



**HAL**  
open science

# Approche expérimentale et numérique de l'usure du carbure de tungstène sous impact-glisement

Marième Fall

► **To cite this version:**

Marième Fall. Approche expérimentale et numérique de l'usure du carbure de tungstène sous impact-glisement. Autre. Université de Lyon, 2018. Français. NNT : 2018LYSEC009 . tel-02537342

**HAL Id: tel-02537342**

**<https://theses.hal.science/tel-02537342>**

Submitted on 8 Apr 2020

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

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



N°d'ordre NNT : 2018LYSEC009

**THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON  
opérée au sein de l'Ecole centrale de Lyon**

**Ecole Doctorale N° 34  
Ecole Doctorale des Matériaux de Lyon**

**Spécialité de doctorat :  
Génie des Matériaux**

**Soutenue le 04/04/2018, par :  
Marième Fall**

---

**APPROCHE EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE DE L'USURE  
DU CARBURE DE TUNGSTENE SOUS IMPACT-GLISSEMENT**

---

Devant le jury composé de :

Langlade, Cécile	Professeur, UTBM	Rapporteure
Boher, Christine	Maître assistant (HDR), ENS des Mines d'Albi	Rapporteure
Desplanques, Yannick	Professeur, Ecole Centrale de Lille	Président du jury
Ramalho, Amilcar	Professeur, University of Coimbra	Examineur
Kapsa, Philippe	Directeur de recherche émérite au CNRS, ECL	Directeur de thèse
Fridrici, Vincent	Maître de conférences, Ecole Centrale de Lyon	Co-directeur de thèse
Guillonneau, Gaylord	Maître de conférences, Ecole Centrale de Lyon	Co-encadrant



# Remerciements

Cette thèse prend fin avec un manuscrit qui met en exergue l'aspect scientifique de cette thèse, mais pas uniquement. Il reflète aussi l'investissement et l'engouement de la part de mes encadrants et de toutes les personnes qui ont apporté une touche à ce projet de thèse. Je remercie grandement mon tuteur de thèse Prof. Philippe KAPSA et mes co-encadrants Mr. Vincent FRIDRICI et Mr. Gaylord GUILLONNEAU, pour leur dévouement et pour leur conseils bénéfiques. Mes remerciements sincères vont aussi à l'endroit de Mr. Gaëtan BOUVARD pour tous les moments passés autour du banc d'essai d'impact-glissement et pour toutes les discussions et échanges géopolitiques et socio-économiques. Merci pour votre disponibilité à tous et pour avoir été à l'écoute. Je tiens à remercier Prof. Cécile LANGLADE (de l'UTBM) et Mme. Christine BOHER (de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines d'Albi) ainsi que Prof. Yannick DESPLANQUES (Ecole Centrale de Lille), et Prof. Amilcar RAMALHO (de l'University of Coimbra) pour avoir pris le temps de lire mon manuscrit et pour leurs précieuses remarques. Leur avis ont permis d'apporter un regard neuf au projet de thèse et de prendre du recul sur les interprétations des traces d'usure et sur la dynamique d'impact glissement.

Mes sincères remerciements vont aussi à toutes celles et ceux qui ont participé scientifiquement ou humainement à ce projet de thèse sans oublier Thomas, Jean-Christophe, Hélène et Sylvie. Je remercie également Prof. Fabrice DASSENOY pour les TP que j'ai eu à donner. J'en profite pour faire un petit clin d'œil à mes collègues super sympas de notre bureau « international », Hao Hao, Toni, Raphael, Yuta, Gilles, Ousseini, Joana, Ana, Vilayvonne pour toutes les discussions et les débats engoués, même en Chine; merci pour ces souvenirs les copains! J'adresse chaleureusement mes remerciements à tous les « voisins » de notre bureau, sans oublier notre clique avec qui nous avons vécu des moments délirants et épanouissants! Nul besoin de les citer, ils se reconnaîtront très bien, nous avons eu des délires inoubliables les amis.

Cette page de remerciements ne peut se terminer sans évoquer les personnes qui me sont chères et qui ont toujours été là malgré l'éloignement, ma famille, Nouna, Popo et mes proches: merci pour tout.

Je n'imaginai pas à tel point cette expérience pourrait avoir un impact sur ma personnalité et sur ma vision des choses. C'est avec enthousiasme que je me suis engagée dans cette aventure scientifique qui m'a permis de rencontrer des personnes riches en expérience et de diverses cultures. Cette aventure se termine avec des souvenirs et des fous rires inoubliables...merci encore.

A ma famille et à mes proches...

*Lo doonul talibeem, mënulo doone serignam*

C'est l'étude qui nous mène au savoir  
(proverbe sénégalais)

# Résumé

Le sujet de ce mémoire de thèse concerne l'usure des inserts en carbure de tungstène soumis à des sollicitations d'impact-glissement. Ces inserts situés sur la tête de coupe de tunneliers permettent d'excaver le sol. Ces carbures sont caractérisés par une dureté élevée et une résistance à l'usure importante ; néanmoins, ils sont soumis à des conditions d'excavation sévères qui finissent par les endommager. Il est donc primordial d'augmenter leur résistance à l'usure afin d'augmenter leur durée de vie dans le but de réduire les opérations de remplacement et les coûts. Une étude expérimentale avec un banc d'impact-glissement permet de solliciter les carbures de tungstène dans des conditions proches de celles rencontrées lors de l'excavation. Nous analysons trois carbures de tungstène avec des propriétés et des compositions différentes. Un des trois carbures sert de référence et est utilisé industriellement. Les deux autres carbures ont été développés récemment. Une bille, en acier 100Cr6 ou en carbure de silicium, est soumise à un déplacement vertical, et vient impacter l'échantillon en carbure de tungstène. Le déplacement de deux lames flexibles, situées sous l'échantillon impacté, permet de générer le glissement au moment de l'impact. L'abrasion et l'adhésion sont les principaux mécanismes d'usure, accompagnés de la formation de fissures dans le cas du carbure le plus fragile. Le volume d'usure dépend fortement de l'énergie d'impact, du nombre d'impacts, de l'angle d'impact, de la nature des matériaux au contact et de l'environnement de contact. Le carbure de référence s'use le plus parmi les trois carbures. De plus, le glissement contribue à augmenter l'usure et la bille en SiC forme une couche sacrificielle avec l'un des carbures développé récemment. La présence d'argon au contact tend à réduire l'adhésion et, par conséquent, l'usure est moins sévère. Parallèlement aux tests expérimentaux, une analyse numérique par éléments finis sous Abaqus/Explicit est réalisée. Un modèle 3D représentant le contact entre la bille et le plan incliné a été développé en mettant en avant la dynamique du contact. Cela nous donne accès à des grandeurs non déterminées expérimentalement (distance glissée, énergie dissipée par frottement, énergie de déformation plastique, contraintes au contact) et permet ainsi de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu lors du contact. Les coefficients énergétiques d'usure obtenus expérimentalement sont mis en corrélation avec les énergies dissipées par frottement et les énergies de déformation plastique. La distribution des contraintes de traction et de compression permet d'établir un lien avec la formation des fissures pour le carbure le plus fragile. Cette approche expérimentale combinée à la simulation numérique nous permet de mieux comprendre les phénomènes d'endommagement qui se déroulent au contact de l'insert.

**Mots-clés** : usure, endommagement, impact, glissement, céramique, simulation numérique

# Abstract

Tungsten carbide cutting tools are very frequently used for tunnel boring machines, as inserts on the drag bits at the front face. With their high toughness, hardness and their wear resistance, they are highly suitable for this kind of application. During excavation, those tools are subjected to important mechanical stresses mostly represented as repetitive impacts combined with the sliding motion induced by the rotation of the cutting wheel. In this regard, their lifetime should be optimized in order to reduce the maintenance operations cost. This thesis highlights the wear mechanisms associated to the impact-sliding motion of tungsten carbide cutting tools. An experimental approach is presented with an impact-sliding test rig allowing to represent the contact dynamics closed to the one observed during the excavation. The test rig is developed with a ball/flat configuration. The ball undergoes a vertical sinusoidal motion derived by an electromagnetic shaker and impacts the inclined tungsten carbide sample. There are two vertical foils underneath the tungsten carbide, which slide backward during the impact: this induces the sliding motion. Three types of tungsten carbides with different chemical compositions, production processes and mechanical properties have been tested. AISI 52100 and SiC balls are considered in this study. Abrasion and adhesion are mainly observed on wear scars, with cracks initiation for the more brittle tungsten carbide. Wear volume depends on many factors : the impact energy, the number of impacts, the impact angle, the ball material, the hardness of materials and the environment under which they are tested. The reference material wears out the most with larger wear scars. The sliding motion contributes greatly on the wear and SiC ball tends to create a sacrificial layer in some conditions. Tests run under argon showed that adhesion is less likely to occur at the contact. Besides, a 3D finite element dynamic model has been developed with the use of ABAQUS/Explicit. Experimental data are taken into account in order to obtain simulation conditions analogous to those in the experimental study. This numerical approach gives an insight on wear phenomena involved in this impact-sliding contact. In addition to this, parameters that were unreachable experimentally could be calculated (sliding distance, friction dissipated energy, plastic deformation energy). Energetic wear coefficient, calculated experimentally, can be correlated with the dissipated energy and the plastic deformation energy. Cracking features are linked to the contact stress distribution. Numerical results provide an input on experimental data and help in understanding complex wear processes entailed in this impact-sliding conditions.

**Keywords:** wear, damage, impact-sliding, ceramics, numerical simulation.

# Table des matières

Remerciements.....	i
Résumé .....	iii
Abstract.....	iv
Table des matières.....	v
Introduction générale .....	1
<b>Chapitre 1 : Etude bibliographique et usure des dents de tunneliers.....</b>	<b>5</b>
<b>I. Introduction .....</b>	<b>7</b>
<b>II. Le carbure de tungstène comme matériau pour outil de coupe de tunneliers .....</b>	<b>7</b>
II.1. Les différentes parties d'un tunnelier.....	8
II.2. Les différents outils de coupe .....	13
<b>III. Généralités sur l'usure .....</b>	<b>17</b>
III.1. Usure par abrasion.....	17
III.2. Usure adhésive.....	22
<b>IV. Généralités sur l'impact-glissement .....</b>	<b>23</b>
IV.1. Sollicitation d'impact-glissement .....	23
IV.2. Endommagement en impact-glissement.....	24
<b>V. Caractéristiques et endommagements des dents de tunneliers .....</b>	<b>28</b>
V.1. Caractéristiques des carbures de tungstène .....	28
V.2. Modes d'usure des carbures de tungstène .....	31
V.3. Influence du milieu d'excavation et du matériau sur l'usure.....	36
<b>VI. Conclusions .....</b>	<b>39</b>
<b>VII. Références .....</b>	<b>40</b>
<b>Chapitre 2 : Présentation du dispositif expérimental et des matériaux utilisés .....</b>	<b>47</b>
<b>I. Introduction .....</b>	<b>49</b>
<b>II. Le banc d'essai d'impact-glissement .....</b>	<b>49</b>
II.1. Description du dispositif expérimental.....	49
II.2. Pilotage, acquisition et traitement des données.....	51
II.3 Essais sous air et sous argon .....	53
<b>III. Les matériaux étudiés.....</b>	<b>53</b>
III.1. Les carbures de tungstène .....	53
III.2. Billes impactant les carbures de tungstène .....	57
<b>IV. Les outils pour l'analyse et l'observation des traces d'usure.....</b>	<b>57</b>
<b>V. Conclusions .....</b>	<b>58</b>
<b>VI. Références .....</b>	<b>60</b>
<b>Chapitre 3 : Résultats expérimentaux et analyse des traces d'usure.....</b>	<b>61</b>
<b>I. Introduction .....</b>	<b>63</b>
<b>II. Effet de l'énergie d'impact totale sur l'usure .....</b>	<b>63</b>
II.1. Conditions expérimentales .....	63
II.3. Analyse quantitative de l'usure .....	90
II.4. Conclusions .....	92
<b>III. Effet de la nature de la bille sur l'usure .....</b>	<b>93</b>
III.1. Conditions expérimentales .....	93
III.2. Observations des traces et identification des mécanismes d'usure .....	93
III.3. Analyse quantitative de l'usure .....	102

III.4. Conclusions .....	105
<b>IV. Effet de l'angle d'impact sur l'usure .....</b>	<b>106</b>
IV.1. Conditions expérimentales .....	106
IV.2. Analyse qualitative des traces d'usure .....	106
IV.3. Analyse quantitative de l'usure .....	110
IV.4. Conclusions .....	111
<b>V. Effet de l'environnement .....</b>	<b>111</b>
V.1. Conditions expérimentales .....	111
V.2. Analyse des traces d'usure .....	111
V.3. Analyse quantitative de l'usure .....	120
V.4. Conclusions .....	122
<b>VI. Discussion et synthèse des résultats .....</b>	<b>123</b>
<b>VII. Conclusions .....</b>	<b>128</b>
<b>VIII. Références .....</b>	<b>130</b>
<b>Chapitre 4 : Simulation numérique du contact bille / plan sous impact-glissement .....</b>	<b>131</b>
<b>I. Introduction .....</b>	<b>133</b>
<b>II. Présentation du modèle numérique .....</b>	<b>133</b>
II.1. Géométrie du modèle et maillage .....	133
II.2. Loi de comportement .....	134
II.3. Définition du contact .....	135
II.4. Conditions limites .....	135
<b>III. Analyse et interprétation des résultats .....</b>	<b>137</b>
III.1. Validation du modèle numérique .....	137
III.2. Aire de contact .....	138
III.3. Distance glissée .....	143
III.4. Energie dissipée par frottement .....	146
III.5. Distribution des contraintes et fissuration .....	149
III.6. Contraintes de cisaillement .....	150
III.7. Déformation plastique .....	151
<b>IV. Conclusions .....</b>	<b>154</b>
<b>V. Références .....</b>	<b>155</b>
<b>Conclusion et perspectives .....</b>	<b>157</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>161</b>
<b>Annexe 1 : Détermination des coefficients de frottement pour la simulation numérique .....</b>	<b>162</b>
<b>Annexe 2 : Détermination de la raideur et de l'amortissement des ressorts .....</b>	<b>166</b>
<b>Annexe 3 : Détermination du coefficient de frottement (méthode alternative) .....</b>	<b>170</b>
<b>Liste des figures et des tableaux .....</b>	<b>174</b>

# Introduction générale

Les inserts en carbure de tungstène des dents situées sur la roue de coupe des tunneliers sont susceptibles de s'endommager sous l'effet des sollicitations (choc, glissement, ...) induites par le contact avec le sol, lors du percement d'un tunnel. Ces matériaux sont connus pour leurs propriétés de dureté, de ténacité et de résistance à l'usure, et ont longtemps été utilisés comme outils de coupe dans l'excavation des sols. La microstructure de ces matériaux frittés, constitués de grains en carbure de tungstène et d'une matrice liante métallique, est un atout majeur dans la résistance à l'usure. Néanmoins, sous des conditions extrêmes telles que celles dans lesquelles les tunneliers excavent les sols, ces matériaux finissent par s'user. Les conditions d'excavation font que ces matériaux subissent constamment des chocs brutaux puisqu'ils sont en contact direct avec le sol à excaver. Ces chocs favorisent la fissuration et les frottements répétés entraînent une abrasion sévère. La simultanéité de ces mécanismes qui interagissent entre eux fait que les mécanismes d'endommagement sont d'autant plus importants. Ces outils arrivent alors à leur fin de vie et leur remplacement est inévitable. Les opérations de remplacement étant coûteuses et dangereuses pour les opérateurs, l'optimisation de ces outils de coupe devient primordiale.

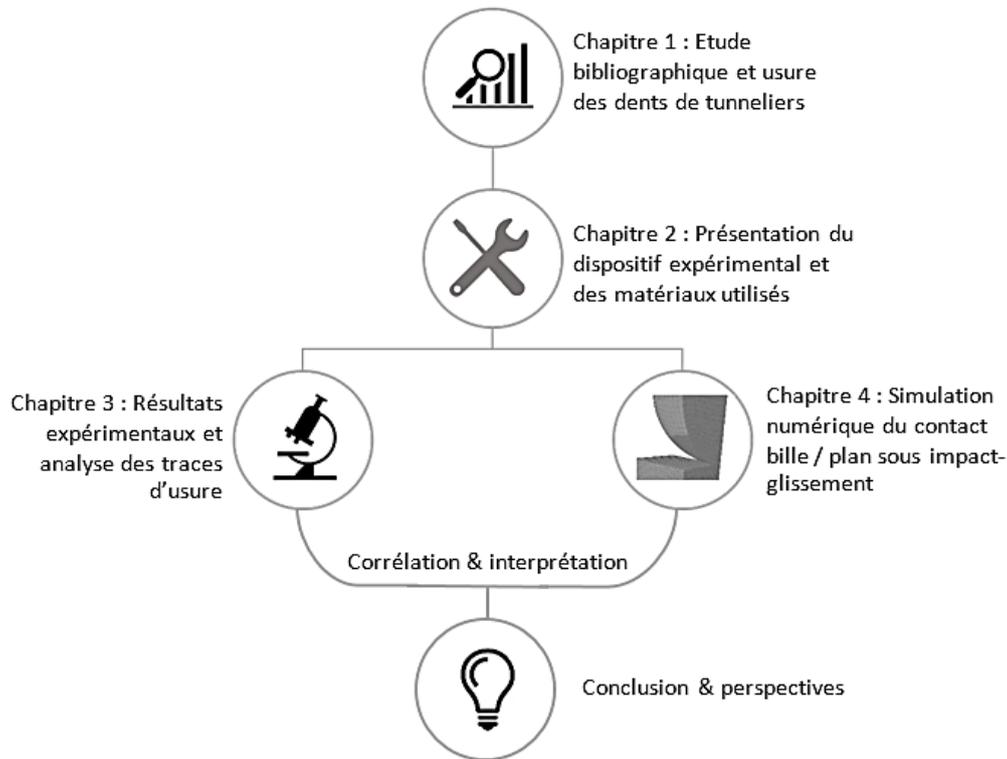
La rotation du tunnelier combinée à la force de poussée des vérins sur la roue de coupe fait que le contact à l'interface est une succession d'impacts suivis par des glissements entre le sol et la dent en carbure de tungstène.

Nous nous sommes donc focalisés sur l'étude des mécanismes d'usure sous sollicitations d'impact-glissement, avec trois carbures de tungstène ayant des propriétés mécaniques différentes. Le carbure E6, qui sert de référence, est utilisé industriellement, tandis que les carbures WCR1 et WNZVC sont des carbures qui ont été développés récemment. Les résultats d'essais réalisés dans différentes conditions expérimentales (énergie d'impact, nombre d'impacts, angle d'impact, nature de l'impacteur, environnement) sont analysés. Afin de mieux comprendre ce qui se passe lorsque les deux matériaux antagonistes sont en contact, une simulation numérique sous Abaqus/Explicit permet d'obtenir des informations auxquelles nous ne pouvons pas accéder expérimentalement, telles que les distributions des contraintes au contact, les distances glissées, les densités d'énergie dissipée.

L'objectif général de cette thèse est donc, à partir des résultats expérimentaux et de la simulation numérique, de comprendre comment et pourquoi les carbures de tungstène s'endommagent sous sollicitation d'impact-glissement, afin de déterminer les caractéristiques et propriétés importantes pour résister à ces endommagements.

Cette étude s'articule en quatre chapitres. Le diagramme suivant (fig. IG.1) présente l'organisation du manuscrit.

## Introduction générale



*Fig.IG.1. Diagramme de l'organisation des quatre chapitres.*

Dans un premier temps, nous parlons des différentes parties qui constituent le tunnelier avec les différents outils de coupe de la roue de coupe. Les mécanismes d'usure généraux sont également décrits dans cette partie. Puis, une section est consacrée aux sollicitations d'impact-glisserment avec la dynamique d'impact combinée au glissement. Ensuite, une troisième section présente les mécanismes d'usure observés sur les outils de coupe et les dents en carbure de tungstène. L'influence des paramètres comme la microstructure, le taux de liant et la taille des grains sur l'usure, est mise en relief dans la troisième partie de ce chapitre.

Le deuxième chapitre présente l'approche expérimentale de l'étude. Le banc d'essai d'impact-glisserment est présenté avec les capteurs utilisés et les différentes conditions d'essai. Les matériaux utilisés y sont également décrits.

Dans le troisième chapitre, sont présentés les résultats expérimentaux de cette étude sous différentes sections. L'influence de l'énergie d'impact sur les mécanismes d'usure avec une comparaison des trois carbures étudiés est d'abord présentée. En variant les énergies d'impact par cycle et les nombres de cycles d'impact-glisserment, nous pouvons suivre l'évolution de l'usure (de la bille et du plan) en fonction de l'énergie d'impact totale. Des coefficients énergétiques d'usure sont alors déterminés et les traces d'usure sont analysées. Puis, l'influence de l'angle d'impact est étudiée pour déterminer les effets relatifs du glissement et de l'impact sur les mécanismes d'usure. Pour ce faire, des essais avec un angle d'impact de  $90^\circ$  (impact pur) sont réalisés. L'influence de la nature de la bille (avec des billes en SiC et en acier) est également analysée. Enfin, l'effet de la tribochimie au contact est

## Introduction générale

analysé en réalisant des essais sous argon avec un flux d'argon qui vient alimenter le contact bille / plan.

Le quatrième et dernier chapitre aborde l'analyse numérique sous Abaqus/Explicit. Un modèle représentant les conditions d'essai du banc d'impact-glissement a été mis au point avec une configuration bille/plan. Des paramètres expérimentaux comme le déplacement de la bille sont utilisés pour simuler l'impact entre les deux matériaux. Cette approche numérique permet de corréler les phénomènes d'usure observés expérimentalement avec les résultats numériques. Ces simulations nous permettent également de calculer des grandeurs non accessibles expérimentalement, telles que les distances glissées et les énergies dissipées lors d'un cycle d'impact/glissement.

Pour clore ce mémoire, une conclusion générale dresse le bilan de toute cette étude et des perspectives sont présentées.



# Chapitre 1 : Etude bibliographique et usure des dents de tunneliers

---

Ce chapitre présente les tunneliers, les outils de coupe comprenant des inserts de carbure de tungstène et leurs modes d'usure sous impact-glissement.

## Table des matières

<b>I. Introduction.....</b>	<b>7</b>
<b>II. Le carbure de tungstène comme matériau pour outils de coupe de tunneliers .....</b>	<b>7</b>
II.1. Les différentes parties d'un tunnelier .....	8
II.1.1. La roue de coupe.....	9
II.1.2. La chambre de forage .....	11
II.1.3. Le bouclier.....	12
II.1.4. Le train suiveur.....	12
II.2. Les différents outils de coupe .....	13
II.2.1. Les disques à molette .....	15
II.2.2. Les dents de tunneliers .....	16
II.2.3. Les racleurs .....	17
<b>III. Généralités sur l'usure .....</b>	<b>17</b>
III.1. Usure par abrasion .....	17
III.1.1. Usure abrasive à deux corps .....	19
III.1.2. Usure abrasive à trois corps.....	20
III.2. Usure adhésive .....	22
<b>IV. Généralités sur l'impact-glisement .....</b>	<b>23</b>
IV.1. Sollicitation d'impact-glisement .....	23
IV.2. Endommagement en impact-glisement .....	24
<b>V. Caractéristiques et endommagements des dents de tunneliers .....</b>	<b>28</b>
V.1. Caractéristique des carbures de tungstène .....	28
V.1.1. Les propriétés mécaniques.....	29
V.1.2. La microstructure.....	30
V.2. Modes d'usure des carbures de tungstène.....	31
V.2.1. Mécanismes d'abrasion .....	31
V.2.2. Phénomènes de transfert .....	35
V.2.3. Mécanismes de fatigue.....	35
V.3. Influence du milieu d'excavation et du matériau sur l'usure .....	36
V.3.1. Influence de la taille des grains .....	36
V.3.2. Influence du taux de liant métallique.....	36
V.3.3. Influence du milieu d'excavation.....	37
V.3.4. Influence de la température .....	38
<b>VI. Conclusions .....</b>	<b>39</b>
<b>VII. Références.....</b>	<b>40</b>

## I. Introduction

Ce chapitre décrit les carbures de tungstène utilisés comme renforts pour les dents de tunneliers. Les carbures de tungstènes ont des propriétés remarquables et sont utilisés dans de nombreux domaines. Dans le secteur des tunneliers, qui est l'objet de cette étude, ils sont utilisés au niveau de la tête de coupe. Il s'agit de la face qui va entrer en contact avec le sol à excaver. Pour cela, ces outils ont une géométrie et une disposition précise pour permettre un forage optimal. Dans un premier temps, les différentes parties qui composent un tunnelier sont brièvement présentées puis les outils de la tête de coupe sont décrits. Et enfin les modes d'endommagement observés au niveau des outils de carbure de tungstène sont abordés.

## II. Le carbure de tungstène comme matériau pour outil de coupe de tunneliers

On appelle généralement « carbure de tungstène », un matériau fritté composé de grains de carbure de tungstène avec un liant plus ductile comme le fer, le nickel ou le cobalt. Les carbures de tungstène sont des matériaux aux propriétés spectaculaires. Ils sont caractérisés par une résistance à l'abrasion et à l'usure élevée associée à une dureté et une ténacité élevées. Ces matériaux sont pour les raisons citées précédemment, utilisés dans l'industrie minière, le secteur pétrolier ou encore dans le forage de tunnels<sup>1</sup>. Les carbures de tungstène avec des alliages de titane et de tallium vont présenter une meilleure tenue à la température, ceux contenant du cuivre ou de l'argent seront dédiés aux applications électriques. La Fig.1.1 illustre les différents domaines d'application des carbures de tungstène.

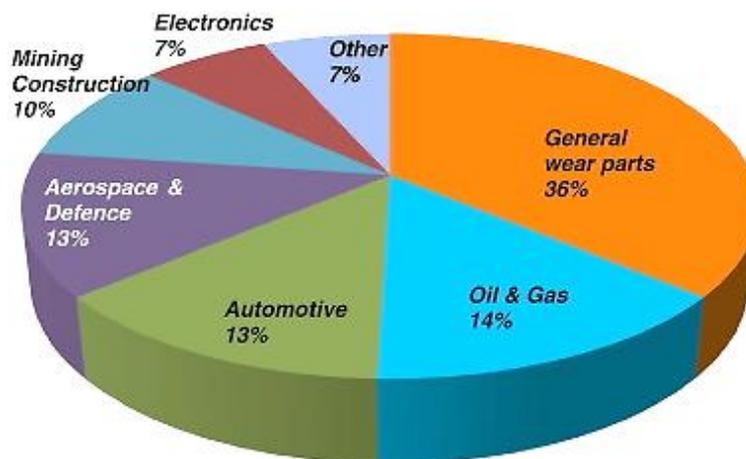


Fig. 1.1. Domaines d'application des carbures de tungstène (Roskill 2011)<sup>2</sup>.

Nous allons nous focaliser sur la partie forage qui correspond à 36% des applications (Fig.1.2). Notre étude porte sur les outils de coupe utilisés au niveau de la tête des tunneliers. La Fig.1.2 montre un tunnelier excavant le sol sans altérer les infrastructures souterraines comme les canalisations.



*Fig. 1.2. Image présentant un tunnelier créant un tunnel.*

Les logements et les espaces naturels aménagés comme les parcs peuvent être aussi préservés. Cette technique permet donc d'éviter tout dysfonctionnement et perturbation du réseau routier et atténue les embouteillages. Le tunnelier est en général à 45 mètres en profondeur. Il est sujet à traverser des sols qui peuvent être de natures différentes. Les tunneliers, appelés aussi TBM (Tunnel Boring Machines), sont de dimensions très importantes. Ces vraies usines souterraines sont capables de creuser des kilomètres, en entraînant la tête rotative, le moteur et toute la structure qui le compose. Le diamètre varie entre 10-15 mètres et peut peser jusqu'à 3000 tonnes, soit un peu plus de 5 Airbus A380. La longueur totale d'un TBM, quant à elle peut atteindre plus de 88 mètres.

## **II.1. Les différentes parties d'un tunnelier**

Les TBM sont amenés à réaliser une succession d'opérations lors du forage. Parmi ces opérations on distingue :

- l'abattage du sol,
- l'acheminement des débris en dehors de la zone de travail,
- la mise en place de matériaux de soutènement, les voussoirs.

Le tunnelier va être composé des 4 parties suivantes : la roue de coupe (A), la chambre de forage (B), le bouclier (C) et le train suiveur (D) (Fig.1.3).

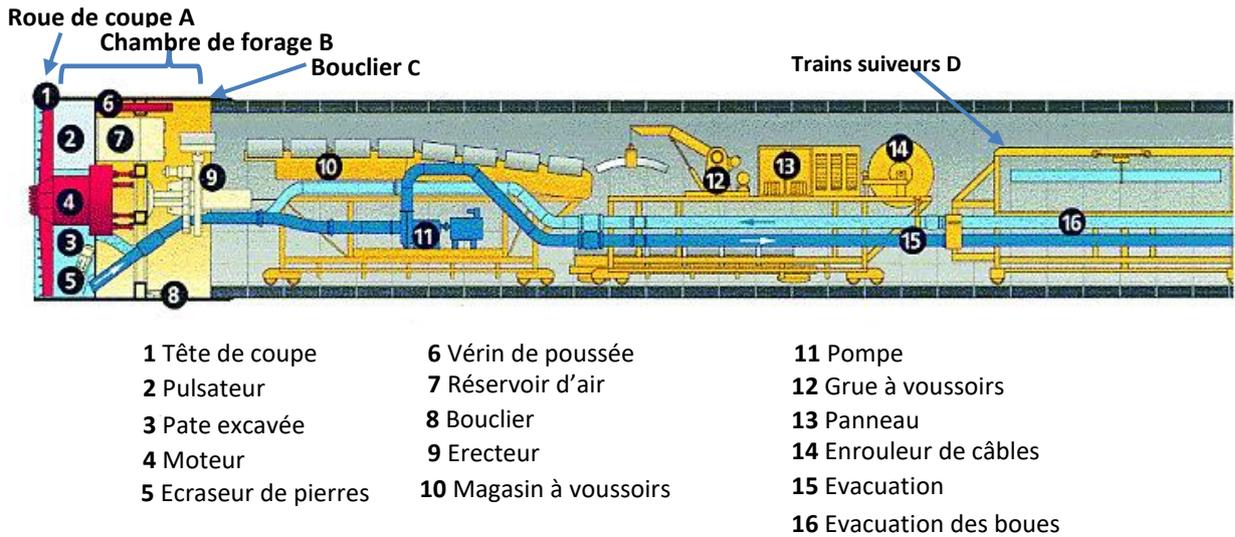


Fig. 1.3. Vue en coupe d'un tunnelier <sup>3,4</sup>.

### II.1.1. La roue de coupe

La roue de coupe constitue la partie qui va être en contact avec le sol et qui va excaver tout type de sol et roche. Son diamètre peut atteindre 20 mètres et elle est fixée à l'avant du TBM. Cette tête de coupe dotée d'outils performants, effectue une rotation à 1,5 t/min [5].

Les outils de coupe présents sur la tête de coupe sont constitués de métaux durs ayant des propriétés mécaniques particulières qui leur confèrent une résistance à l'usure élevée <sup>5-7</sup>. La fig.1.4 présente une tête de tunnelier.

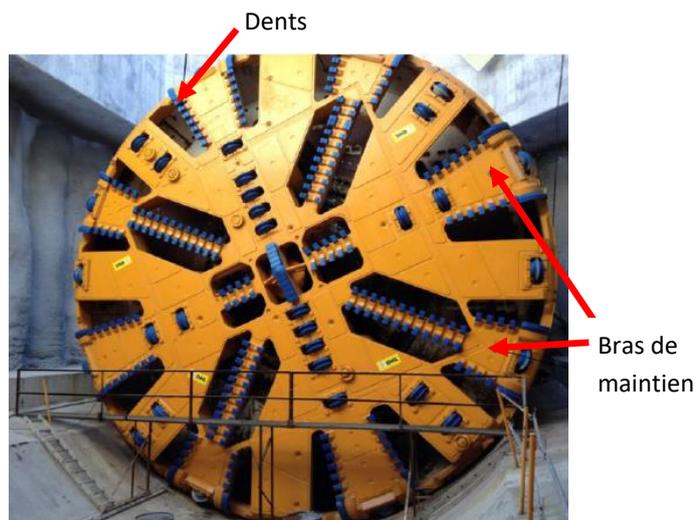
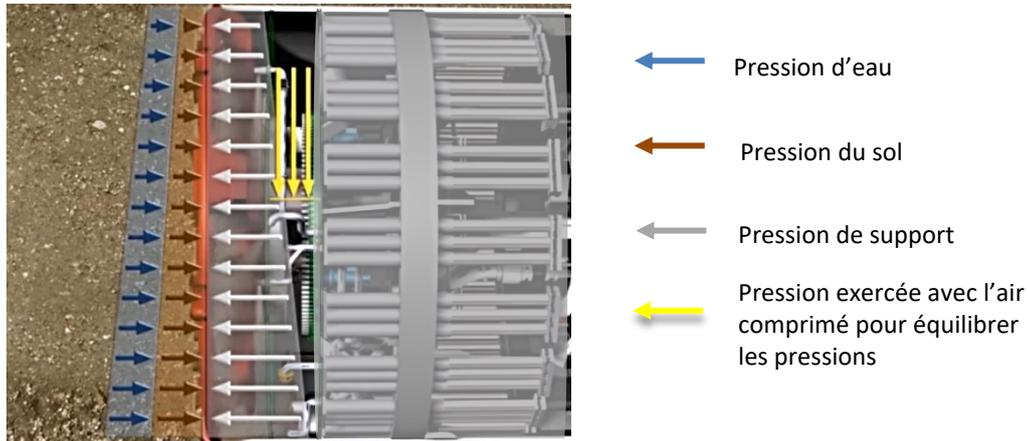


Fig. 1.4. Tête de coupe d'un tunnelier pour des sols tendres <sup>8</sup>.

Les pressions d'eau souterraine et du sol lors de l'excavation peuvent atteindre 6,5 bars. Un équilibre des forces doit être atteint pour permettre l'avancée du tunnelier dans le sol. Les réservoirs d'air comprimé situés dans la chambre d'excavation permettent de réguler

la pression de la chambre d'excavation (Fig.1.5). Les forces exercées au niveau de la tête de coupe peuvent être classées en deux catégories : les forces actives et les forces passives. Les forces actives se définissent comme l'ensemble des forces pouvant être contrôlées par l'opérateur du tunnelier. Elles englobent la pression de support exercée, la force d'avancement et de poussée.



*Fig. 1.5. Schéma des forces exercées sur la roue de coupe.*

A contrario, les forces passives s'identifient comme les forces qui sont les conséquences des mécanismes qui se déroulent lors des opérations d'excavation et de forage et qui interviennent dans ces mécanismes. La fig.1.6 illustre les forces qui interviennent au niveau de la tête de coupe et la coupe transversale du tunnelier.

Ces forces et la rotation exercées par la tête rotative entraînent des chocs entre les outils de la tête de coupe et les composés durs du sol ce qui conduit à les casser. Les débris du sol sont acheminés hors de l'interface tête de coupe-sol à l'aide d'ouvertures. Puis une vis d'extraction des déblais présente dans la chambre d'excavation les achemine vers l'arrière à l'intérieur du tunnelier. Les déblais sont ainsi évacués au cours de l'excavation.

Les efforts interviennent sur les mécanismes d'usure des outils de coupe et participent à leur usure. Les différents outils de coupe et leurs modes d'endommagement des outils de coupe seront discutés dans le chapitre suivant.

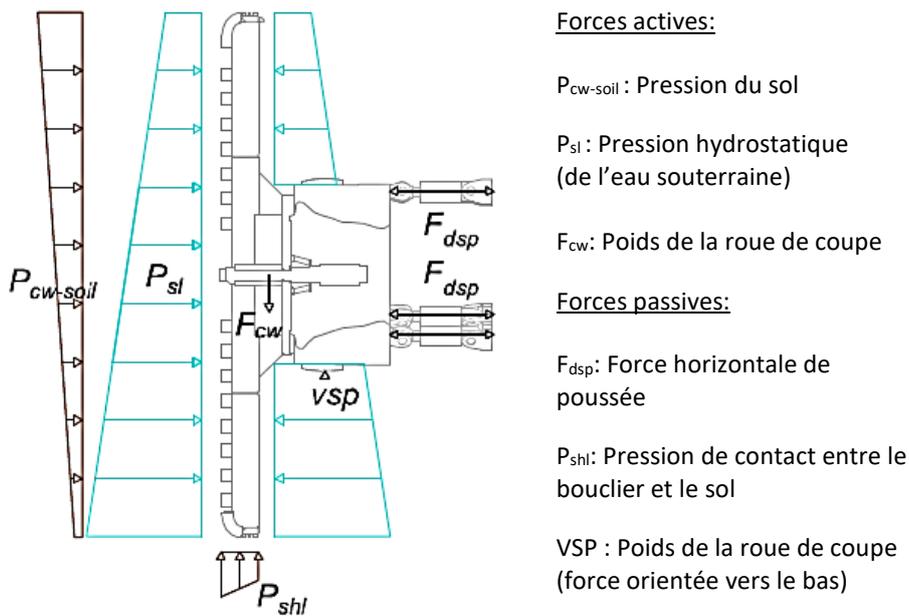


Fig. 1.6. Schéma des forces intervenant sur la tête de coupe (a) et coupe transversale du tunnelier (b) <sup>9</sup>.

### II.1.2. La chambre de forage

Cette chambre d'excavation se situe derrière la roue de coupe. Elle a la particularité de s'adapter à la diversité des terrains en exerçant une pression avec les moteurs hydrauliques. Avec ou sans pression d'eau et en tenant compte de la nature du terrain, dur ou meuble, les pressions exercées permettent d'assurer une poussée suffisante. Les vérins de poussée s'appuient sur la paroi externe du tunnelier pour avancer (Fig.1.7).

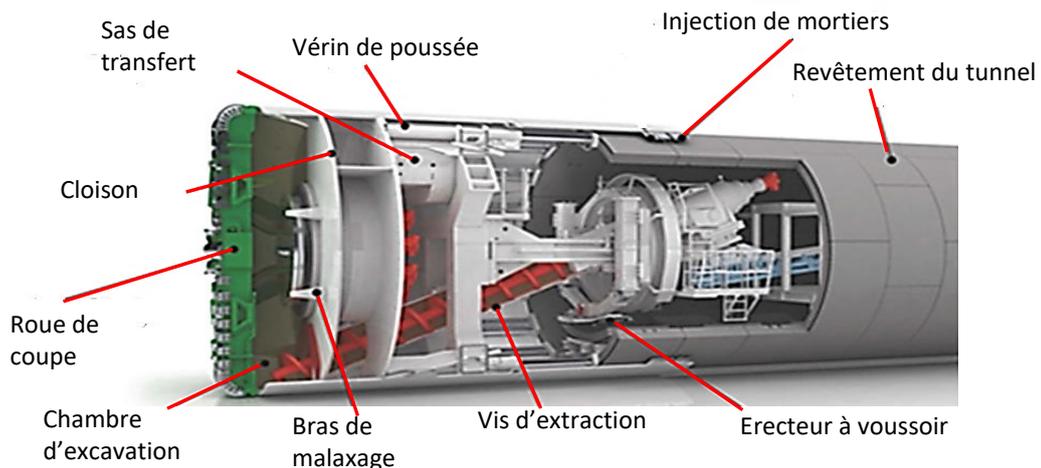


Fig. 1.7. Schéma des différents éléments d'un tunnelier.

Dans les situations nécessitant le changement des outils de coupe ou pour nettoyer ces-derniers, cette cellule d'excavation est une entité cruciale pour les ouvriers car elle leur permet d'accéder directement à la tête de coupe. Cependant, avec les arrivées d'eau et les risques d'écroulement, ainsi que les conditions thermiques extrêmes, ce type d'opération est limité et effectué sous de stricts protocoles afin de garantir leur sécurité.

La vis d'extraction constitue un moyen d'évacuation des déblais au niveau de la chambre d'excavation. Les déblais sont remontés jusqu'au convoyeur à bandes qui les entraînent à l'arrière du tunnelier.

### II.1.3. Le bouclier

Afin de maintenir la roche lors de l'excavation et éviter l'écroulement du sol, un bouclier qui est un cylindre métallique est situé entre la roue de coupe et l'érecteur de voussoirs. Il assure l'étanchéité du tunnelier. Des voussoirs sont ensuite installés et forment une paroi interne au tunnel en dessous de la jupe. Ce bouclier a une importance capitale lors du forage car il permet de garantir une protection du front du tunnel, au moment de l'excavation.

### II.1.4. Le train suiveur

Comme son nom l'indique, il s'agit de la partie arrière du tunnelier qui sert à ravitailler le TBM en voussoirs à l'aide du train suiveur (Fig.1.8).

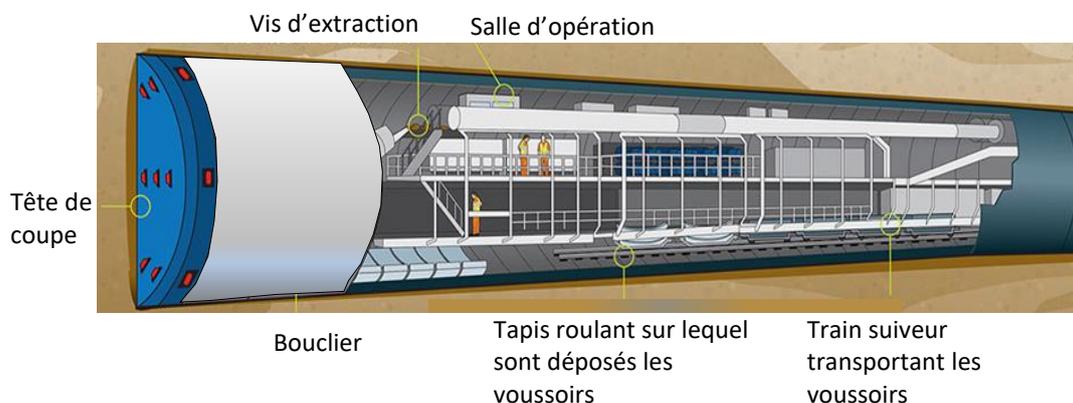


Fig. 1.8. Train suiveur du tunnelier.

Les voussoirs sont des plaques de béton préfabriquées en portions de cylindres (du diamètre du tunnel) de 2 mètres de long et de 0,4 mètre d'épaisseur. Ces voussoirs sont positionnés en même temps que le forage a lieu et forment des anneaux en raison de leur forme en arc de cercle. Le train suiveur permet également de débarrasser la zone d'excavation des sols. Il peut s'étendre sur plusieurs mètres et constitue la plus grande partie du tunnelier.

Le revêtement interne une fois mis en place permet de consolider le tunnel et d'éviter l'éroulement du sol. La fig.1.9 montre des voussoirs et le revêtement d'un tunnel. L'érecteur de voussoirs assure la disposition des voussoirs sous la jupe. Il est situé sous le bouclier. Après la jupe, le vide entre les voussoirs est comblé.



(a) Voussoirs



(b) Revêtement du tunnel

Fig. 1.9. Voussoirs préfabriqués en béton (a) et intérieur du tunnel après revêtement (b).

### II.2. Les différents outils de coupe

Il est important de préciser que les outils de coupe sont confectionnés en fonction du type de roche et de sol à excaver. Ces caractéristiques géotechniques jouent un rôle primordial au niveau de la méthode d'excavation et la forme du tunnel. Par ailleurs, le tunnelier est appelé à creuser au cours de son passage une grande variété de sols. Les Fig.1.10 et Fig.1.11 montrent la carte géologique et une section décrivant la présence de plusieurs sols en Barcelone.

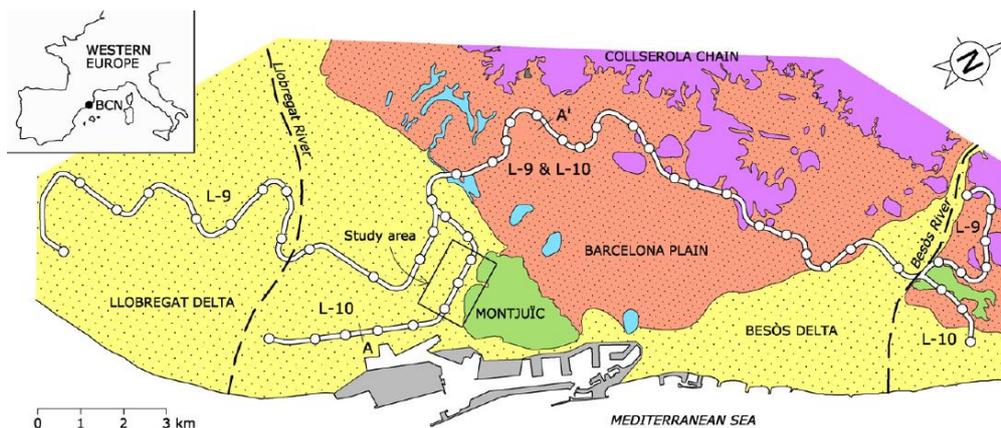


Fig. 1.10. Carte géologique représentant une vue globale de la complexité du terrain <sup>10</sup>.

## Chapitre 1 : Etude bibliographique et usure des dents de tunneliers

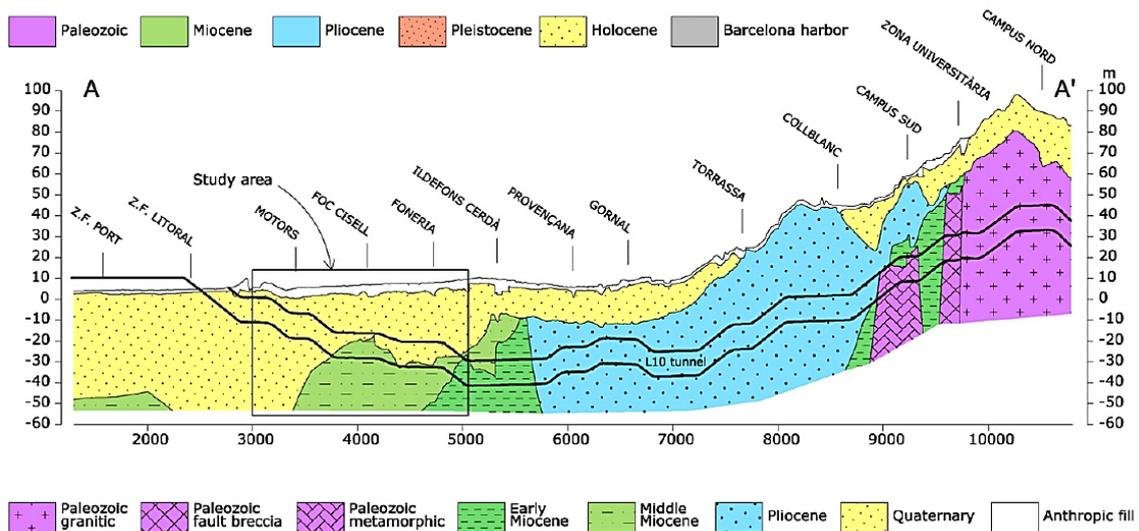


Fig. 1.11. Coupe transversale géologique du sol de la ligne de métro L10<sup>10</sup> en Barcelone.

Ainsi, la tête de coupe comporte des outils de coupe qui sont adaptés au sol et disposés de façon spécifique au niveau de la tête rotative. Parmi les différents outils de coupe, on peut distinguer 3 grandes familles d'outils :

- Les disques à molette
- Les dents
- Les racleurs

La Fig.1.12 présente les 3 types d'outils de la tête de coupe énoncés ci-dessus.

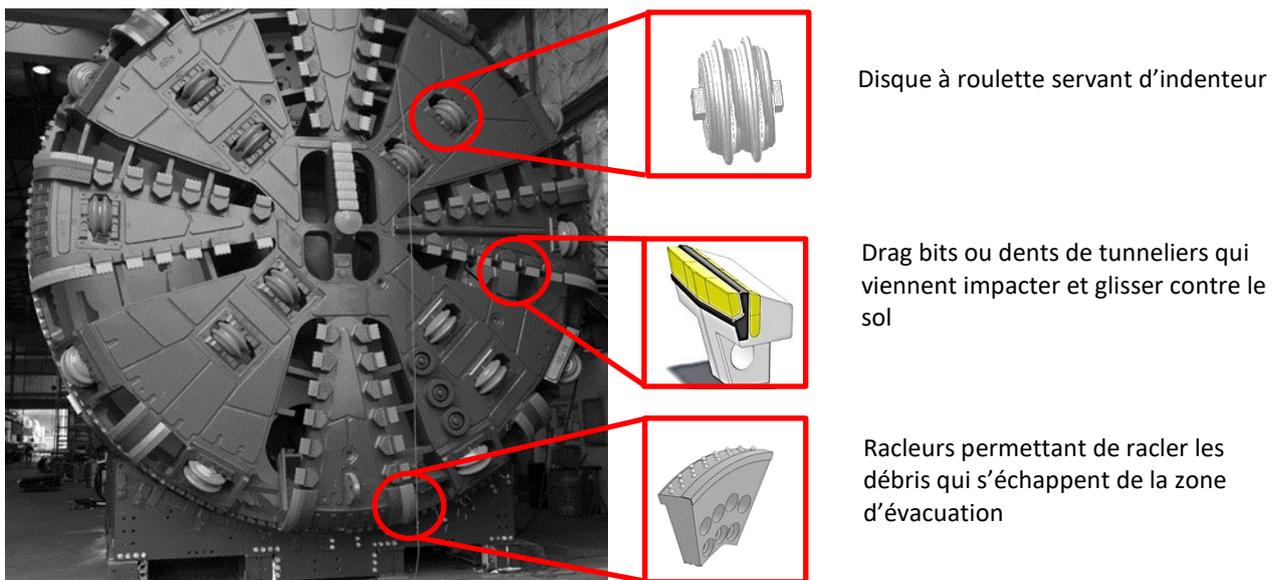


Fig. 1.12. Surface de coupe et différents outils de coupe.

### II.2.1. Les disques à molette

Les disques à molettes sont des disques libres en rotation qui vont venir au contact du sol afin de le fragmenter. Sous l'action de la poussée en prenant appui sur les voussoirs, les disques à molette avancent en creusant le sol avec une force normale perpendiculaire à la force de rotation et de glissement. La Fig.1.13 illustre l'action des disques à molettes.

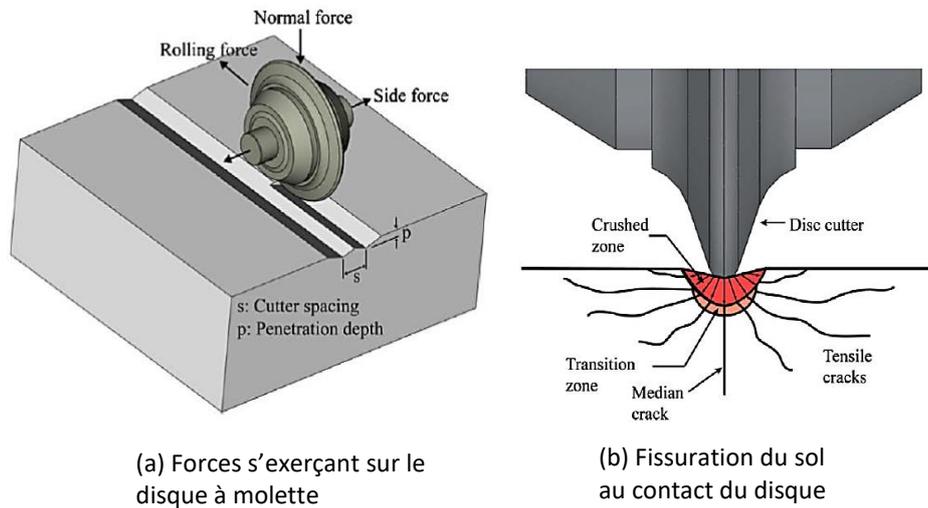


Fig. 1.13. Forces qui entrent en jeu dans la fragmentation du sol (a) et processus de fissuration de le sol sous l'action du disque à molette (b) <sup>11</sup>.

Les disques à molette en rotation pénètrent dans le sol qui est ainsi plus ou moins fissuré. Cela crée des traces concentriques et circulaires sur la roche (Fig.1.14)



Fig. 1.14. Traces concentriques et circulaires du sol après le contact avec les disques à molette.

Sur la roue de coupe, ils sont espacés de 75 à 95 mm en fonction de la dureté de la roche et sont utilisés pour des roches dures. En présence de sol mou, du sable peut empêcher la rotation des disques. La rotation est due au mouvement de la tête de coupe et aux frottements engendrés par la mise en contact outil-sol.

### II.2.2. Les dents de tunneliers

Les dents de tunneliers sont des outils de coupe métalliques équipés d'inserts en carbure de tungstène. Plus communément appelés « dragbits », ils sont capables de fragmenter le sol qui a déjà été dégradé par les disques à roulettes. La propagation des fissures est favorisée par les chocs entre les dents de tunneliers et le sol. La Fig.1.15 montre une illustration schématique de la dent de tunnelier. Ces outils sont spécialement utilisés pour excaver des sols mous comme le sable et l'argile.

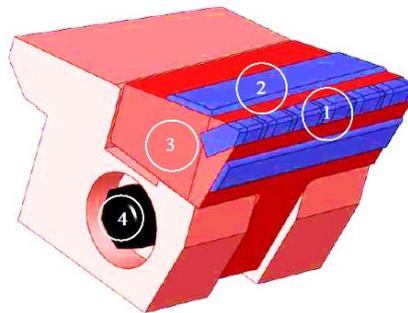


Fig. 1.15. Dent de tunnelier avec les inserts (1), le rechargement de protection métallique (2), le corps en acier (3) et la vis de serrage (4) <sup>8</sup>.

En outre, ils exercent sur le sol des chocs combinés à des glissements, ces raclages successifs en cisaillement permettent de fragmenter le sol et d'évacuer les débris générés hors de la zone d'excavation à l'aide de la rotation de la roue de coupe. La fig.1.16 présente un schéma de l'action de la dent sur le sol. Nous nous consacrerons à l'usure de ce type d'inserts dans ce manuscrit.

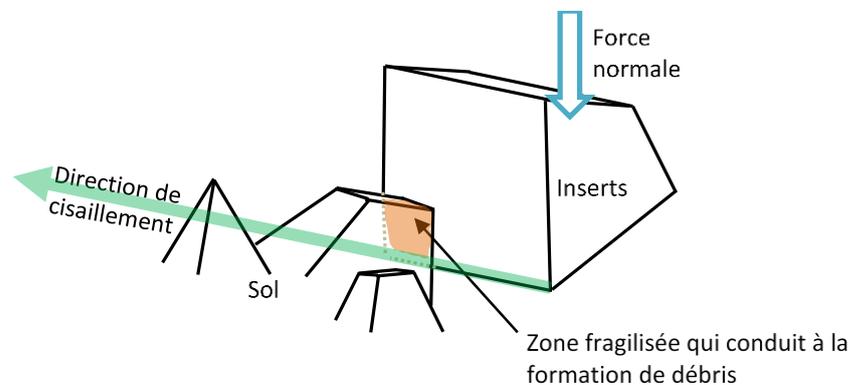


Fig. 1.16. Schéma de la dent de tunnelier en contact avec le sol provoquant des débris.

### II.2.3. Les racleurs

Les racleurs sont des outils similaires aux dragbits. Leur rôle est de rassembler les débris qui sont en mouvement au niveau de la tête de coupe. Cela permet de protéger les outils d'éventuelles percussions ou chocs avec ces débris et les outils. Ils assurent également la protection des parois du tunnel en évitant l'effondrement du sol fragilisé, au niveau de la zone d'excavation. Ils peuvent être remplacés par des disques à roulettes en raison des conditions sévères dans lesquelles ils sont soumis causant des endommagements sévères.

## III. Généralités sur l'usure

L'usure est une conséquence de plusieurs mécanismes de frottement se déroulant simultanément lorsque deux corps sont en contact. Nous pouvons classer les différents modes d'usure selon différentes catégories suivantes:

- l'adhésion intervient lorsque le contact de deux corps en glissement induit une phase de transfert d'un corps sur un autre. Cela génère une usure sévère allant jusqu'au grippage;
- l'abrasion résulte du frottement de deux corps qui peut s'effectuer sous pression et peut induire des endommagements diverses;
- l'érosion est définie comme une dégradation de surface due à un arrachement de particules provoquant des cavités et des rayures en surface;
- la tribochimie correspond aux réactions chimiques qui sont amorcées par le frottement de deux matériaux antagonistes, en présence ou non de lubrifiant;
- la déformation plastique intervient lorsque le matériau est sollicité à des contraintes supérieures à sa limite d'élasticité;
- la fatigue se traduit par des phénomènes de fissuration ou d'arrachement du matériau entraînant des phénomènes de piqûres de délamination ou d'effritements.

Nous allons plus précisément aborder l'usure par abrasion et par adhésion qui sont les principaux modes d'usures rencontrés dans notre étude.

### III.1. Usure par abrasion

L'usure par abrasion est un mécanisme le plus souvent identifié comme une perte de matière assimilée à une dégradation sous l'action d'un contact répété. Cela induit à long terme une perte de volume (Lucrèce (95-55 av. J.C.), "De rerum natura"). C'est un phénomène qui suscite un intérêt depuis des siècles et qui est un aspect fondamental de la tribologie. Meng et Ludema<sup>12</sup> ont recensé plus de 300 modèles et équations d'usure.

Archard a proposé un modèle simple, permettant de connaître le volume d'usure d'un matériau en fonction de la distance glissée avec le coefficient d'usure<sup>13</sup>.

Cette relation s'écrit :

$$W = k \frac{F}{H} l \quad (1.1)$$

avec  $W$  : le volume usé ( $m^3$ )  
 $k$  : le coefficient d'usure  
 $F$  : la charge nominale appliquée (N)  
 $H$  : la dureté du matériau le plus tendre (Hv)  
 $l$  : la longueur de glissement (m)

La variation du coefficient de frottement, des écarts par rapport à la loi (l'évolution linéaire du volume avec le glissement) font que cette loi est rapidement mise en question par le développement de nouveaux systèmes. En 1962, Mulhearn et Samuel <sup>14</sup> développent un modèle d'abrasion de l'acier frottant contre un papier abrasif de carbure de Silicium. Les modèles et lois sur l'usure abrasive se succèdent avec Lawn <sup>15</sup> qui étudie l'usure des matériaux fragiles, Sundararajan <sup>16</sup> explorant la déformation plastique et plus récemment Bull et Rickerby <sup>17</sup> qui proposent un modèle en tenant compte des phénomènes de multi-fissurations.

L'usure abrasive est généralement perceptible par la présence de rayures ou microrayures témoignant l'action d'un matériau plus dur ou de particules plus dures qui ont rayé la surface moins dure laissant derrière leur passage une trace. Lorsqu'une particule vient frotter contre une surface, elle enlève de la matière selon différents mécanismes (Fig.1.17).

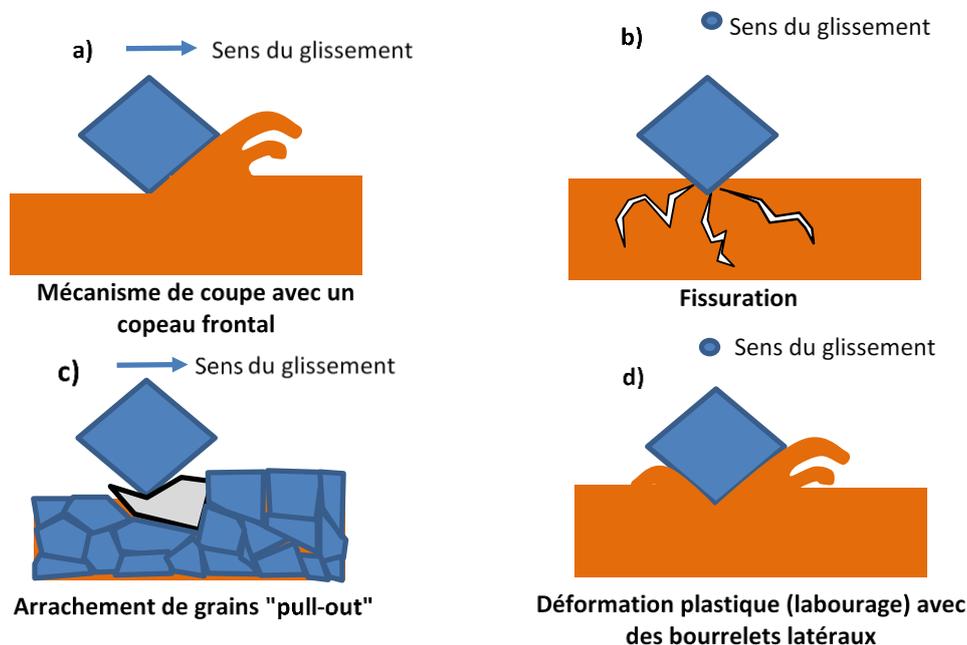


Fig. 1.17. Différents mécanismes de l'usure abrasive.

Le mécanisme de coupe (Fig.1.17.a) est susceptible de créer des débris d'usure et endommager sévèrement la surface. Une quantité importante de matière est alors enlevée

[15]. Les travaux de Reaumur (1722) et Tabor (1954) montrent que le matériau qui va favoriser l'usure devrait être au moins 20% plus dur que le matériau antagoniste. Cependant, cela ne s'applique plus dès lors qu'un matériau en contact avec des particules abrasives sont soumises à une charge. En effet, la dureté des particules en contact peut être égale à celle du matériau<sup>18</sup>.

La fissuration quant à elle est provoquée par les fortes charges (Fig.1.17.b). Un matériau fragile est logiquement plus propice à ce type d'endommagement avec une pénétration dans la matière suivie d'une fissuration et de la propagation des fissures<sup>18</sup>. La présence des débris peut accentuer l'usure par une action au niveau des fissures et en favorisant leur propagation<sup>19</sup>.

Le détachement de grains est spécifique aux matériaux frittés ou composites constitués d'un liant ductile et de grains durs qui sont dans la matrice ductile. L'adhérence entre les grains et le liant, joue un rôle crucial dans la distribution des charges supportées par le matériau. En effet, une surcharge peut entraîner des inclusions et provoquer des détachements de grains ou encore des fissures qui peuvent se propager au sein du grain et détériorer le matériau en déclenchant une rupture brutale. C'est à ce moment-là que l'interface intervient en déviant la fissure pour empêcher qu'elle ne se propage dans le matériau. Elle va plutôt suivre l'interface et entraîner un détachement du grain (Fig.1.17.c).

La fig.1.17.d) présente la déformation plastique du matériau qui crée des plis ou du labourage de part et d'autre du sillon, pour un matériau ductile. La plastification de la surface du matériau participe activement à l'usure abrasive. Ceci peut aussi entraîner des phénomènes de fatigue par le mouvement cyclique de la particule sur la surface<sup>16,20-22</sup>. Ce mécanisme de fatigue est lié à la capacité du matériau à absorber les énergies de déformation et les contraintes thermiques liées au frottement.

Le rôle des particules dans l'abrasion est important. Il nous conduit à distinguer deux mécanismes distincts d'usure : « l'abrasion à deux corps » et « l'abrasion à trois corps ».

### III.1.2. Usure abrasive à deux corps

Ce type d'usure, comme le nom l'indique, concerne un système à deux corps qui conduit à un endommagement de la surface en contact. En fait les deux corps en contact sont identifiés comme étant le « 1<sup>er</sup> corps » et les particules d'un des corps qui ne sont pas en mouvement au niveau de l'interface et qui sont responsables des phénomènes d'abrasion sont sous l'appellation du « 2<sup>ème</sup> corps ». Comme le montre la Fig.1.18, le deuxième corps réalise des micro-rayages avec la présence de copeaux sous l'action du glissement répété entre les deux matériaux.

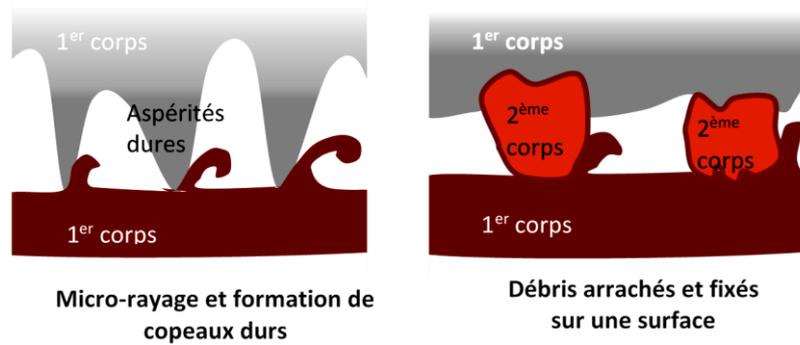


Fig. 1.18. Mécanisme de l'abrasion à deux corps.

Ce deuxième corps peut provenir d'un des deux matériaux suite à un arrachement suivi d'une fixation sur l'un des corps. Il peut également correspondre aux aspérités dures d'un des deux matériaux. Ces mécanismes sont initiés en fonction des propriétés des deux matériaux mis en contact. En effet un contact entre deux matériaux de dureté très différente entrainera des mécanismes de bourrelets du matériau le moins dur avec des bourrelets de part et d'autre du sillon ou de la rayure formée. Zum Gahr <sup>23,24</sup> a évalué un facteur d'enlèvement de matière, défini par le rapport du volume d'usure sur le volume de rainure. Pour un matériau fragile, le passage répété du matériau le plus dur entrainera des fissurations sur l'antagoniste et une usure.

### III.1.2. Usure abrasive à trois corps

L'usure abrasive à trois corps fait intervenir un troisième corps dans l'interface. Le troisième corps peut être des particules qui sont générées lors du contact répété entre les deux corps. Il est caractérisé par sa mobilité au sein de l'interface de contact <sup>25</sup>.

Le roulement de ce troisième corps (particules) peut faire intervenir d'autres phénomènes comme des plastifications qui conduisent à un durcissement des particules (écrouissage), ou encore l'agrégation des débris. La Fig.1.19 représente ce phénomène.

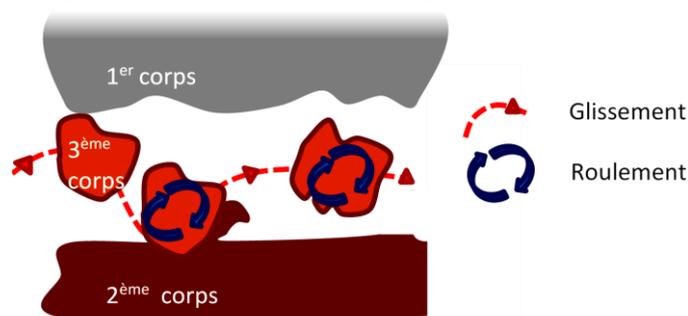


Fig. 1.19. Représentation schématique de l'usure à trois corps.

- Mécanismes d'accommodation

Le troisième corps transmet la charge entre les premiers corps frottants. Il assure l'accommodation des vitesses des deux corps en contact. Berthier <sup>26</sup> utilise des sites,  $S_i$  et des modes  $M_i$  pour définir le lieu et le mode d'accommodation des vitesses. Les premiers corps sont représentés par  $S_1$  et  $S_5$ , tandis que le « troisième corps » est identifié comme  $S_3$ .

La frontière entre les premiers corps et le troisième est représenté par  $S_2$  et  $S_4$ . Les modes sont classés en quatre catégories :

- la déformation élastique ( $M_1$ ),
- la fissuration ( $M_2$ ),
- le cisaillement ( $M_3$ ),
- et le roulement ( $M_4$ ).

Il prend en compte l'identification des mécanismes d'accommodations de vitesses dans le contact pour étudier l'usure intervenant dans l'usure trois corps (Fig.1.20).

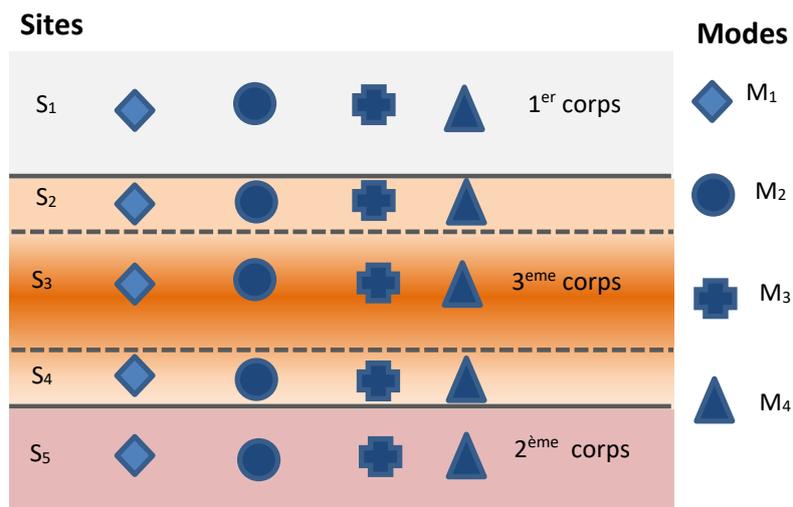


Fig. 1.20. Sites et modes d'accommodations.

Le mécanisme d'accommodation est ensuite défini comme une association d'un site et d'un mode, ce qui en fait 20. Ces mécanismes pouvant se déclencher en tout point ne génèrent systématiquement pas des débris <sup>27</sup>. De plus tous ces mécanismes ne sont présents dans l'usure abrasive à trois corps.

- Circuit tribologique

La formation, le détachement des particules et leur piégeage au sein de l'interface des deux « premiers corps » se fait par un déroulement d'étapes qui caractérise cette usure à trois corps. Cette formation de débris se poursuit jusqu'à l'établissement d'un équilibre entre le détachement et l'étape élimination des particules. Berthier <sup>28</sup> traduit cet équilibre suivant un

circuit tribologique en définissant un débit comme étant le gradient de vitesse soumis aux particules mobiles à l'interface<sup>29</sup>. Ceci conduit aux relations d'équilibre des débits de Dalverny<sup>30</sup> distinguant le circuit « fermé » où des petites particules abrasives circulent à l'interface des deux corps pouvant être en contact [23, 28–30]. Tandis que le circuit « ouvert » représente le passage unique des particules qui, souvent de grandes tailles, empêchent les deux surfaces de frotter l'une contre l'autre<sup>34</sup>.

Classiquement, l'usure à trois corps engendre moins de perte de matière que l'usure à deux corps. La différence est assez significative. En effet des études montrent que les particules entre les deux corps antagonistes s'entrechoquent et favorisent la dissipation d'énergie. Elles seraient le plus souvent en roulement au lieu d'être en glissement. Rabinowicz *et al.* s'est penché sur cette question et montre que cela contribuerait à un affinement de la géométrie des particules<sup>35</sup>. De plus ce « troisième corps » est susceptible de participer à un autre mécanisme d'usure qui est l'adhésion [28, 33–35].

### III.2. Usure adhésive

L'adhésion correspond à un processus d'usure où des débris de matière d'un corps sont transférés vers l'autre corps. Elle peut être associée à un phénomène mécanique ou à un mécanisme tribo-chimique<sup>39</sup>. Le phénomène mécanique dont il est question se déroule lorsque deux matériaux frottent l'un contre l'autre. Une élévation de température aux micro-aspérités, qui constituent des zones de micro-contacts supportant l'ensemble des charges normales, se produit. Cette-dernière peut déclencher des réactions physico-chimiques aux jonctions. Ceci peut alors conduire à des phénomènes de micro-soudage ou encore de grippage. Ainsi, un film est créé entre les deux surfaces antagonistes. Il permet de supporter la force de frottement. Si la force de frottement n'excède pas l'adhérence du film créé, un certain équilibre est maintenu. Dans le cas contraire, des contraintes de cisaillement générées conduisent à la rupture de cette interface et forme des débris. L'évacuation des débris à l'interface joue un rôle crucial dans l'usure. Si les débris sont progressivement évacués du contact, cela laisse une interface encore réactive qui va conduire à nouveau à la formation du film. Cependant, si les débris sont piégés dans l'interface, cela augmente les aires réelles de contact. Les débris jouent dès lors un rôle de portance ce qui contribue à séparer les deux surfaces antagonistes. Par conséquent l'usure et le coefficient de frottement sont considérablement réduits.

De nombreux travaux dont ceux de Sha *et al.*<sup>40</sup> se sont focalisés sur l'usure à trois corps à l'échelle du nanomètre avec une « mono-aspérité ». Ils ont ainsi montré que le taux d'usure est indépendant de l'aire de contact<sup>41</sup>.

## IV. Généralités sur l'impact-glissement

### IV.1. Sollicitation d'impact-glissement

On appelle « impact-glissement » une situation pour laquelle on associe deux types de sollicitations mécaniques : « l'impact » et le « glissement ».

L'impact pur (vitesse initiale normale à la surface) se caractérise selon Levy *et al* par un endommagement en profondeur du matériau (plastification) qui peut conduire à une délamination <sup>42</sup>. La relation d'Engel reliant l'intensité d'un impact et la pression maximale du contact ( $P_0$ ) et la limite d'élasticité du matériau ( $\sigma_y$ ) permet d'évaluer l'intensité de l'impact <sup>43</sup>:

$$I = \frac{P_0}{\sigma_y} \quad (1.2)$$

Lorsque  $I < 1$  : impact d'intensité faible

$I > 1$  : impact d'intensité élevé

Le glissement pur quant à lui est plutôt générateur de phénomènes d'adhésion, d'abrasion et de fatigue. La combinaison des deux phénomènes, peut conduire à une usure plus sévère, car elle associe l'action de l'impact au frottement et donc aux contraintes de cisaillement au contact des deux surfaces. La Fig.21 représente les trois différentes cinématiques de contact étudiées par Ko *et al* <sup>44</sup>. Il considère la vitesse normale,  $V_n$  et la vitesse tangentielle,  $V_t$  à chaque cinématique en utilisant deux alliages de Nickel.

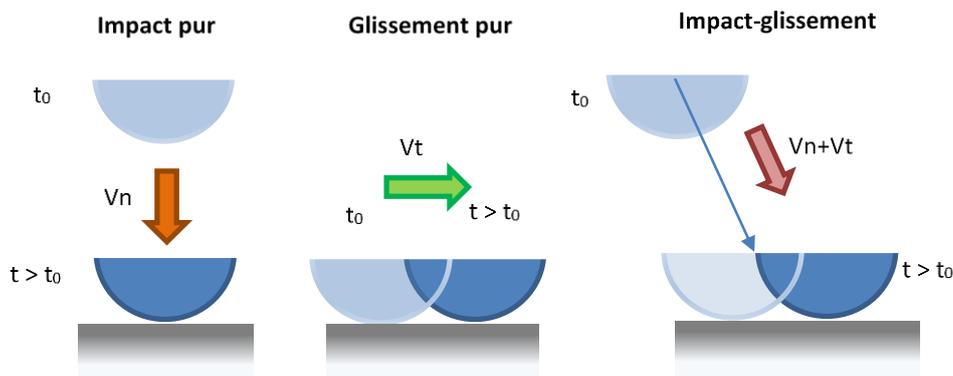


Fig. 1.21. Les différentes cinématiques de contact.

Il a étudié le rôle important de la composante tangentielle sur le taux d'usure pour des cinématiques d'impact-glissement. Il démontre également que cette composante tangentielle est liée à la composante normale par le coefficient de frottement et l'angle d'incidence. En effet l'usure dans cette cinématique d'impact-glissement est fortement liée au frottement et de nombreuses recherches se sont focalisées sur cette thématique. D'après Peterson, le taux d'usure n'augmente pas linéairement avec la vitesse et la charge normale. Il identifie un seuil

à partir duquel, l'usure varie considérablement (elle augmente ou diminue fortement après le point de transition critique). Hirst <sup>45</sup>, Lancaster <sup>46</sup> et Welsh <sup>47</sup> se sont penchés sur l'influence de la vitesse et de la charge sur l'usure du cuivre et de l'acier. Lewis *et al* <sup>48</sup> ont étudié l'influence de l'angle d'impact en réalisant des essais avec des angles allant de 0° à 85° par rapport à la normale. Il dénote une variation du coefficient de frottement entre 0° et 40° avant d'atteindre une valeur constante à partir de 40°.

#### IV.2. Endommagement en impact-glissement

L'usure lors d'un impact pur et répété a été étudiée par Engel qui la présente comme un mécanisme se déroulant en deux temps. Il identifie une première période ou phase d'incubation, où les impacts répétés ne conduisent pas à une perte de matière importante <sup>49</sup>. Il y a alors des phénomènes de transformations en surface et en profondeur comme le développement de fractures, de fissures et de fragments. Ceci entraîne des modifications de la rugosité et peut déclencher l'oxydation. Cette période d'incubation est ensuite suivie d'une phase où l'usure devient non négligeable, à partir de  $N_0$  cycles. L'usure augmente alors linéairement plus précisément en profondeur. La figure 22 montre la profondeur d'usure en fonction des cycles d'impacts,  $N$ .

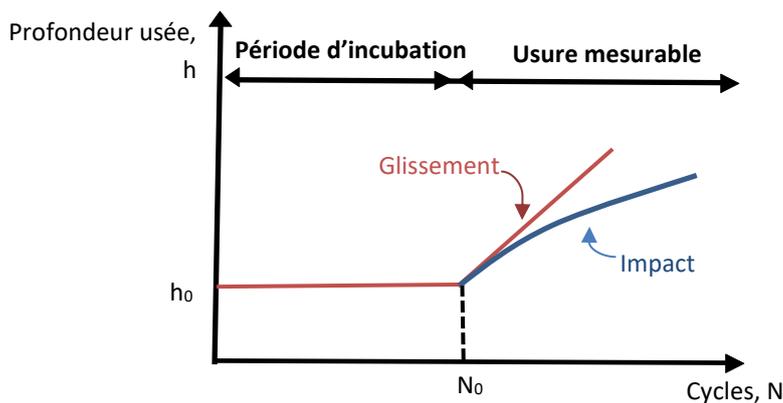


Fig. 1.22. Evolution de la profondeur d'usure en fonction du nombre de cycles selon Engel.

Engel <sup>43</sup> démontre que la vitesse normale d'impact influe peu sur l'initiation à l'usure et que la vitesse tangentielle quant à elle est un paramètre majeur de l'usure. Ses travaux s'orientent aussi sur l'évaluation du coefficient de glissement,  $f$ , qui permet d'identifier un mécanisme d'adhésion durant l'impact :

$$f = \frac{\pi m \vartheta_T}{\mu T_i F_N} \quad (1.3)$$

avec  $m$  : la masse de l'impacteur (kg)

$\vartheta_T$ : la vitesse de glissement (m/s)

$\mu$  : le coefficient de frottement

$F_N$ : la force normale appliquée (N)

$T_i$ : la durée de l'impact (s)

Les critères sont les suivants : si  $f$  est compris entre 0 et 2 : le glissement donne lieu à l'adhérence avant l'impact. Par contre, si le facteur de glissement est supérieur à 2, le glissement est total tout au long de l'impact.

Rice *et al*<sup>50</sup> explique que l'impact couplé à des glissements à sec, sur des alliages de cuivre et d'aluminium, amorce les mécanismes de dégradation des grains évoqués par Rigney<sup>51</sup> sur les phénomènes de fatigue (Fig.1.23).

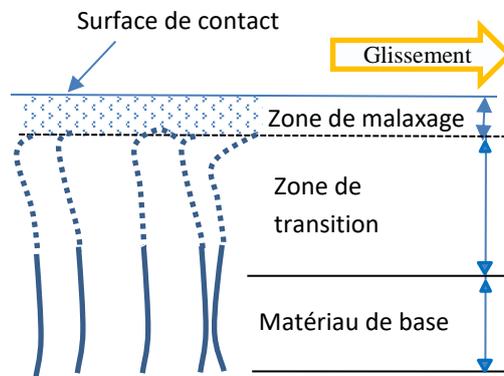


Fig. 1.23. Illustration schématique de la déformation en profondeur suite à des glissements répétés.

Ce dernier distingue trois zones distinctes :

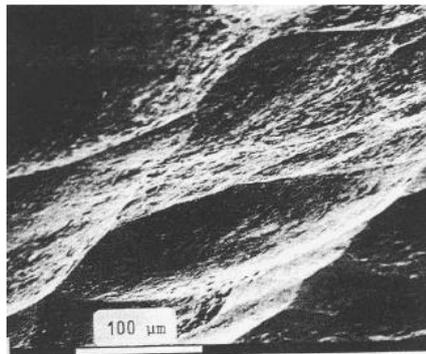
- une zone endommagée sévèrement et caractérisée par des films de transfert oxydés qui sont « malaxés » sous l'effet du glissement,
- une zone de transition avec une réorientation et une désintégration des grains avec un gradient de déformation plastique,
- une troisième couche qui constitue le matériau de base avec à l'interface un matériau déformé plastiquement (orientée dans le sens du glissement).

Levy *et al.*<sup>52</sup> ont étudié les contacts avec impacts-glissements pour des aciers inoxydables. Il a observé l'influence de la température en présence de dioxyde de carbone avec les aciers AISI 316 et AISI 310. Des observations similaires à Rice ont été faites avec les mécanismes d'usure variés. Levy parle de l'adhésion qui caractérise le début de l'endommagement avec une augmentation de la rugosité des surfaces mises en contact. Les

deux surfaces sont recouvertes, de couches mixtes et oxydées, de façon progressive. Ensuite le contact conduit à des frottements entre les couches oxydées conduisant à leur déformation et à la réduction de l'usure de l'acier. Le revêtement créé et compacté sous les sollicitations d'impact-glissement joue le rôle de couche protectrice.

En 1982, les travaux de Nowolty *et al* mettent en relief les modes d'endommagements des aciers sous impact et glissement. Ils identifient trois zones distinctes : une zone non déformée qui correspond au matériau de base, une seconde zone où le matériau est déformé plastiquement avec une orientation dans le sens du glissement et enfin une dernière zone caractérisée par une usure adhésive. Des films de transfert oxydés contenant des éléments provenant du matériau antagoniste sont observés dans cette troisième zone <sup>53</sup>.

Les travaux de Kaczorowski <sup>54</sup> et de Kaiser <sup>55</sup> sur les phénomènes d'endommagement des grappes de réacteur nucléaire mettent en exergue des faciès d'usure particulier sous impact-glissement. Il s'agit de déformations plastiques du matériau qui conduit à des faciès en forme de « cupules » (Fig.1.24). Ils ont montré que le coefficient de frottement, l'angle d'incidence et la force normale ont une influence sur les taux d'usure. Kaczorowski explique par une approche mécanique les observations des faciès d'usure particuliers avec des zones caractérisées par un faible écrouissage au niveau d'une zone peu épaisse et l'associe au glissement lors du contact <sup>54</sup>.



*Fig. 1.24. Illustration des cupules observées sur un tube de générateur vapeur <sup>54</sup>.*

Kaiser poursuit cette analyse en rajoutant les conditions environnementales, à cette étude et conclue sur un processus de formation de cupules <sup>55</sup> (Fig.1.25).

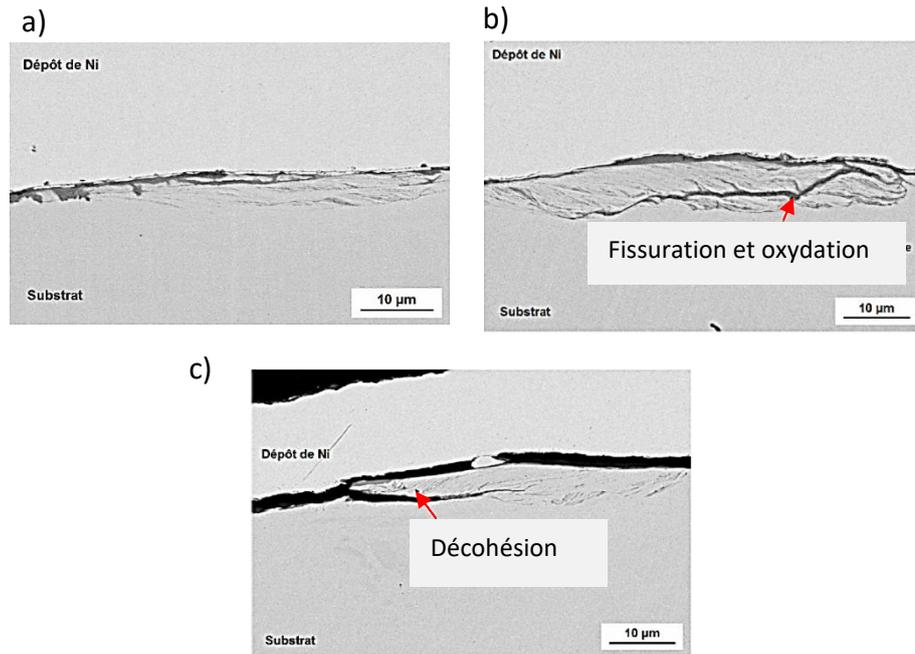


Fig. 1.25. Observations microscopiques de sections réalisées au niveau des cicatrices d'usure :  
(a) formation de la zone lamellaire,  
(b) fissuration et oxydation,  
(c) décohésion <sup>55</sup>.

Ces sollicitations entraînent un amorçage et la propagation de fissures au niveau du matériau favorisant ensuite l'oxydation et conduisant à une transformation tribologique en surface du métal. L'interface entre ces zones lamellaires et le substrat constituée d'oxydes, est fragilisée, en raison des conditions environnementales (eau pressurisée à 300°C). La succession des impact-glissements rompt cette interface et conduit à la libération de particules de petites tailles appelées « grumeaux ». Ces derniers peuvent soit se briser et former des débris d'usure, soit adhérer à l'antagoniste et former une cupule par rayure ductile.

Plus récemment Messaadi, a étudié le comportements d'aciers frittés utilisés pour les sièges de soupape de moteur à explosion sous impact-glissement dans différentes conditions expérimentales (angle d'impact, énergies d'impact et nature du contact) <sup>56</sup>. Cette étude avec une configuration bille/plan est associée par une analyse numérique du contact par éléments finis. Elle a montré que l'usure des aciers sous impact-glissement donne des faciès d'usure avec des profondeurs d'usure différentes selon les conditions de sollicitations. L'analyse numérique a permis de démontrer que les contraintes de cisaillements diminuent lorsque la composante de glissement est faible. L'approche expérimentale a mis en exergue le phénomène de multi-impacts qui conduit à une déformation plastique importante (Fig.1.26).

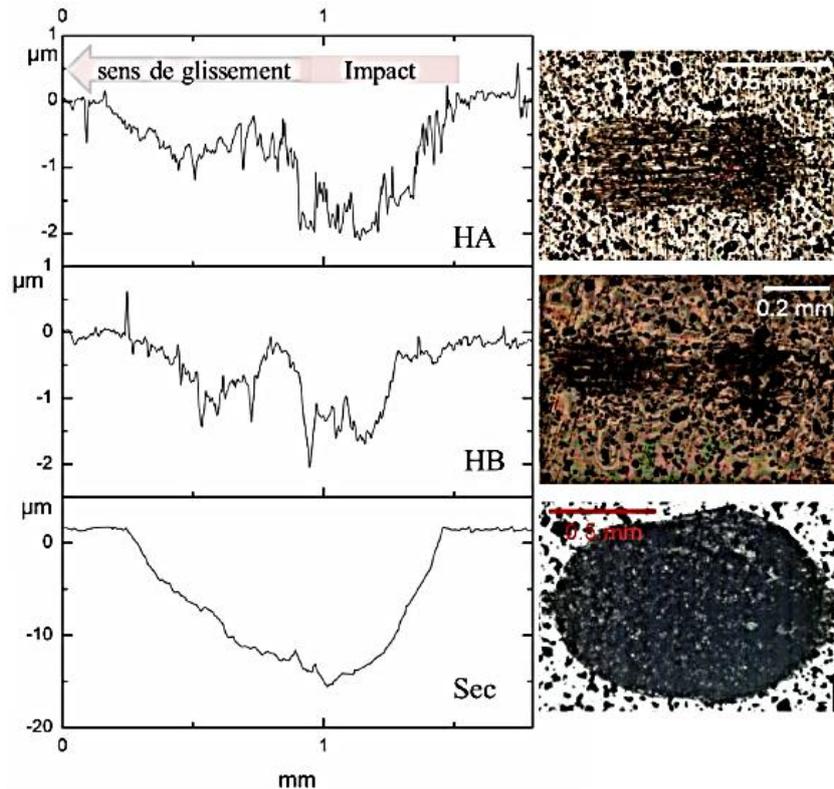


Fig. 1.26. Profils 2D des traces d'usure et observations microscopiques pour un angle d'impact de  $45^\circ$ <sup>56</sup>.

Elle distingue également des mécanismes d'endommagement bien spécifiques aux conditions de sollicitations d'impact-glissements. Dans le cas d'un contact sec, les traces observées montrent une combinaison des phénomènes d'abrasion, d'adhésion et de déformation plastique. Les traces montrent une zone d'impact marquée par une profondeur d'usure élevée et localisée en haut de trace. Cette zone est suivie par une zone où la profondeur croît graduellement jusqu'à rejoindre la surface. La trace est elliptique avec un profil lisse. Pour un contact lubrifié, la forme de la trace d'usure est modifiée. La trace d'usure observée est irrégulière et rugueuse. De plus, elle est formée de deux parties distinctes.

## V. Caractéristiques et endommagements des dents de tunneliers

### V.1. Caractéristiques des carbures de tungstène

Les conditions de travail étant variées durant l'excavation, les carbures de tungstène sont sujets à des phénomènes d'usure qui sont rendus complexes du fait de leur mise en jeu de façon simultanée. Le remplacement des dents s'effectue par des opérateurs au niveau de la zone d'excavation. La Fig.1.27 montre un opérateur en train d'analyser l'usure sur la tête de coupe du tunnelier.



*Fig. 1.27. Opérateur au niveau de la roue de coupe du tunnelier analysant l'usure des disques <sup>57</sup>.*

Par conséquent la durée de vie des dents doit être optimisée afin de limiter leur endommagement et leur remplacement. Les propriétés d'usure des carbures de tungstène dépendent de deux paramètres fondamentaux à savoir, leurs propriétés mécaniques et leur microstructure.

#### **V.1.1. Les propriétés mécaniques**

Pour ces matériaux, les propriétés de dureté et la ténacité sont très fortement liées à la microstructure. Il est quasiment impossible d'avoir un matériau avec une dureté élevée sans diminuer la résistance à la fissuration <sup>8</sup>. Ainsi, la dureté et la ténacité des carbures de tungstène sont des propriétés antagonistes ce qui rend difficile l'élaboration d'un composite combinant dureté et ténacité élevées. Un compromis entre l'efficacité de ces outils de coupe et leur endommagement est à considérer. La Fig.1.28 représente l'évolution de la ténacité en fonction de la dureté et permet de souligner le fait que la ténacité est inversement proportionnelle à la dureté Vickers.

Du diamant polycristallin <sup>58,59</sup> recouvrant les dents de carbures peut aider à augmenter la durée de vie de ces outils de coupe. En effet les outils de coupe recouverts de PDC (Polycristalline Diamond Compact) peuvent opérer plus rapidement dans le forage du sol (en s'usant deux fois moins) <sup>60,61</sup>. Après avoir été découverte par General Electric en 1970, cette technologie s'est rapidement rependue avec une résistance à l'impact améliorée et une meilleure résistance à la dégradation thermique. Cependant, le phénomène d'abrasion n'est pas pour autant négligeable.

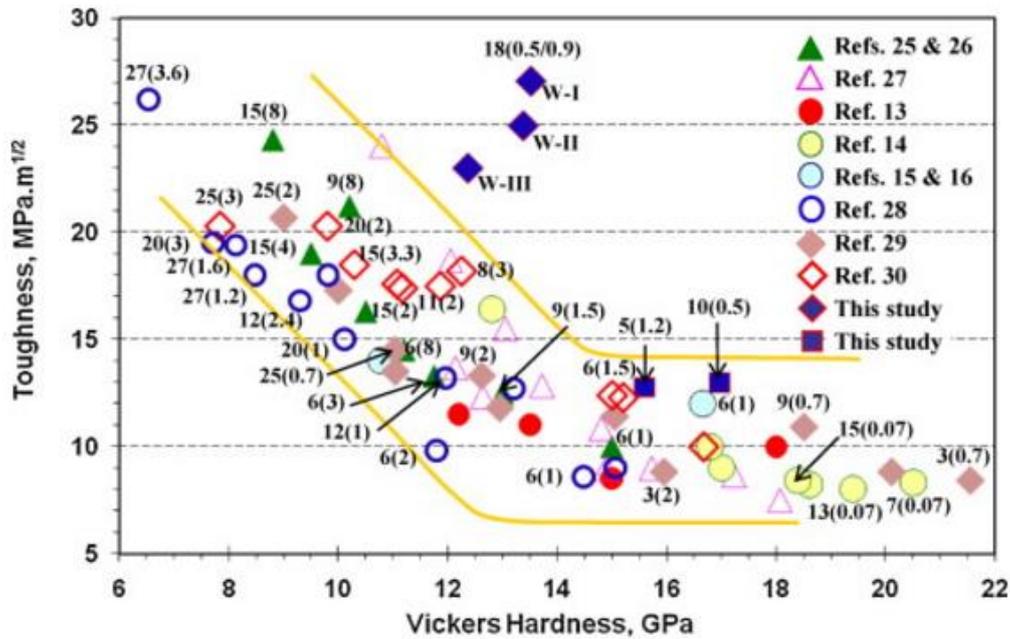


Fig.1.28. Tracé de la ténacité en fonction de la dureté Vickers <sup>62</sup>.

### V.1.2. La microstructure

Les carbures de tungstène sont caractérisés par une répartition plus ou moins homogène de grains de carbure dans une matrice ductile, le liant (Fig.1.29). La microstructure de ces composites va dépendre de plusieurs facteurs en fonction de la taille des grains, leur distribution, leur fraction volumique, et leur forme <sup>7</sup>.

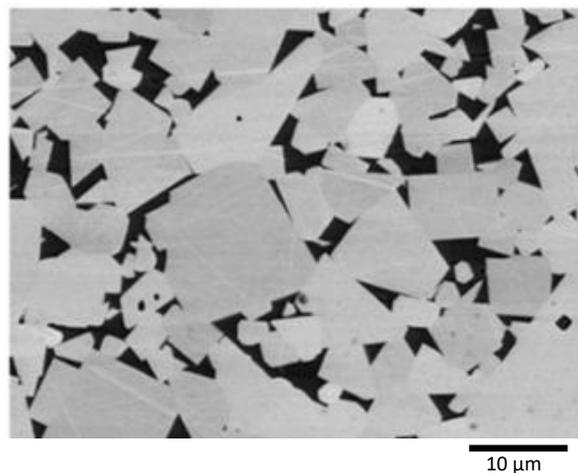


Fig.1.29. Microstructure d'un carbure de tungstène contenant 6% de cobalt <sup>63</sup>.

La taille des grains dépend du processus d'élaboration par frittage et permet d'augmenter la dureté du matériau. En effet des grains plus petits permettent d'amoinrir l'amorçage et surtout la propagation des fissures au sein du matériau. Des grains de grosse taille ne vont pas résister à l'abrasion à cause des contraintes résiduelles qui vont favoriser l'apparition de microfissures <sup>8,38,64</sup>. De même, la surface de contact entre les grains qui est non

négligeable va faciliter le processus de fissuration. Il faudrait donc trouver des moyens pour remédier à cette faible ténacité qui caractérise les composites à matrice métalliques élaborés avec de gros grains de WC.

Le liant métallique qui constitue la phase ductile, le Cobalt ou le Nickel le plus souvent, permet de lier les grains entre eux et apporte de la ductilité au composite. Ainsi la teneur en liant peut éviter le déroulement des mécanismes d'usure<sup>65-67</sup>.

De nombreux travaux ont été menés afin d'identifier des additifs qui pourraient soit augmenter la dureté ou la ténacité. Des grains de carbure de Vanadium, VC et de carbure de Chrome, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, se sont révélés être efficaces dans la conservation de la taille des grains de WC. Poetschke *et al.* a démontré que ces grains permettent d'obtenir une nanostructuration des carbures de tungstène qui augmente leur résistance à l'usure<sup>68,69</sup>. Des micro-grains de WC aideraient à réduire le phénomène d'écaillage en augmentant la dureté. Des oxydes d'aluminium et de zirconium, ainsi que les renforts comme le carbure de titane et de tantale permettent aussi d'optimiser les propriétés mécaniques. Cette nanostructuration des grains permettrait de s'affranchir de la relation dureté-ténacité. En effet, La microstructure des carbures joue un rôle non négligeable au niveau des propriétés mécaniques de ces composites<sup>70,71</sup>. La dureté, quant à elle pourrait être optimisée par l'usage de zircone yttrée [21, 27, 28]. L'utilisation des grains plus fins permet d'avoir à la fois une dureté élevée et une ténacité élevée. La taille des grains de WC peut donc être contrôlée par la présence des additifs dans les fabrications de ces céramiques.

Une propension à utiliser des grains de dimensions inférieure à celle utilisée usuellement dans les processus d'élaboration des céramiques, s'est peu à peu affirmée. Une double-structuration a émergé. En effet, la présence simultanée de gros grains et de grains fins permet de combiner à la fois les avantages d'une macrostructure et d'une nanostructure. Une macrostructure apporte une meilleure résistance à l'usure tandis qu'une nanostructure compense les inconvénients de gros grains, en renforçant la matrice [69-72]. Les grains plus fins contribuent à augmenter la dureté du composite. De plus, l'addition de grains fins dans une macrostructure tend à espacer les gros grains dans la matrice et réduit l'usure<sup>7</sup>. La distribution de la taille des grains constitue un facteur majeur qui a trait à la résistance d'abrasion<sup>76</sup>. La conception et le design de ces carbures sont aussi à considérer.

## **V.2. Modes d'usure des carbures de tungstène**

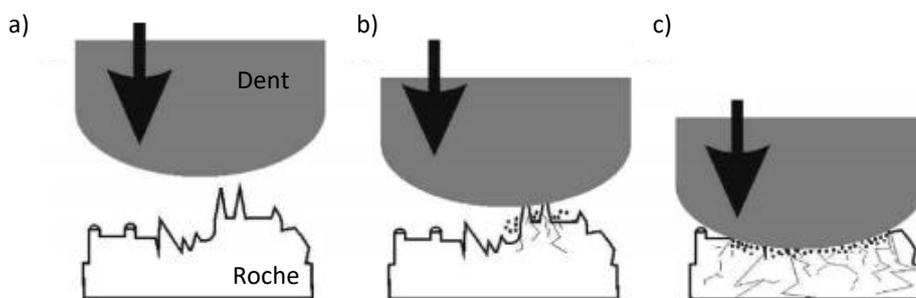
### **V.2.1. Mécanismes d'abrasion**

Les modes d'usure dans notre contexte minier sont le plus souvent assimilés à une usure à deux corps, mais ce phénomène est rendu plus complexe par l'intervention de plusieurs facteurs interdépendants<sup>77</sup>.

Montgomery<sup>78</sup> et Rozeanu<sup>21</sup> ont travaillé sur les sols excavés avec des carbures de tungstène et ont montré que les contacts répétés sur les carbures de tungstènes peuvent les endommager. L'usure par la succession d'impacts conduit à une détérioration de la surface

impactée créant des débris. En réduisant la composante de glissement, l'usure est réduite. Les débris régénérés lors de l'impact sont maintenus à l'interface et servent de couche sacrificielle. Le rapport élevé entre la vitesse tangentielle et la vitesse normale tend à disperser les débris et par conséquent augmente le processus d'usure par abrasion.

Les observations faites sur les dents endommagées reflètent l'action de plusieurs mécanismes favorisant l'ébrèchement des matériaux, leur fissuration et l'abrasion. Lors du contact carbure/sol, plusieurs étapes découlent de la pénétration des débris dans la dent en carbure de tungstène<sup>58</sup>. La fig.1.30 représente le processus qui mène à excaver le sol<sup>2</sup>. Dans un premier temps, la dent au contact avec les aspérités du sol, sous l'effet de l'impact et de la force d'impact, brise les premières aspérités du sol (Fig.1.30.a). Cela occasionne des microfissures qui ont tendance à se propager sous l'action du martellement des fragments engendrés par les premiers impacts (Fig.1.30.b). Cette structure de surface endommagée associée aux impacts répétés contribue non seulement à une fragmentation progressive mais aussi à la pénétration de ces fragments (Fig.1.30.c) dans les dents en carbure de tungstène<sup>58,79,80</sup>.



*Fig. 1.30. Processus de fragmentation de la roche lors du contact carbure/roche<sup>2</sup> :*  
*(a) dent au contact avec les aspérités du sol,*  
*(b) propagation des microfissures,*  
*(c) fragmentation du sol.*

Le liant, cobalt le plus souvent, est la première composante du composite à s'user. Avec la présence des particules abrasives provenant des impacts carbure/sol, le cobalt est éliminé peu à peu du matériau et laisse entrevoir des cavités entre les grains de carbures de tungstène. Ceci entraîne une baisse de la ténacité du matériau. En effet Blombery et al.<sup>81</sup> ont montré qu'un WC-Co dans lequel la phase Cobalt a été enlevée chimiquement présente une surface caractérisée par des grains de carbures mis à nu et par une forte dépression qui diminue la résistance à la fracture des grains. Il montre que l'absence du liant, conduit à des déformations plastiques intra-granulaires et entraîne une relaxation des grains de carbures. Ceci provoque une mise sous pression du cobalt restant. Par conséquent la microfissuration est amplifiée. Après avoir utilisé le cobalt, les grains de carbures seront sujets à des impact-frottements, qui vont créer des microfractures générant à la longue des endommagements importants. En effet, des microfissures se créent à partir des cavités qui sont dans le liant du composite, donc entre les grains de carbure de tungstène. Ces grains finissent par se fissurer

sous l'impact et accélèrent le processus d'écaillage, ce qui est observable par de grosses portions ou ensemble grains-liant manquant au niveau de la dent de carbure.

Marou Alzouma, dans sa thèse détaille par une analyse microscopique des dents de tunneliers la formation de sillons parallèles à la direction de coupe <sup>8</sup>. Il explique que cela est provoqué par la perte de grains de carbure et par la formation des microfissures. Des dents placées à la périphérie de la roue de coupe et au centre de la roue font l'objet de cette analyse. Celles à la périphérie sont caractérisées par des sillons plus larges en raison de la sévérité du contact outil-sol que celles du centre de la roue. En effet celles-ci parcourent une plus longue distance lors de l'excavation. La Fig.1.31.a) montre le phénomène de « pull-out » des grains de carbures (arrachement des grains) suite à une décohésion entre les grains et la matrice. Des microfissures sont observables en Fig.1.31.b). Elles témoignent de l'importance des chocs sur le matériau.

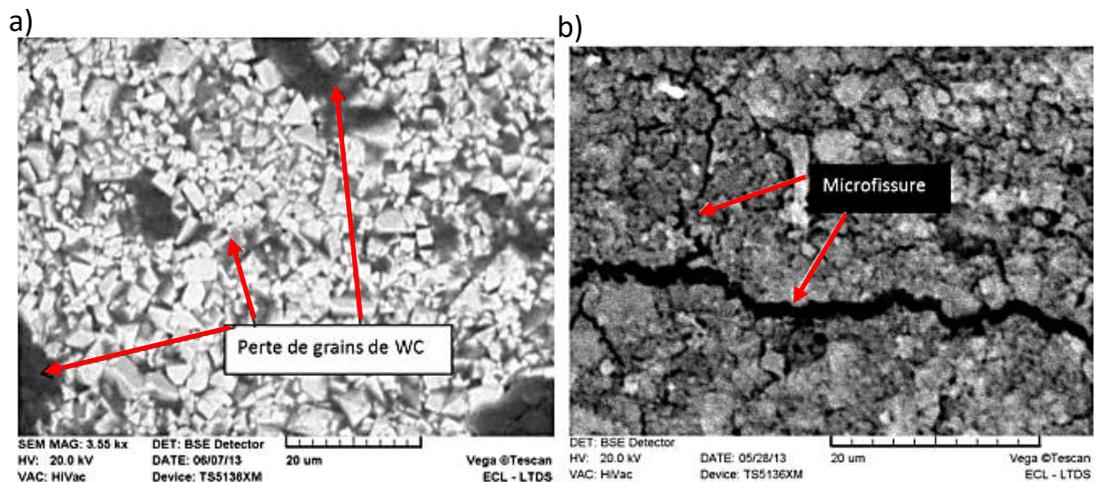


Fig. 1.31. Usure abrasive des carbures avec perte de grains et formation de microfissures <sup>8</sup>.

La déformation plastique liée à l'extrusion de la matrice métallique, plus ductile, contribue énormément à l'usure de ces matériaux (Fig.1.32).

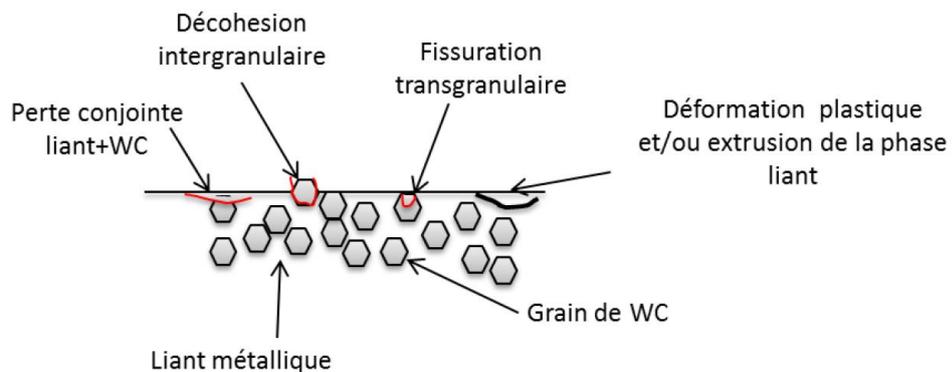
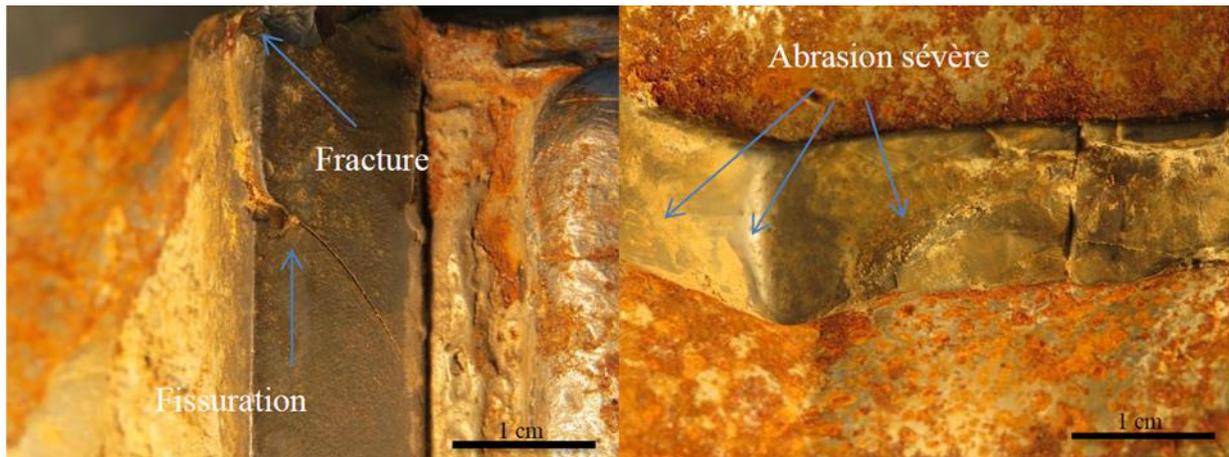


Fig. 1.32. Représentation schématique des mécanismes d'usure observés <sup>8</sup>.

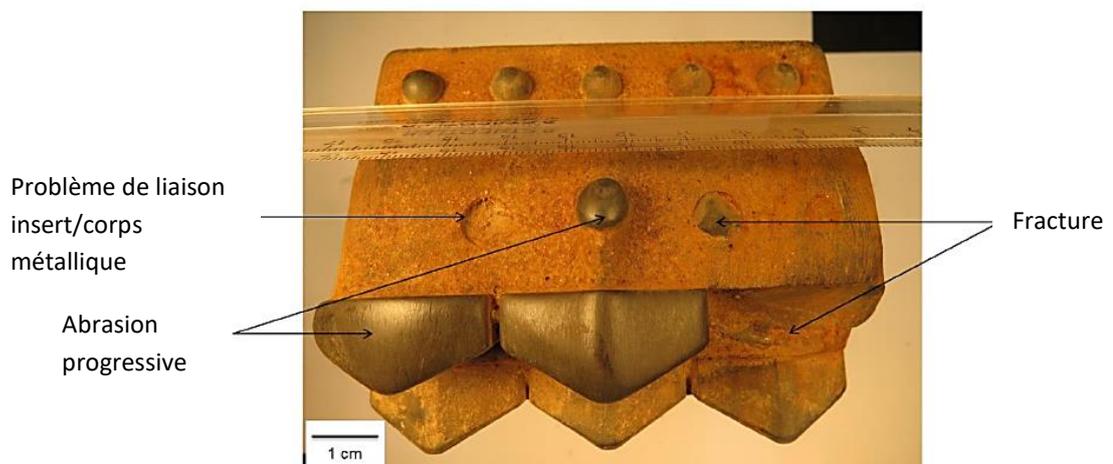
## Chapitre 1 : Etude bibliographique et usure des dents de tunneliers

Une fissuration excessive peut aller jusqu'à créer des fractures au sein de l'insert et entraîner son arrachement. Cela est observable lors de l'excavation des sols meubles qui avec la terre rendent difficile l'évacuation des débris vers la chambre d'excavation. Lors du forage, l'injection de mousse servant de lubrifiant, conduit à la formation d'une pâte à base de débris. Cette pâte reste alors coincée entre les dents et le sol. Une compression se crée alors entre les dents et cette pâte. Avec la rotation de la roue de coupe cela entraîne une augmentation de la fissuration et de l'abrasion <sup>82</sup>. La Fig.1.33 montre des fractures et des faciès d'usure des inserts triangulaires.



*Fig. 1.33. Phénomènes de fissuration, de fracture et d'abrasion sévère sur les inserts de forme triangulaires <sup>8</sup>.*

La fig.1.34 illustre les modes d'endommagement observés sur des « dragbits » avec des inserts coniques.



*Fig. 1.34. Endommagement d'un dragbit avec des inserts de carbure de tungstène usés <sup>8</sup>.*

Des inserts en carbures de tungstène peuvent être arrachés de la dent. Des fractures des inserts sont également observables. Les observations faites sur des dents et les études

permettent de conclure que trois phénomènes majeurs interviennent lors de l'excavation (Fig.1.35) :

- l'usure abrasive entraînant, sous l'effet des contacts répétés, de la perte de matière progressive,
- les compressions locales favorisant l'amorçage et la propagation de fissures et de fractures,
- le détachement total de l'insert dû aux chocs auxquels les dents sont soumises.

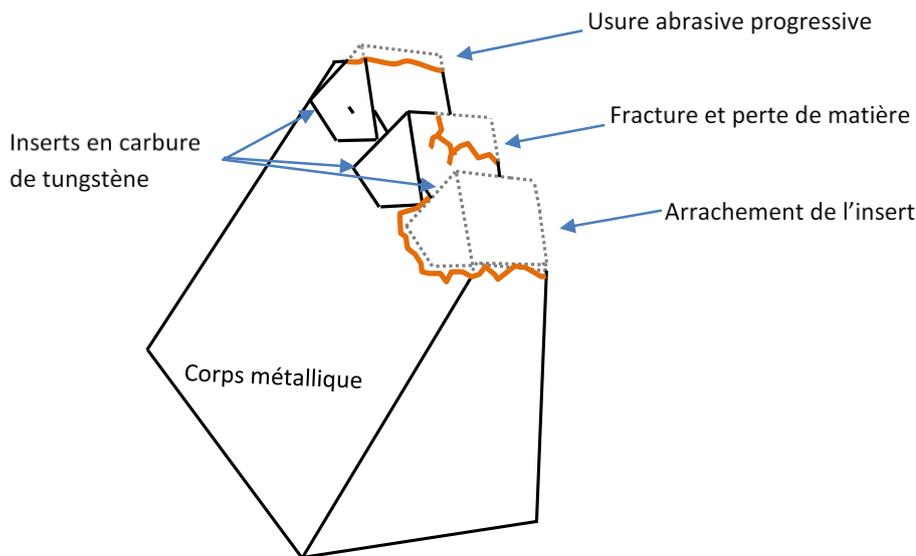


Fig. 1.35. Illustration des modes d'endommagement des dents de tunnelier.

### V.2.2. Phénomènes de transfert

Les phénomènes de transfert observés sur les dents de tunneliers sont le plus souvent provoqués par les conditions thermiques dans lesquelles elles sont sollicitées. Les dents sont en frottement permanent avec les particules et débris. Des débris provenant du sol mais aussi ceux arrachés des dents puis fragmentés, sous l'action des impacts successifs et de la rotation de la roue de coupe, peuvent adhérer aux inserts. Cela crée un film constitué d'éléments malaxés et oxydés.

### V.2.3. Mécanismes de fatigue

Les mécanismes de fatigue observés sur les inserts se traduisent par la simultanéité des mécanismes d'usure combinée à l'action cyclique et donc répétitive de ces mêmes mécanismes <sup>18</sup>.

Des phénomènes d'écaillages sont visibles sur les inserts. Beste *et al* a défini ces écaillages comme des écaillages de fatigue générés par les chocs répétitifs <sup>58,83</sup>. De plus, les conditions thermiques sévères exacerbent les endommagements des dents en fragilisant le

matériau. En effet les dents travaillent à des températures voisines de 1000°C et cela engendre la formation de fissures qui pénètrent dans le matériau et forme une surface similaire à celle d'une « peau de serpent »<sup>84</sup>.

L'usure observée sur les matériaux ne reflète pas seulement le caractère simultané de ces phénomènes d'usure mais aussi leur aspect interdépendant. L'environnement chimique va avoir un impact sur le phénomène d'adhésion. Ceci est assimilable à l'action d'un lubrifiant sur l'adhésion dans un contact métal-métal<sup>81</sup>.

### **V.3. Influence du milieu d'excavation et du matériau sur l'usure**

Les dents avec les inserts en carbure de tungstène sont estimées totalement usées lorsque l'endommagement est tel que le polissage ne peut permettre d'obtenir sa forme géométrique fonctionnelle initiale. Les facteurs limitant de la durée de vie des matériaux qui sont liées aux conditions d'excavation et aux caractéristiques des carbures de tungstènes sont donc à considérer.

#### **V.3.1. Influence de la taille des grains**

La taille des grains est un paramètre important pour la dégradation du matériau, dans la mesure où elle influe sur les propriétés de résistance à l'abrasion et à la propagation des fissures. Des études montrent que plus les grains sont de grande taille plus l'abrasion est importante<sup>64,85</sup>. Ceci s'explique d'une part par le fait que les gros grains ont tendance à se déformer plus facilement ; et d'autre part par la surface de contact entre les grains qui vulnérabilise le matériau. En effet, la déformation plastique favorise la microfissuration qui induit la facturation de l'insert. De même, plus les grains sont de grande taille, plus la surface inter-granulaire croît, contribuant à l'amorçage et la propagation des fissures. Le taux de liant joue donc un rôle fondamental sur la probabilité de contact entre les grains du matériau.

#### **V.3.2. Influence du taux de liant métallique**

Le liant en Cobalt est généralement dans le cas des inserts pour dents de tunnelier, autour de 6-15w% afin de pourvoir de bonnes propriétés aux composites, à savoir un bon compromis entre dureté et ténacité<sup>58</sup>. Des grains de WC de diamètre important avec un taux de liant élevé conduirait à une résistance à l'impact et aux contraintes compressives optimale ainsi qu'une meilleure résistance aux chocs thermiques et donc réduirait l'abrasion et l'usure. En diminuant le taux de liant avec des grains fins de WC, l'usure par abrasion ou l'érosion peut être amoindrie avec une meilleure résistance à l'usure, l'adhésion et une meilleure dureté (déformation plastique évitée). Ce type de carbure est utilisé pour des roches dures comme le quartz ou le grès<sup>1</sup>, mais la ténacité est réduite. Un taux faible en Cobalt diminue la résistance à l'impact et donc entraîne des défaillances, en l'occurrence, la formation de micro-écailles le plus souvent aux extrémités des dents et des fissures<sup>86,87</sup>.

Le taux de liant doit néanmoins être optimal dans le sens où il doit permettre de noyer les grains et d'éviter les contacts inter granulaires tout en évitant de réduire la résistance à l'usure du matériau. Cette matrice plus propice à l'usure que les grains de WC, conduit à une fragilisation du matériau. Un taux élevé tend donc à réduire la dureté et à augmenter la ténacité<sup>27</sup>. Cela baisse inexorablement la résistance à l'usure.

Il a été montré qu'un taux de liant élevé aurait un effet fragilisant plus significatif que l'augmentation de la taille des grains<sup>88</sup>. Dès lors, le paramètre à prendre en compte est la distance intergranulaire optimale, appelée « le parcours libre moyen ». Ce paramètre,  $\lambda$ , selon Cheikh Ahmed *et al* est donné par la relation suivante<sup>88</sup>:

$$\lambda = \alpha D_{wc} f_b (1 - f_b) \quad (1.4)$$

avec  $\alpha$  : la forme et la contiguïté des grains WC

$D_{wc}$ : la taille des grains

$f_b$  : le taux de liant

### V.3.3. Influence du milieu d'excavation

Le milieu d'excavation est un milieu acide avec des particules abrasives susceptibles de percuter et d'accélérer l'usure des dents. Ce milieu acide endommage sérieusement les carbures de tungstène en raison de la corrosivité qui va éliminer le liant métallique<sup>89</sup>. Une fois le liant métallique enlevé, les grains de WC sont plus vulnérables. Des études se sont penchées sur ce sujet et ont montré que la corrosion peut être couplée à l'abrasion, ce qui accentuerait l'usure des dents de tunnelier. Le taux de matière enlevée est alors défini comme étant la somme des taux d'usure liée à la corrosion sans abrasion, à l'abrasion sans corrosion, et à la synergie « abrasion-corrosion »<sup>8,89,90</sup>.

Une éventuelle oxydation des carbures à ces températures est palliée par l'usage d'éléments comme le Ti, Ta (TaC) et du Nb (NbC), qui rajoutés à la composition des carbures, permettent d'augmenter la résistance à l'oxydation<sup>91</sup>. A une température de 600°C, l'oxydation est déclenchée ainsi que tous les phénomènes de micro-défaillances.

L'environnement chimique en milieu acide, tend à dissoudre la phase Co, ce qui amoindrit l'effet du liant sur le composite et tend à la formation de « micro-trous », autrement dit de zones à défauts. Des inserts peuvent subir une usure graduelle, une fracture brutale, une concentration importante et locale de contraintes à l'extrémité des boutons due à une usure graduelle ou encore des fissurations générées par des surcontraintes sur des zones à défauts<sup>2,92</sup>. Les alliages à base de cobalt avec du chrome, du molybdène, et du nickel, voire le remplacement du cobalt par du nickel permettent de réduire ce phénomène de « Cobalt leeching »<sup>93,94</sup>. En effet les composites WC/Ni ont une résistance optimale à la corrosion du liant sans altérer les propriétés mécaniques du composite.

L'humidité est aussi un paramètre influant sur l'usure en accélérant le processus d'abrasion « à deux corps ». L'humidité, facilite le glissement pur des particules abrasives, elles peuvent alors plus facilement rayer le matériau et enlever de la matière <sup>18</sup>. Par contre l'abrasion « à trois corps » dépend du ratio des mécanismes de roulement et de glissement. L'humidité facilitant le mouvement des particules, qui correspondent au « troisième corps », favorise à la fois les mécanismes de roulement et de glissement. Ainsi, un roulement prépondérant entraînerait une diminution de l'usure et à contrario un glissement majoritaire conduirait à une usure plus sévère.

### **V.3.4. Influence de la température**

Pour réduire les phénomènes d'usure la géométrie, la composition, la nature et les propriétés des carbures sont soigneusement sélectionnées. Les conditions thermiques et l'environnement de travail sont également à considérer. Lors des opérations d'excavation, la température peut atteindre 1 000°C. C'est la raison pour laquelle un jet d'eau ou un lubrifiant est projeté à la zone de contact entre les carbures et le sol afin d'assurer un certain refroidissement. On obtient ainsi des températures de l'ordre de 300-500°C. Ce flux d'eau est aussi bénéfique car il permet de faciliter le forage et d'évacuer les débris pouvant endommager les dents de coupe, et ainsi allonger la durée de vie de ces matériaux <sup>95</sup>. Toutefois, des variations de température irrégulières lors du cycle de chauffage – refroidissement peuvent induire des fissures. En ce qui concerne les carbures de tungstène WC / Co, le liant a une grande résistance à la fatigue thermique tandis que les carbures ayant un point de fusion très élevé, ont une faible résistance à la fatigue thermique. De ce fait, le phénomène de fissuration induit thermiquement aura tendance à apparaître dans la phase liant et par la suite se propagera dans la phase WC. Les surcontraintes générées par les autres mécanismes d'usure provoqueront une progression de ces fissures et un élargissement de la zone usée <sup>96</sup>. Bien que la phase WC ait un point de fusion élevé, les températures élevées lors du forage couplées aux contraintes importantes conduisent à la déformation plastique des grains de WC. Ceci affecte la géométrie des dents qui déformée ne peut plus résister efficacement à l'usure. Le composite entre donc dans un processus d'endommagement qui affecte toute la dent et donc toute la face de coupe. Ce flux de lubrifiant doit donc être systématiquement contrôlé, une pression de jet importante va enlever plus efficacement les débris et faciliter le forage. L'auteur considère que cela pourrait aussi accélérer l'érosion des dents.

Milman *et al* <sup>97,98</sup> a étudié l'influence de la température sur l'usure des matériaux et montré que les grains de WC se dilatent et augmentent de taille. Le processus d'endommagement suit plusieurs étapes. Comme évoqué précédemment avec l'usure par fatigue, l'amorçage et la propagation des fissures en profondeur laissant une apparence de « peau de serpent » constitue la première étape du processus. Puis les impacts successifs et les variations de température au niveau de la zone comprise entre la roue de coupe et le sol conduisent à des transformations allotropiques du liant. Cela conduit à sa fragilisation et

entraîne sa dégradation. A cela s'ajoutent les mécanismes d'adhésion amorcés par les conditions thermiques.

Sous ses conditions sévères, tous les mécanismes d'usure, à savoir l'abrasion, l'érosion couplée à la corrosion, à l'écaillage ou encore à la fissuration induite thermiquement ou aux phénomènes de dégradation thermique, sont intensifiés. Ces mécanismes déclenchés au-delà de 500°C conduisent à une fragmentation et à une dégradation du liant métallique aggravées.

## VI. Conclusions

Ce chapitre permet de mettre en exergue les aspects importants qui seront étudiés au cours des prochains chapitres. Les différents mécanismes d'usure sont abordés avec une description des tunneliers et des dents. Les différents mécanismes d'usure des inserts sont :

- les microrayures témoignant de l'usure abrasive;
- l'adhésion des particules arrachées d'un des matériaux antagonistes. Le contact occasionne non seulement l'échange de débris d'un matériau à l'autre, mais aussi favorise la compression de ces débris en surface et donc leur adhésion au matériau respectif;
- la formation d'écaillés au contact répété de particules abrasives lors des impacts;
- la fragmentation de la dent de carbure sous l'action soudaine et répétée de contraintes compressives importantes;
- les fractures thermiques souvent générées par fatigue, elles sont induites par des phénomènes de dilatation thermique ;
- les frottements présents à l'interface de la roche et des dents qui vont déclencher des réactions chimiques entre les éléments présents dans l'environnement et les carbures;
- l'arrachement des grains de carbure de tungstène.

La simultanéité de ces mécanismes d'usure rend complexe l'interprétation de l'usure des tunneliers. De plus, la taille des grains, le taux de liant métallique ainsi que les conditions d'excavation entrent en jeu dans l'endommagement des dents et doivent être considérés dans l'élaboration des inserts.

Lors de l'excavation, les impacts répétés et les frottements générés lors du glissement font de ces sollicitations un paramètre important de l'usure. Ces sollicitations d'impact-glissement vont donc nous permettre d'étudier l'usure de ces inserts en carbure de tungstène.

## VII. Références

1. Beste, U. On the Nature of Cemented Carbide Wear in Rock Drilling. (2004).
2. Katiyar, P. K., Singh, P. K., Singh, R. & Kumar, A. I. Modes of failure of cemented tungsten carbide tool bits (WC/Co): A study of wear parts. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 54, 27–38 (2016).
3. Kneib, G., Kassel, A., & Lorenz, K. Automatic seismic prediction ahead of the tunnel boring machine. *First Break* 18, 295–302 (2000).
4. Talmon, A. m. & Bezuijen, A. Analytical model for the beam action of a tunnel lining during construction. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* 37, 181–200 (2013).
5. Jiang, D., Van der Biest, O. & Vleugels, J. ZrO<sub>2</sub>–WC nanocomposites with superior properties. *J. Eur. Ceram. Soc.* 27, 1247–1251 (2007).
6. An, L., Han, J. & Chen, J. Microstructure and mechanical properties of WC-20wt% Co/ZrO<sub>2</sub>(3Y) cermet composites. *J. Univ. Sci. Technol. Beijing Miner. Metall. Mater.* 13, 174–177 (2006).
7. Ünal, N., Kern, F., Öveçoğlu, M. L. & Gadov, R. Influence of WC particles on the microstructural and mechanical properties of 3 mol% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> stabilized ZrO<sub>2</sub> matrix composites produced by hot pressing. *J. Eur. Ceram. Soc.* 31, 2267–2275 (2011).
8. Marou Alzouma, O. Durabilité tribologique de matériaux pour insert de dents de tunnelier. n° 2015-42, 2015, (Ecully, Ecole centrale de Lyon, 2015).
9. Festa, D., Broere, W. & Bosch, J. W. An investigation into the forces acting on a TBM during driving – Mining the TBM logged data. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 32, 143–157 (2012).
10. Filbà, M., Salvany, J. M., Jubany, J. & Carrasco, L. Tunnel boring machine collision with an ancient boulder beach during the excavation of the Barcelona city subway L10 line: A case of adverse geology and resulting engineering solutions. *Eng. Geol.* 200, 31–46 (2016).
11. Cho, J.-W., Jeon, S., Yu, S.-H. & Chang, S.-H. Optimum spacing of TBM disc cutters: A numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 25, 230–244 (2010).
12. Meng, H. C. & Ludema, K. C. Wear models and predictive equations: their form and content. *Wear* 181, 443–457 (1995).
13. Archard, J. F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces. *J. Appl. Phys.* 24, 981–988 (1953).
14. Mulhearn, T. O. & Samuels, L. E. The abrasion of metals: A model of the process. *Wear* 5, 478–498 (1962).
15. Lawn, B. R. A model for the wear of brittle solids under fixed abrasive conditions. *Wear* 33, 369–372 (1975).

## Chapitre 1 : Etude bibliographique et usure des dents de tunneliers

16. Sundararajan, G. A new model for two-body abrasive wear based on the localization of plastic deformation. *Wear* 117, 1–35 (1987).
17. Bull, S. J. & Rickerby, D. S. Multi-pass scratch testing as a model for abrasive wear. *Thin Solid Films* 181, 545–553 (1989).
18. Stachowiak, G. W. & Batchelor, A. W. 11 - Abrasive, Erosive and Cavitation Wear. in *Engineering Tribology (Third Edition)* 501–551 (Butterworth-Heinemann, 2006). doi:10.1016/B978-075067836-0/50012-2
19. Ling, J., Sun, W., Huo, J. & Guo, L. Study of TBM cutterhead fatigue crack propagation life based on multi-degree of freedom coupling system dynamics. *Comput. Ind. Eng.* 83, 1–14 (2015).
20. Vinogradov, V., Knyazhansky, M. & Tsun, A. Experimental observation and numerical modeling of formation of local plastic zones in hardened surface layers due to contact overloading. *Mech. Mater.* 83, 90–102 (2015).
21. Rozeanu, L. Fatigue wear as a rate process. *Wear* 6, 337–340 (1963).
22. Govindarajan, N. & Gnanamoorthy, R. Rolling/sliding contact fatigue life prediction of sintered and hardened steels. *Wear* 262, 70–78 (2007).
23. Gahr, K.-H. Z. Formation of wear debris by the abrasion of ductile metals. *Wear* 74, 353–373 (1981).
24. Franco, L. A. & Sinatora, A. Material removal factor (fab): a critical assessment of its role in theoretical and practical approaches to abrasive wear of ductile materials. *Wear* doi:10.1016/j.wear.2017.04.006
25. Mezlini, S., Kapsa, P. & Laboratoire de tribologie et dynamique des systèmes. Etude de l'usure par abrasion d'alliages d'aluminium. (Ecole centrale de Lyon, 2003).
26. Berthier, Y. Background on friction and wear. in *Handbook of materials behavior models* 676–699 (Academic Press, 2001).
27. Yahiaoui, M., Comportement tribologique de diamants polycristallins et de carbures cémentés WC-Co avec traitements de graduation Application aux inserts et taillants d'outils pour le forage de formations rocheuses fortement abrasives (Tarbes, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, 2013).
28. Berthier, Y., Godet, M. & Brendle, M. Velocity Accommodation in Friction. *Tribol. Trans.* 32, 490–496 (1989).
29. Berthier, Y., Godet, M., Third body, The third body concept. Elsevier Edition, 1996, pp. 21-30.
30. Dalverny, O. Vie tribologique à chaud et température interfaciale des contacts céramiques, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I, (1998).

31. Gates, J. D. Two-body and three-body abrasion: A critical discussion. *Wear* 214, 139–146 (1998).
32. Zambelli, G. & Vincent, L. *Matériaux et contacts: une approche tribologique*. (Ed. Techniques Ingénieur, 1998).
33. Trezona, R. I., Allsoppl, D.N., Hutchings, M., Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test. *Wear* 1, 205–214 (1999).
34. Misra, A., Finnie, I., Classification of Three-Body Abrasive Wear and Design of a New Tester. *Wear* 60, 111–121 (1980).
35. Rabinowicz, E., Dunn, L. A. & Russell, P. G. A study of abrasive wear under three-body conditions. *Wear* 4, 345–355 (1961).
36. Fillot, N., Iordanoff, I. & Berthier, Y. Modelling third body flows with a discrete element method—a tool for understanding wear with adhesive particles. *Tribol. Int.* 40, 973–981 (2007).
37. Sasada, T., Oike, M. & Emori, N. The effect of abrasive grain size on the transition between abrasive and adhesive wear. *Wear* 97, 291–302 (1984).
38. Date, S. W. & Malkin, S. Effects of grit size on abrasion with coated abrasives. *Wear* 40, 223–235 (1976).
39. Varga, M., Rojacz, H., Winkelmann, H., Mayer, H. & Badisch, E. Wear reducing effects and temperature dependence of tribolayer formation in harsh environment. *Tribol. Int.* 65, 190–199 (2013).
40. Large-scale molecular dynamics simulations of wear in diamond-like carbon at the nanoscale. *Appl. Phys. Lett.* 103, 073118 (2013).
41. Yang, Y., Huang, L. & Shi, Y. Adhesion suppresses atomic wear in single-asperity sliding. *Wear* 352–353, 31–41 (2016).
42. Lewis, A. D. & Rogers, R. J. Experimental and numerical study of forces during oblique impact. *J. Sound Vib.* 125, 403–412 (1988).
43. Engel, P. A., Lyons, T. H. & Sirico, J. L. Impact wear model for steel specimens. *Wear* 23, 185–201 (1973).
44. Ko, P. L. *Wear of Power Plant Components Due to Impact and Sliding*. *Appl. Mech. Rev.* 50, 387–411 (1997).
45. Hirst, W. & Lancaster, K. 'The influence of speed on metallic wear', *Proceedings of the Royal Society.* 259A, 288 (1960).
46. Lancaster, J. The formation of surface films and transition between mild and severe wear. *Proc. R. Soc.* vol.273A, 466 (1963).

47. Welsh, N. The dry wear of steels. vol.257A, 31–50 (1965).
48. Lewis, A. D. & Rogers, R. J. Experimental and numerical study of forces during oblique impact. *J. Sound Vib.* 125, 403–412 (1988).
49. Engel, P. A. *Impact Wear of Materials*. (Elsevier, 1978).
50. Rice, S. L., Nowotny, H. & Wayne, S. F. Characteristics of metallic subsurface zones in sliding and impact wear. *Wear* 74, 131–142 (1981).
51. Rigney, D. A., Chen, L. H., Naylor, M. G. S. & Rosenfield, A. R. Wear processes in sliding systems. *Wear* 100, 195–219 (1984).
52. Levy, G. & Morri, J. Impact fretting wear in CO<sub>2</sub>-based environments. *Wear* 106, 97–138 (1985).
53. Nowotny, H., Rice, S. & Wayne, S. Impact wear of a tool steel. *Wear* 81, 175–181 (1982).
54. Kaczorowski, D. Usure d'un acier inoxydable austénitique dans de l'eau à haute pression et haute température. n° 2002-10, 2002 (Ecully, Ecole centrale de Lyon, 2002).
55. Kaiser, A. L. Caractérisation tribologique d'un acier inoxydable  $\gamma$  sollicité en impact glissement dans un environnement sévère. n° 2005-30, 2005 (Ecully, Ecole centrale de Lyon, 2005).
56. Messaadi, M. Dégradation des aciers frittés sous impact-glissement. n° 2014-11, 2014 (Ecully, Ecole centrale de Lyon, 2014).
57. Amoun, S., Sharifzadeh, M., Shahriar, K., Rostami, J. & Tarigh Azali, S. Evaluation of tool wear in EPB tunneling of Tehran Metro, Line 7 Expansion. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 61, 233–246 (2017).
58. Beste, U. & Jacobson, S. A new view of the deterioration and wear of WC/Co cemented carbide rock drill buttons. *Wear* 264, 1129–1141 (2008).
59. Miyazaki, K., Ohno, T., Karasawa, H., Takakura, S. & Eko, A. Performance evaluation of polycrystalline diamond compact percussion bits through laboratory drilling tests. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 87, 1–7 (2016).
60. Jack L. Wise, D. W. R. Effects of Design and Processing Parameters on Performance of PDC Drag Cutters for HardRock Drilling.
61. Silva, W. M. et al. Performance of carbide tools coated with DLC in the drilling of SAE 323 aluminum alloy. *Surf. Coat. Technol.* 284, 404–409 (2015).
62. Shaw, L. L., Luo, H. & Zhong, Y. WC-18 wt.% Co with simultaneous improvements in hardness and toughness derived from nanocrystalline powder. *Mater. Sci. Eng. A* 537, 39–48 (2012).

63. Konyashin, I. & Ries, B. Wear damage of cemented carbides with different combinations of WC mean grain size and Co content. Part II: Laboratory performance tests on rock cutting and drilling. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 45, 230–237 (2014).
64. Sin, H., Saka, N. & Suh, N. P. Abrasive wear mechanisms and the grit size effect. *Wear* 55, 163–190 (1979).
65. Ersoy, A. & Waller, M. D. Wear characteristics of PDC pin and hybrid core bits in rock drilling. *Wear* 188, 150–165 (1995).
66. Wojtanowicz, A. K. & Kuru, E. Mathematical Modeling of PDC Bit Drilling Process Based on a Single-Cutter Mechanics. *J. Energy Resour. Technol.* 115, 247–256 (1993).
67. Yahiaoui, M., Gerbaud, L., Paris, J.-Y., Denape, J. & Dourfaye, A. A study on PDC drill bits quality. *Wear* 298–299, 32–41 (2013).
68. Marou Alzouma, O., Azman, M.-A., Yung, D.-L., Fridrici, V. & Kapsa, P. Influence of different reinforcing particles on the scratch resistance and microstructure of different WC–Ni composites. *Wear* 352–353, 130–135 (2016).
69. Poetschke, J., Richter, V. & Holke, R. Influence and effectivity of VC and Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> grain growth inhibitors on sintering of binderless tungsten carbide. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 31, 218–223 (2012).
70. Fang, Z. & Eason, J. W. Study of nanostructured WC-Co composites. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 13, 297–303 (1995).
71. Jia, K., Fischer, T. E. & Gallois, B. Microstructure, hardness and toughness of nanostructured and conventional WC-Co composites. *Nanostructured Mater.* 10, 875–891 (1998).
72. Hu, J., Li, D. Y. & Llewellyn, R. Computational investigation of microstructural effects on abrasive wear of composite materials. *Wear* 259, 6–17 (2005).
73. Kim, H.-M., Kim, T.-S., Suryanarayana, C. & Chun, B.-S. Microstructure and wear characteristics of rapidly solidified Al–Pb–Cu alloys. *Mater. Sci. Eng. A* 287, 59–65 (2000).
74. Özer, A., Kriven, W. M. & Tür, Y. K. The effect of 3 mol% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> stabilized ZrO<sub>2</sub> produced by a steric entrapment method on the mechanical and sintering properties of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> based cermets. *Mater. Sci. Eng. A* 556, 878–884 (2012).
75. Yilmaz, O. & Buytoz, S. Abrasive wear of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-reinforced aluminium-based MMCs. *Compos. Sci. Technol.* 61, 2381–2392 (2001).
76. Bellin, F., Dourfaye, A., King, W., & Thigpen, M., The current state of PDC bit technology. *World Oil* 231, 41–46 (2010).
77. Moore, M. A. A review of two-body abrasive wear. *Wear* 27, 1–17 (1974).

## Chapitre 1 : Etude bibliographique et usure des dents de tunneliers

78. Montgomery, R. S. The mechanism of percussive wear of tungsten carbide composites. *Wear* 12, 309–329 (1968).
79. Beste, U., Coronel, E. & Jacobson, S. Wear induced material modifications of cemented carbide rock drill buttons. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 24, 168–176 (2006).
80. Beste, U., Hartzell, T., Engqvist, H. & Axén, N. Surface damage on cemented carbide rock-drill buttons. *Wear* 249, 324–329 (2001).
81. Blombery, R. I., Perrot, C. M. & Robinson, P. M. Abrasive wear of tungsten carbide-cobalt composites. I. Wear mechanisms. *Mater. Sci. Eng.* 13, 93–100 (1974).
82. Zhao, J. & et al. Tunnelling through a frequently changing and mixed ground: A case history in Singapore/ Tunnelling and Underground Space Technology 22. 388–400 (2007).
83. Beste, U., Jacobson, S. & Hogmark, S. Rock penetration into cemented carbide drill buttons during rock drilling. *Wear* 264, 1142–1151 (2008).
84. Konyashin, I. et al. Novel ultra-coarse hardmetal grades with reinforced binder for mining and construction. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 23, 225–232 (2005).
85. Date, S. W. & Malkin, S. Effects of grit size on abrasion with coated abrasives. *Wear* 40, 223–235 (1976).
86. Morrell, R. & Gant, A. J. Edge chipping of hard materials. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 19, 293–301 (2001).
87. Grady, D. Impact failure and fragmentation properties of tungsten carbide. *Int. J. Impact Eng.* 23, 307–317 (1999).
88. Sheikh-Ahmad, J. Y. & Bailey, J. A. The wear characteristics of some cemented tungsten carbides in machining particleboard. *Wear* 225–229, Part 1, 256–266 (1999).
89. ASTM G119-03, Standard Guide for Determining Synergism Between Wear and Corrosion, ASTM International, West Conshohocken, PA. (2003).
90. Watson, S. W., Friedersdorf, F. J., Madsen, B. W. & Cramer, S. D. Methods of measuring wear-corrosion synergism. *Wear* 181, 476–484 (1995).
91. Acchar, W., Gomes, U. U., Kaysser, W. A. & Goring, J. Strength Degradation of a Tungsten Carbide-Cobalt Composite at Elevated Temperatures. *Mater. Charact.* 43, 27–32 (1999).
92. Gupta, A., Chattopadhyaya, S. & Hloch, S. Critical Investigation of Wear Behaviour of WC Drill Bit Buttons. *Rock Mech. Rock Eng.* 46, 169–177 (2012).
93. Kellner, F. J. J., Hildebrand, H. & Virtanen, S. Effect of WC grain size on the corrosion behavior of WC-Co based hardmetals in alkaline solutions. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 27, 806–812 (2009).

## Chapitre 1 : Etude bibliographique et usure des dents de tunneliers

94. Pugsley, V. A. et al. The influence of a corrosive wood-cutting environment on the mechanical properties of hardmetal tools. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 19, 311–318 (2001).
95. Yang, X., Li, X. & Lu, Y. Wear characteristics of the cemented carbide blades in drilling limestone with water jet. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 29, 320–325 (2011).
96. Zhou, Y. et al. Experimental study of WC–Co cemented carbide air impact rotary drill teeth based on failure analysis. *Eng. Fail. Anal.* 36, 186–198 (2014).
97. Milman, Y. V., Luyckx, S. & Northrop, I. Influence of temperature, grain size and cobalt content on the hardness of WC–Co alloys. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 17, 39–44 (1999).
98. Milman, Y. V., Chugunova, S., Goncharuck, V., Luyckx, S. & Northrop, I. T. Low and high temperature hardness of WC-6 wt%Co alloys. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 15, 97–101 (1997).

## Chapitre 2 : Présentation du dispositif expérimental et des matériaux utilisés

---

Ce chapitre présente le banc d'essai d'impact-glissement ainsi que les paramètres expérimentaux utilisés.

Les propriétés mécaniques et la microstructure des matériaux étudiés sont décrites.

Les outils pour l'analyse phénoménologique y sont également présentés.

## Table des matières

<b>I. Introduction.....</b>	<b>49</b>
<b>II. Le banc d'essai d'impact-glissement.....</b>	<b>49</b>
II.1. Description du dispositif expérimental.....	49
II.2. Pilotage, acquisition et traitement des données .....	51
II.2.1. La force d'impact et le déplacement de la bille.....	51
II.2.2. L'énergie d'impact .....	52
II.3 Essais sous air et sous argon.....	53
<b>III. Les matériaux étudiés.....</b>	<b>53</b>
III.1. Les carbures de tungstène.....	53
III.1.1. Géométrie des échantillons .....	53
III.1.2. Microstructure et composition chimique .....	54
III.1.2.1. Matériau de référence E6 .....	54
III.1.2.2. Les carbures WCR1 et WNZVC.....	55
III.1.3. Propriétés mécaniques .....	56
III.2. Billes impactant les carbures de tungstène.....	57
<b>IV. Les outils pour l'analyse et l'observation des traces d'usure .....</b>	<b>57</b>
<b>V. Conclusions .....</b>	<b>58</b>
<b>VI. Références.....</b>	<b>60</b>

## I. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation du banc d'essai d'impact-glisement ainsi qu'à la description des matériaux utilisés. Une première partie décrit le banc d'essai expérimental qui permet de générer des impacts d'une bille sur un plan rectangulaire. Elle est complétée par la présentation du système d'acquisition et le traitement des données. Ensuite, dans une deuxième partie, les matériaux sont présentés avec une description des carbures de tungstène et de la bille. Enfin, les techniques de caractérisation des traces d'usure sont détaillées.

## II. Le banc d'essai d'impact-glisement

### II.1. Description du dispositif expérimental

Les essais sous impact-glisement sont réalisés à l'aide d'un banc d'essai ayant une configuration bille / plan (Fig.2.1). La bille, maintenue par un porte-bille, subit un déplacement vertical sinusoïdal généré par un actionneur électromagnétique (Fig.2.2). Le pilotage de ce dernier permet une régulation de l'amplitude de déplacement  $\delta$  de la bille. Un échantillon plan en carbure de tungstène est positionné en dessous de la bille. Il est au-dessus des lames flexibles verticales<sup>1</sup>.

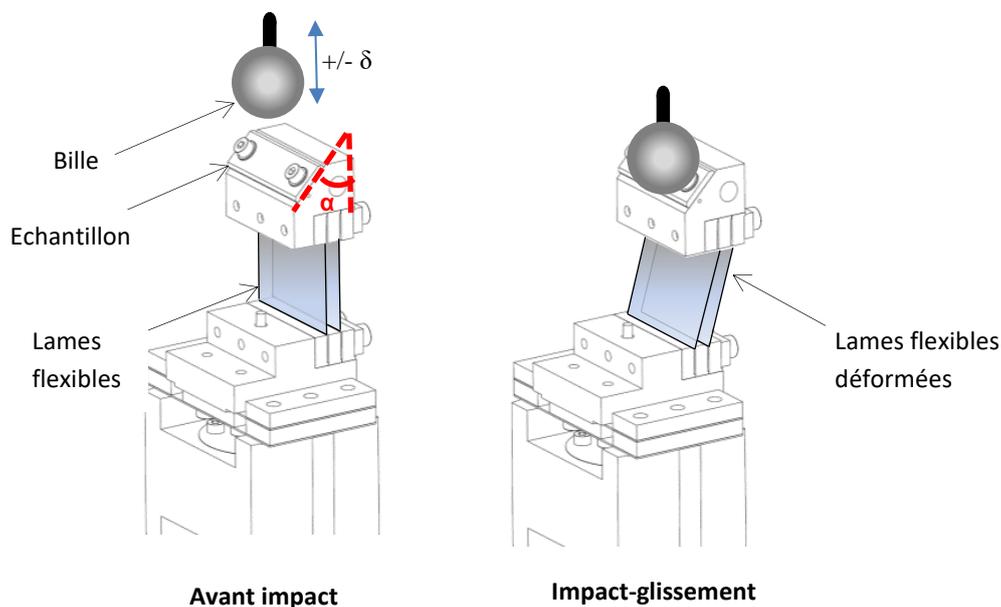


Fig.2.1. Schéma du banc d'essai avec les états "avant impact" et "impact-glisement".

Lors de l'impact de la bille sur le plan, les lames flexibles situées sous le porte-échantillon vont fléchir, sous l'effet du choc et de la masse embarquée. Le glissement est alors une conséquence de l'impact puisqu'il est généré par le choc entre la bille et le plan qui conduit au fléchissement des lames flexibles.

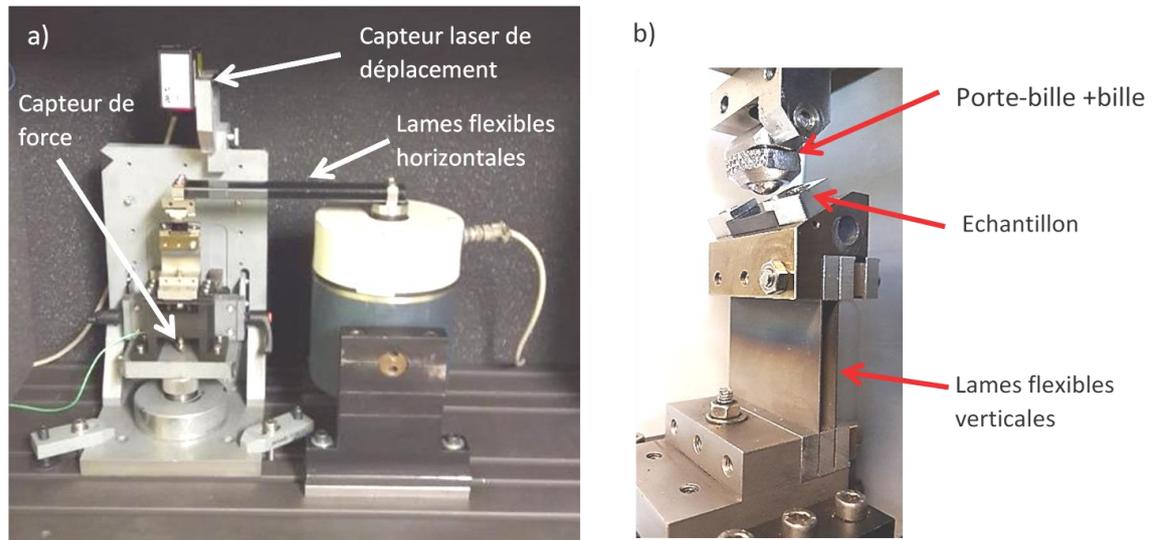


Fig. 2.2. Banc d'essai avec un angle  $\alpha$  de  $60^\circ$  :  
 (a) vue générale,  
 (b) image rapprochée de la zone de contact bille / plan.

La raideur des lames flexibles et l'angle d'impact  $\alpha$  (qui correspond à l'inclinaison du porte-échantillon par rapport à la verticale) sont des paramètres importants pour les caractéristiques de l'impact-glisement. Plus la raideur est importante, plus le glissement généré est faible. Un impact normal à la surface ( $\alpha=90^\circ$ ) conduit à un glissement macroscopique nul. Ces conditions correspondent à un « impact pur ». A contrario, un angle faible atténue l'impact et accentue le glissement. La fig.2.3 montre les différentes configurations angulaires de l'échantillon plan par rapport au mouvement de la bille. La bille suit une trajectoire verticale.

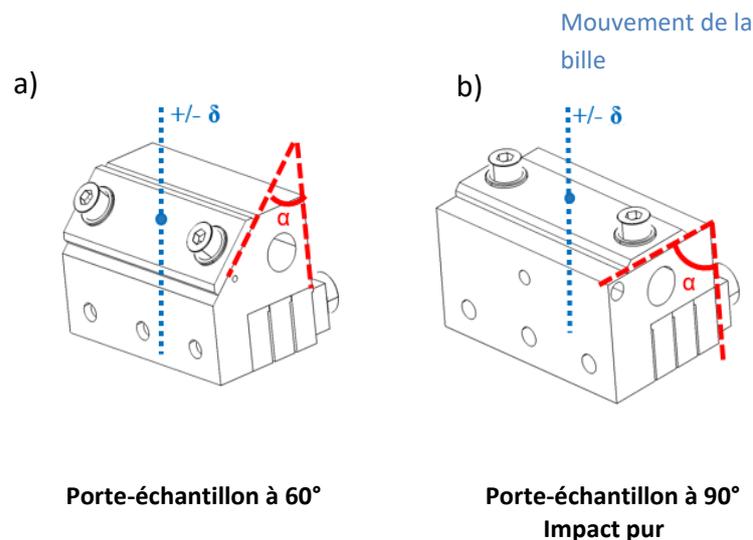


Fig.2.3. Schémas des porte-échantillons :  
 (a) angle d'impact à  $60^\circ$ ,  
 (b) angle d'impact à  $90^\circ$ .

Sur notre dispositif expérimental, nous pouvons alors faire varier plusieurs paramètres expérimentaux :

- L'angle d'impact (entre 30° et 90°),
- La fréquence d'impact (16 Hz a été choisi pour tous nos essais),
- L'énergie d'impact (entre 4 mJ / impact et 10 mJ / impact),
- Le nombre de cycles d'impact-glissement (et donc la durée des essais),
- La nature des matériaux en contact,
- L'environnement du contact (présence de gaz).

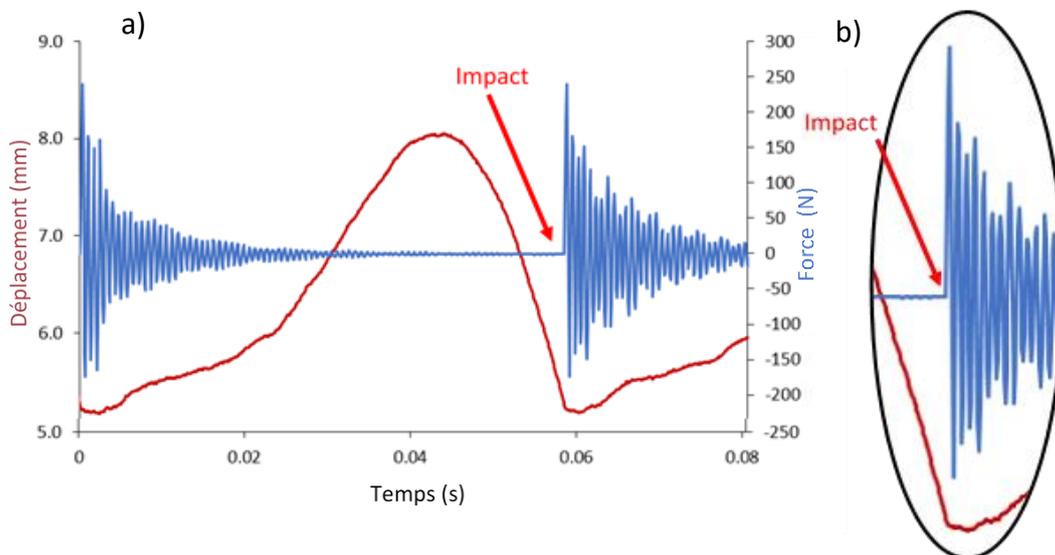
## II.2. Pilotage, acquisition et traitement des données

Nous disposons de deux capteurs au niveau de banc d'essai :

- un capteur laser de position qui permet de suivre le déplacement vertical de la bille,
- un capteur piézoélectrique qui mesure l'effort vertical sous les lames flexibles (supportant le porte échantillon plan et l'échantillon).

### II.2.1. La force d'impact et le déplacement de la bille

L'impact correspond au moment où la force d'impact mesurée commence à ne plus être nulle. Le déplacement de la bille est mesuré par le capteur laser (situé au-dessus de la zone de contact bille / plan). La fig.2.4 présente un exemple d'évolution du déplacement de la bille et de la force mesurée en fonction du temps lors d'un test.



*Fig.2.4. Exemple d'un essai à 4 mJ :  
(a) évolutions de la force d'impact et du déplacement de la bille,  
(b) agrandissement du graphe au moment où se produit l'impact.*

Le capteur piézoélectrique situé sous les lames verticales permet de mesurer indirectement la force d'impact. Lorsque la bille entre en contact avec le plan, le capteur piézoélectrique voit une augmentation rapide de la valeur de la force. Cette mesure permet

de savoir quand l'impact se produit. A ce moment-là, la vitesse d'impact de la bille est calculée par dérivation du signal de déplacement de la bille

### II.2.2. L'énergie d'impact

L'énergie d'impact est alors calculée comme étant l'énergie cinétique de la masse « impactante » (la masse de la bille, du porte-bille et des lames flexibles horizontales) au moment de l'impact :

$$E = \frac{1}{2} mV^2 \quad (II.1)$$

avec  $E$  : énergie d'impact (4 mJ à 10 mJ pour nos tests)  
 $m$  : masse embarquée autour de 138 g (bille + porte-bille + lames flexibles horizontales)<sup>256</sup>  
 $V$  : vitesse d'impact en m/s

La Fig.2.5 illustre un exemple d'enregistrement des grandeurs mesurées lors d'un essai.

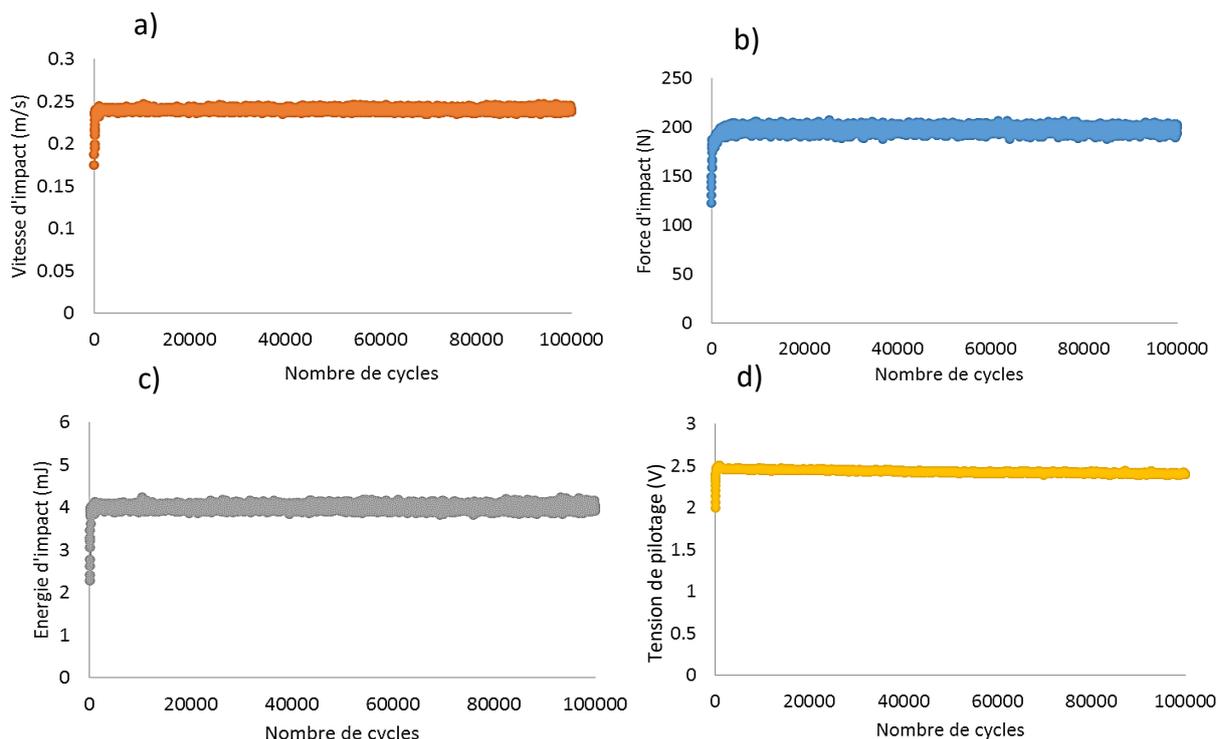


Fig.2.5. Exemple d'évolution des paramètres expérimentaux d'un essai de 100 000 cycles à 4 mJ : (a) vitesse d'impact, (b) force d'impact, (c) énergie d'impact, (d) tension appliquée au pot vibrant.

Pour les essais réalisés, l'énergie d'impact est asservie à une valeur choisie (allant de 4 mJ à 10 mJ) en pilotant le mouvement du pot vibrant.

Des fluctuations autour de la valeur cible peuvent exister. Tout au long de l'essai, nous pouvons suivre l'évolution de l'énergie d'impact, de la tension de pilotage du pot vibrant, de la force d'impact et de la vitesse d'impact.

### II.3 Essais sous air et sous argon

Le banc d'essai peut fonctionner sous différents environnements. Dans notre étude, nous réalisons des essais sous air (à l'air ambiant) et des essais sous argon. Les essais sous argon ont été réalisés en utilisant un tube relié à une bonbonne d'argon avec un débit de 2 l/min visant la zone d'impact. L'argon vient donc à l'interface à l'arrière du contact, pour le plan, afin de réduire la présence d'oxygène vers l'interface et réduire une éventuelle oxydation. Le tube est positionné de façon à ce que le déplacement de la bille ne soit pas perturbé (Fig.2.6).

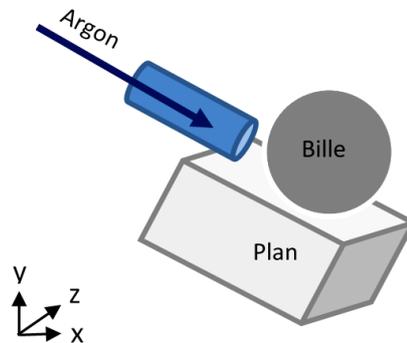


Fig.2.6. Schéma du banc d'essai avec le flux d'argon à l'arrière du contact.

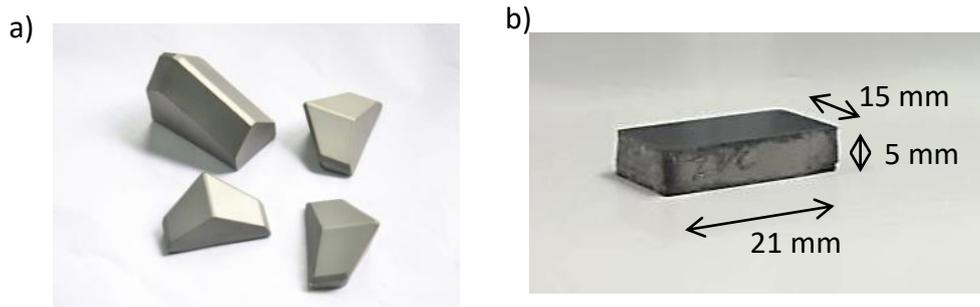
## III. Les matériaux étudiés

### III.1. Les carbures de tungstène

Les carbures de tungstène utilisés pour cette étude sont au nombre de trois et sont fournis par l'Université Technologique de Tallinn (TUT). Un des trois carbures est utilisé industriellement pour les inserts dans les dents de tunnelier et sert de référence (E6). Les deux autres sont des matériaux développés récemment (WCR1 et WNZVC).

#### III.1.1. Géométrie des échantillons

La configuration du banc permet d'utiliser des échantillons en carbure de tungstène parallélépipédiques de 21 x 15 x 5 mm (Fig.2.7). Ils sont fixés au niveau du support de l'échantillon avec des brides. Les échantillons sont issus des inserts avec leur géométrie particulière, qui sont découpés à l'aide d'une tronçonneuse avec un disque diamanté.



*Fig.2.7. Photographies des échantillons :  
(a) inserts en carbure de tungstène avant utilisation,  
(b) échantillons découpés dans les inserts et utilisés pour les essais.*

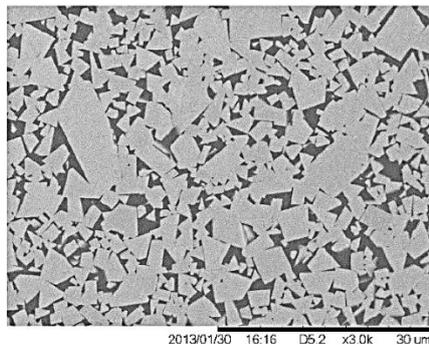
Les surfaces étudiées sont polies en utilisant deux disques diamantés avec des grains de tailles 40 et 20  $\mu\text{m}$ . Ensuite, la finition se fait sur le tapis de polissage TOP avec une suspension diamantée de 9  $\mu\text{m}$ , puis sur le tapis de polissage RAM avec une suspension diamantée de 3  $\mu\text{m}$ . La rugosité,  $R_a$ , est de l'ordre de 0,01  $\mu\text{m}^2$ . Avant les essais, les échantillons sont nettoyés en utilisant un bain ultrasons dans l'acétone.

### III.1.2. Microstructure et composition chimique

La microstructure des échantillons de carbure de tungstène est liée au processus de fabrication et à leur composition.

#### III.1.2.1. Matériau de référence E6

Le matériau de référence E6 est élaboré par frittage conventionnel. Des grains de carbure de tungstène sont chauffés à haute température sous pression avec du cobalt (liant métallique). Des détails sur les méthodes d'élaboration sont inaccessibles en raison de leur confidentialité. La Fig.2.8 montre une image par microscopie électronique à balayage du carbure E6. Ce matériau est caractérisé par un taux élevé en liant cobalt (15% en masse), et il contient donc 85% de grains de carbure.



*Fig.2.8. Observation du carbure E6 par microscopie électronique à balayage<sup>3</sup>.*

On observe sur la micrographie des grains clairs qui sont des grains de carbure de tungstène (5-10  $\mu\text{m}$ ). Les taches noires correspondent à la matrice en cobalt.

### III.1.2.2. Les carbures WCR1 et WNZVC

Les carbures WCR1 et le WNZVC sont particuliers car les processus de fabrication sont différents.

#### Le carbure WCR1

Le carbure WCR1 est composé de poudre de W et de Co (8% en masse) ainsi que de carbone. Il est obtenu par frittage réactionnel. Sa structure est caractérisée par des grains de petite taille, de l'ordre de 2  $\mu\text{m}$  (Fig.2.9). Cela apporte une meilleure résistance à l'usure et protège la matrice métallique des déformations plastiques<sup>3</sup>. Sur la photo, on peut voir des grains de WC de tailles variables incrustés dans une matrice en cobalt (en noir).

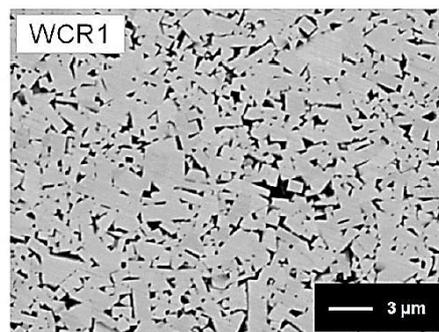


Fig.2.9. Observation par microscopie électronique à balayage du WCR1<sup>3</sup>.

#### Le carbure WNZVC

Ce carbure a la particularité d'avoir du nickel comme liant (8% en masse) au lieu du cobalt. Le nickel est moins cher que le cobalt, ce qui réduit considérablement les coûts de fabrication de ces carbures de tungstène. De plus, le nickel a une meilleure résistance à la corrosion, à l'érosion et à la température<sup>3-5</sup>. Il présente également de meilleures propriétés en terme de mouillabilité que le cobalt, ce qui est intéressant lors de l'ajout des additifs, en particulier la zircone<sup>6-9</sup>. Le carbure WNZVC est également le matériau parmi les trois carbures qui est caractérisé par des additifs rajoutés lors du frittage. Il s'agit du  $\text{ZrO}_2$  (3% en masse), du VC (0,5 % en masse) et du  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  (0,5 % en masse). Ces additifs vont empêcher le grossissement des grains au cours du frittage et permettre d'avoir une taille relativement uniforme des grains<sup>6</sup>. La Fig.2.10 présente une observation au microscope électronique à balayage du carbure WNZVC.

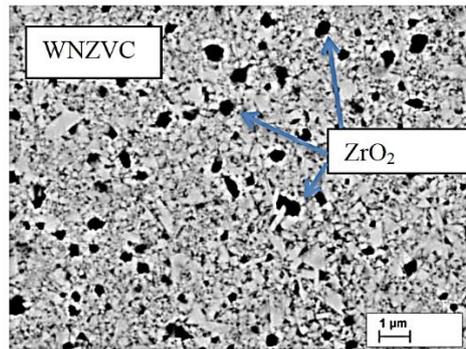


Fig.2.10. Observation du WNZVC par microscopie électronique à balayage <sup>3</sup>.

Les grains clairs correspondent aux grains de carbure de tungstène et les taches noires correspondent aux grains de  $ZrO_2$ . Le liant en nickel n'est pas facilement visible sur cette micrographie. Nous pouvons remarquer que les grains ont une taille de l'ordre du micromètre ou moins.

### III.1.3. Propriétés mécaniques

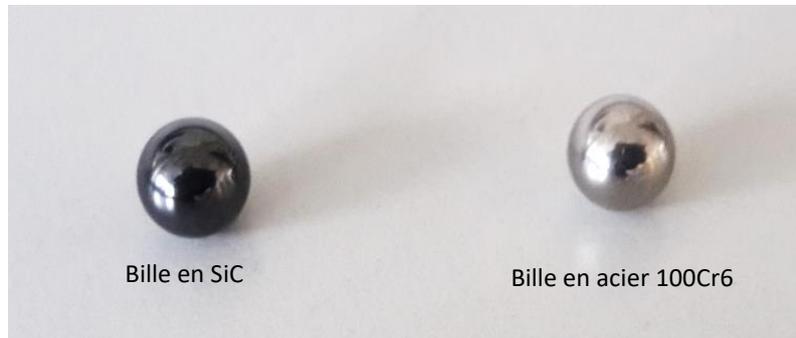
La dureté et la ténacité sont des propriétés classiquement antagonistes (Chap I). Un compromis entre ces deux caractéristiques permet d'avoir un matériau avec des propriétés optimales. Le tableau 2.1 présente ces propriétés mécaniques et le module de Young pour les trois matériaux. Le matériau de référence est le moins dur avec la ténacité la plus élevée.

Tableau.2.1. Dureté et ténacité des matériaux en carbures de tungstène <sup>3</sup>. La dureté est obtenue en utilisant une machine Indectec HV, avec six mesures réalisées pour chaque matériau <sup>3</sup>. La ténacité est déterminée par indentation, à l'aide du logiciel Omnimet Imaging <sup>3,10</sup>.

Matériaux	Composition	Dureté (HV <sub>30</sub> )	Ténacité (MPa.√m)	Module d'élasticité (GPa)
Carbure E6	WC + liant Co	1050	15,8	380
Carbure WCR1	WC + liant Co	1550	11,3	571
Carbure WNZVC	WC + liant Ni + additifs (ZrO <sub>2</sub> + VC + Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> )	1790	9,0	538

### III.2. Billes impactant les carbures de tungstène

Le dispositif d'essai utilise des billes de diamètre 10 mm. Deux matériaux ont été utilisés l'acier 100Cr6 (traitement thermique classique de billes de roulements à billes) et le SiC (Fig.2.11).



*Fig.2.11. Billes utilisées pour les tests d'impact-glisement.*

La bille en SiC est quatre fois plus dure que celle en acier. Ceci permet de travailler dans des conditions plus sévères et de réduire les phénomènes de déformation plastique de la bille (Tableau.2.2).

*Tableau.2.2. Propriétés mécaniques et rugosité Ra des billes.*

<i><b>Matériaux</b></i>	<i><b>Dureté (HV<sub>30</sub>)</b></i>	<i><b>Rugosité (Ra, μm)</b></i>	<i><b>Module d'élasticité (GPa)</b></i>
100Cr6	750	0,32	210
SiC	2800	0,20	410

Les rugosités mesurées par interférométrie montrent que les deux billes ont des rugosités similaires.

## IV. Les outils pour l'analyse et l'observation des traces d'usure

L'analyse des traces d'usure est faite en se basant sur les faciès d'usure observés par l'interféromètre optique, le microscope numérique et sur les images obtenues au microscope électronique à balayage avec analyse EDX.

## Chapitre 2 : Présentation du dispositif expérimental et des matériaux utilisés

L'observation des traces d'usure se fait à l'aide de microscopes qui permettent d'analyser les différents mécanismes d'usure qui se sont déroulés lors du contact impact-glisserment. Trois microscopes sont utilisés : le microscope optique numérique (Keyence), le microscope électronique à balayage (TESCAN VEGA) et l'interféromètre optique (Bruker).

- Le microscope optique numérique à très haute résolution (Keyence) apporte des informations sur la forme des traces et sur le profil d'usure. Il permet d'observer les faciès d'usure et de situer les zones intéressantes à analyser plus en détail,
- Le microscope électronique à balayage (TESCAN) donne des images avec des détecteurs d'« électrons secondaires » (SE) et d'« électrons rétrodiffusés » (BSE). Le détecteur SE permet d'avoir une vision claire et détaillée de la surface des matériaux, tandis que le détecteur BSE apporte des informations sur la topographie de surface. L'imagerie peut être couplée à l'analyse EDX pour analyser chimiquement les surfaces tout en étudiant morphologiquement les traces. Un dépôt d'or est effectué sur les échantillons en carbure de tungstène et sur les billes en SiC. Des traces d'usure peuvent également être observées en coupe, pour analyser les endommagements en dessous de la surface de contact,
- Enfin l'interféromètre, de marque Bruker, donne des informations sur les profils d'usure à la fois des traces de la bille et des carbures de tungstène. Cette méthode sans contact permet de réaliser des images topographiques 3D et de quantifier les pertes de matière (volumes d'usure).

## V. Conclusions

Nous avons utilisé pour la partie expérimentale de notre travail un banc d'essai d'impact-glisserment développé au LTDS. Ce banc d'essai permet d'imposer des sollicitations simulant les chocs que subissent les inserts des dents en carbure de tungstène. Le banc d'essai est sous la configuration bille/plan et permet d'impacter une bille contre un échantillon parallélépipédique. La composante de glissement est représentative du frottement entre les inserts et le sol lors de la rotation de la roue de coupe. L'angle d'impact permet de faire varier cette composante de glissement. L'énergie d'impact, le nombre d'impacts et l'angle d'impact sont des paramètres pour nos essais.

Nous avons étudié trois types de carbure de tungstène et deux types de billes. Les carbures de tungstène sont différents par leurs propriétés de dureté et de ténacité qui leur sont conférés par leur microstructure, la présence d'additifs et la nature du liant métallique. Un des trois matériaux, E6, est considéré comme « matériau de référence ». Le WCR1 et le WNZVC sont plus durs que le carbure E6. E6 et WCR1 ont en commun le même liant métallique : le cobalt. Par contre, WCR1 présente la particularité d'avoir des grains de WC plus petits. Ils apportent de la dureté au composite, tandis que les micrograins renforcent le carbure en terme de ténacité. Le carbure WNZVC a la caractéristique d'avoir le nickel comme phase liante au lieu du cobalt.

## Chapitre 2 : Présentation du dispositif expérimental et des matériaux utilisés

Deux billes sont utilisées pour impacter ces carbures : une bille en acier 100Cr6 et une bille en SiC. Ces deux billes de dureté différente permettent de travailler dans des conditions plus sévères (avec la bille en SiC).

## VI. Références

1. Messaadi, M., Kermouche, G. & Kapsa, P. Numerical and experimental analysis of dynamic oblique impact: Effect of impact angle. *Wear* 332–333, 1028–1034 (2015).
2. Messaadi, M. Dégradation des aciers frittés sous impact-glissement. n° 2014-11, 2014 (Ecully, Ecole centrale de Lyon, 2014).
3. Marou Alzouma, O. Durabilité tribologique de matériaux pour insert de dents de tunnelier. n° 2015-42, 2015, (Ecully, Ecole centrale de Lyon, 2015).
4. Aristizabal, M., Sanchez, J. M., Rodriguez, N., Ibarreta, F. & Martinez, R. Comparison of the oxidation behaviour of WC–Co and WC–Ni–Co–Cr cemented carbides. *Corros. Sci.* 53, 2754–2760 (2011).
5. Aristizabal, M. et al. 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, 15–21 (2012).
6. Olubambi, P. A., Alaneme, K. K. & Andrews, A. Mechanical and tribological characteristics of tungsten cermet composites sintered with Co-based and zirconia mixed binders. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 50, 163–177 (2015).
7. An, L., Han, J. & Chen, J. Microstructure and mechanical properties of WC-20wt% Co/ZrO<sub>2</sub>(3Y) cermet composites. *J. Univ. Sci. Technol. Beijing Miner. Metall. Mater.* 13, 174–177 (2006).
8. Jiang, D., Van der Biest, O. & Vleugels, J. ZrO<sub>2</sub>–WC nanocomposites with superior properties. *J. Eur. Ceram. Soc.* 27, 1247–1251 (2007).
9. Venkateswaran, T., Sarkar, D. & Basu, B. WC–ZrO<sub>2</sub> composites: processing and unlubricated tribological properties. *Wear* 260, 1–9 (2006).
10. Sergejev, F. & Antonov, M. Comparative study on indentation fracture toughness measurements of cemented carbides. *Proc. Est. Acad. Sci.* 12, 388–398 (2006).

## Chapitre 3 : Résultats expérimentaux et analyse des traces d'usure

---

Ce chapitre présente les résultats des essais d'impacts-glisserment en considérant l'effet des paramètres expérimentaux. Dans un premier temps, l'influence de l'énergie d'impact sur les mécanismes d'usure est discutée. L'influence de la nature de la bille est aussi analysée. Puis l'effet de l'angle d'impact sur les modes d'usure est étudié. Enfin, la nature du contact est mise en exergue avec l'influence de l'environnement de contact.

## Table des matières

<b>I. Introduction.....</b>	<b>63</b>
<b>II. Effet de l'énergie d'impact totale sur l'usure .....</b>	<b>63</b>
II.1. Conditions expérimentales.....	63
II.2. Analyse des modes d'usure .....	64
II.2.1. Mécanismes d'enlèvement de matière .....	64
II.2.2. Mécanisme de transfert.....	70
II.2.3. Mécanisme de fissuration.....	73
II.2.4. Analyse approfondie des modes d'usure .....	76
II.2.5. Synthèse sur les modes d'usure des trois carbures.....	90
II.3. Analyse quantitative de l'usure .....	90
II.4. Conclusions.....	92
<b>III. Effet de la nature de la bille sur l'usure.....</b>	<b>93</b>
III.1. Conditions expérimentales.....	93
III.2. Observations des traces et identification des mécanismes d'usure .....	93
III.2.1. Mécanismes d'usure du carbure E6.....	93
III.2.2. Mécanismes d'usure du carbure WCR1.....	97
III.2.3. Mécanismes d'usure du carbure WNZVC .....	99
III.3. Analyse quantitative de l'usure .....	102
III.4. Conclusions.....	105
<b>IV. Effet de l'angle d'impact sur l'usure .....</b>	<b>106</b>
IV.1. Conditions expérimentales.....	106
IV.2. Analyse qualitative des traces d'usure.....	106
IV.3. Analyse quantitative de l'usure.....	110
IV.4. Conclusions.....	111
<b>V. Effet de l'environnement .....</b>	<b>111</b>
V.1. Conditions expérimentales.....	111
V.2. Analyse des traces d'usure .....	111
V.2.1. Usure des carbures E6 sous argon.....	111
V.2.2. Mécanismes d'usure du carbure WNZVC .....	116
V.3. Analyse quantitative de l'usure .....	120
V.4 Conclusions.....	122
<b>VI. Discussion et synthèse des résultats.....</b>	<b>123</b>
<b>VII. Conclusions .....</b>	<b>128</b>
<b>VIII. Références.....</b>	<b>129</b>

## I. Introduction

Ce chapitre présente dans une première partie les conditions d'essais utilisées pour étudier l'effet de l'énergie d'impact, de l'angle d'impact ainsi que de la nature du contact. L'analyse des phénomènes et des mécanismes d'usure est également détaillée. L'influence de l'énergie d'impact sur les modes d'usure associée à l'analyse quantitative des volumes d'usure est discutée. Puis, nous présentons comment la nature de la bille peut apporter des changements sur l'endommagement des carbures de tungstène et sur la bille. Ensuite, on analyse l'influence de l'angle d'impact en comparant les résultats en impact à 60° et à 90°. Enfin, nous terminons ce chapitre par une étude réalisée sous argon, afin de mieux comprendre les mécanismes d'endommagement lors des impacts-glissements. Ainsi, nous pouvons comparer les modes d'usure des trois carbures de tungstène et identifier les mécanismes d'endommagement.

## II. Effet de l'énergie d'impact totale sur l'usure

Des essais avec des énergies d'impact et des nombres de cycles différents sont réalisés et les traces d'usure sont analysées qualitativement et quantitativement afin de déterminer les modes d'endommagement et de comparer la résistance à l'usure en impact-glissement des différents matériaux testés.

### II.1. Conditions expérimentales

Des essais sont réalisés avec différents nombres de cycles d'impact-glissement et énergies d'impact par cycle, avec un angle d'impact de 60°, permettant d'avoir à la fois du glissement et de l'impact, avec une fréquence d'impact de 16 Hz. Les essais sont réalisés à température ambiante et à air ambiant. Trois couples de matériaux ont été étudiés:

- bille 100Cr6 / plan carbure E6,
- bille 100Cr6 / plan carbure WCR1,
- bille 100Cr6 / plan carbure WNZVC.

Nous travaillons avec des énergies allant de 4 à 10 mJ/cycle et des nombres de cycles d'impact-glissement de 100 000, 300 000 et 10<sup>6</sup> cycles (Fig3.1).

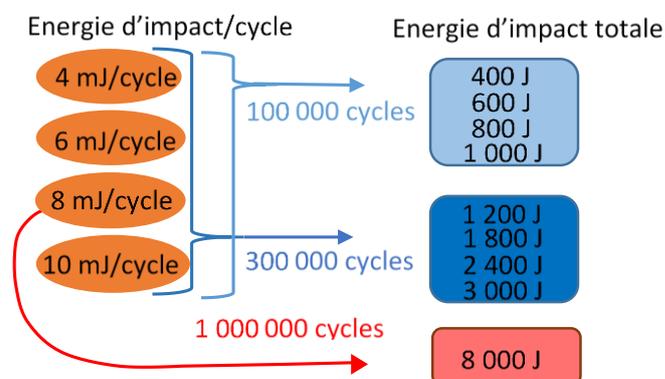


Fig. 3.1.Énergies d'impact totales pour les essais réalisés.

Nous déterminons alors « l'énergie d'impact totale » qui est le produit du nombre de cycles d'impact-glissement par l'énergie d'impact à chaque cycle.

### II.2. Analyse des modes d'usure

Les essais d'impact-glissement réalisés sont soumis à une étude phénoménologique qui permet d'associer les faciès d'usure aux mécanismes d'usure et aux phénomènes physico-chimiques. La déformation plastique, qui intervient lorsque les contraintes locales au contact bille/plan sont supérieures à la limite d'élasticité, entraînent des déformations de la bille, du liant métallique et des grains de carbure de tungstène. De même, l'amorçage et la propagation des fissures, se produisant sous l'effet de contraintes dépassant la limite à la rupture, est un phénomène à prendre en compte. Les transformations physico-chimiques de surface (les mécanismes tribochimiques) font également partie des endommagements de contact. Identifier et comprendre ces caractéristiques et les mécanismes de contact se déroulant lors de l'impact-glissement est souvent complexe en raison de la simultanéité de ces phénomènes. En effet un mécanisme peut favoriser ou même amoindrir un autre mécanisme d'usure. De plus, la combinaison de l'impact et du glissement rend cette analyse délicate. Le sens du glissement est défini comme allant du haut vers le bas sur chaque image présentée. Cela correspond à la direction d'impact de la bille sur le plan. Nous observerons principalement trois modes d'endommagement : l'abrasion, l'adhésion et la fissuration.

#### II.2.1. Mécanismes d'enlèvement de matière

Les traces d'usure généralement observées comme sur la Fig.3.2 sont généralement circulaires. Cependant, nous constatons que, dès 800 J, elles ont tendance à s'allonger dans le sens du glissement au niveau des plans.

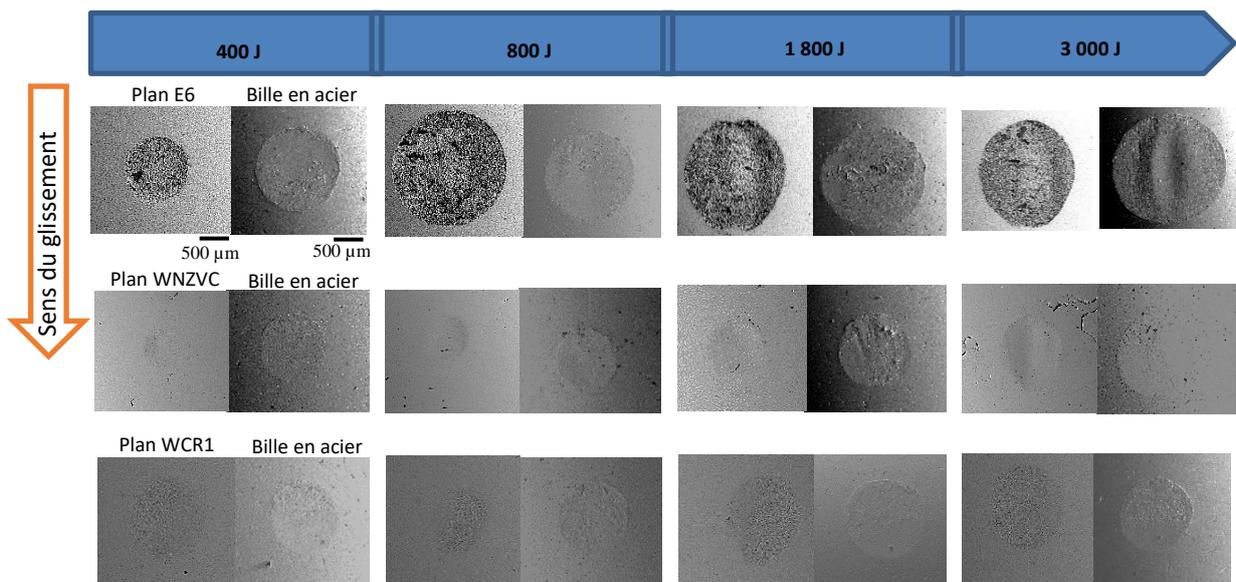


Fig. 3.2. Observations microscopiques au MEB des traces d'usure sur les plans en carbure de tungstène et sur les billes.

### Chapitre 3 : Résultats expérimentaux et analyse des traces d'usure

Le haut de la trace est la zone d'impact (cette zone correspond à la zone où la bille entre en contact avec le plan en carbure de tungstène), tandis que la zone de glissement correspond à l'allongement de la trace. Ces deux zones sont relativement distinctes. La surface de contact de la bille correspond à la fois à la zone impactant et à la zone glissée.

Sur la Fig3.2, les carbures WNZVC et WCR1 sont caractérisés par des traces d'usure avec un profil lisse et de petite taille. Les traces d'usure de E6 sont plus grandes (de l'ordre du millimètre) et peuvent aller jusqu'à 2 mm de long (Fig.3.3) dans le sens du glissement. WCR1 et WNZVC présentent des traces d'usure qui varient très peu par rapport au carbure E6 (entre 560 et 1000  $\mu\text{m}$ ).

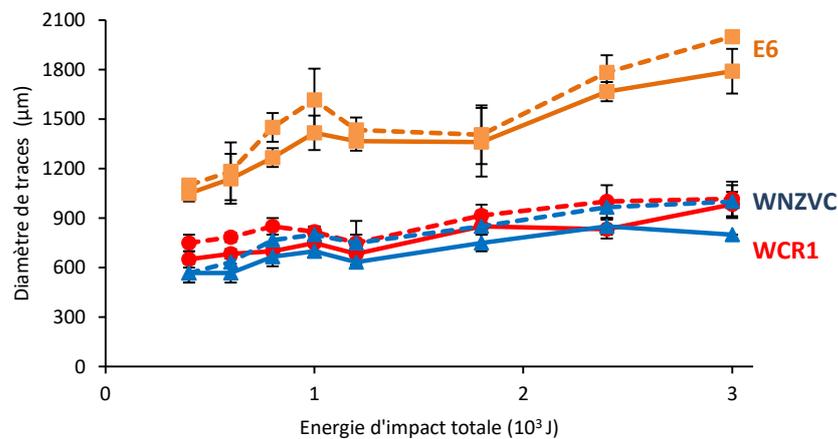


Fig. 3.3. Diamètre des traces d'usure en fonction de l'énergie d'impact totale. (traits interrompus : longueur dans le sens du glissement, trait plein : largeur dans le sens perpendiculaire au glissement).

Les longueurs des traces sont toutes légèrement supérieures à la largeur des traces (Fig.3.4). On peut voir que le rapport des longueurs sur les largeurs des traces est de 1,1, quelle que soit l'énergie d'impact totale. Cela montre effectivement que les traces d'usure restent relativement circulaires.

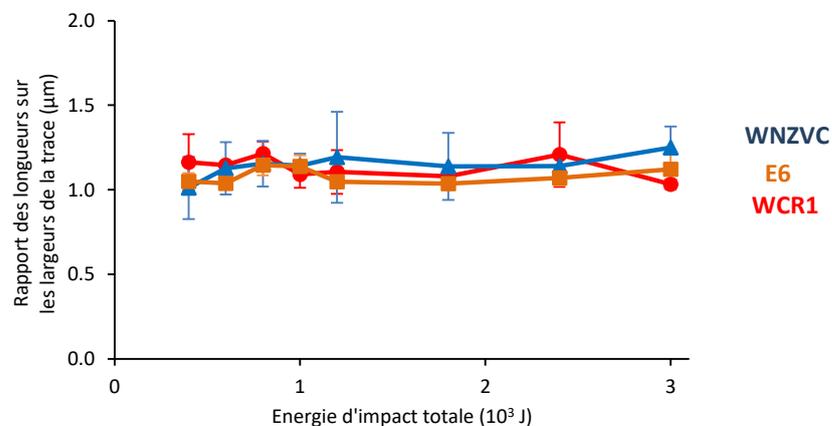


Fig. 3.4. Rapport des dimensions des traces d'usure en fonction de l'énergie d'impact totale.

La profondeur de la trace permet de mieux analyser l'usure en fonction des énergies d'impact. Une trace plus grande et moins profonde, sera caractérisée par des contraintes locales faibles dues à l'augmentation de la surface de contact. Dans notre cas, nous constatons que le carbure E6 a des traces d'usure plus larges et plus longues (Fig. 3.3) que celles des deux autres carbures. Nous pouvons également remarquer que les traces d'usure du carbure E6 présentent une profondeur d'usure plus importante que celles des carbures WNZVC et WCR1 (Fig.3.5).

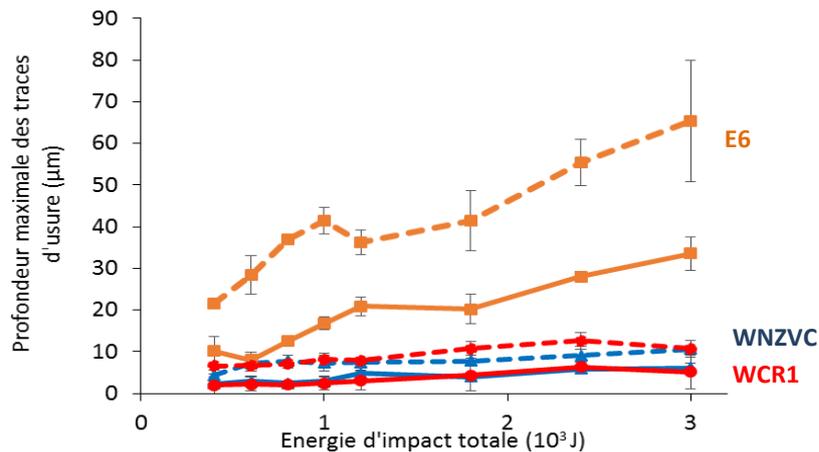


Fig. 3.5. Profondeurs des traces d'usure en fonction de l'énergie d'impact totale (traits interrompus : profondeur de la trace sur la bille, trait plein : profondeur de la trace sur le plan en carbure de tungstène).

Les profondeurs des traces d'usure du carbure E6 sont en moyenne 3 fois plus élevées que celles des carbures WNZVC et WCR1. Nous constatons que les écarts-type de ces profondeurs (prises sur trois essais à chaque fois) sont élevés à partir de 1 800 J. En effet, les traces d'usure sont peu similaires et présentent des faciès d'usure différents en fonction des échantillons testés.

Dès 1 200 J, deux profondeurs distinctes au centre de la trace commencent à apparaître pour le carbure E6. Et ces profondeurs augmentent avec l'énergie d'impact totale. Après redressement des profils d'usure, à l'aide du Logiciel Vision 64, l'analyse du profil transversal d'usure montre, à 1 200 J, une profondeur de 15 µm et une deuxième de 20 µm (Fig.3.6).

De plus, à cette énergie, la zone d'impact est marquée par une profondeur supérieure par rapport au reste de la trace. Sur le profil longitudinal, la profondeur maximale se trouve à un tiers environ de la longueur de la trace.

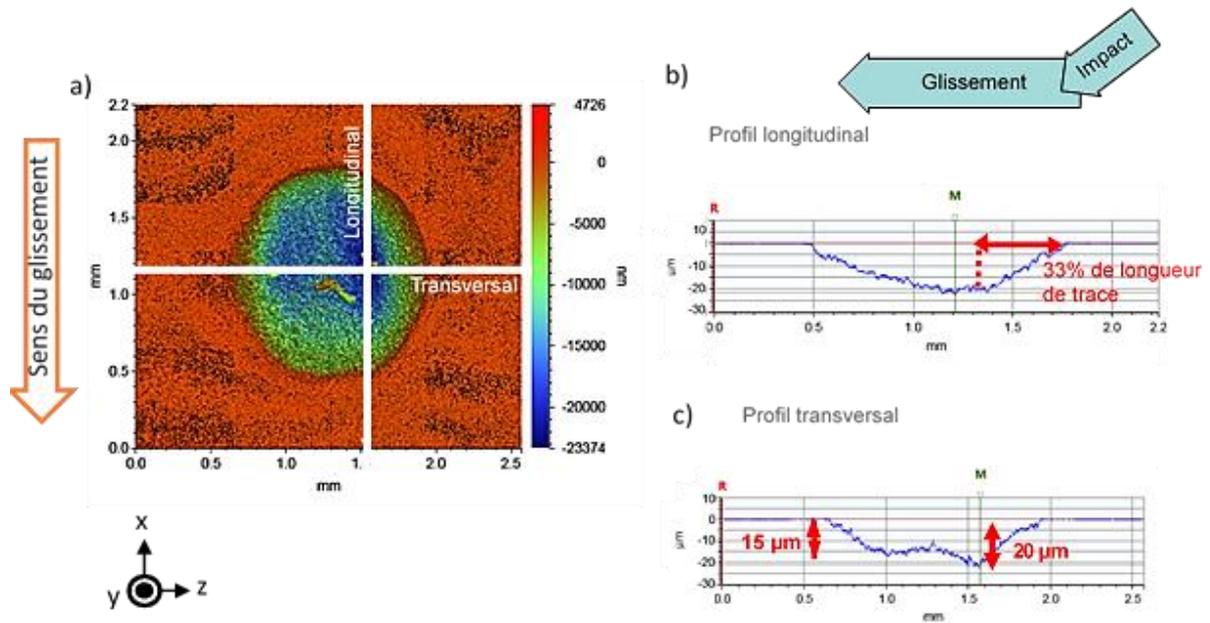


Fig. 3.6. Observations à l'interféromètre numérique :  
 (a) trace d'usure du carbure E6 à 1200 J, (b) profil longitudinal de la trace d'usure,  
 (c) profil transversal de la trace d'usure.

La présence de ces deux profondeurs peut être expliquée par une usure plus sévère sur ces zones. La bille en 100Cr6 présente ce même faciès d'usure (Fig.3.7).

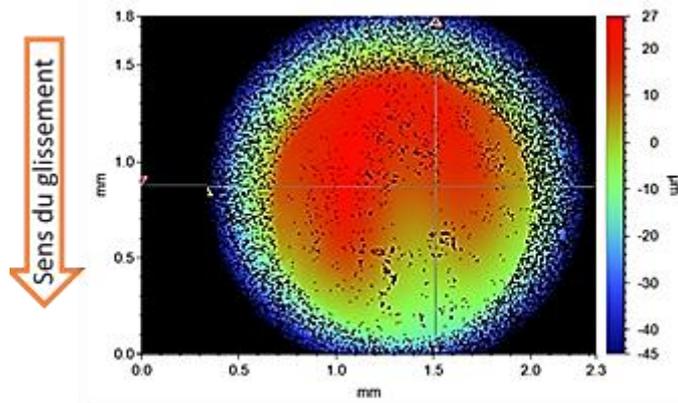


Fig. 3.7. Observation à l'interféromètre numérique de la trace d'usure de la bille non redressée.

On note une profondeur maximale de 38 µm (après redressement de la trace) (Fig.3.8). La profondeur de la trace d'usure de la bille est donc bien supérieure à celle de la trace sur le plan.

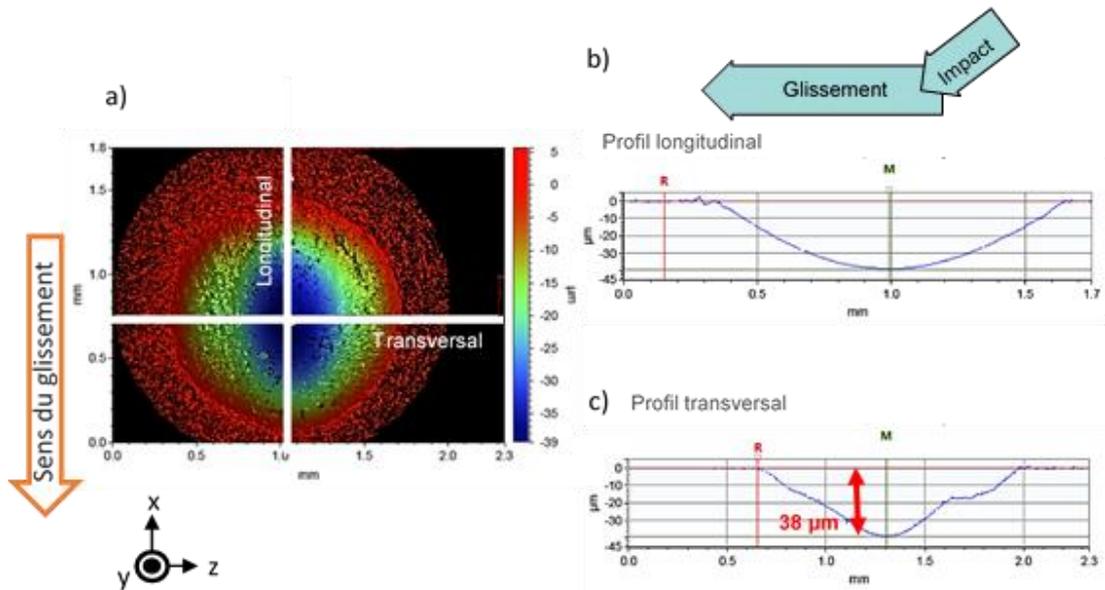


Fig. 3.8. Observations à l'interféromètre numérique :  
 (a) trace d'usure de la bille à 1 200 J après redressement du profil, (b) profil longitudinal de la trace d'usure, (c) profil transversal de la trace d'usure.

Les traces d'usure des carbures montrent des aspects de surface différents. Les grains de WC sur la trace d'usure du carbure E6 sont usés et endommagés. On peut voir des grains déformés et rayés. Ces grains WC endommagés témoignent d'une usure abrasive (Fig.3.9).

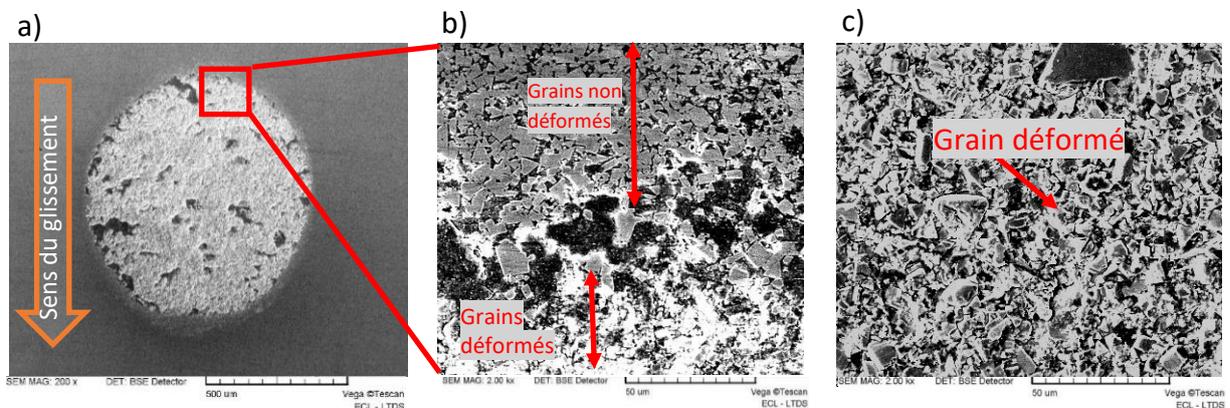


Fig. 3.9. Observations au MEB de la trace d'usure du carbure E6 à 800 J :  
 (a) trace d'usure du carbure E6, (b) vue en détail à la frontière trace/zone non usée,  
 (c) centre de la trace d'usure.

Des agglomérats de débris sont aussi présents sur toute la trace d'usure. Par contre, on remarque que les grains en dehors de la trace d'usure (autour de la trace) sont intacts et non déformés. Par contre, ceux à l'intérieur de la trace sont déformés et le liant métallique est enlevé. Typiquement, les carbures WCR1 et WNZVC présentent des traces moins endommagées avec un profil plus lisse que celui du carbure E6. Les grains sont tout de même endommagés sur la trace d'usure. Nous apercevons des grains déchaussés de la matrice. Peu de débris sont présents sur la trace d'usure du carbure WCR1. Ils sont majoritairement situés en bordure de trace (Fig.3.10).

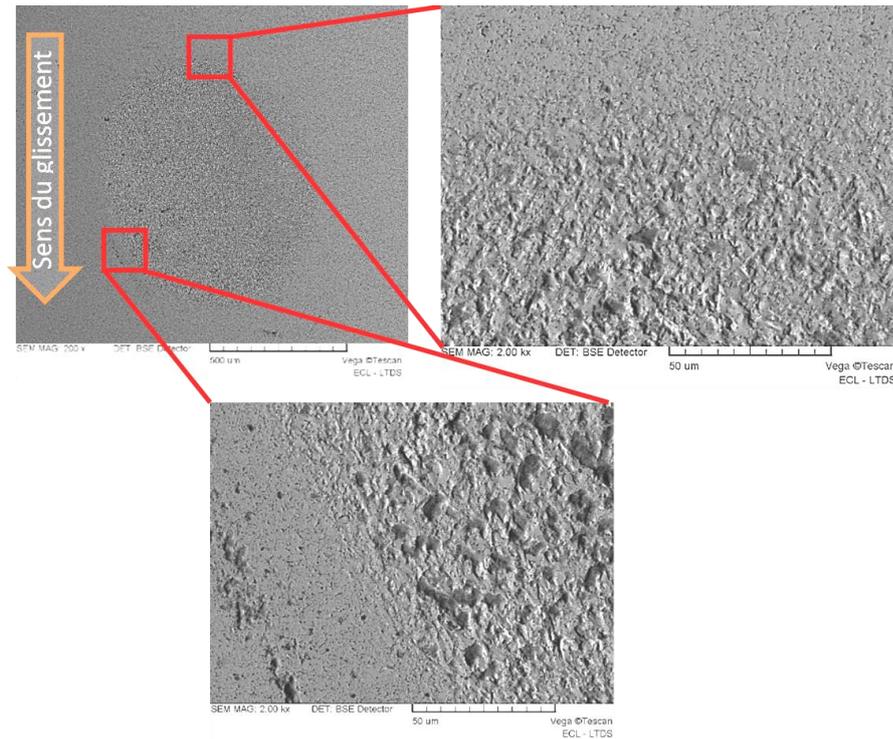


Fig. 3.10. Observations au MEB de la trace d'usure du carbure WCr1 à 1000 J.

A partir de 1 200 J, les faciès d'usure ont des traces de rayures dans le sens du glissement. On les observe aussi bien sur la bille que sur le plan et ces rayures témoignent d'une usure abrasive (Fig.3.11).

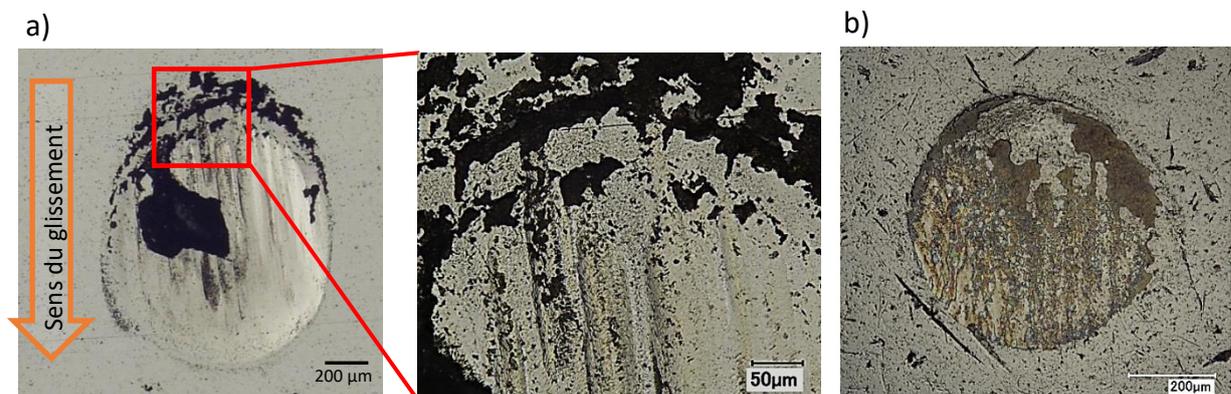


Fig. 3.11. Observation au microscope optique des traces d'usure à 1 200 J :  
(a) carbure WCr1,  
(b) bille en 100Cr6.

Sur la trace d'usure du carbure WNZVC, la présence de défauts entraîne la formation de fissures. Ces fissures deviennent rapidement le lieu d'accumulation de débris d'usure (Fig.3.12).

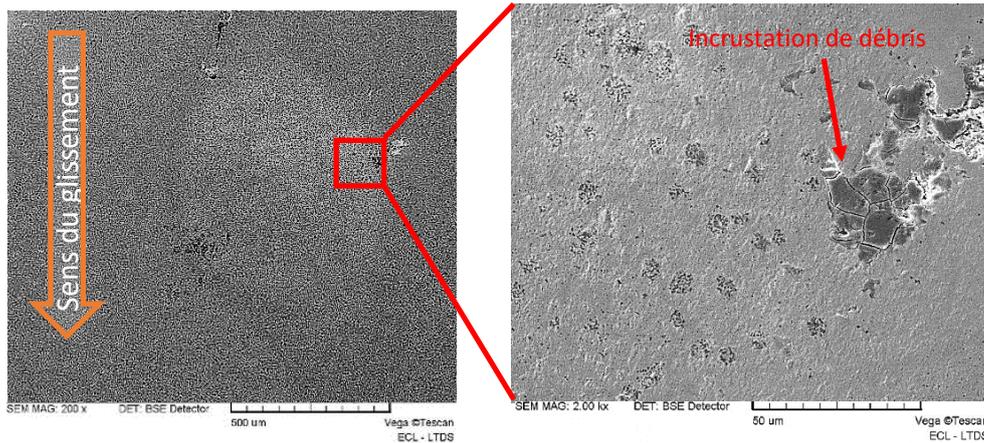


Fig. 3.12. Observations au MEB de la trace d'usure du carbure WNZVC à 1000 J.

Nous pouvons conclure que l'enlèvement de matière est perceptible sur les traces d'usure avec des grains WC déformés et rayés. Le mode d'usure est principalement l'usure abrasive. Certains grains sont aussi déchaussés.

Pour les carbures WNZVC et WCR1, les traces sont lisses. En revanche, des fissures sont présentes sur les traces d'usure du carbure WNZVC. Des incrustations de débris au niveau des fissures sont visibles pour le carbure WNZVC. Ce mode d'usure a été aussi observé sur les travaux de Marou Alzouma <sup>1</sup>.

### II.2.2. Mécanisme de transfert

L'analyse de la nature des débris sur les traces d'usure a été réalisée au MEB associée à une analyse EDX (Fig.3.13). Les échantillons sont nettoyés dans un bain d'acétone à ultrasons pendant une dizaine de minutes avant chaque observation microscopique.

Les débris sont présents sur toute la surface de contact du plan. Les débris sont composés de fer ce qui suggère que les débris proviennent de la bille en acier. Un mécanisme d'adhésion se déroule donc en même temps que l'abrasion. Ce contact bille/plan est donc le lieu où se déroulent des mécanismes d'abrasion à trois corps. Néanmoins ces débris peuvent également se fixer à l'interface et favoriser alors l'abrasion à deux corps.

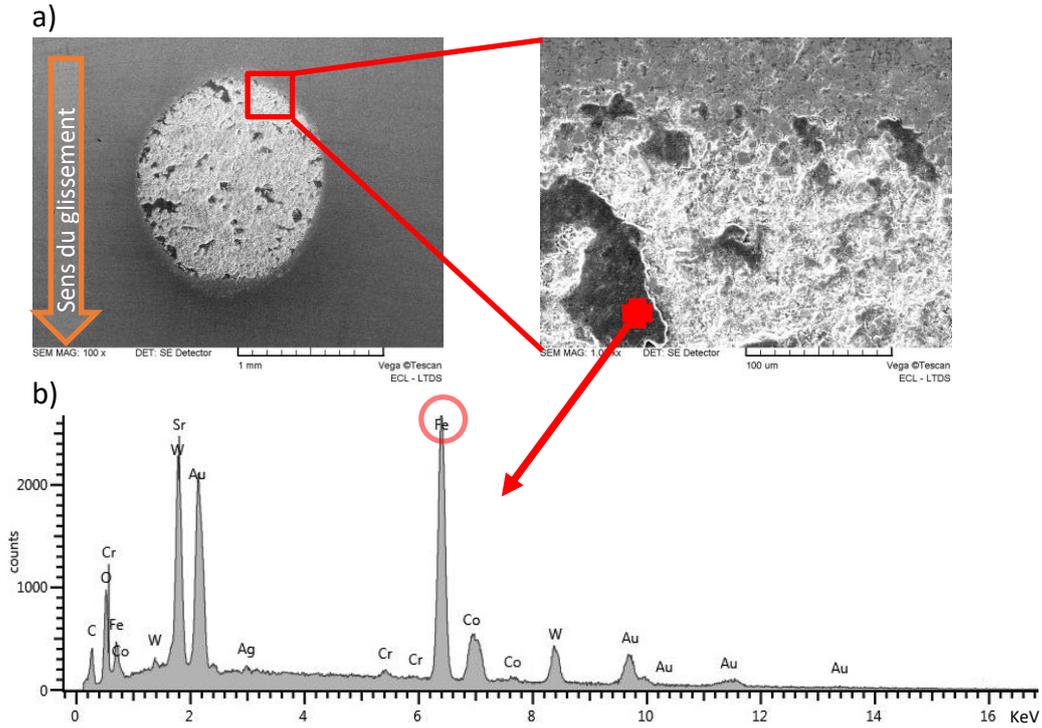


Fig. 3.13. Observations au MEB de la trace d'usure du carbure E6 essai à 800 J :  
 (a) trace d'usure sur le carbure,  
 (b) analyse EDX effectuée sur les débris de la trace d'usure.

Du tungstène et du cobalt sont également observés sur la bille (Fig.3.14).

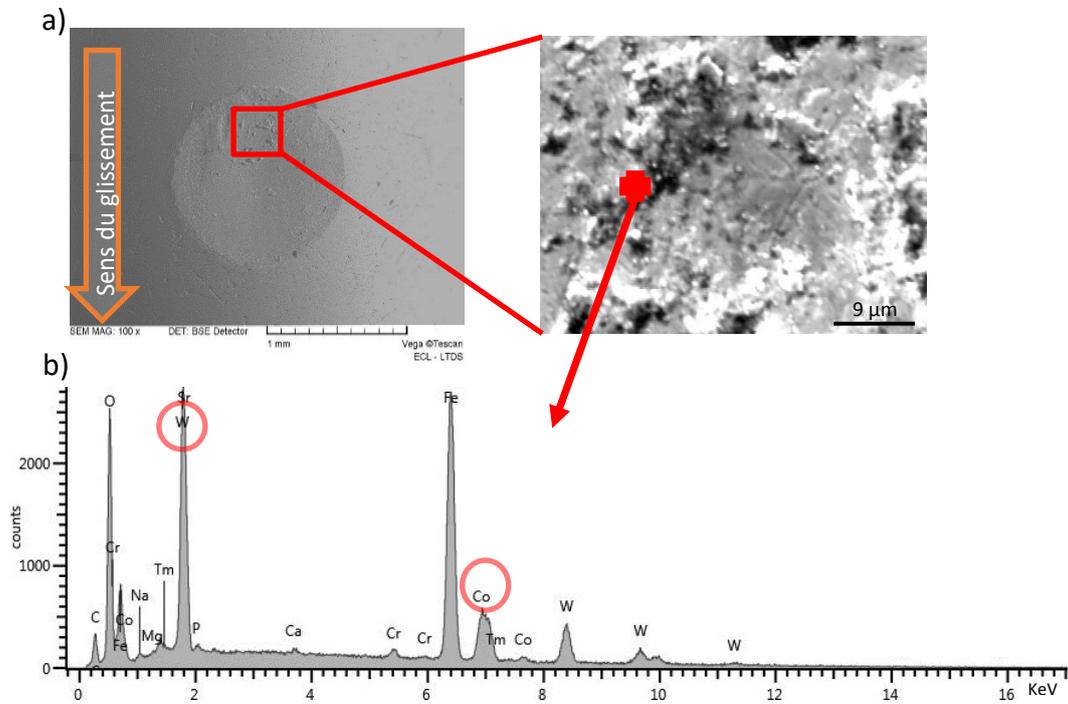


Fig.14. Observations au MEB de la trace d'usure de la bille à 800 J :  
 (a) trace d'usure sur la bille, (b) analyse EDX effectuée sur les débris de la trace d'usure.

Cela implique que le processus de transfert de matière a lieu dans les deux sens de la bille vers le carbure et du carbure vers la bille. Nous observons aussi ce phénomène de transfert sur le carbure WCR1 avec des débris éparpillés sur la trace (Fig.3.15). Par analyse MEB couplée à l'EDX, on peut avoir des cartographies de la trace d'usure et identifier les agglomérats de débris sur la trace. Nous pouvons alors affirmer que les débris présents sur la trace d'usure sont des débris de fer oxydés.

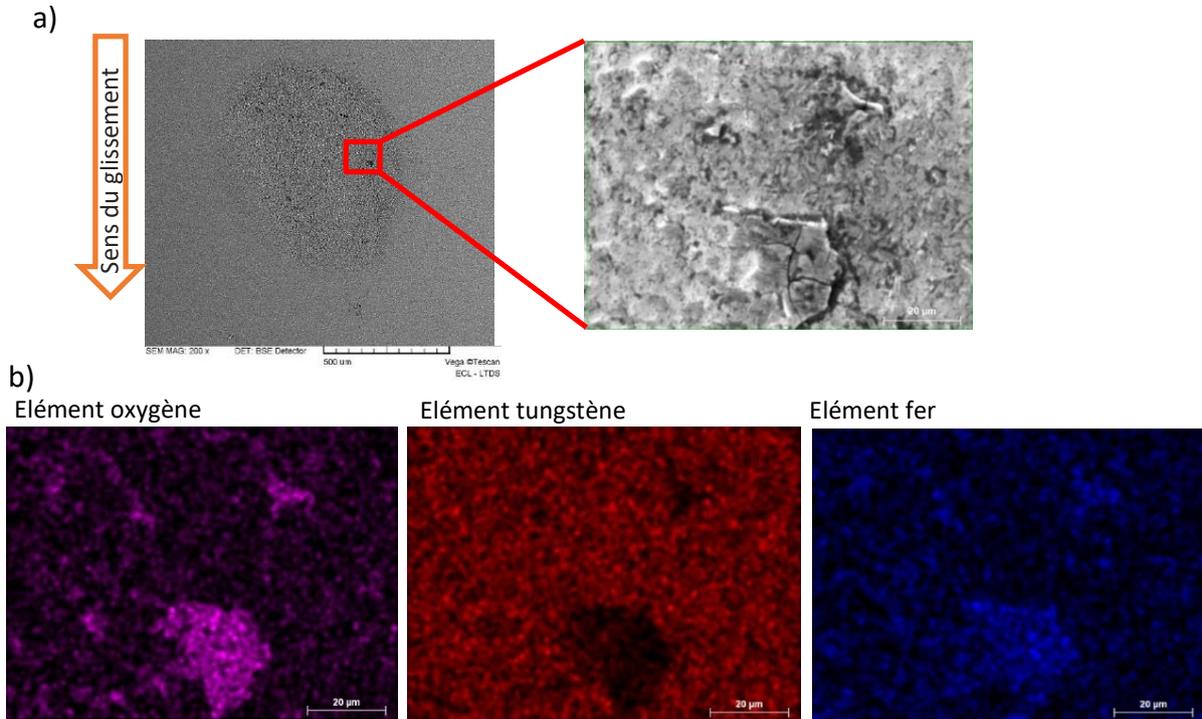


Fig. 3.15. Observations au MEB-EDX à 1 000 J :  
(a) trace d'usure sur le carbure WCR1, (b) cartographies des éléments O, W et Fe.

Le carbure WNZVC est caractérisé par des traces avec peu de débris. Seule la présence des débris incrustés au niveau des fissures permet de témoigner d'un mécanisme de transfert (Fig.3.16).

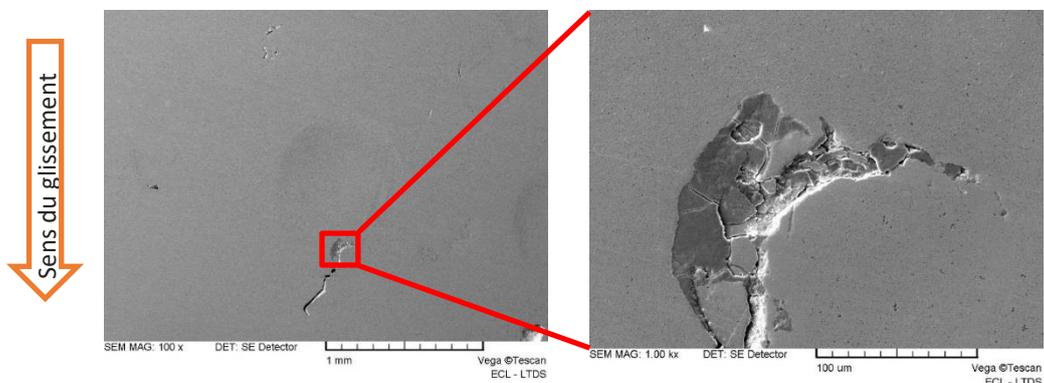
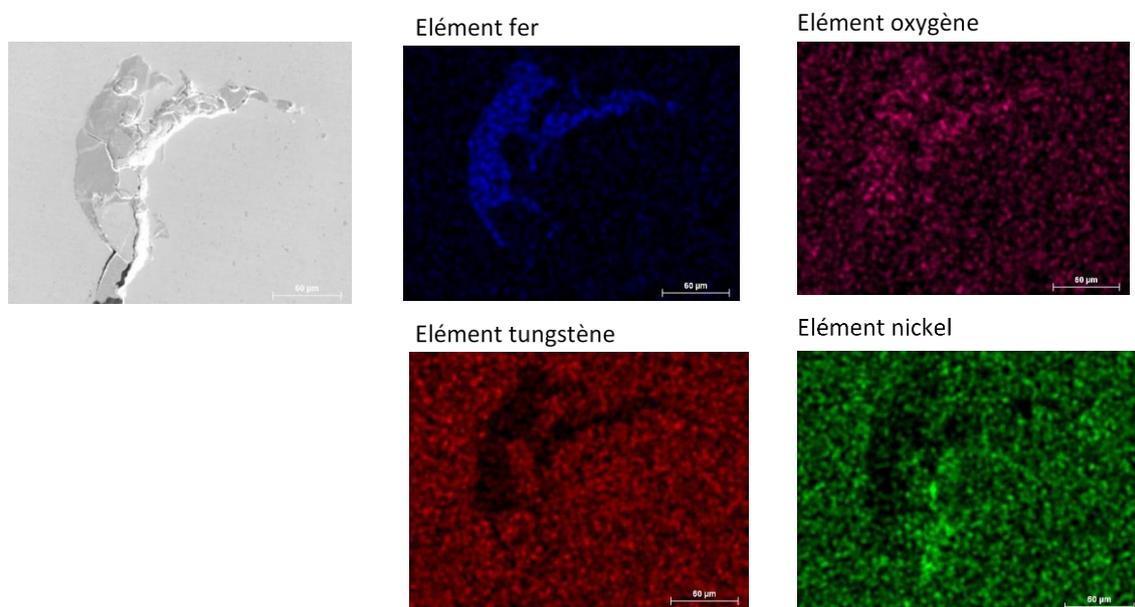


Fig. 3.16. Observations au MEB de la trace d'usure du carbure WNZVC à 1 000 J.

Nous pouvons voir sur la trace d'usure du carbure WNZVC que la trace d'usure est lisse sans aucun faciès d'usure particulier. Une fissure en bas de la trace est présente avec des débris d'usure qui y sont incrustés.

En faisant une analyse MEB couplée à l'EDX, on peut observer une cartographie du bas de la trace (Fig.3.17).



*Fig. 3.17. Observations au MEB couplée à l'EDX de la fissure située sur le bas de la trace d'usure du carbure WNZVC à 1 000 J.*

On peut distinguer la présence de fer et oxygène au niveau des débris agglomérés et incrustés dans la fissure. Le tungstène et le nickel ne sont pas des composants de ces débris mais, ils sont bien présents autour de la fissure. Les billes présentent aussi des débris des carbures.

Le mécanisme de transfert se fait majoritairement avec le carbure E6. Des débris sont présents sur toute la surface de la trace d'usure, aussi bien sur la bille que sur le plan. Des débris analysés comme étant des débris oxydés contenant du fer, sont présents sur les traces d'usure. Le carbure WCR1 présente aussi des débris d'usure contenant du fer. Par contre, le carbure WNZVC est caractérisé par des débris qui sont incrustés dans les fissures. En dehors des fissures, il n'y a pas de débris adhérant à la surface.

### **II.2.3. Mécanisme de fissuration**

Compte tenu de sa ténacité plus faible, le carbure WNZVC est susceptible de se fissurer plus que les deux autres. Nous constatons qu'à 400 J, il n'y a pas de fissures apparentes. Des fissures apparaissent à partir de 600 J pour le carbure WNZVC (Fig. 3.18).

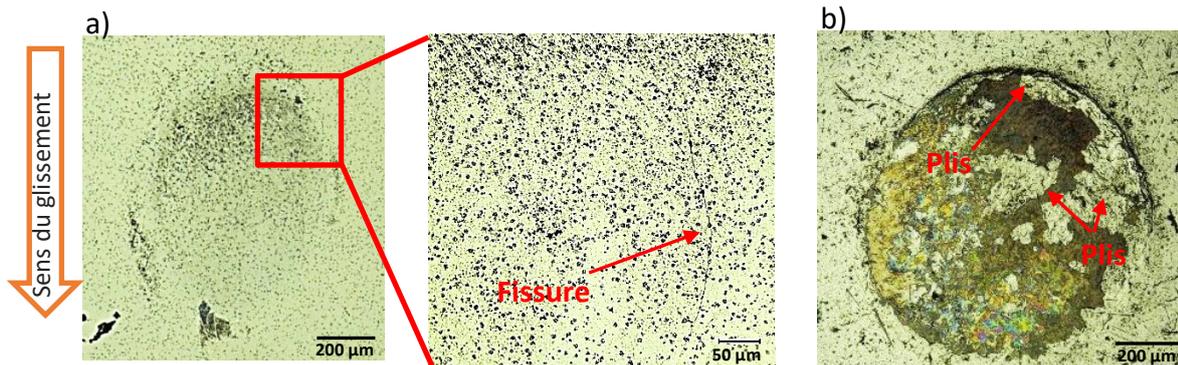


Fig. 3.18. Observations au microscope optique d'un essai à 600 J :  
(a) trace d'usure du carbure WNZVC, (b) trace sur la bille.

Les fissures sont observables à 600 J et à 1 800 J. Cela suggère que l'énergie d'impact est suffisamment élevée pour amorcer le processus de formation des fissures. Nous constatons que le haut de la bille est caractérisé par des déformations plastiques dès 600 J (Fig.3.19). La trace d'usure de la bille est caractérisée par des plis perpendiculaires au glissement.

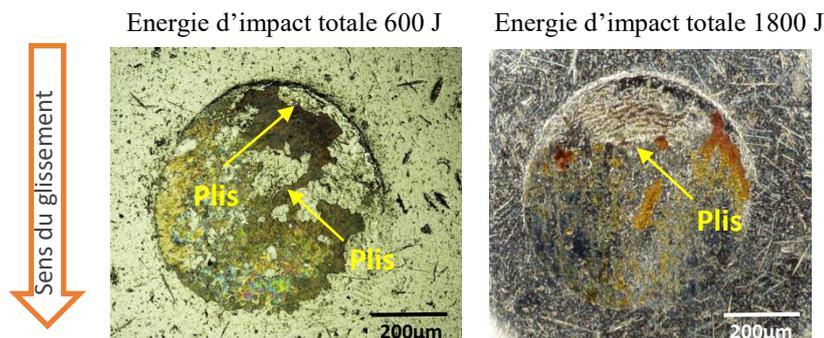


Fig. 3.19. Observations au microscope optique des traces d'usure sur la bille 100Cr6 pour les tests effectués avec du carbure WNZVC.

Les débris contenant du fer se sont accumulés au niveau de la zone de contact et ont graduellement créé une couche protectrice qui semble réduire l'usure du carbure de tungstène. En contrepartie, sous l'effet des impacts répétés, les débris sont accumulés. La bille en acier est alors soumise à des conditions sévères puisqu'elle subit des chocs qui engendrent non seulement des particules mais aussi la pénétration des débris.

A 1000 J, les fissures apparaissent sur la trace d'usure du carbure en plus de celles formées à l'extérieur de la trace. A cette énergie, les chocs sont si sévères que les débris générés par les impacts "martèlent" le carbure WNZVC mais ne permettent pas la formation de la couche de débris sur le plan (Fig.3.20).

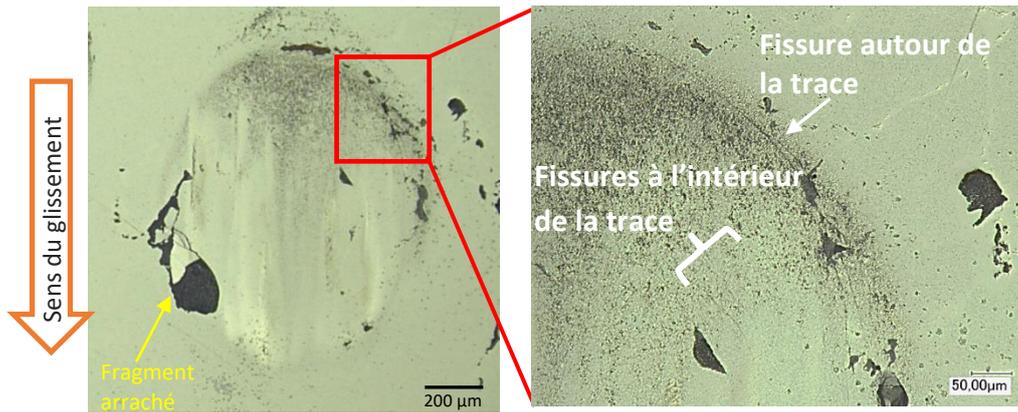


Fig. 3.20. Observations au microscope optique de la trace d'usure du carbure WNZVC à 3 000 J.

A 3000 J, des fissures concentriques en haut de la trace de la bille sont observables. Elles sont en forme de « cratère » et témoignent de la sévérité des impacts (Fig.3.21).

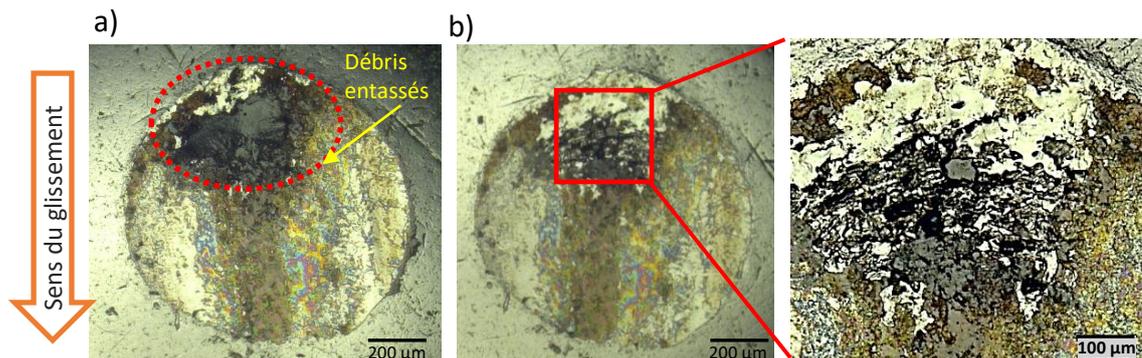


Fig. 3.21. Observations au microscope optique pour des essais à 3 000 J :  
(a) trace d'usure sur la bille avant nettoyage,  
(b) après passage aux bains ultrasons.

Nous pouvons conclure que les fissures apparaissent à 600 J. Cela signifie qu'à 400 J, l'énergie d'impact totale n'est pas suffisante pour amorcer la fissuration. A 800 J, il n'y a pas de fissures observées sur la trace d'usure. Les mécanismes d'abrasion et d'adhésion qui interviennent dans la formation, la propagation et la disparition des fissures sont en compétition avec le mécanisme de fissuration. Il est possible que la sévérité des impacts conduise à fragmenter le carbure. Cela peut favoriser le déchaussement de grains et l'abrasion, par rapport à la fissuration. On observe alors des traces sans fissures.

A 1000 J, elles sont de nouveau observables. Cela suggère que la fissuration est prépondérante par rapport aux mécanismes d'abrasion.

La durée de l'essai, à savoir le nombre de cycles d'impact-glissement (assimilable à la fatigue) est un paramètre à considérer. Le processus de formation et disparition des fissures

dépend de l'énergie d'impact par cycle d'impact glissement (Fig.3.22). Les fissures apparaissent à partir de 1 800 J, ce qui correspond à une énergie de 6 mJ pour 300 000 cycles. Puis elles apparaissent de nouveau à 3 000 J (essai à 10 mJ avec 300 000 cycles).

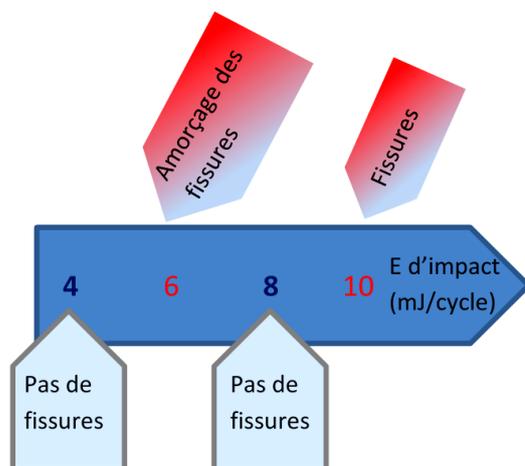


Fig. 3.22. Représentation graphique des observations sur la fissuration faites sur les traces d'usure du carbure WNZVC.

En revanche, les carbures E6 et WCR1 ne présentent aucune fissure aussi bien sur la bille que sur le plan. Ce phénomène s'explique par la ténacité de ces derniers qui est plus élevée, en comparaison avec celle du carbure WNZVC. Elle est respectivement de 15,8 et de 11,3 MPa. $\sqrt{m}$  pour les carbures E6 et WCR1 et 9 MPa. $\sqrt{m}$  pour le carbure WNZVC.

### II.2.4. Analyse approfondie des modes d'usure

Le mécanisme de fatigue se traduit par l'amorçage de fissures et par l'intensification des mécanismes d'usure. Nous réalisons des essais à une énergie d'impact élevée et avec un nombre de cycles élevé afin d'analyser les mécanismes d'usure dans ces conditions. Nous faisons le choix de travailler avec une énergie d'impact de 8 mJ/cycle et un nombre de cycles d'un million de cycles, soit une énergie d'impact totale de 8 000 J. Les trois carbures ont été analysés et chacun présente des faciès d'usure différents.

#### II.2.4.a) Conditions sévères d'usure du carbure E6

##### Faciès d'usure du carbure E6

Le matériau de référence (E6) impacté avec la bille en acier est caractérisé par la présence de deux zones profondes, comme évoqué précédemment. Nous pouvons remarquer des zones latérales profondes et une zone centrale moins profonde (Fig.3.23.a). De plus, les traces d'usure de la bille sont caractérisées par une profondeur centrale entourée d'un bourrelet (Fig.3.23.b).

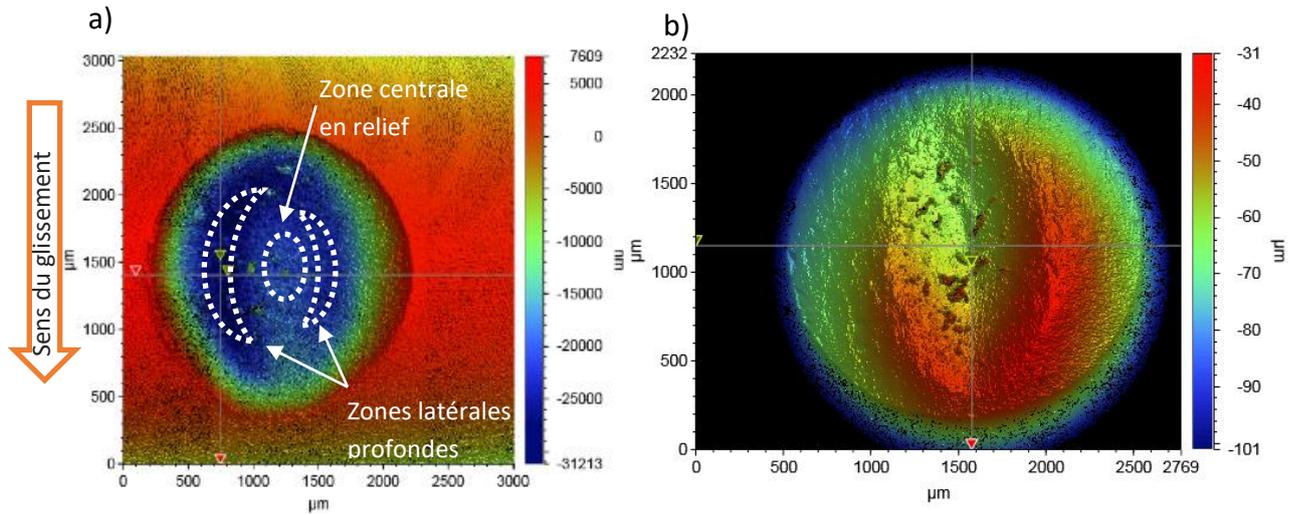


Fig. 3.23. Observations en interférométrie des profils d'usure (a) du plan et (b) de la bille.

Ce faciès d'usure suggère que la trace d'usure de la bille peut "s'emboîter" sur la trace d'usure du plan (Fig.3.24).

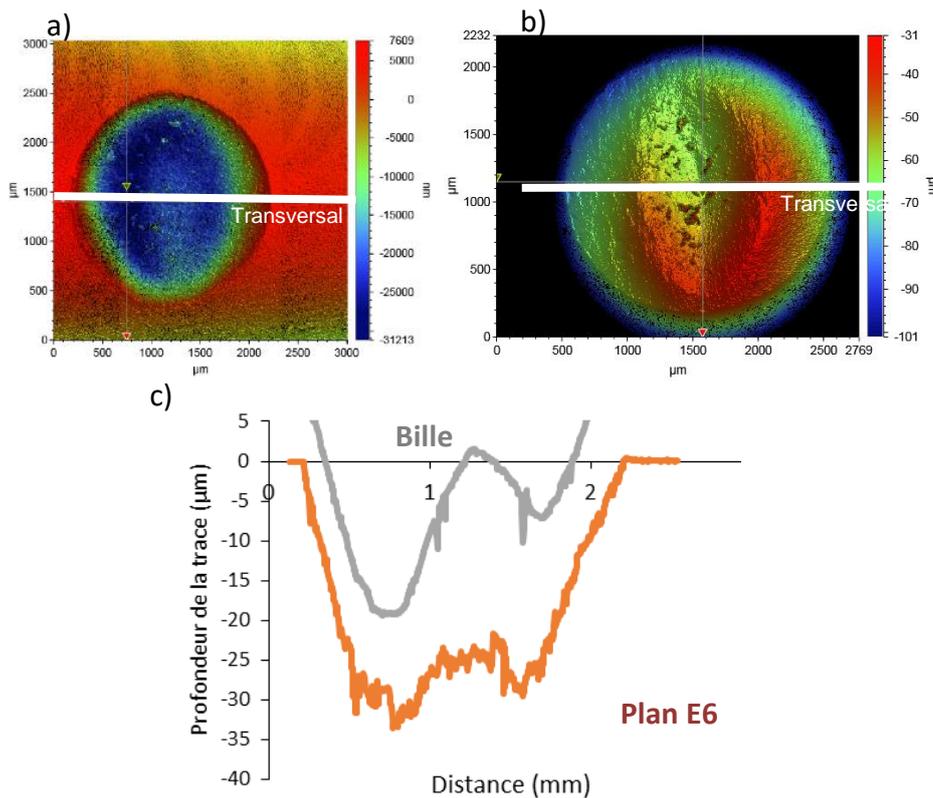


Fig. 3.24. Observations en interférométrie et profils d'usure : (a) plan, (b) bille, (c) tracé des profils 2D de la bille et du plan.

Il y a une complémentarité au niveau des profils d'usure de la bille et du plan (Fig. 24.c). On peut expliquer cela par le fait que la déformation de la bille entraîne graduellement une transformation de la surface de contact bille/plan. La bille s'use et la surface de contact s'élargit et devient une surface de contact plus grande avec des contraintes locales réparties non uniformément.

De plus, la présence du troisième corps à l'interface vient altérer la surface de contact et l'évacuation des débris. Cela conduit à la création des zones latérales où les contraintes importantes sont associées à des phénomènes d'usure intenses. Des grains de carbure de tungstène présentent des traces d'abrasion (Fig. 3.25). On peut observer des débris sur la trace et des grains de WC ont été arrachés. De plus, des grains de WC présentent des rayures. Certaines sont présentes sur le liant et sur les grains.

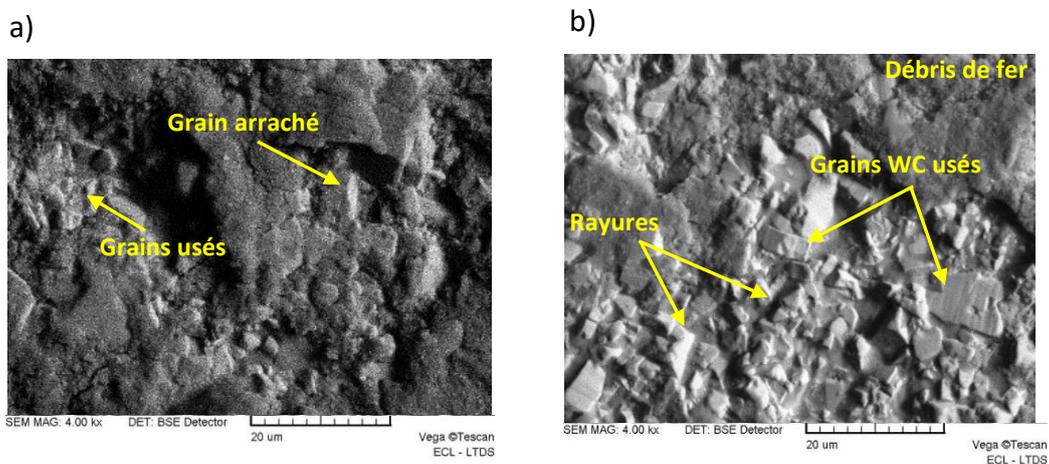
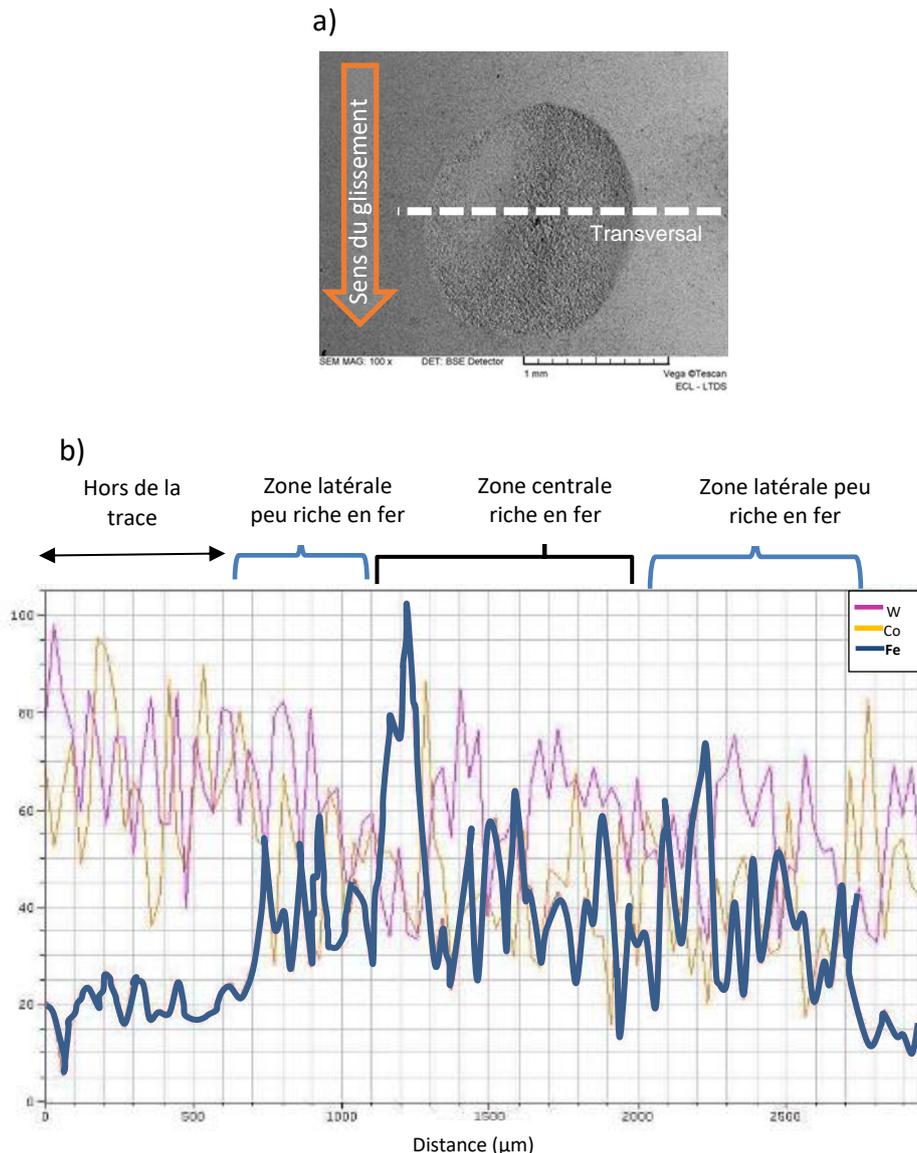


Fig. 3.25. Observations au MEB de la trace d'usure du carbure E6 à 8 000 J :  
(a) zone centrale rugueuse, (b) zone latérale lisse.

#### Usure par adhésion

A l'aide de la microscopie électronique, on peut voir, au niveau de la zone centrale, la présence de débris contenant du fer. L'analyse EDX sur une ligne permet d'observer la répartition des débris riches en fer selon un profil transversal (Fig.3.26). Le profil transversal traverse les deux zones latérales et la zone en relief (Fig.3.26.a). Nous constatons que les deux zones latérales ont beaucoup moins de débris de fer transférés de la bille (Fig.3.26.b).



*Fig. 3.26. Observations au MEB :  
(a) trace d'usure du carbure E6 à 8 000 J, (b) analyse EDX sur une ligne.*

Coupe transversale de la trace

Une coupe transversale de la trace d'usure de l'échantillon E6 permet d'observer ces deux zones latérales (Fig.3.27). Les observations microscopiques permettent de mettre en évidence la présence de grains fracturés. Des groupements de grains détachés du liant métallique en cobalt, avec des grains usés et fracturés, sont également visibles au niveau de la zone centrale en relief (Fig.3.27.c), tandis que les zones latérales profondes sont caractérisées par des grains WC usés, de forme arrondie et entassés (Fig.3.27.d).

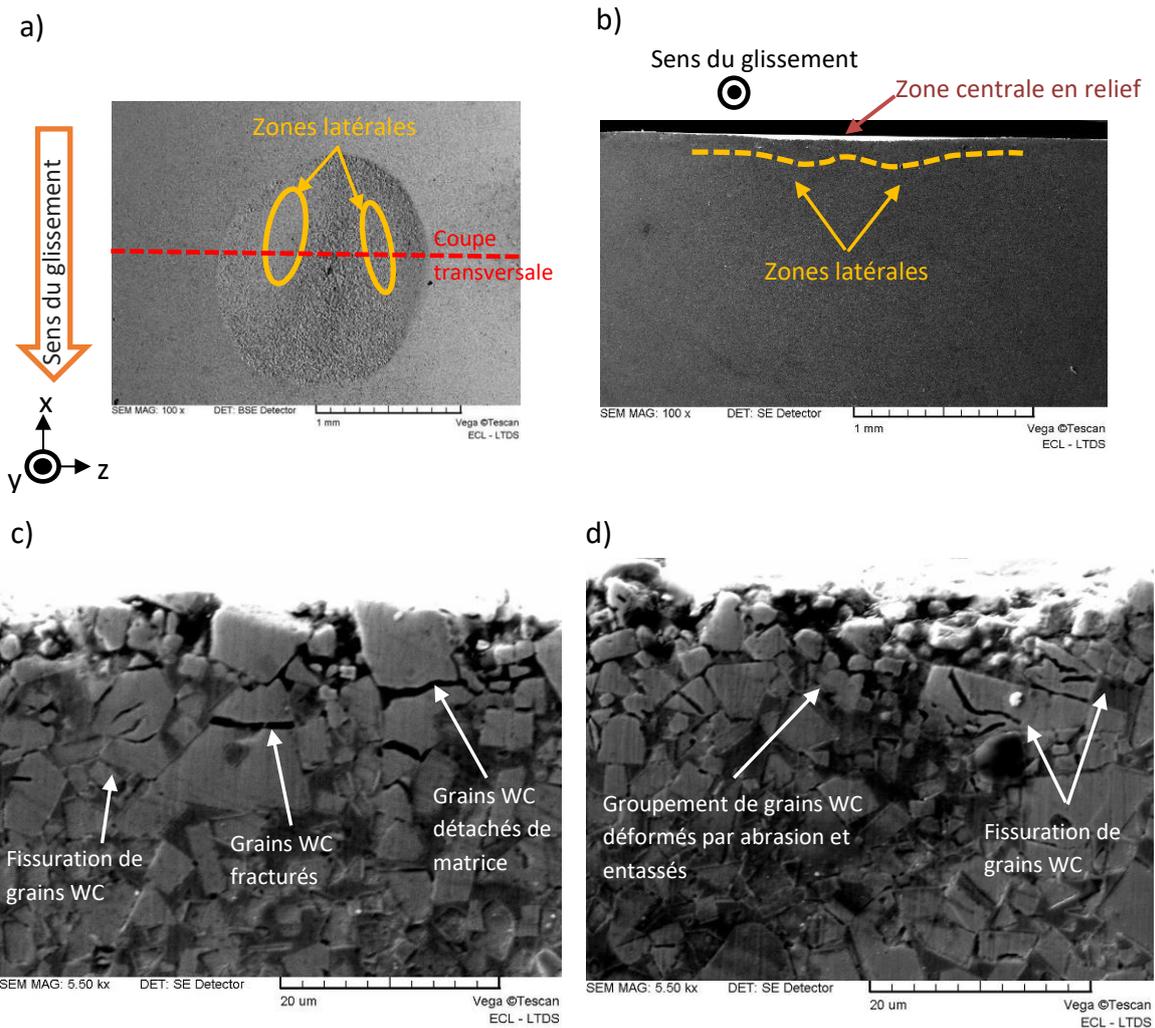


Fig. 3.27. Observations au MEB de la trace d'usure sur le carbure E6 : (a) image MEB de la trace, (b) section de la trace, (c) zone centrale, (d) zone latérale.

Nous pouvons apercevoir des grains au niveau de la zone centrale de la trace qui ont un faciès d'usure en corrélation avec les traces d'usure observées en Fig.3.25.b (rayures sur les grains de WC témoignant de l'usure abrasive avec de la fissuration sous l'effet du glissement).

En effet, les traces d'abrasion sur les grains sont visibles au niveau des images obtenues par MEB après avoir effectué la coupe transversale (Fig.3.28). On peut apercevoir des grains WC rayés en surface (rayures parallèles au sens du glissement).

### Chapitre 3 : Résultats expérimentaux et analyse des traces d'usure

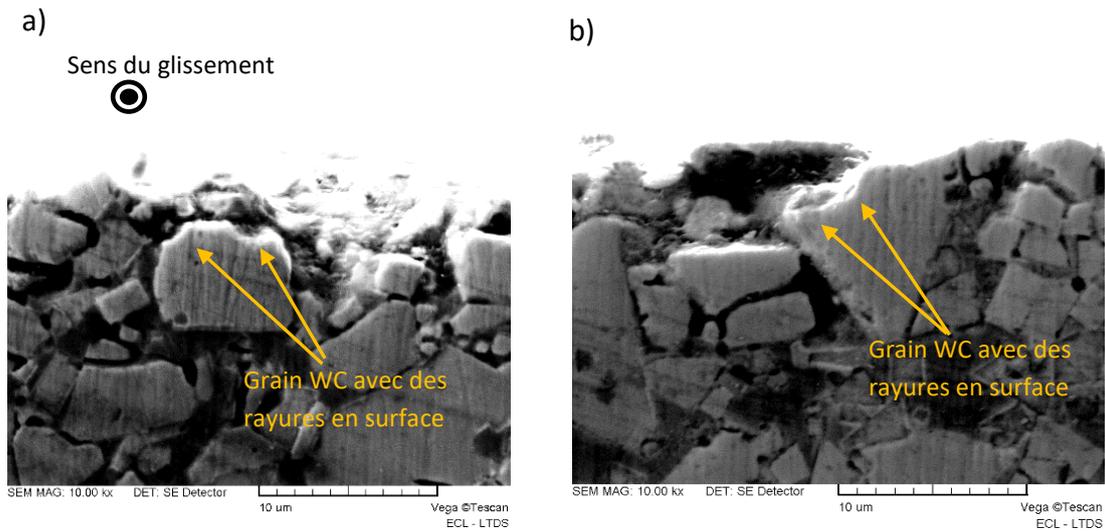


Fig.3.28. Observations au MEB suite à une coupe transversale du carbure E6 : usure abrasive des grains (a et b) au milieu de la trace d'usure.

L'analyse EDX de la coupe transversale montre que les carbures de WC sont dispersés dans le liant en cobalt. Des débris oxydés contenant du fer sont aussi présents sur la trace d'usure (Fig. 3.29).

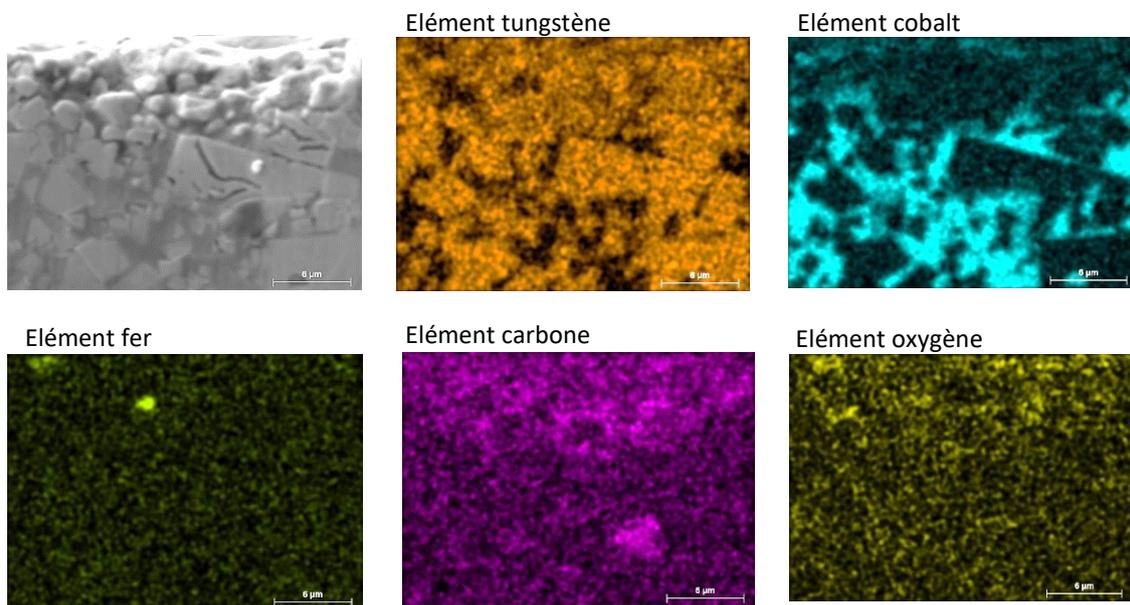


Fig. 3.29. Observations au MEB couplée à l'EDX de la coupe transversale de la trace du carbure E6 à 8 000 J.

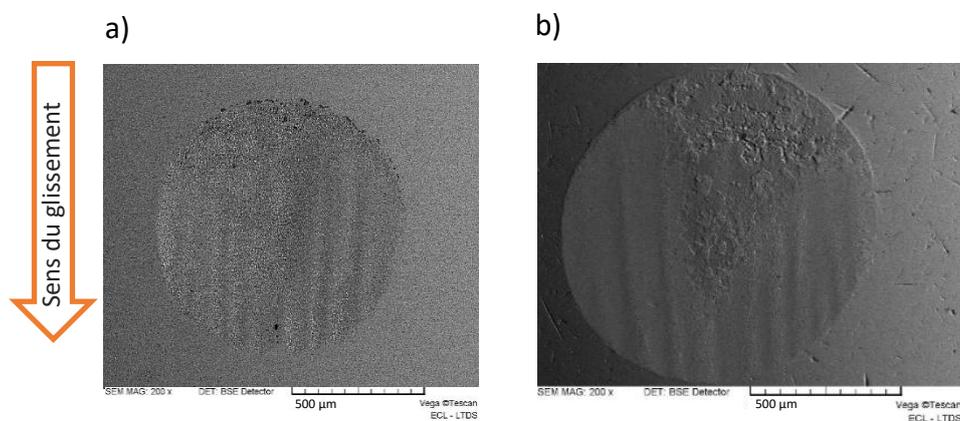
Cette analyse nous permet d'affirmer que le carbure E6 impacté avec une bille en acier à 8000 J donne un faciès d'usure avec des zones latérales creuses et une zone centrale en relief (riche en débris contenant du fer). Les zones centrales peuvent atteindre 34 µm de profondeur. Ce profil "s'emboîte" sur le profil de la bille qui est caractérisé par une zone

centrale creuse et deux zones latérales en relief. Ces profils d'usure sont semblables à ceux observés à 1 200 J, mais les traces d'usure sont plus larges et plus profondes à 8 000 J. La coupe transversale nous permet de voir les grains WC endommagés au niveau des zones latérales et de la zone centrale, ainsi que la composition chimique en profondeur.

### II.2.4.b) Conditions sévères d'usure du carbure WCR1

#### Faciès d'usure du WCR1

Les carbures WCR1 ont la particularité de présenter des faciès d'usure qui apparaissent comme des ondulations sur les profils 2D, aussi bien au niveau de la bille qu'au niveau du plan (Fig.3.30).



*Fig. 3.30. Observations au MEB pour un essai de 8 000 J :  
(a) trace d'usure du carbure WCR1, (b) trace d'usure de la bille.*

Il s'agit d'une succession de traces rectilignes de profondeurs variables. Les traces profondes et celles en relief sont alternées (Fig.3.31). Ces ondulations sont le plus souvent localisées en bas de trace. Le centre de la trace est profond (10 μm) ce qui peut s'expliquer par les impacts-glissements répétés au cours des cycles, favorisant l'usure par abrasion avec une perte importante de matière.

Le redressement du profil (à l'aide d'une fonction polynomiale d'ordre 4) permet de déterminer une période des ondulations qui est en moyenne de 100 μm. Ces formes arrondies sont caractérisées par des « creux » de profondeur de 0,2-0,7 μm et des « bosses » de 0,2-0,5 μm (Fig.3.31.b). Sur la bille, on observe des profils moins ondulés avec une profondeur maximale de 20 μm (Fig.3.32).

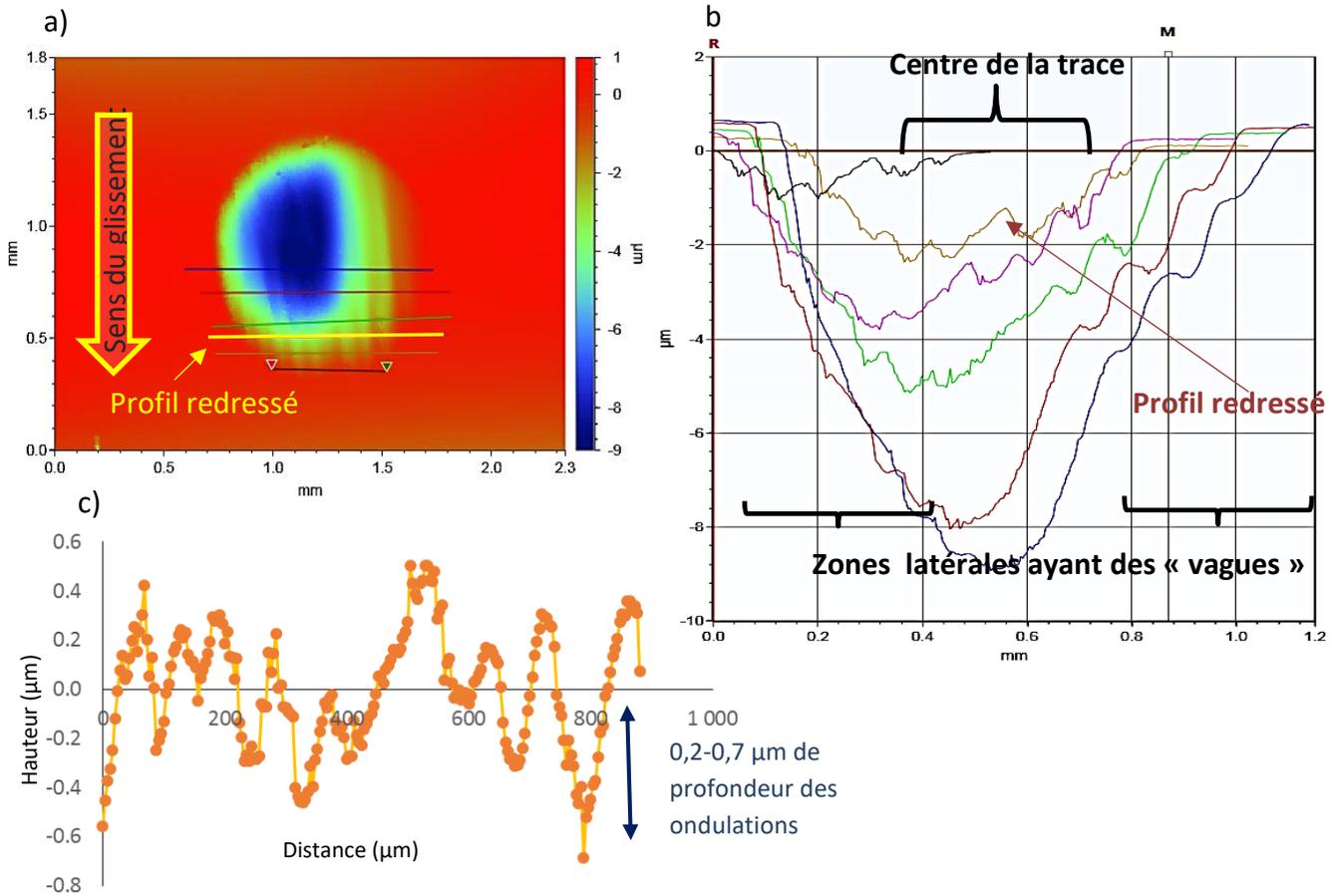


Fig.3.31. Observations à l'interféromètre numérique :  
 (a) trace d'usure du carbure WCR1 à 8 000 J,  
 (b) différents profils d'usure de la trace d'usure,  
 (c) profil redressé des ondulations d'un profil 2D.

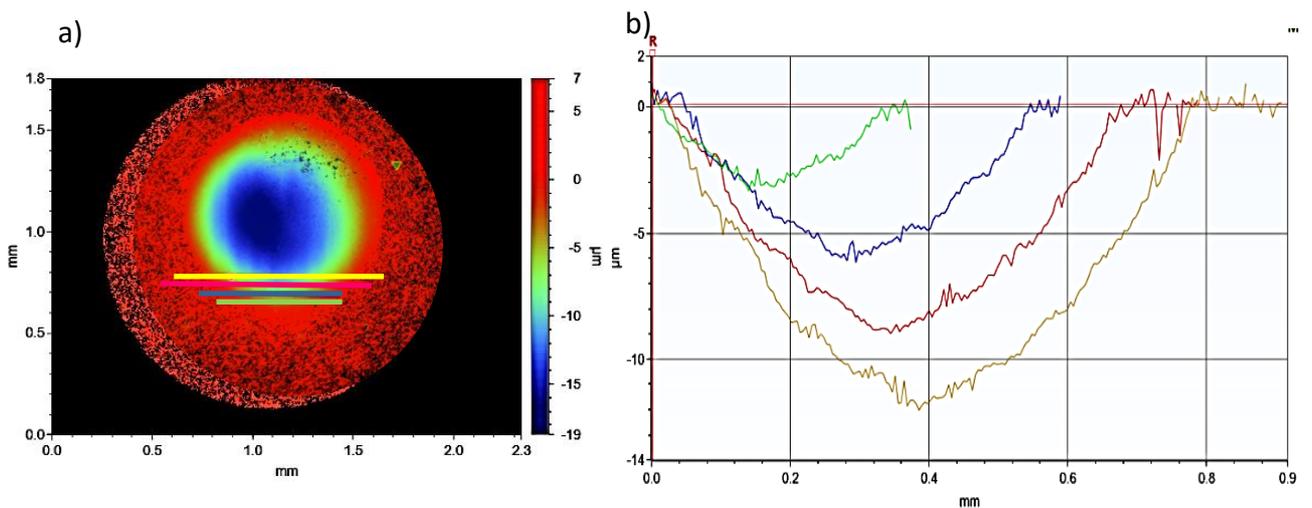
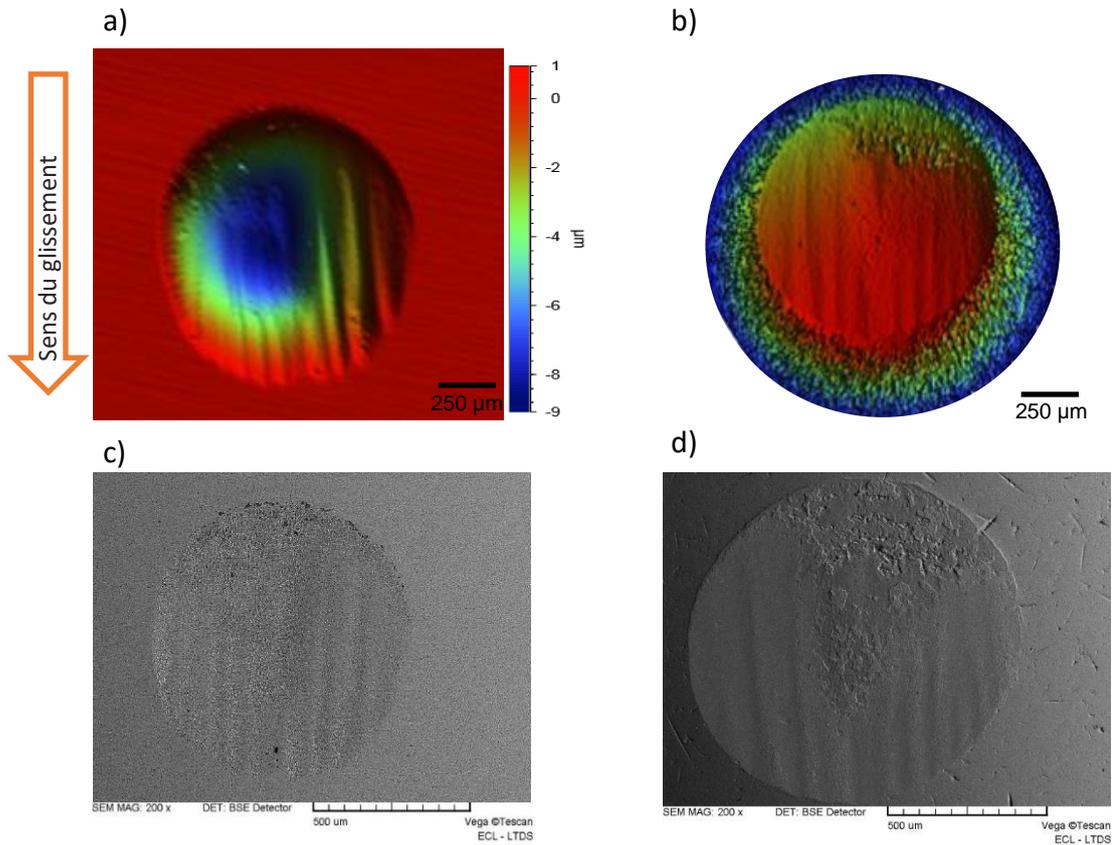


Fig. 3.32. Observations à l'interféromètre numérique à 8 000 J :  
 (a) trace d'usure de la bille, (b) différents profils d'usure de la trace d'usure de la bille.

Si on regarde les profils 3D des traces d'usure, on peut effectivement mieux révéler les faciès d'usure avec les ondulations (Fig. 3.33.a et b). Sur la trace d'usure du carbure WCR1, on peut mettre en corrélation les zones sombres (du profil 3D) avec les zones sombres de l'image MEB (Fig. 3.33.c et d)). Nous pouvons identifier les zones d'ombres sur les profils 3D de la bille comme étant les zones claires de l'image obtenue avec le détecteur des électrons secondaires.



*Fig. 3.33. Observation à l'interféromètre et au MEB :  
(a) profil 3D de la trace du carbure WCR1, (b) profil 3D de la trace de la bille,  
(c) trace d'usure du carbure WCR1, (d) trace d'usure de la bille.*

La coupe transversale de la trace d'usure (Fig.3.34) permet d'observer un faciès d'usure sous forme d'ondulations avec les creux et les bosses. Les zones en creux sont plus rugueuses et présentent des cavités qui témoignent de l'arrachement de grains de WC. Des débris y sont présents (Fig.3.34).

Sens du glissement

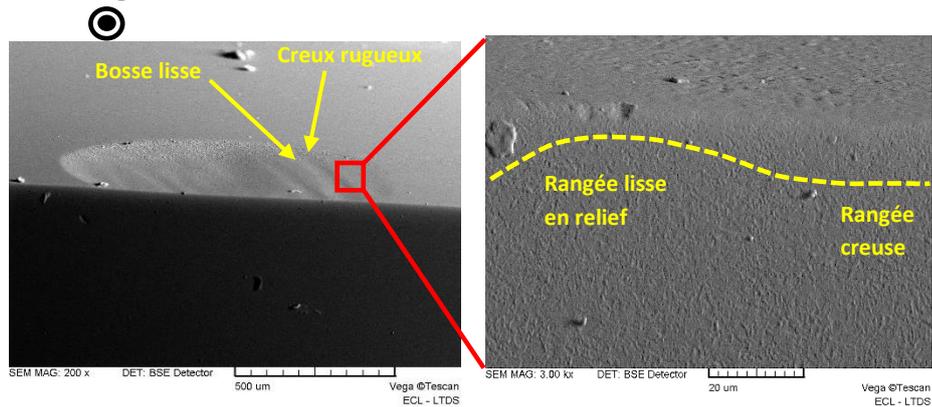


Fig. 3.34. Observations au MEB de la trace d'usure du carbure WCr1 à 8 000 J (détecteur BSE).

Ces rangées creuses et en relief ont des rugosités différentes. Nous identifions sur la trace d'usure du plan des zones lisses alternées avec des zones plus rugueuses (Fig.3.35). On peut conclure que les surfaces lisses correspondent aux « bosses » et que les surfaces rugueuses sont identifiées comme étant les « creux ».

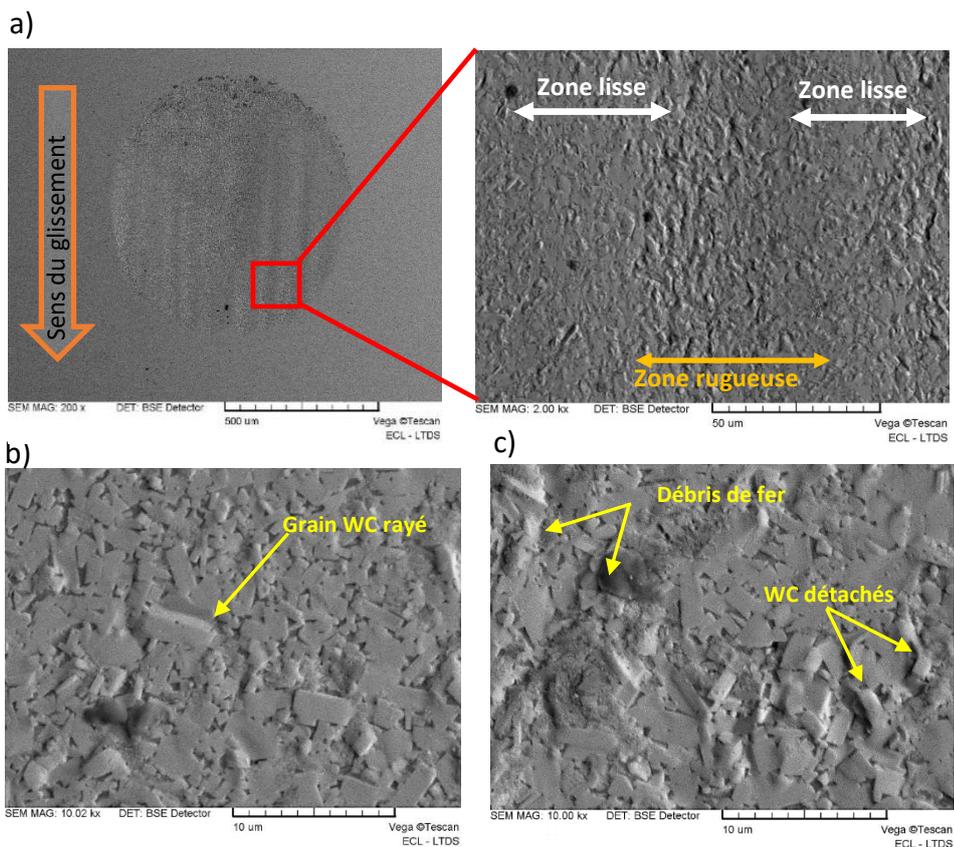
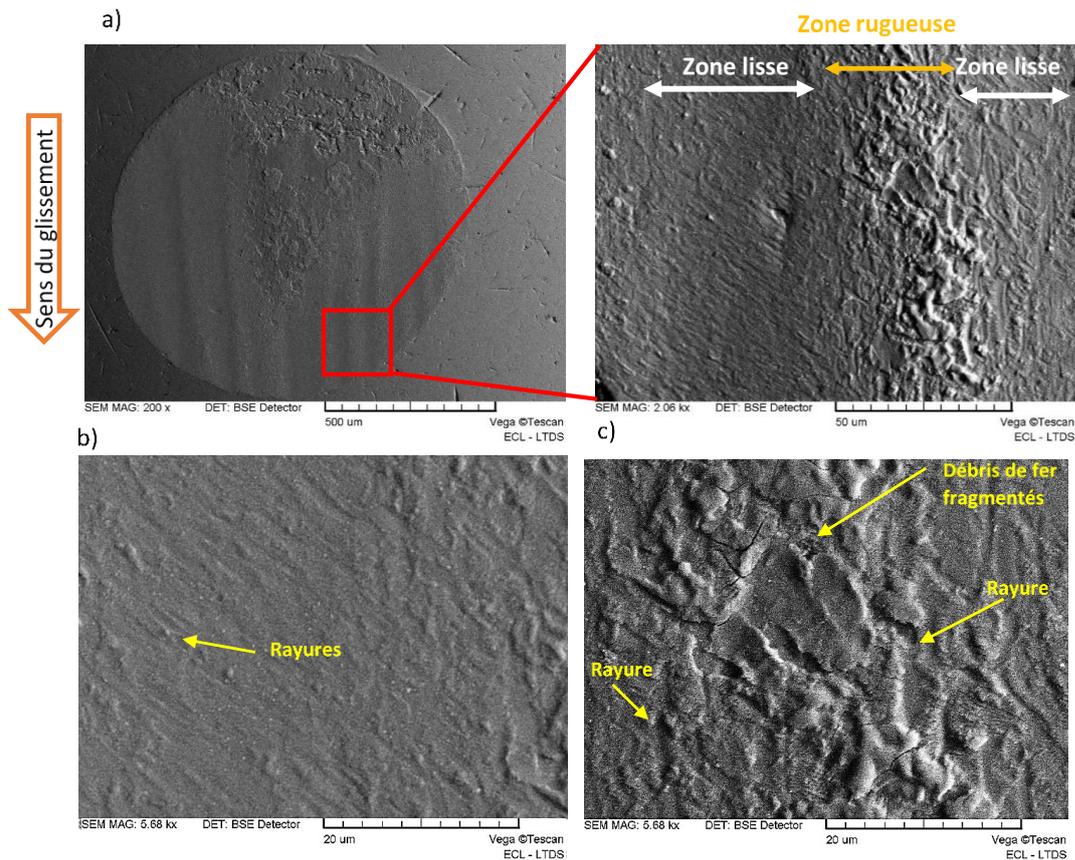


Fig. 3.35. Observation au MEB :  
 (a) trace d'usure sur le carbure WCr1 à 8 000 J,  
 (b) zones lisses creuses, (c) zones rugueuses profondes.

Les zones rugueuses profondes, ont des rayures parallèles au glissement suggérant le passage de débris au cours des impacts. En effet, les débris contenant du fer sont acheminés en dehors de la surface de contact par ces passages, et laissent derrière eux des traces d'abrasion. On peut voir des rayures et également des grains de WC qui, détachés de la matrice, sont susceptibles d'être arrachés. La présence de débris de fer rend cette zone rugueuse, tandis que les zones lisses sont sujettes à des frottements avec une usure plus faible. Des rayures y sont visibles. Ces faciès d'usure similaires sont également observables sur la bille (Fig.3.36).



*Fig. 3.36. Observation au MEB de la trace d'usure sur la bille à 8 000 J :  
 (a) vue générale et détail,  
 (b) zone lisse des ondulations,  
 (c) zone rugueuse des ondulations.*

Sur la bille, les zones ou rangées « lisses » correspondent aux zones creuses et les rangées en relief sont rugueuses. Des débris riches en fer y sont accumulés avec des fragments susceptibles de se détacher et d'approvisionner le contact en débris. Ces observations permettent de mettre en évidence les « bosses » et les « zones creuses » qui sont complémentaires.

Nous pouvons aussi corrélérer l'aspect de surface (rugueux ou lisse) aux faciès d'usure observés à l'aide de l'interféromètre avec les profils des traces d'usure afin de connaître comment les traces d'usure se mettent en contact à l'interface.

Il y a un emboîtement des surfaces antagonistes avec les ondulations du plan et de la bille (Fig.3.37). Sur la trace de la bille, les bosses viennent frotter contre les creux de la trace du carbure. Les débris sont accumulés au niveau de ces creux. A cet endroit-là, se déroule l'abrasion à « 3 corps » combinée éventuellement à de l'abrasion à « 2 corps ».

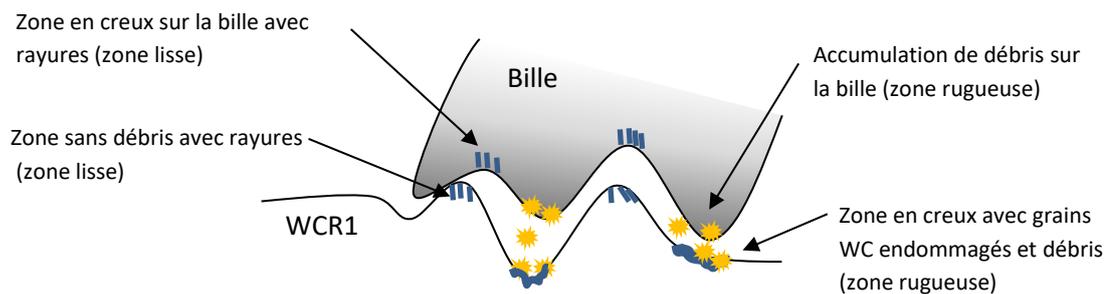


Fig. 3.37. Représentation schématique des surfaces en contact et de l'interface dans le cas du carbure WCR1 et de la bille.

Les faciès d'usure observés à 8 000 J sont semblables à ceux observés à 1 200 J. L'emboîtement des profils d'usure du plan et de la bille est caractérisé par des creux et des bosses qui ont des rugosités différentes. Sur la trace d'usure du carbure, les surfaces rugueuses ont des arrachements de grains de WC et des débris d'usure, là où les surfaces lisses sont caractérisées par des rayures. La trace d'usure de la bille présente un dépôt de débris sur les zones rugueuses et des rayures sur les zones lisses.

### II.2.4.c) Conditions sévères d'usure du carbure WNZVC

#### Faciès d'usure du WNZVC

Le carbure WNZVC a la plus faible ténacité des trois matériaux. Des fissures sont observables en haut de trace. Les tests à 8 000 J sont caractérisés par des faciès, moins réguliers que ceux observés sur le carbure WCR1 (Fig.3.38). Au fur et à mesure des impacts-glissement, les fissures s'élargissent et des débris y sont insérés.

La cicatrice d'usure de la bille présente des traces parallèles au glissement. Cela correspond probablement à l'évacuation des débris en dehors de l'interface et au frottement carbure/bille.

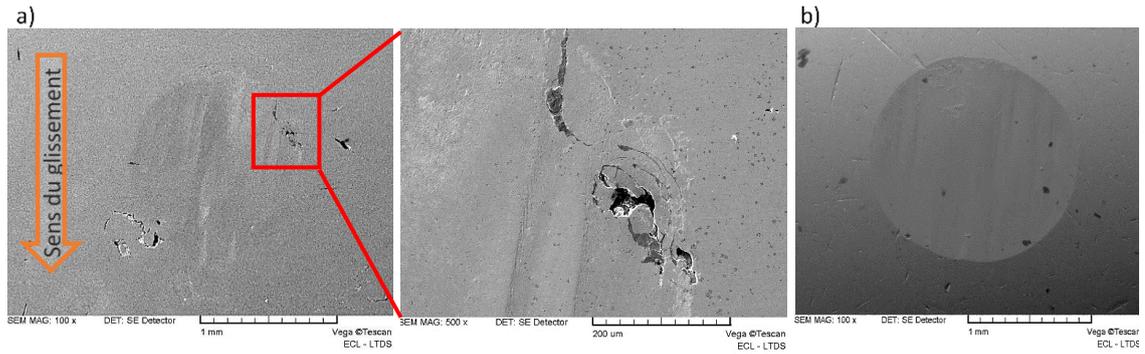


Fig. 3.38. Observations au MEB d'un essai à 8000 J :  
 (a) trace d'usure du carbure WNZVC,  
 (b) bille en acier.

En effet ces marques sont semblables aux ondulations observées sur le carbure WCR1 à 8 000 J. Cependant, elles sont moins marquées et ces marques ne sont pas réparties sur toute la trace d'usure (Fig.3.39).

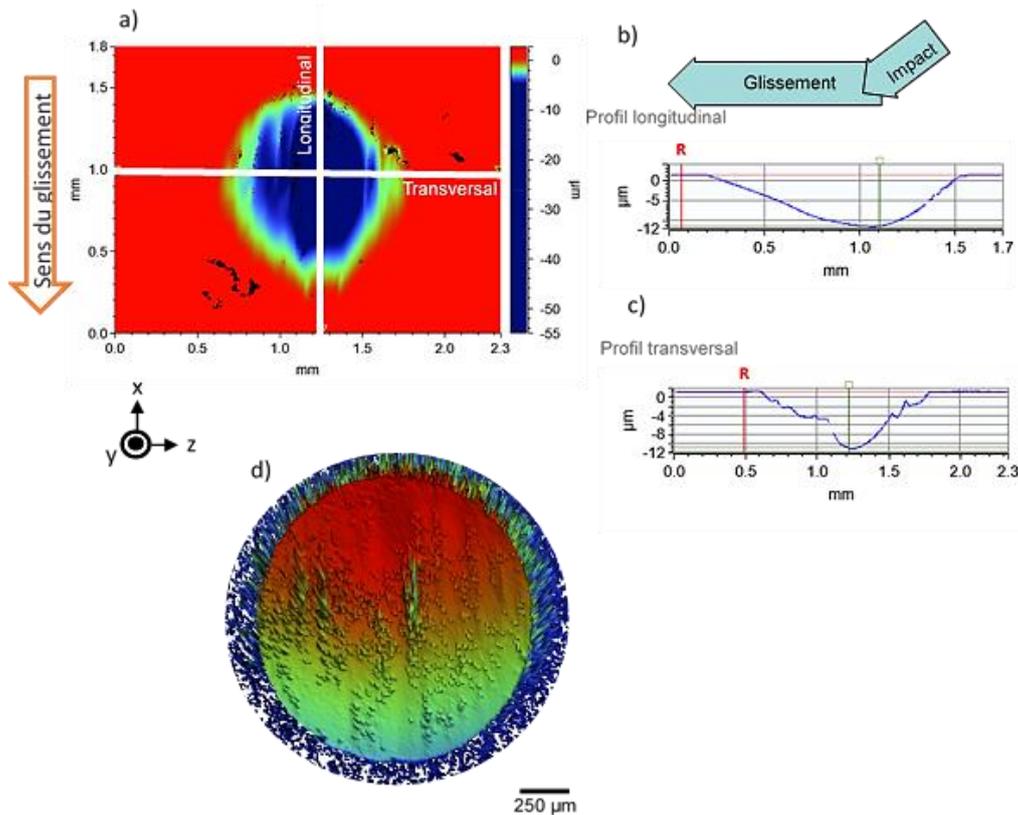
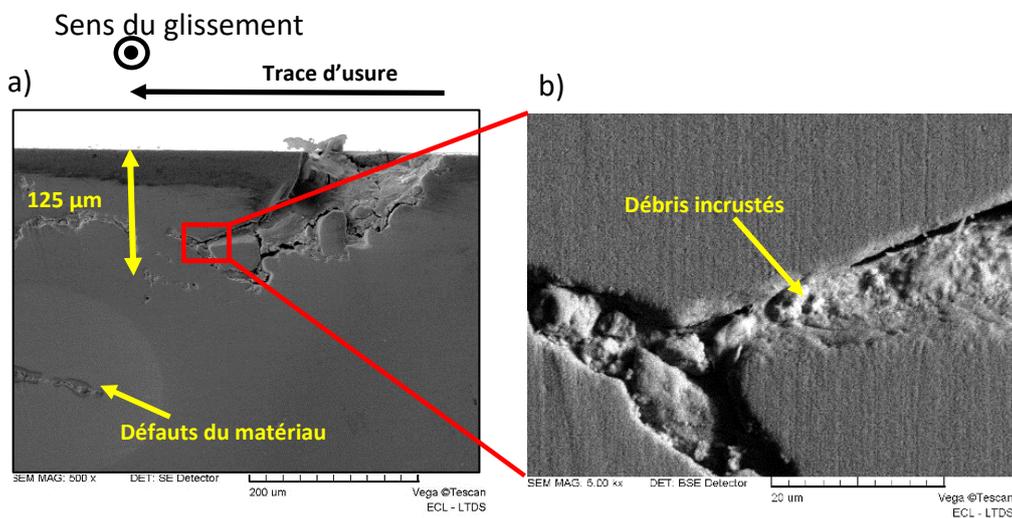


Fig. 3.39. Observation à l'interféromètre numérique :  
 (a) trace d'usure carbure WNZVC,  
 (b) profil longitudinal de la trace du carbure WNZVC,  
 (c) profil transversal de la trace du carbure WNZVC,  
 (d) profil 3D de la trace sur la bille.

Il semble qu'il y a un arrachement de matière important suite à une fissuration qui déstabilise l'interface. Cela renouvelle la surface de contact qui se réadapte et reforme les ondulations. Par conséquent, on peut considérer que la trace d'usure observée est le résultat de l'accumulation de plusieurs faciès ondulés suite à la réadaptation de l'interface face aux mécanismes aléatoires de fissuration (formation de fissures sans arrachement de matière) et de fracturation (fissuration suivie d'un arrachement de matière).

#### Coupe transversale de la trace

La coupe transversale de la trace d'usure montre des fissures dans lesquelles sont incrustés les débris d'usure, ceux-ci contenant du fer (provenant de la bille). Le phénomène de transfert est aussi présent à 8 000 J. De plus, la section permet de voir la propagation des fissures. Elles vont jusqu'à 125  $\mu\text{m}$  en profondeur (Fig.3.40). La fissure se propage sous la trace d'usure, parallèlement à la surface, et non vers la profondeur.



*Fig. 3.40. Observations au MEB d'une coupe pour un essai à 8 000 J :  
(a) trace d'usure du carbure WNZVC,  
(b) fissure en profondeur.*

Les grains de carbure de tungstène sont difficilement distinguables. Nous apercevons la présence de défauts situés juste en dessous de la trace d'usure. Ces défauts ne proviennent pas des mécanismes d'endommagement qui se déroulent à la surface. La structure non homogène du carbure WNZVC avec son caractère fragile fait que de nombreux défauts sont présents dans le matériau.

Les mécanismes d'endommagement du carbure WNZVC sont caractérisés par la formation et l'apparition de fissures en haut de la trace d'usure. Ces fissures se propagent sous la trace d'usure et sont le lieu d'incrustation de débris d'usure. On obtient aussi des faciès d'usure avec des ondulations semblables à celles du carbure WCR1. Néanmoins les ondulations sont moins régulières et moins marquées.

### II.2.5. Synthèse sur les modes d'usure des trois carbures

Nous observons les mêmes modes d'usure pour les trois carbures : l'abrasion et le phénomène de transfert. Les faciès d'usure observés sont différents par les propriétés mécaniques des matériaux antagonistes et par les mécanismes qui ont lieu à l'interface. Seul le carbure WNZVC présente des fissures.

Le carbure E6 est caractérisé par l'abondance de débris d'usure répartis sur toute la trace à partir de 400 J, et par la présence de deux cavités latérales, qui se forment dès 1 200 J. Ces zones profondes latérales deviennent de plus en plus marquées avec l'énergie d'impact totale. Ces zones profondes sont lisses avec des rayures sur les grains de WC et présentent des débris d'usure, tandis que la zone centrale est rugueuse avec des grains de WC arrachés. La trace sur la bille est complémentaire de celle du plan, elle présente une cavité centrale.

Les carbures WCR1 et WNZVC ont des traces d'usure lisses, mais présentent des faciès d'usure différents. Le carbure WCR1 présente des marques allongées sur la trace d'usure avec des profondeurs variées. La bille présente ces mêmes caractéristiques. Ces profils ondulés se répartissent sur toute la trace d'usure, aussi bien sur la bille que sur le plan, à 8 000 J. De plus, des débris d'usure sont surtout observables en haut de la trace d'usure, sur le plan. La bille est caractérisée par ces mêmes ondulations et peut s'emboîter sur le faciès du plan. En revanche, sur le carbure WNZVC, on observe des fissures dans lesquelles sont incrustés les débris d'usure. Aucun débris n'est observable sur la trace d'usure. De plus, à 8 000 J des marques irrégulières de profondeurs variables sont observables sur toute la trace (sur la bille et sur le plan).

### II.3. Analyse quantitative de l'usure

Les mesures des volumes d'usure, à l'aide de l'interféromètre numérique, permettent de suivre leur évolution en fonction de l'énergie d'impact totale (Fig.3.41).

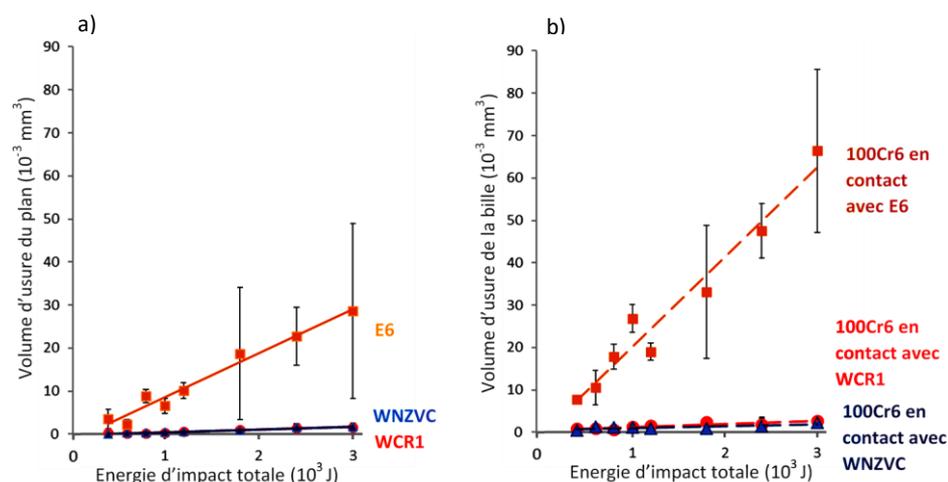


Fig. 3.41. Volumes d'usure en fonction de l'énergie d'impact totale : (a) usure des carbures, (b) usure de la bille.

### Chapitre 3 : Résultats expérimentaux et analyse des traces d'usure

Les résultats présentés pour chaque énergie représentent la moyenne obtenus sur trois essais. On obtient des volumes d'usure pour le carbure E6 qui sont supérieurs à ceux des carbures WNZVC et WCR1.

De plus, on remarque que les volumes d'usure pour les carbures WCR1 et WNZVC sont très similaires. Il en va de même pour les volumes d'usure des billes. La bille en 100Cr6 s'use beaucoup plus lorsqu'elle est en contact avec le carbure E6 qu'avec les carbures WCR1 et WNZVC. Un changement d'échelle permet de mieux séparer ces courbes (Fig.3.42).

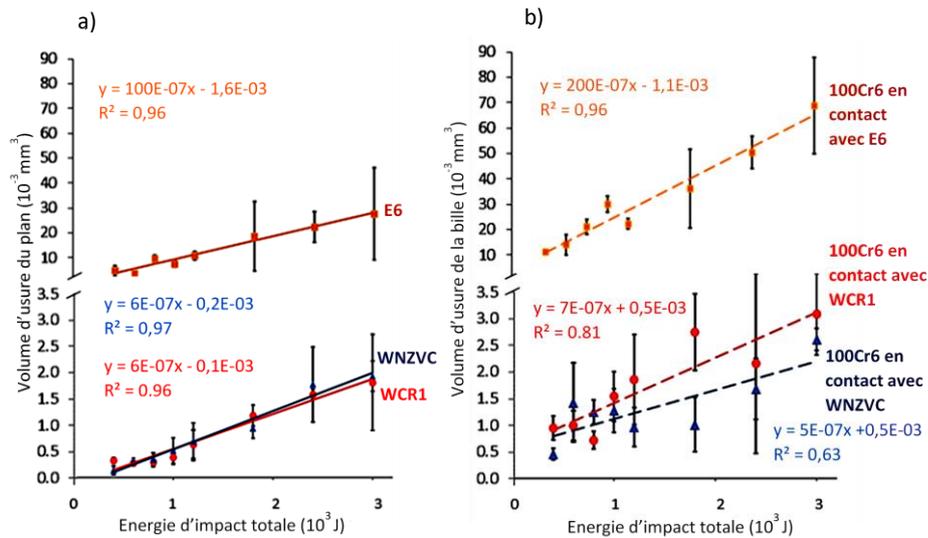


Fig. 3.42. Volumes d'usure en fonction de l'énergie d'impact totale : (a) usure des carbures, (b) usure de la bille.

Nous constatons que les volumes usés augmentent linéairement avec l'énergie d'impact totale (Tableau.3.1). Nous déterminons le coefficient énergétique d'usure,  $C_u$ , comme la pente de la courbe.

Tableau. 3.1. Coefficients énergétiques d'usure des plans et des billes.

Plan	Coefficient énergétique d'usure du plan $C_u$ (mm <sup>3</sup> /J)	Bille 100Cr6 en contact avec	Coefficient énergétique d'usure de la bille $C_u$ (mm <sup>3</sup> /J)
E6	100 .10 <sup>-7</sup>	E6	200 .10 <sup>-7</sup>
WCR1	6 .10 <sup>-7</sup>	WCR1	7 .10 <sup>-7</sup>
WNZVC	6 .10 <sup>-7</sup>	WNZVC	5 .10 <sup>-7</sup>

Les courbes d'usure des carbures WCR1 et WNZVC étant similaires, il y a donc un rapport de 16 environ entre le matériau de référence et les carbures WCR1 et WNZVC. En ce qui concerne les volumes d'usure des billes, le rapport des  $C_u$  (bille) est de 30. En comparant l'usure des carbures et des matériaux antagonistes en question, nous pouvons conclure que la bille en acier en contact avec le carbure E6 s'use deux fois plus.

Par contre les coefficients énergétiques d'usure des billes qui impactent les carbures WCR1 et WNZVC sont proches des coefficients énergétiques d'usure des plans. Le rapport des volumes d'usure de la bille sur les volumes d'usure du plan permet de comparer l'usure des matériaux antagonistes (Fig.3.43).

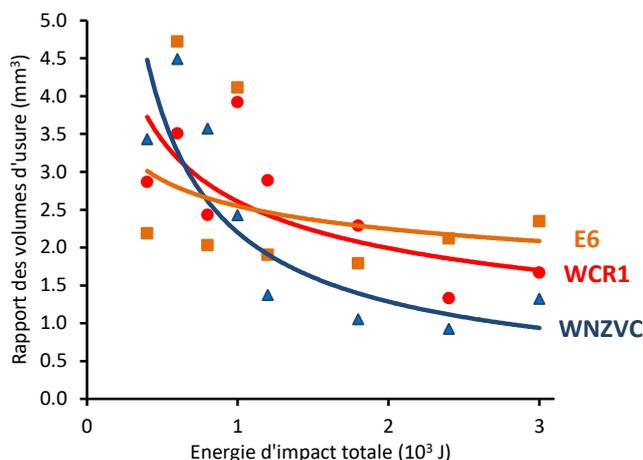


Fig. 3.43. Rapport des volumes d'usure de la bille et du plan en fonction de l'énergie d'impact totale.

On obtient une tendance similaire pour les carbures E6 et WCR1, le rapport diminue puis se stabilise à partir de 1 200 J. Le rapport des volumes d'usure pour le carbure WNZVC diminue fortement dès 400 J (facteur 4) et il se stabilise vers 1 800 J autour de 1.

La bille qui impacte les carbures WCR1 et E6 s'use donc environ 3 fois plus que le plan entre 400 et 1 200 J. Puis le facteur diminue légèrement jusqu'à atteindre un facteur 2 au-delà de 1 200 J. La bille au contact du carbure WNZVC s'use 4 fois plus que le plan à de faibles énergies d'impact-glissement (entre 400 et 1 800 J). Puis elle devient constante autour de 1 à de fortes énergies (à partir de 1 800 J).

## II.4. Conclusions

Les principaux modes d'usure sont l'abrasion, l'usure par transfert et la fissuration (uniquement pour le carbure WNZVC). On constate que les traces sont généralement circulaires et présentent des faciès d'usure qui sur le plan et sur la bille sont complémentaires. Lorsque la bille entre en contact avec le plan, l'impact provoque progressivement une déformation de la surface de contact et génère des débris. Ces débris peuvent adhérer à la surface et favoriser l'usure à deux corps en endommageant les matériaux qui sont en frottement. On remarque que cette adhésion des débris est très faible pour le cas du carbure WNZVC. En effet les débris sont uniquement présents au niveau des fissures (incrustation des débris). Lors du glissement, ces débris sont évacués en dehors de l'interface. Cela va accentuer l'usure à trois corps. De plus l'augmentation de la surface de contact au cours de l'essai conduit à répartir de façon non uniforme les contraintes (avec les débris d'usure qui

augmentent la rugosité des surfaces). Il se crée alors des contraintes locales qui accentuent l'usure à des endroits précis et cela va conduire à déformer les surfaces antagonistes et générer des traces d'usure avec des faciès particuliers

L'analyse des volumes d'usure permet de remonter aux coefficients énergétiques d'usure des carbures et des billes. On constate que le carbure E6 s'use le plus parmi les trois carbures testés. La bille antagoniste est elle aussi la plus usée. Les volumes d'usure des carbures WNZVC et WCR1 sont très similaires. Le rapport des volumes d'usure de la bille et du plan montre, pour les carbures E6 et WCR1, qu'à de faibles énergies (400 à 1 200 J) la bille doit s'user environ 3 fois plus que le plan. Ce phénomène est moins marqué à de plus fortes énergies d'impact totales (à partir de 1 200 J). En revanche le carbure WNZVC présente un rapport des volumes d'usure qui diminue fortement (facteur 4 à 1) entre 400 et 1 800 J, avant de se stabiliser à 1, à partir de 1 800 J. On peut en conclure que l'endommagement du carbure, surtout à de faibles énergies, exige une usure sévère de la bille.

### III. Effet de la nature de la bille sur l'usure

#### III.1. Conditions expérimentales

Les essais étaient jusqu'ici réalisés avec une bille en acier 100Cr6. Dans cette partie, nous utilisons une bille en SiC. La bille en SiC avec une dureté (28 GPa) supérieure à celles des carbures de tungstène (14 GPa) va permettre de travailler dans des conditions d'impact-glissement plus sévères. Les autres conditions expérimentales, comme l'angle d'impact et la raideur des lames rigides, sont inchangées. La rugosité Ra de la bille en SiC est légèrement inférieure (Ra de 0,2  $\mu\text{m}$ ) que celle de la bille 100Cr6 (Ra de 0,32  $\mu\text{m}$ ).

#### III.2. Observations des traces et identification des mécanismes d'usure

##### III.2.1. Mécanismes d'usure du carbure E6

###### Observation des traces d'usure

Les traces d'usure du carbure E6 et de la bille en SiC sont présentées sur la Fig.3.44. Les traces sont recouvertes de débris d'usure, leur nettoyage aux ultrasons permet d'observer ces traces. Les traces sur le carbure E6 sont un peu allongées et font jusqu'à 1 200  $\mu\text{m}$  de longueur dans le sens du glissement. Elles sont plus petites que les traces d'usure obtenues avec la bille 100Cr6. A 400 J les traces sur le carbure sont similaires, mais à 800 J la trace d'usure du carbure avec la bille en SiC est deux fois plus petite que celle impactée avec la bille 100Cr6. A 1 800 et 3 000 J, le rapport diminue légèrement (la trace est 1,3 fois plus petite). Les traces sur les billes sont circulaires et ne présentent pas de débris d'usure.

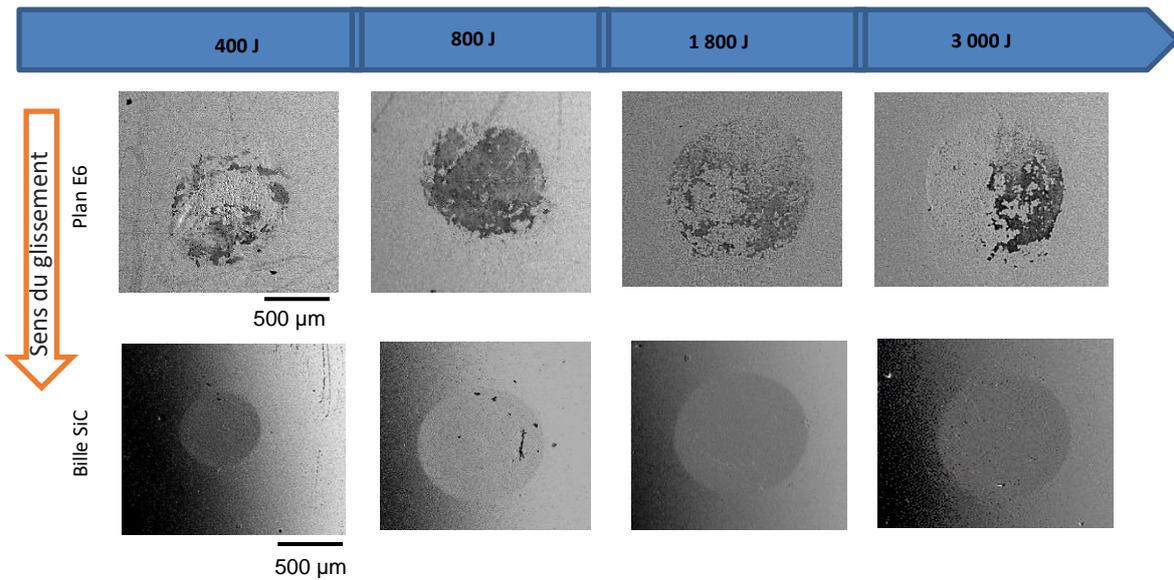


Fig. 3.44. Observations au MEB des traces d'usure du carbure E6 et des billes en SiC pour différentes énergies totales.

Les traces d'usure du carbure E6 montrent dès 400 J des micro-rayures sur les grains de WC résultant de l'usure abrasive. Les grains de WC sont endommagés. On peut apercevoir des grains rayés et déformés (Fig. 3.45).

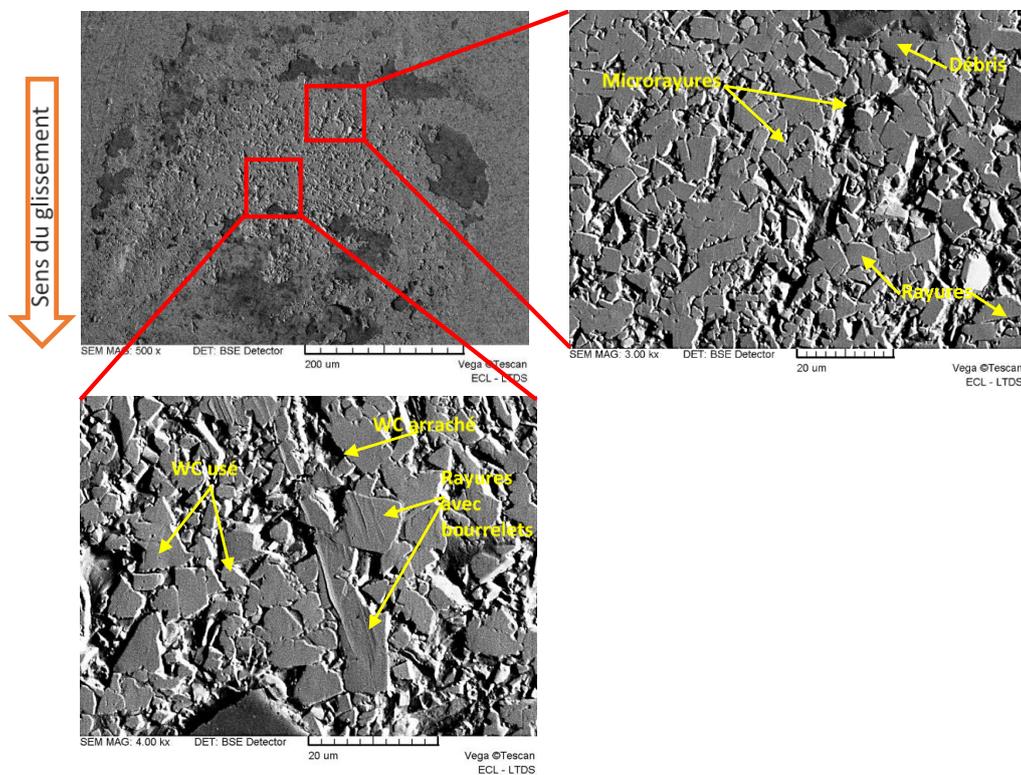


Fig. 3.45. Observations au MEB du haut de la trace d'usure du carbure E6 à 400 J.

A cela s'ajoutent des rayures qui résultent de l'arrachement grossier de matière lors du contact bille/carbure. Ces rayures profondes qui déchaussent les grains WC sont dues aux débris d'usure générés à l'interface. Des grains de carbures sont alors rayés et des sillons s'étendant sur plusieurs grains sont visibles. Le carbure E6 plus ductile que la bille en SiC va se déformer plastiquement et formant du labourage avec des bourrelets de part et d'autre du sillon. Ces rayures peuvent aussi contribuer à fragiliser l'interface grains WC / matrice Co et favoriser l'éjection des grains. On peut alors voir des « trous » qui étaient occupés par les grains WC dans les rayures formées.

Plus l'énergie d'impact totale augmente, plus l'usure est sévère. Les rayures deviennent de plus en plus longues (jusqu'à 75  $\mu\text{m}$ ) sur la trace d'usure (Fig.3.46).

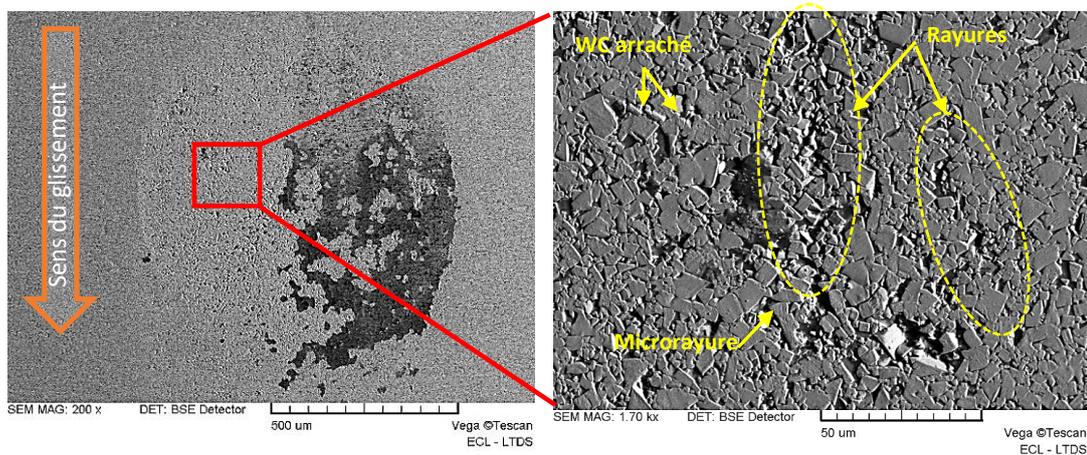


Fig. 3.46. Observations au MEB de la trace d'usure sur le carbure E6 à 3 000 J.

La trace d'usure du carbure est recouverte de débris d'usure. On peut voir sur le côté droit de la trace le dépôt de débris. Par contre, la bille en SiC présente très peu de débris adhérant à sa surface. Sur la trace d'usure, on observe des fissures concentriques (Fig.3.47). Ces fissures concentriques témoignent de la sévérité des impacts. Des débris d'usure y sont incrustés.

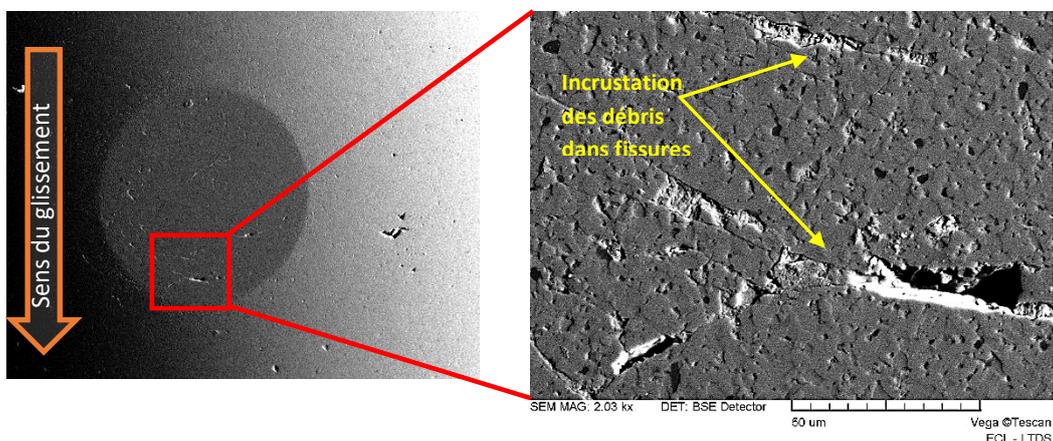


Fig. 3.47. Observations au MEB de la trace d'usure sur la bille à 3 000 J.

Mécanisme de transfert

Les débris générés lors des impacts-glissements sur la trace d'usure du carbure contiennent essentiellement du silicium provenant de la bille en SiC (Fig.3.48).

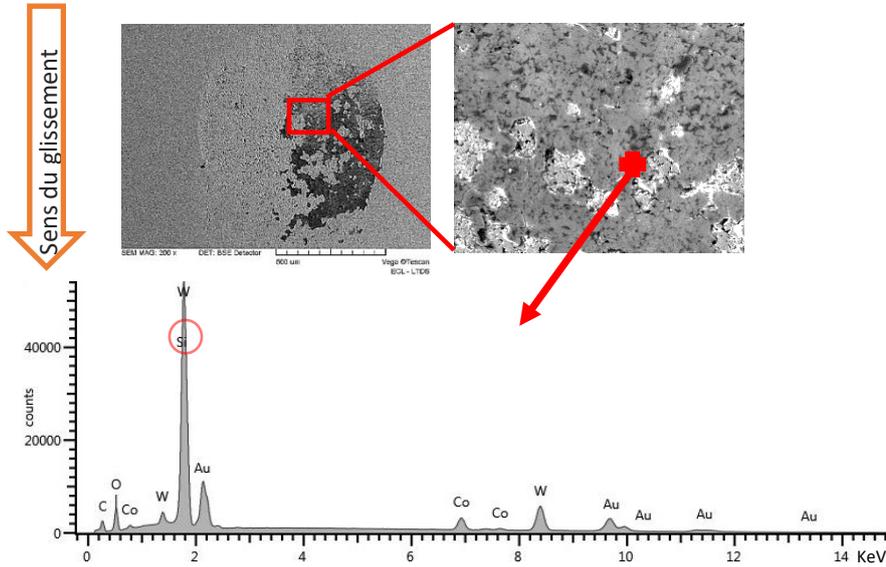


Fig. 3.48. Observations au MEB avec EDX de la trace d'usure du carbure E6 à 1 800 J.

Nous observons un processus de transfert similaire à celui qui a lieu avec les carbures et la bille en acier. Des éléments cobalt et tungstène sont aussi présents sur la bille, ce qui signifie que des débris du carbure de tungstène adhèrent à la surface de la bille (Fig.3.49).

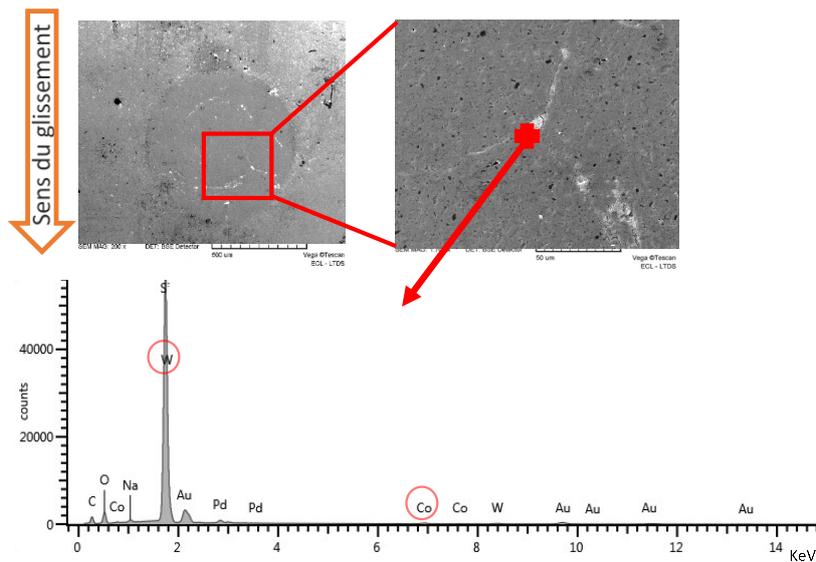


Fig. 3.49. Observations au MEB avec EDX de la bille SiC à 1 800 J.

En conclusion les mécanismes d'usure observés sont principalement de l'abrasion et de l'adhésion avec un mécanisme de transfert. Les traces d'usure sur le carbure E6 sont généralement circulaires avec un dépôt important de débris d'usure, tandis que les traces d'usure sur la bille en SiC sont fissurées avec très peu de débris d'usure. Sur la trace d'usure, les débris d'usure sont incrustés dans les fissures concentriques.

### III.2.2. Mécanismes d'usure du carbure WCR1

#### Observation des traces d'usure

Nous constatons que les traces d'usure sont circulaires et de petite taille par rapport aux traces sur le carbure E6, impacté avec la bille en SiC (Fig.3.50). Les traces d'usure du carbure WCR1 font entre 500 et 700  $\mu\text{m}$  de diamètre. Elles sont recouvertes entièrement de débris d'usure.

Les traces d'usure des billes font les mêmes dimensions que celles des essais avec le carbure E6 et ne présentent aucune trace d'adhésion. Elles sont de plus petite taille que celles du carbure WCR1 impacté avec la bille en 100Cr6.

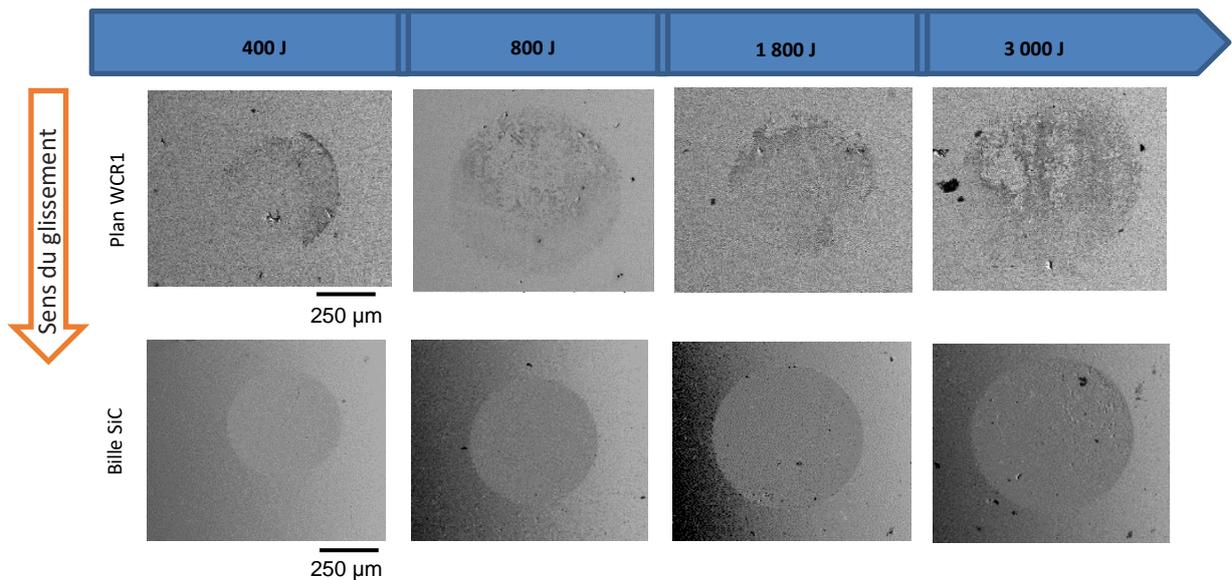


Fig. 3.50. Observations au MEB des traces d'usure du plan WCR1 et de la bille en SiC pour différentes énergies totales.

L'observation des traces d'usure indique qu'à 400 J le carbure WCR1 présente des rayures comme celles observées pour le contact SiC/E6 (Fig.3.51.a).

Ces rayures forment des sillons sur le carbure WCR1. La bille, quant à elle, présente des faciès d'usure avec des creux et des bosses. Cela signifie que les bosses sur la bille viennent rayer le carbure et créer les sillons (Fig.3.51.b).

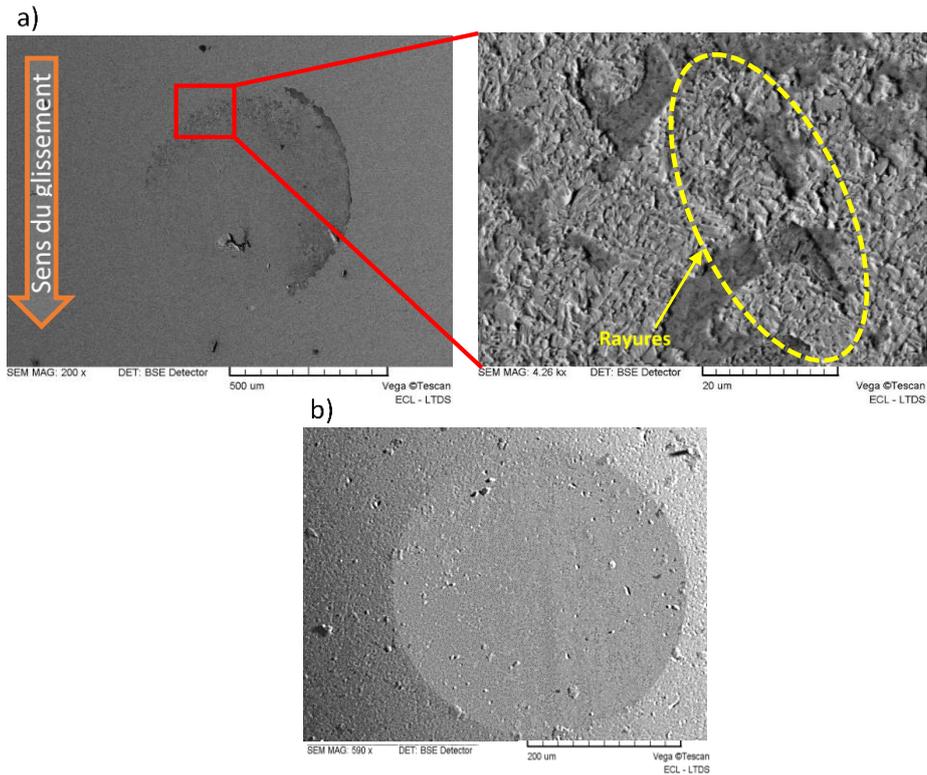


Fig. 3.51. Observations au MEB des essais à 400 J :  
 (a) usure du carbure WCR1,  
 (b) bille en SiC.

A partir de 1 800 J, les traces d'usure de la bille sont caractérisées par un profil lisse (sans les faciès d'usure observés précédemment). De plus, la trace d'usure du plan est quasiment recouverte de débris. Cette couche superficielle a la particularité d'avoir un profil ondulé et semble jouer un rôle de couche sacrificielle. En effet, à cette énergie, la bille est en contact avec cette couche de débris qui contribue à endommager la bille en SiC (Fig.3.52).

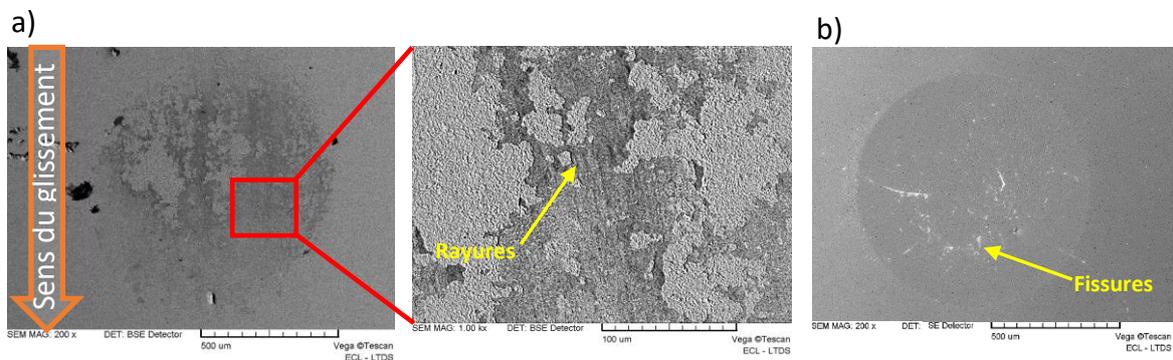
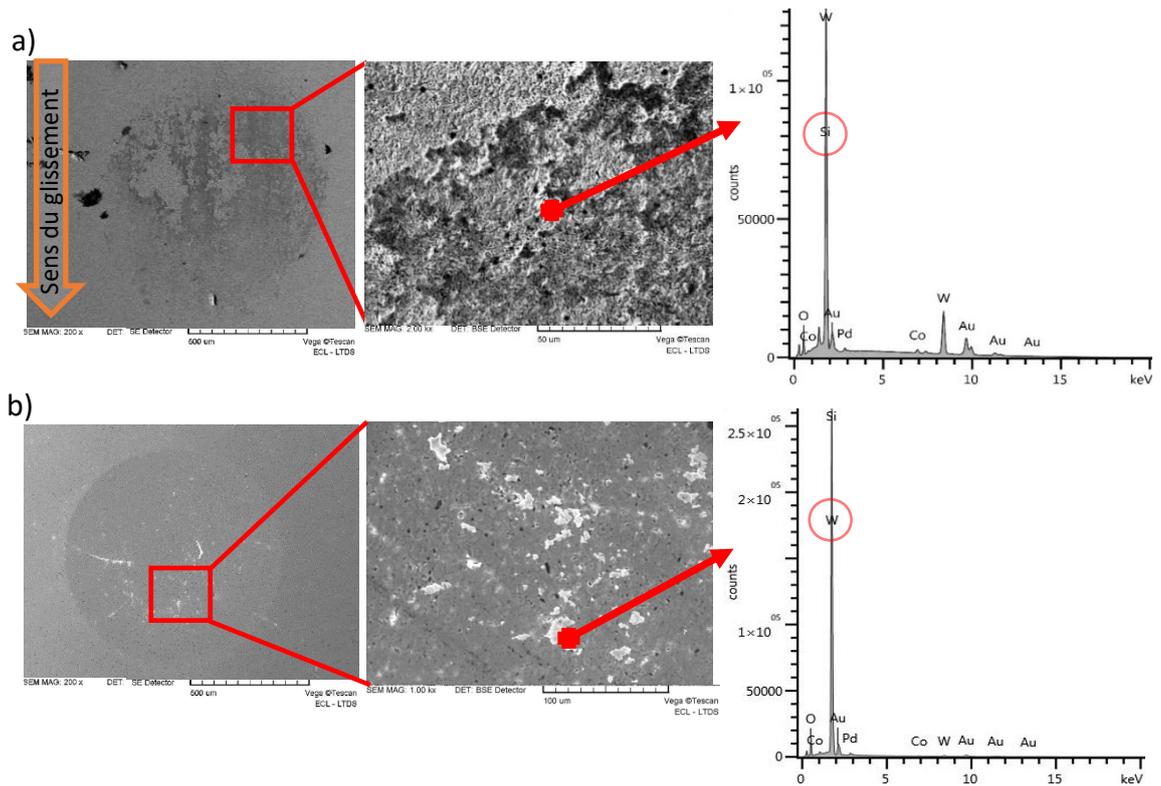


Fig. 3.52. Observations au MEB à 3 000 J :  
 (a) trace d'usure du carbure WCR1,  
 (b) trace d'usure sur la bille en SiC.

## Chapitre 3 : Résultats expérimentaux et analyse des traces d'usure

La bille se fragmente et crée des débris qui vont venir approvisionner la couche sacrificielle. Ce processus contribue à la fois à enrichir la couche en débris (qui recouvre la trace sur le carbure) et contribue à aggraver l'usure de la bille. Des fissures concentriques sont visibles sur la trace d'usure de la bille.

Les débris qui s'accumulent sur la trace d'usure sont des débris riches en Si qui proviennent de la bille en SiC. De plus, on observe sur la trace d'usure sur la bille des débris constitués de W et de Co (Fig.3.53).



*Fig. 3.53. Observations au MEB avec EDX des essais à 3 000 J :  
(a) trace d'usure du carbure WCR1,  
(b) trace d'usure sur la bille SiC.*

En conclusion, les mécanismes d'usure observés sur le carbure WCR1 sont similaires à ceux du carbure E6, avec de l'abrasion et de l'adhésion. Les fissures sont aussi présentes sur la trace d'usure de la bille. Par contre, le dépôt de débris d'usure est important et conduit à la formation d'une couche protectrice contre l'usure du plan.

### III.2.3. Mécanismes d'usure du carbure WNZVC

Les traces d'usure du carbure WNZVC contre la bille SiC sont présentées sur la Fig.3.54. Nous observons des traces de 500 à 1 100  $\mu\text{m}$  de diamètre et qui sont peu allongées sur le carbure. Les billes ont des traces qui sont circulaires (700 à 1 200  $\mu\text{m}$  de diamètre).

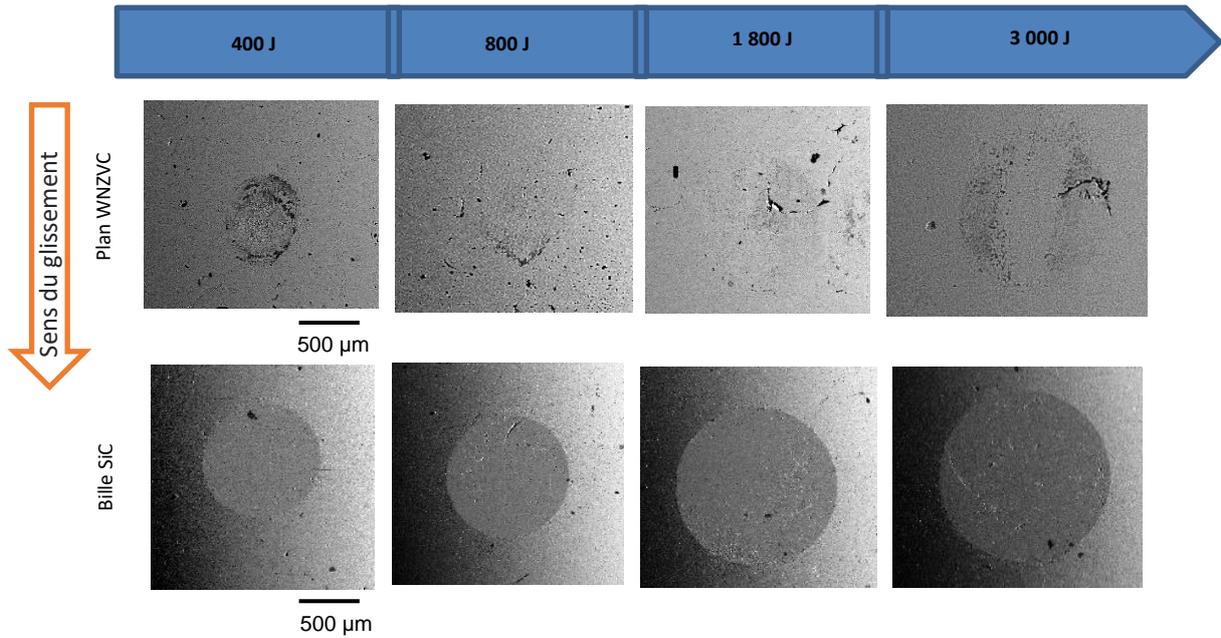


Fig. 3.54. Observations au MEB des traces d'usure du carbure WNZVC et de la bille en SiC pour différentes énergies totales.

La trace d'usure du carbure WNZVC présente des rayures grossières à 400 J qui suggèrent que la bille et les débris générés au contact viennent rayer le carbure plus ductile en formant des sillons (Fig.3.55). La trace d'usure sur la bille a un profil lisse et ne présente aucun faciès d'usure particulier.

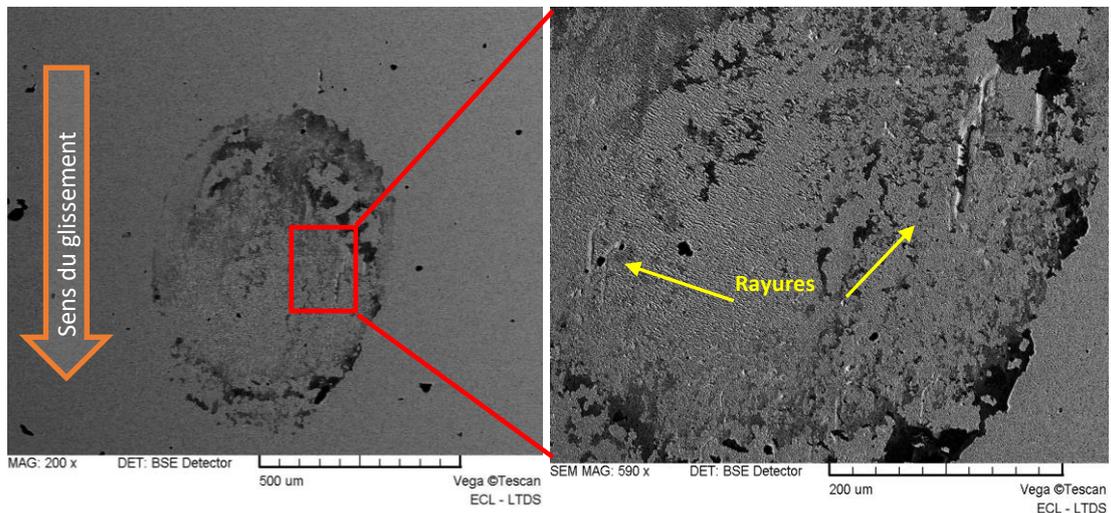
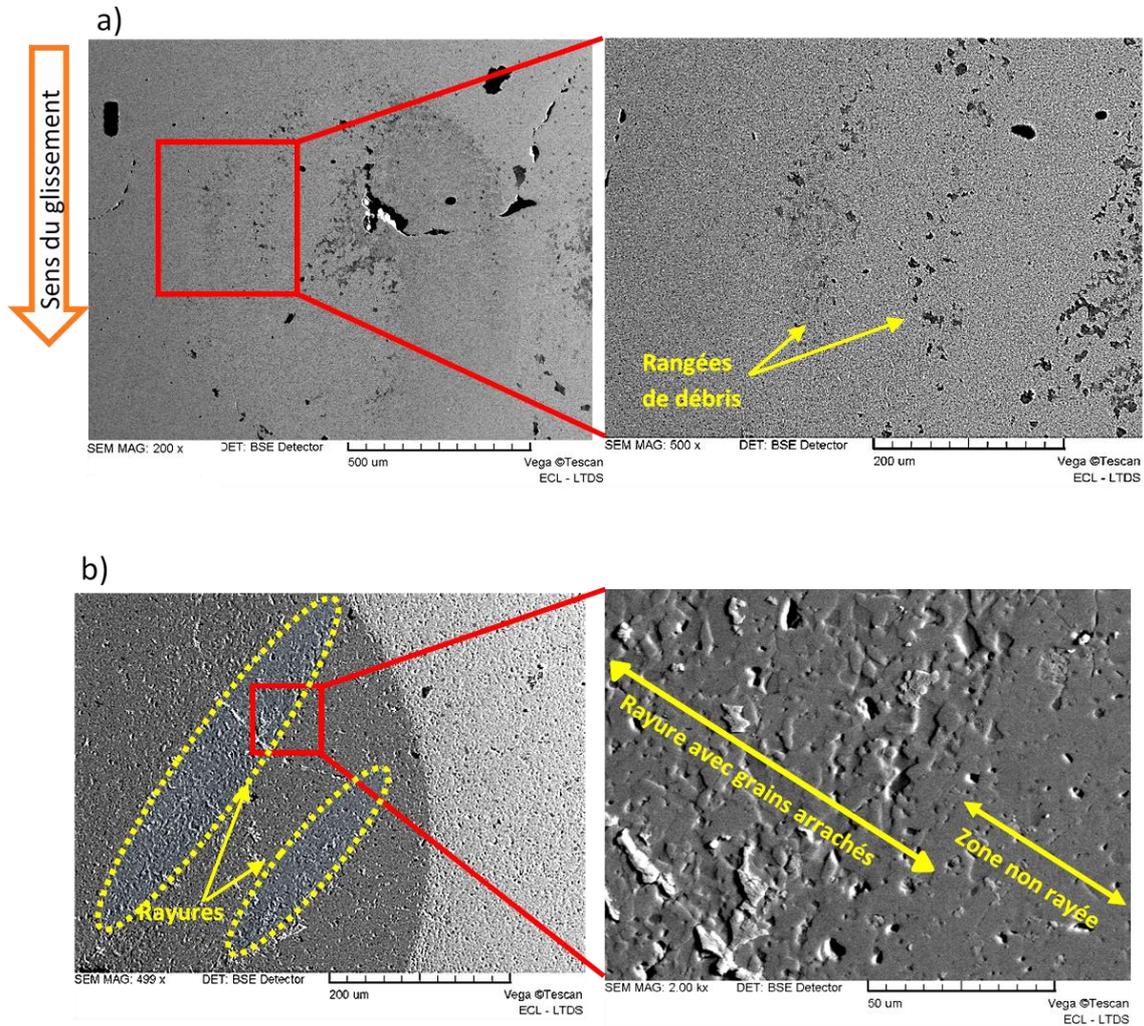


Fig. 3.55. Observations au MEB de la trace d'usure du carbure WNZVC à 400 J.

Dès 800 J, la bille se fissure avec des fissures concentriques et, à partir de 1 800 J, la bille présente des faciès avec des « creux » et des « bosses ». Nous observons un mécanisme d'usure similaire à celui de WCR1 impactée par la bille en SiC à 400 J.

Par contre cet aspect n'est pas réparti sur toute la trace de la bille (Fig.3.56). Les débris sont accumulés selon des rangées sur la trace d'usure du WNZVC. Ces rangées de débris correspondent à l'endroit où se trouvent ces faciès de la bille (Fig.3.56). Ces zones rayées sur la bille ont des grains arrachés qui témoignent de l'usure de la matrice liante<sup>2</sup>. Les grains sont alors fragilisés et sont susceptibles d'être arrachés.



*Fig. 3.56. Observations au MEB des essais à 1 800 J :  
(a) trace d'usure du carbure WNZVC avec vue détaillée,  
(b) trace d'usure de la bille en SiC avec vue détaillée.*

Des analyses EDX ont montré qu'il s'agit de débris riches en Si et le mécanisme de transfert est aussi présent sur la bille (Fig.3.57). Sur la bille, ces débris sont incrustés dans les fissures. Par contre sur la trace d'usure du carbure, les débris sont localisés sur toute la trace.

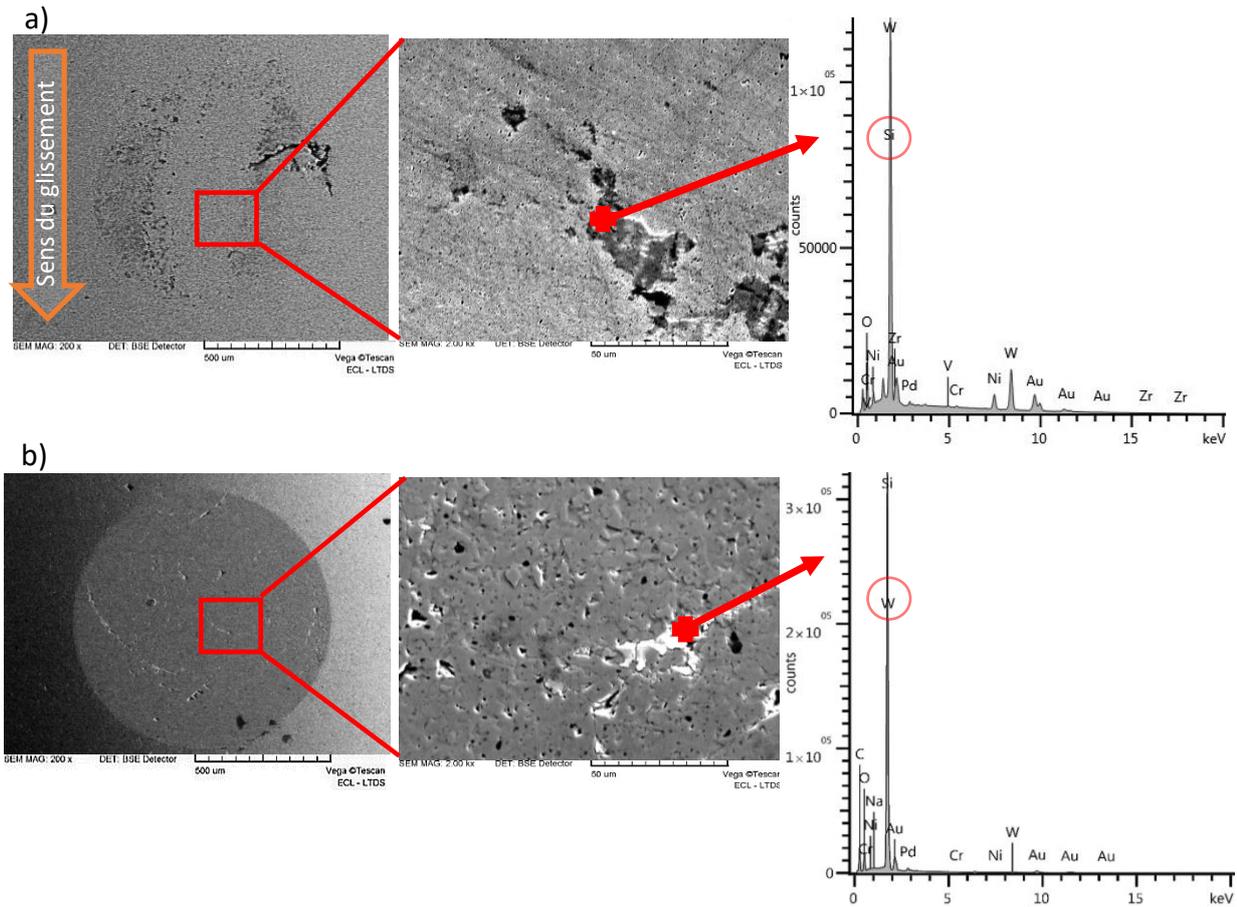


Fig. 3.57. Observations au MEB avec EDX à 3 000 J :

(a) trace d'usure du carbure WNZVC,

(b) trace d'usure de la bille SiC.

Ces observations nous permettent de conclure que les mécanismes d'usure des essais avec le carbure WNZVC et la bille SiC sont caractérisés par un dépôt de débris d'usure sur le plan. Ce dépôt en rangées parallèles au glissement raye la bille et on observe des zones rayées sur la trace de la bille. Ce mécanisme d'abrasion est combiné avec un mécanisme de transfert.

### III.3. Analyse quantitative de l'usure

Les volumes d'usure des essais du carbure E6 impacté avec la bille en SiC montrent que l'usure diminue significativement avec la bille SiC par rapport aux essais avec une bille en acier (Fig.3.58).

### Chapitre 3 : Résultats expérimentaux et analyse des traces d'usure

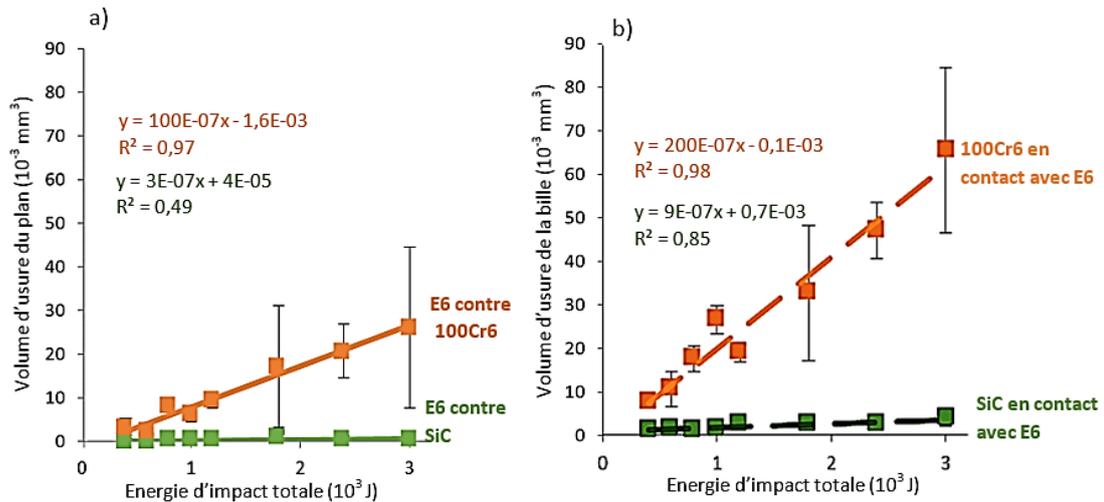


Fig. 3.58. Volumes d'usure en fonction de l'énergie d'impact totale :  
 (a) plans en carbure E6,  
 (b) billes en SiC.

Les coefficients énergétiques, pour le contact carbure E6 contre la bille SiC, sont respectivement de  $3 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{J}$  pour le carbure et de  $9 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{J}$  pour la bille (Tableau.3.2). Les rapports des coefficients énergétiques d'usure sont de 33 pour les carbures et de 22 pour les billes. Cela signifie que la bille en SiC plus dure que l'acier s'use beaucoup moins. De plus, on constate que la bille SiC comme la bille 100Cr6 s'use à peu près 2,5 fois plus que le carbure.

Tableau. 3.2. Coefficients énergétiques d'usure du plan en carbure E6 et des billes en 100Cr6 et en SiC.

Plan	Coefficient énergétique d'usure du plan $C_u$ ( $\text{mm}^3/\text{J}$ )	Bille en contact avec E6	Coefficient énergétique d'usure de la bille $C_u$ ( $\text{mm}^3/\text{J}$ )
E6	$100 \cdot 10^{-7}$	100Cr6	$200 \cdot 10^{-7}$
E6	$3 \cdot 10^{-7}$	SiC	$9 \cdot 10^{-7}$

La bille en SiC s'use peu par rapport à la bille en 100Cr6 contre le carbure E6. La dureté élevée de la bille en SiC (4 fois plus dure que la bille 100Cr6) fait en sorte qu'il y a peu de débris d'usure avec le carbure E6. Ceci tend à diminuer l'usure à « 3 corps » et fait que l'usure est moins sévère.

Les essais réalisés avec les carbures WCR1 et WNZVC et la bille en SiC montrent aussi que les plans s'usent moins par rapport aux essais avec la bille 100Cr6. Néanmoins, lorsque la bille en SiC impacte les carbures WCR1 et WNZVC, elle s'use plus que la bille en 100Cr6 (Fig. 3.59 et 3.60).

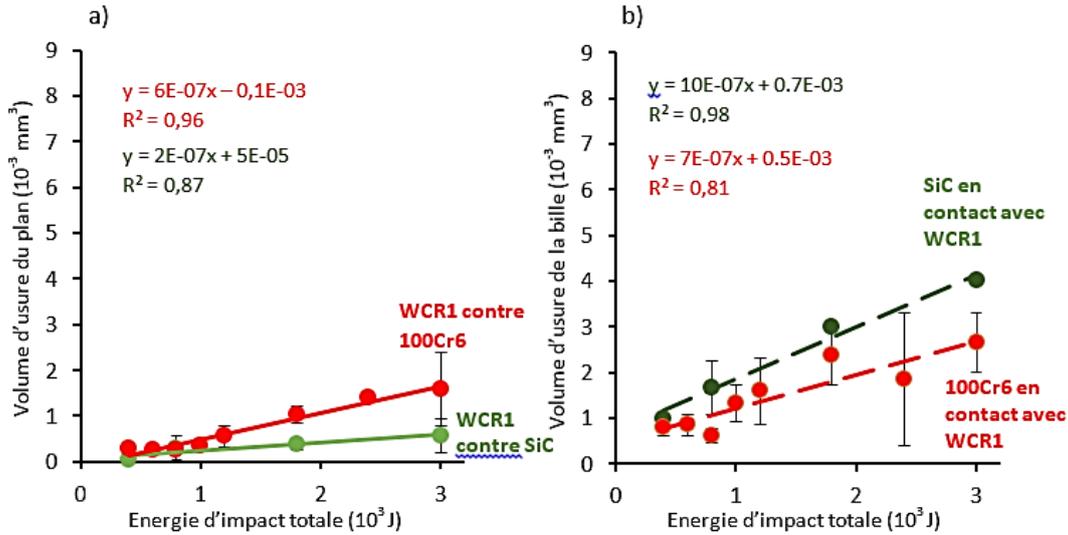


Fig. 3.59. Volumes d'usure en fonction de l'énergie d'impact totale :  
(a) plans en carbure WCR1,  
(b) billes.

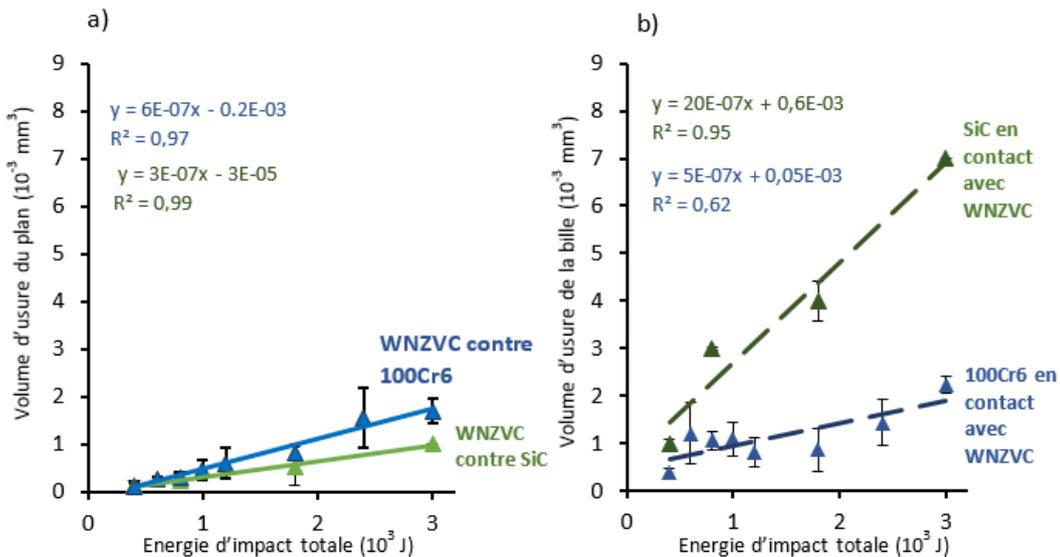


Fig. 3.60. Volumes d'usure en fonction de l'énergie d'impact totale :  
(a) plans en carbure WNZVC,  
(b) billes.

Le tableau.3.3 regroupe les coefficients énergétiques d'usure; on peut effectivement voir que les carbures WCR1 et WNZVC s'usent environ 2 fois moins avec la bille en SiC (rapport de 3 pour le carbure WCR1 et rapport de 2 pour WNZVC).

Tableau. 3.3. Coefficients énergétiques d'usure pour les essais avec les carbures WCR1 et WNZVC.

Plan WCR1	Coefficient énergétique d'usure du plan $C_u$ (mm <sup>3</sup> /J)	Bille en contact avec WCR1	Coefficient énergétique d'usure de la bille $C_u$ (mm <sup>3</sup> /J)
WCR1	$6 \cdot 10^{-7}$	100Cr6	$7 \cdot 10^{-7}$
WCR1	$2 \cdot 10^{-7}$	SiC	$10 \cdot 10^{-7}$
Plan WNZVC	Coefficient énergétique d'usure du plan $C_u$ (mm <sup>3</sup> /J)	Bille en contact avec WNZVC	Coefficient énergétique d'usure de la bille $C_u$ (mm <sup>3</sup> /J)
WNZVC	$6 \cdot 10^{-7}$	100Cr6	$5 \cdot 10^{-7}$
WNZVC	$3 \cdot 10^{-7}$	SiC	$20 \cdot 10^{-7}$

Pour les billes en SiC, on constate respectivement un rapport de 1,4 et de 4 des coefficients d'usure pour le carbure WCR1 et pour le carbure WNZVC. Les carbures WCR1 et WNZVC, plus durs que le carbure E6, vont favoriser la formation des débris d'usure. Ces débris vont conduire à l'usure « à 3 corps » et à la formation de la couche sacrificielle qui va accélérer l'usure. De plus, le fait que la bille en SiC s'use à peu près 2 fois plus avec le carbure WNZVC qu'avec le carbure WCR1, s'explique par le caractère fragile du carbure WZNVC. En effet, ce dernier avec sa faible ténacité, tend à se fracturer facilement. Ceci augmente la rugosité de l'interface et accentue l'usure. Par ailleurs, on remarque que les billes en SiC s'usent 6 fois plus que les carbures WCR1 et WNZVC. Cela témoigne de l'usure importante de la bille (formation des débris d'usure) contre ces types de carbures.

### III.4. Conclusions

La nature de la bille a une influence sur le contact bille/plan lors des sollicitations d'impact-glisement. Nous pouvons constater que les trois carbures de tungstène ont des faciès d'usure différents. Néanmoins, ils ont tendance à se rayer au contact de la bille en SiC. Nous observons des micro-rayures sur les grains de carbure de tungstène suggérant une usure abrasive, et des rayures causées par le frottement de particules dures laissant un sillon sur la trace d'usure. Ces sillons peuvent s'étendre sur plusieurs grains de WC.

Pour le carbure E6, on remarque que les traces d'usure ne comportent pas de faciès particuliers. En revanche, la bille en SiC présente des fissures concentriques. Nous constatons, pour WCR1 et WNZVC, qu'à partir de 400 J, les débris générés lors des impacts sont répartis sur la trace d'usure des carbures de façon bien précise, en rangées parallèles au sens du glissement. Cette disposition fait que les débris accumulés deviennent suffisamment durs pour contribuer à l'usure de la bille en SiC. Celle-ci présente un faciès d'usure qui épouse la forme des rangées de débris. Elle présente des zones lisses peu endommagées alternées avec

des zones plus usées caractérisées par des grains SiC arrachés et des débris adhérents à la surface de la bille.

Au-delà de 1 800 J, les traces d'usure de WCR1 montrent que les débris sont répartis sur toute la trace d'usure du carbure formant une couche sacrificielle et protectrice, tandis que la bille est caractérisée par un faciès lisse régulier avec des fissures.

Les volumes d'usure sont significativement réduits par rapport aux essais effectués avec la bille en acier. Le rapport des coefficients énergétiques d'usure est de 33 pour le carbure E6. Il est plus faible pour les carbures WCR1 et WNZVC. Cette importante chute du coefficient énergétique d'usure avec le carbure E6, peut s'expliquer par le fait que la bille en SiC plus dure que celle en acier (avec un rapport de dureté de 4) produit beaucoup moins de débris d'usure lors des impacts-glissements. Cela signifie que le troisième corps est moins important. Ainsi, les processus de mouvement du troisième corps contribuant à arracher la matière sont significativement affaiblis.

En revanche, au contact des carbures WCR1 et WNZVC (plus durs que le carbure E6), la bille SiC s'use beaucoup plus que la bille 100Cr6. La bille s'use jusqu'à 10 fois plus que la bille 100Cr6 (avec le carbure WNZVC). L'usure de la bille en SiC est alors accentuée avec la présence des débris et de la couche sacrificielle.

## **IV. Effet de l'angle d'impact sur l'usure**

### **IV.1. Conditions expérimentales**

Afin d'étudier l'effet du glissement sur les mécanismes d'usure, nous avons réalisé des essais avec un impact pur (sans glissement). Les essais présentés dans cette partie sont réalisés avec un seul couple de matériaux : le couple plan E6 / bille 100Cr6. Les énergies d'impact totales sont de 400, 800, 1 800 et 3 000 J.

### **IV.2. Analyse qualitative des traces d'usure**

Les traces d'usure sont toutes parfaitement circulaires ce qui est logique pour un impact normal et sans glissement. On peut constater que la taille des traces d'usure n'évolue quasiment pas à partir de 800 J, surtout pour la bille (Fig. 3.61). Les dimensions des traces sur le carbure et sur la bille varient de 700 à 1 300  $\mu\text{m}$  de diamètre.

On remarque que les traces d'usure sont plus petites que celles obtenues avec les essais à 60°. A 400 J, les traces d'usure ont les mêmes dimensions (700  $\mu\text{m}$  de diamètre), mais à partir de 800 J, les traces à 90° sont 1,4 fois plus petites que celles à 60°.

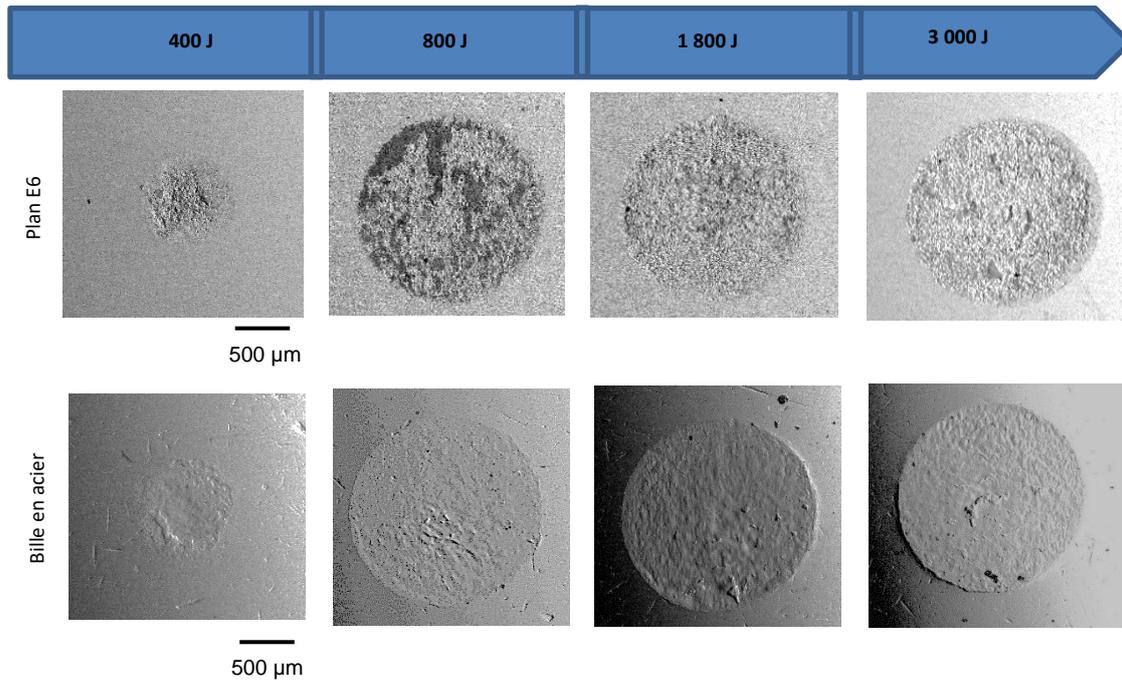


Fig. 3.61. Observations au MEB des traces d'usure du carbure E6 et de la bille.

A 400 J, des rayures sur le carbure sont visibles avec des grains déformés suite aux impacts (Fig.3.62). La trace sur la bille est circulaire avec un centre profond et plus endommagé. Des creux sont visibles avec des micro-rayures témoignant d'un glissement parasite de faible amplitude (Fig.3.63). Ce glissement radial est lié à l'augmentation de l'enfoncement de la bille sur le carbure au cours de chaque impact.

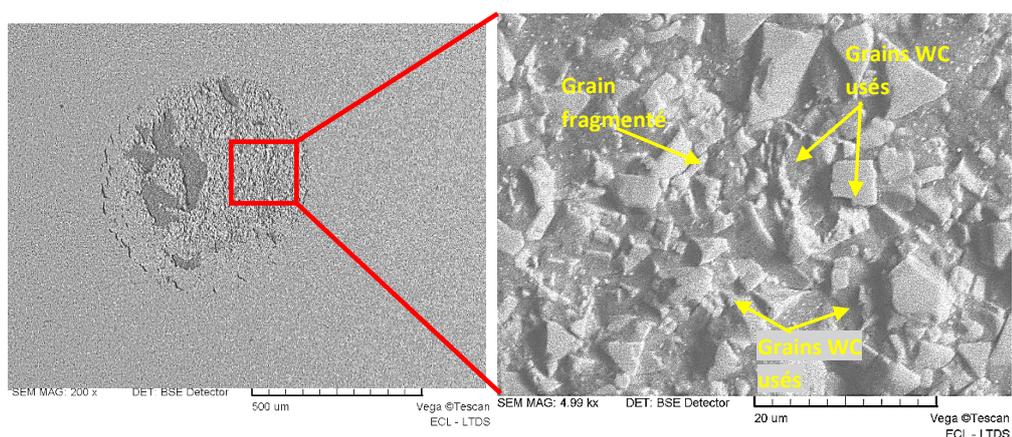


Fig. 3.62. Observations au MEB de la trace d'usure du carbure E6 à 400 J.

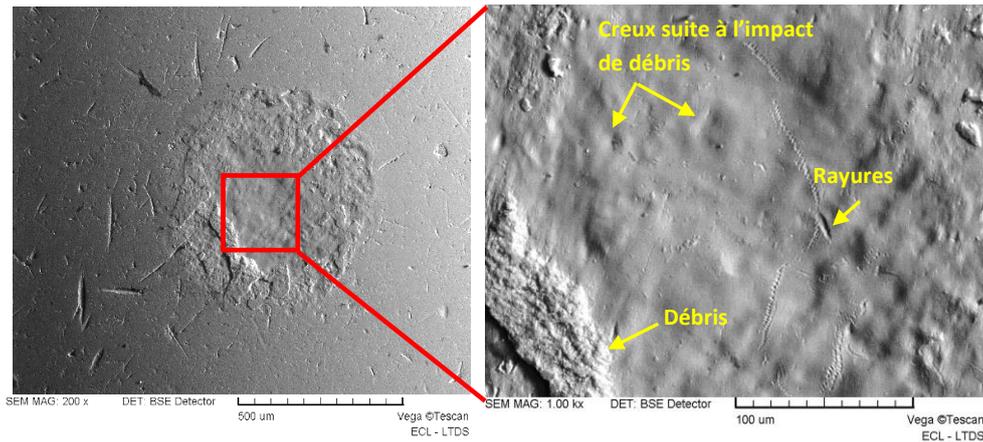


Fig. 3.63. Observations au MEB de la trace d'usure de la bille 100Cr6 à 400 J.

A partir de 800 J, les endommagements sont accentués. Sur la bille, on observe des creux allongés. Ses creux deviennent le lieu de stockage des débris et ces-derniers contribuent à aggraver les mécanismes d'usure. En effet, les débris accumulés dans ces creux peuvent approvisionner le contact en débris et favoriser l'usure abrasive. (Fig.3.64).

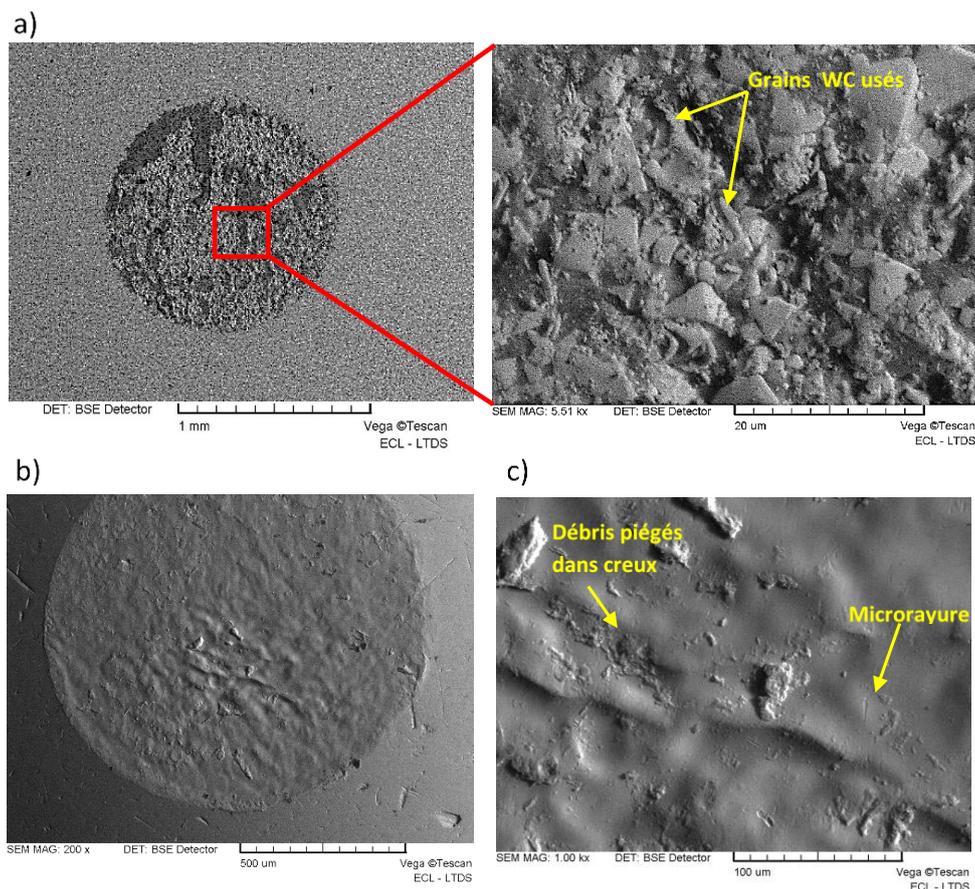


Fig. 3.64. Observations au MEB des essais à 800 J :  
 (a) trace d'usure du carbure E6 avec vue détaillée d'une partie de la trace,  
 (b) trace d'usure de la bille,  
 (c) trace d'usure du centre de la bille.

### Chapitre 3 : Résultats expérimentaux et analyse des traces d'usure

Au-delà de 800 J, ces creux s'aplatissent progressivement et la trace d'usure devient lisse. Les grains de WC sont entassés et certains sont arrachés (Fig.3.65).

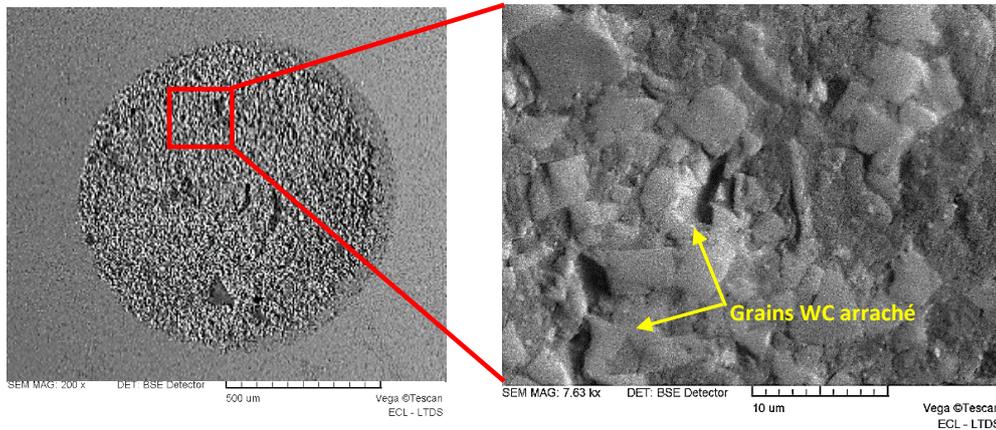


Fig.3.65. Observations au MEB des essais à 3 000 J de la trace d'usure du carbure E6.

Nous remarquons également beaucoup de micro-rayures sont présentes, sur la trace de la bille avec des débris adhérant à la surface (Fig.3.66).

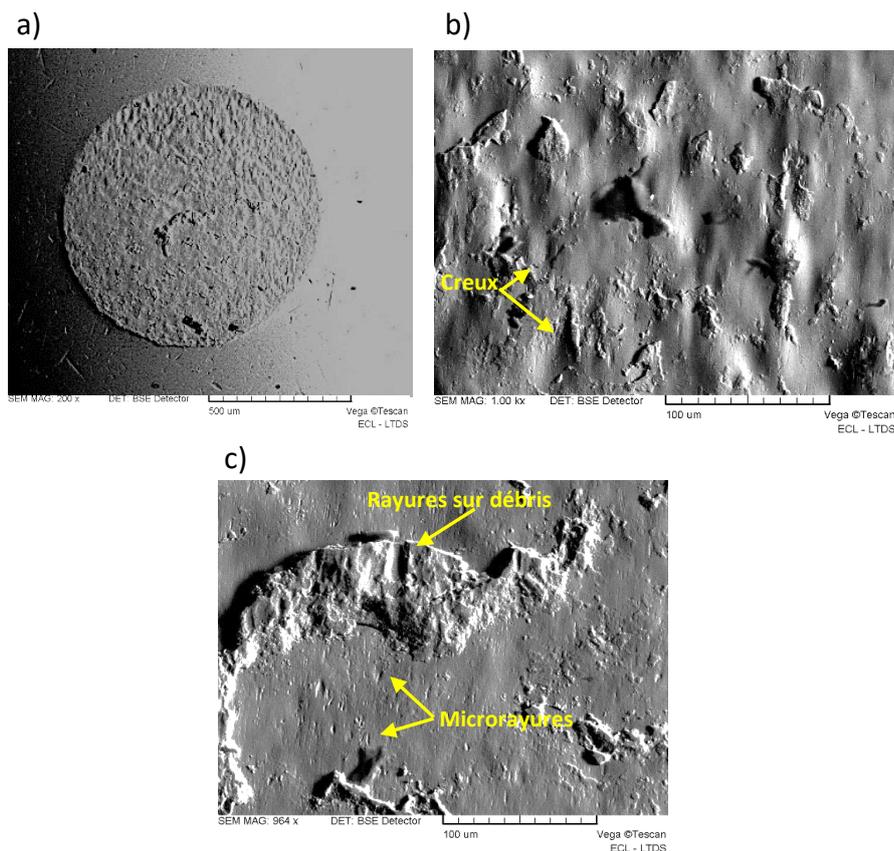


Fig. 3.66. Observations au MEB des essais à 3 000 J :  
(a) trace d'usure de la bille,  
(b) haut de la bille,  
(c) centre de la bille.

Les essais effectués à 90° montrent que l'abrasion avec des arrachements de grains est combinée avec le mécanisme d'adhésion. Les débris d'usure sont accumulés à l'interface et conduisent à endommager d'avantage le carbure et la bille avec l'enfoncement de ces débris dans les matériaux lors de l'impact.

### IV.3. Analyse quantitative de l'usure

Nous observons une évolution linéaire du volume d'usure pour la bille et pour le plan (Fig.3.67). En impact normal, on obtient des volumes d'usure qui sont réduits aussi bien pour la bille que pour le plan avec un rapport des coefficients énergétiques d'usure de 3,3 par rapport aux essais à 60° (Tableau.3.4).

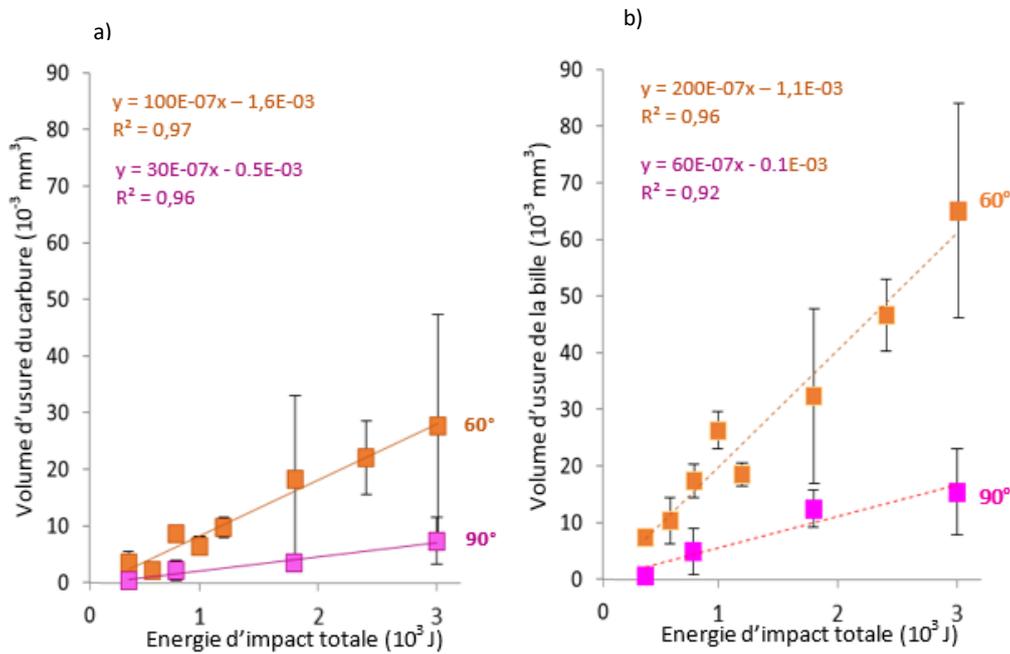


Fig. 3.67. Volumes d'usure en fonction de l'énergie d'impact totale :  
(a) plans en carbure E6,  
(b) billes en 100Cr6.

Tableau. 3.4. Coefficients énergétiques d'usure des essais avec le carbure E6 à 60° et à 90°.

Plan E6	Coefficient énergétique d'usure du plan $C_u$ (mm <sup>3</sup> /J)	Bille 100Cr6 en contact avec E6	Coefficient énergétique d'usure de la bille $C_u$ (mm <sup>3</sup> /J)
60°	$100 \cdot 10^{-7}$	60°	$200 \cdot 10^{-7}$
90°	$30 \cdot 10^{-7}$	90°	$60 \cdot 10^{-7}$

De plus, on constate que la bille 100Cr6 s'use 2 fois plus que le plan. Les volumes d'usure montrent que l'effet du glissement sur les volumes d'usure est important puisque

l'usure est réduite de plus de 75% par rapport aux volumes usés à 60°, ce qui s'explique par la disparition de la composante de glissement lors des impacts normaux.

### **IV.4. Conclusions**

L'impact normal conduit à des traces d'usure du carbure E6 avec une compaction des débris qui, à de fortes énergies d'impact totales, sont entassés au niveau de la bille. Cela accélère les mécanismes d'usure par la présence de débris durs à l'interface. Ces débris sont, suite aux impacts répétés, enfoncés au sein de la bille. La trace d'usure du carbure est caractérisée à 400 J par une zone centrale plus endommagée avec des grains de carbure de tungstène usés et fissurés. La bille subit des déformations plastiques importantes qui forment des cavités. Ces cavités au centre de la trace d'usure témoignent de l'enfoncement de débris lors des impacts. Au-delà de 800 J, ces débris finissent par être fragmentés et forment un troisième corps dans l'interface. Nous observons alors ces plis sur la bille puis ils disparaissent progressivement.

L'analyse quantitative montre que l'usure est réduite de 75%, lorsque la composante de glissement n'est pas présente. Cela montre que le glissement contribue significativement à la perte de matière.

## **V. Effet de l'environnement**

### **V.1. Conditions expérimentales**

Afin d'analyser l'effet de l'oxydation sur les débris d'usure et sur les mécanismes d'usure, nous avons réalisé des essais sous argon. Un débit d'argon est envoyé près du contact bille / plan. Le débit est de 2 l/min. On peut ajouter que ce débit d'argon ne supprime pas complètement la présence d'air ambiant mais qu'il minimise probablement son effet. Les essais sont réalisés avec un angle d'impact de 60° avec la bille 100Cr6.

### **V.2. Analyse des traces d'usure**

#### **V.2.1. Usure des carbures E6 sous argon**

Les traces d'usure montrent des faciès d'usure particuliers. En effet, un creux au niveau du carbure se forme peu à peu. A 3 000 J, on observe une cavité allongée le long de la trace d'usure sur le plan. On observe ce même faciès sur les traces d'usure des tests effectués dans un environnement sans argon. Cependant, des rayures régulières dans le sens du glissement, avec des profondeurs variables, sont observables à 1 800 J et à 3 000 J. Les traces d'usure sont circulaires aussi bien sur le plan (E6) que sur la bille en acier avec un diamètre allant de 600  $\mu\text{m}$  à 1 900  $\mu\text{m}$  (Fig.3.68). A 400 J, les traces sont 3 fois plus petites que celles des essais effectués à l'air. A 1 800 J, les traces sont moins allongées que celles sous air et sont plus petites de taille avec un diamètre de 1 200  $\mu\text{m}$  environ (diamètre de 1 600  $\mu\text{m}$  sous air). A 3 000 J elles sont légèrement supérieures (diamètre de 1900  $\mu\text{m}$  sous argon et 1 600  $\mu\text{m}$  à l'air).

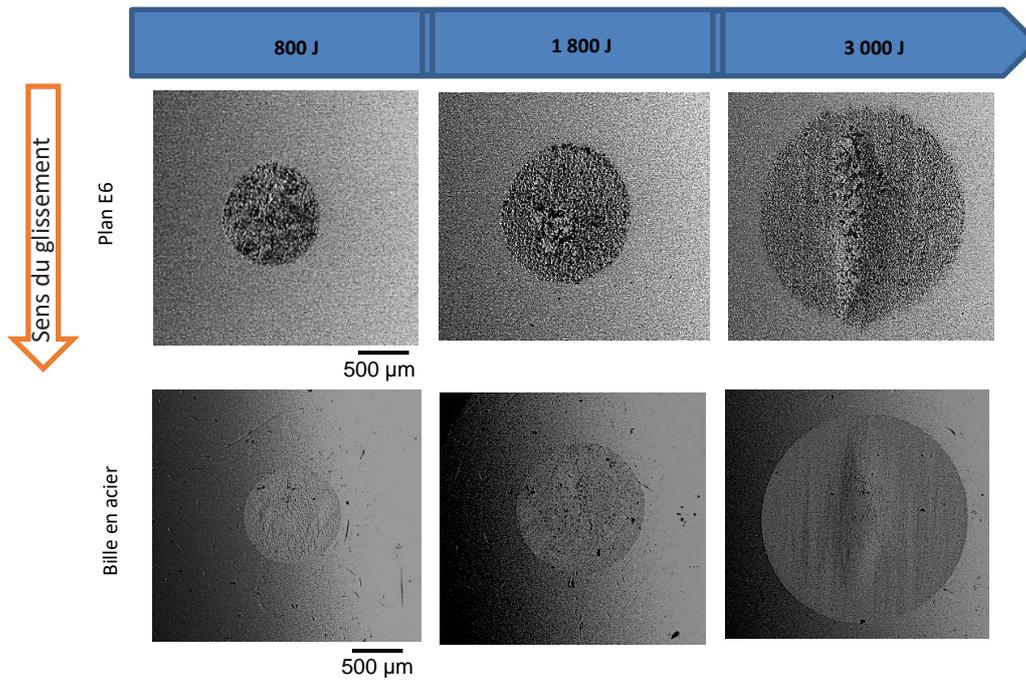


Fig. 3.68. Observations au MEB des traces d'usure des essais plan E6 / bille acier sous argon.

A 800 J, des traces d'abrasion avec des micro-rayures et des endommagements des grains sont observables (Fig.3.69).

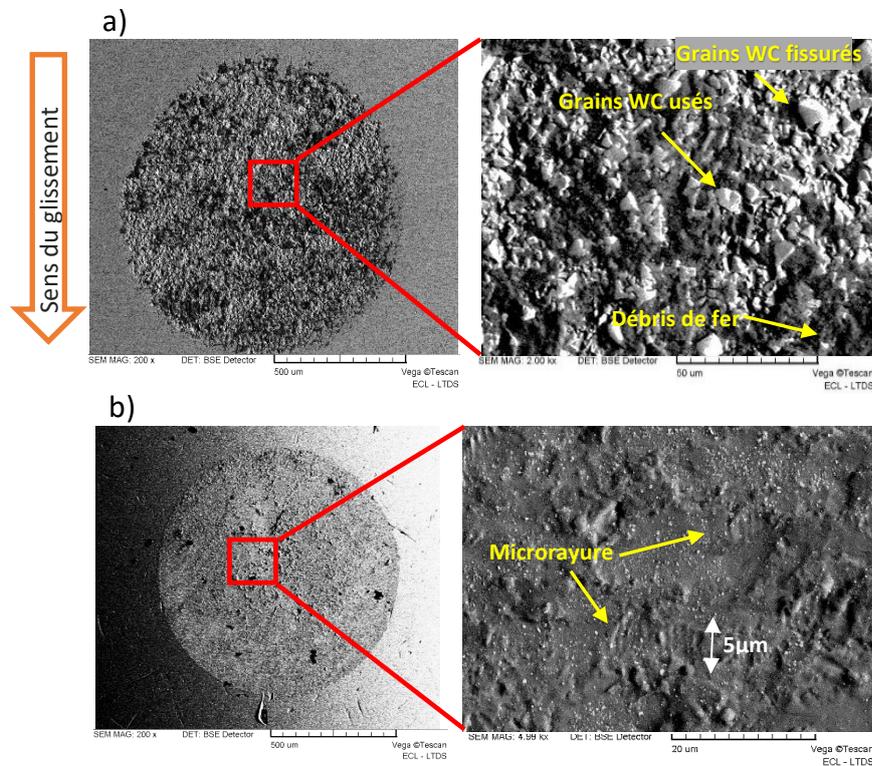


Fig. 3.69. Observations au MEB des essais à 800 J :  
 (a) trace d'usure du carbure E6,  
 (b) trace d'usure de la bille.

### Chapitre 3 : Résultats expérimentaux et analyse des traces d'usure

Nous pouvons observer des grains de carbure de tungstène, recouverts d'une couche riche en fer, fissurés et usés. La bille présente un profil lisse avec des rayures de faible longueur (5µm environ) dans le sens du glissement.

A 1 800 J, on constate les mêmes endommagements qu'à 800 J avec plus de grains WC arrachés et endommagés (Fig.3.70). L'abrasion du carbure E6 est plus sévère, avec des grains WC endommagés.

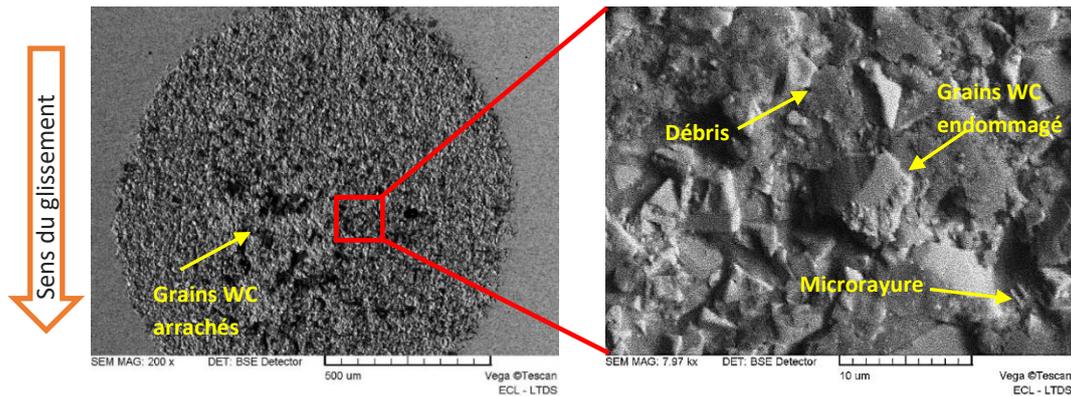


Fig. 3.70. Observations au MEB de la trace d'usure du carbure E6 à 1 800 J.

La bille présente des traces de rayures régulières, parallèles au glissement. Celles-ci s'étendent sur toute la trace d'usure (Fig. 3.71).

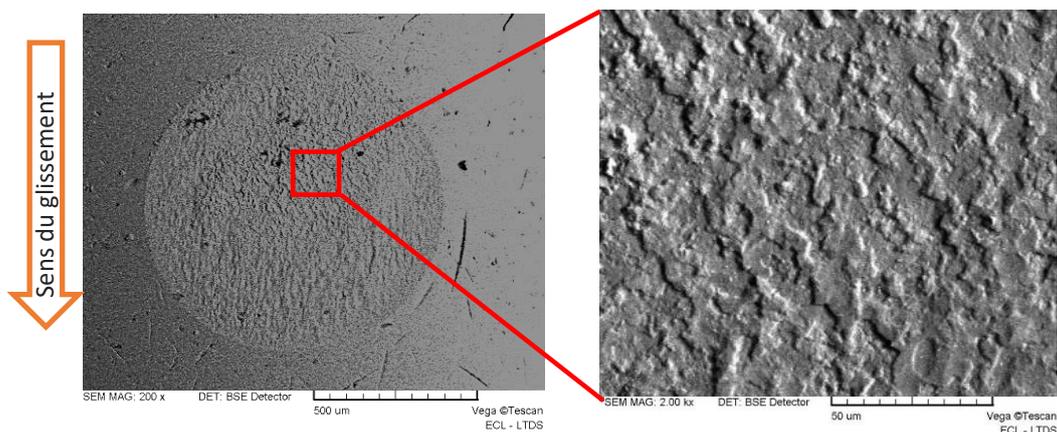


Fig. 3.71. Observations au MEB de la trace d'usure de la bille à 1 800 J.

Les traces d'usure des tests à 3 000 J sont plus allongées et présentent une succession de traces profondes et moins profondes (ondulations). Elles sont observables sur la bille et sur le plan. Cela s'explique par l'évacuation des débris lors du glissement qui forment des zones ondulées. De plus, l'usure du carbure est caractérisée par une zone centrale plus profonde où

la concentration des débris est plus importante. La profondeur maximale est de 25  $\mu\text{m}$  (Fig.3.72).

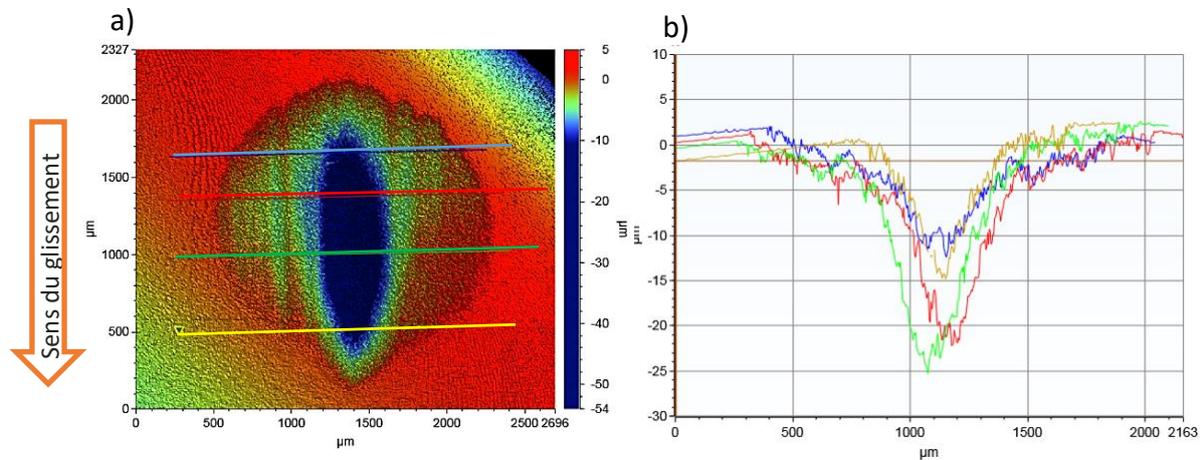


Fig. 3.72. Observations à l'interféromètre numérique des essais à 3 000 J :  
 (a) trace d'usure du carbure E6,  
 (b) profil 2D de la trace du carbure E6.

L'analyse de la trace d'usure montre des débris riches en fer provenant de la bille par mécanisme de transfert (Fig.3.73). L'effet de l'argon sur l'adhérence de ses débris est analysé par le pourcentage atomique en oxygène qui est réduit. On obtient un pourcentage de 15,6% pour des essais à 3000 J (sous argon).

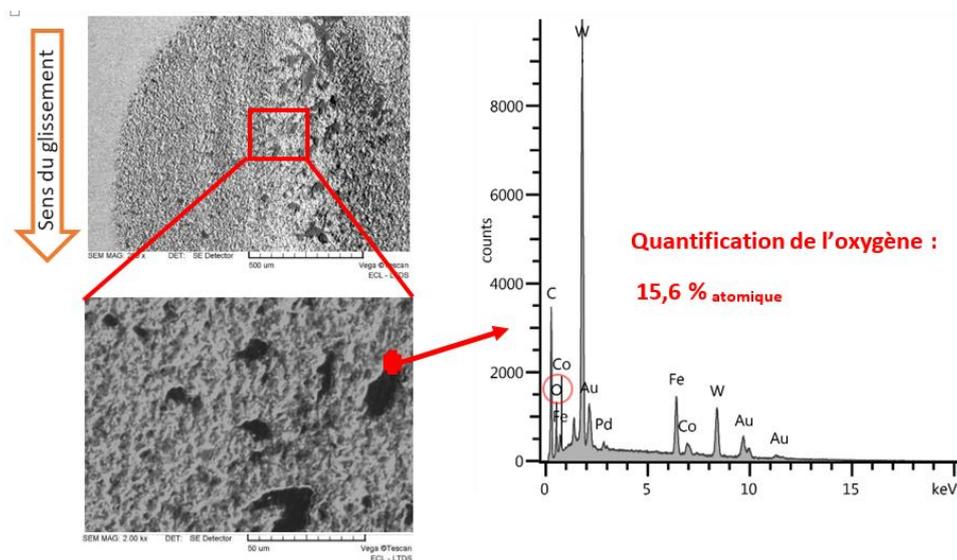


Fig. 3.73. Observations au MEB de la trace d'usure du carbure E6 couplée à l'analyse EDX sous argon à 3 000 J.

Dans des conditions d'essai sous air, on obtient un pourcentage d'oxygène de 24% (Fig.3.74). L'oxygène permet l'adhérence des débris d'usure à l'interface. Ainsi, en diminuant

l'oxygène à l'interface, les débris ne peuvent plus s'accumuler sur la trace d'usure. Ils sont évacués facilement en dehors de la trace.

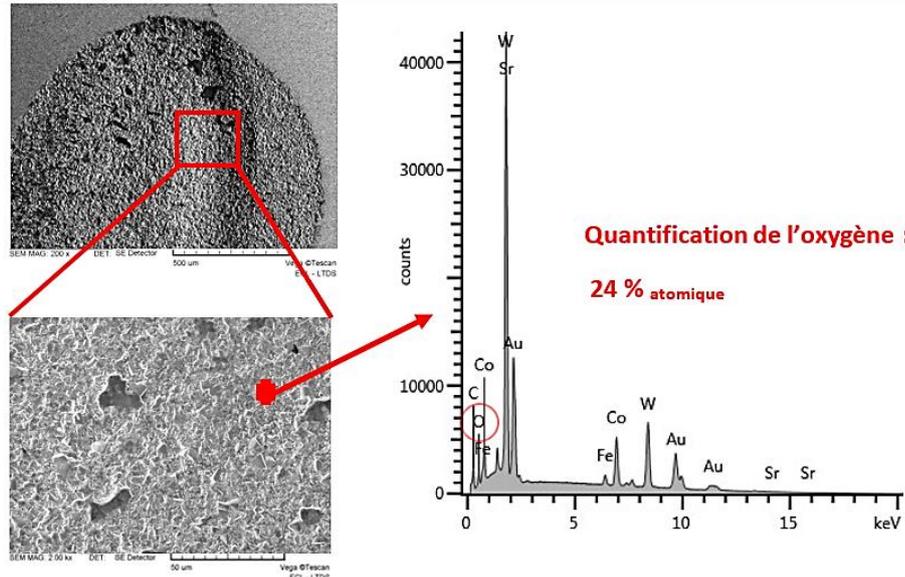


Fig. 3.74. Observations au MEB de la trace d'usure du carbure E6 couplées à l'analyse EDX sous air à 3 000 J.

Sur la bille, nous observons la présence d'une zone centrale en relief au centre de la trace d'usure (hauteur de 20  $\mu\text{m}$ ). Les ondulations évoquées précédemment sont visibles sur les profils 3D et sont réparties de part et d'autre de la trace à partir du centre (Fig.3.75).

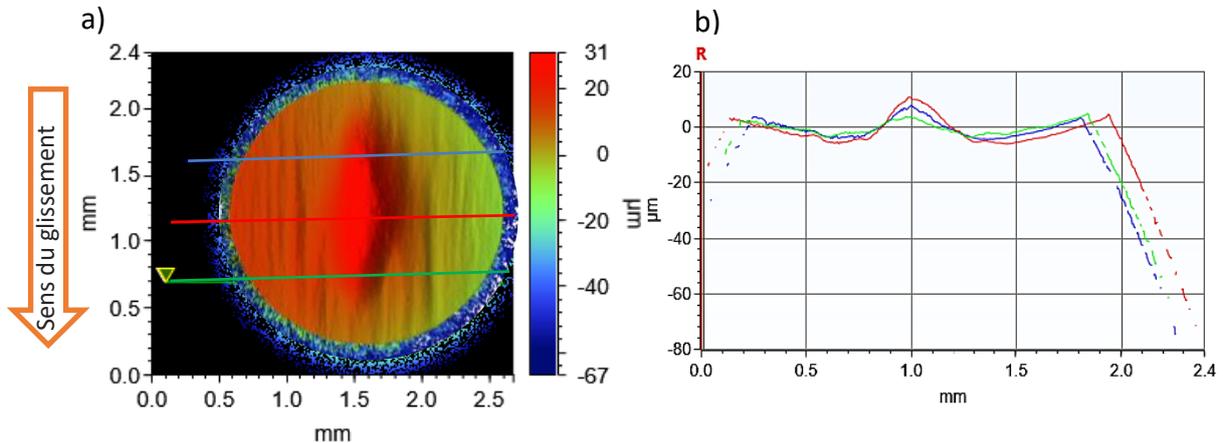


Fig. 3.75. Observations à l'interféromètre numérique (a) de la trace d'usure de la bille sans redressement et (b) des profils 2D de la trace d'usure à 3 000 J.

Des rayures fines avec une trajectoire « ondulatoire » sont visibles. Sous l'effet de l'impact, des débris sont générés et sont piégés à l'interface, plus exactement au centre de la bille. Ils sont évacués en dehors de l'interface lorsque les deux matériaux antagonistes ne sont plus en contact. Ces débris, en mouvement libre au centre du contact, sont alors entraînés en

dehors de cette zone centrale, en roulant ou en glissant. Cela génère des rayures individuelles fines orientées plus ou moins selon le sens du glissement. Nous pouvons observer sur la bille des sillons avec des trajectoires non rectilignes (Fig.3.76).

Le processus d'adhésion est aussi présent sur la bille, avec des particules de carbure de tungstène adhérant à la trace d'usure. L'analyse EDX nous permet de voir la présence d'éléments W et Co (Fig.3.76). La présence importante d'oxygène s'explique par le fait que la bille, avec son déplacement vertical, ne reste pas toujours à l'interface (où est injecté de l'argon).

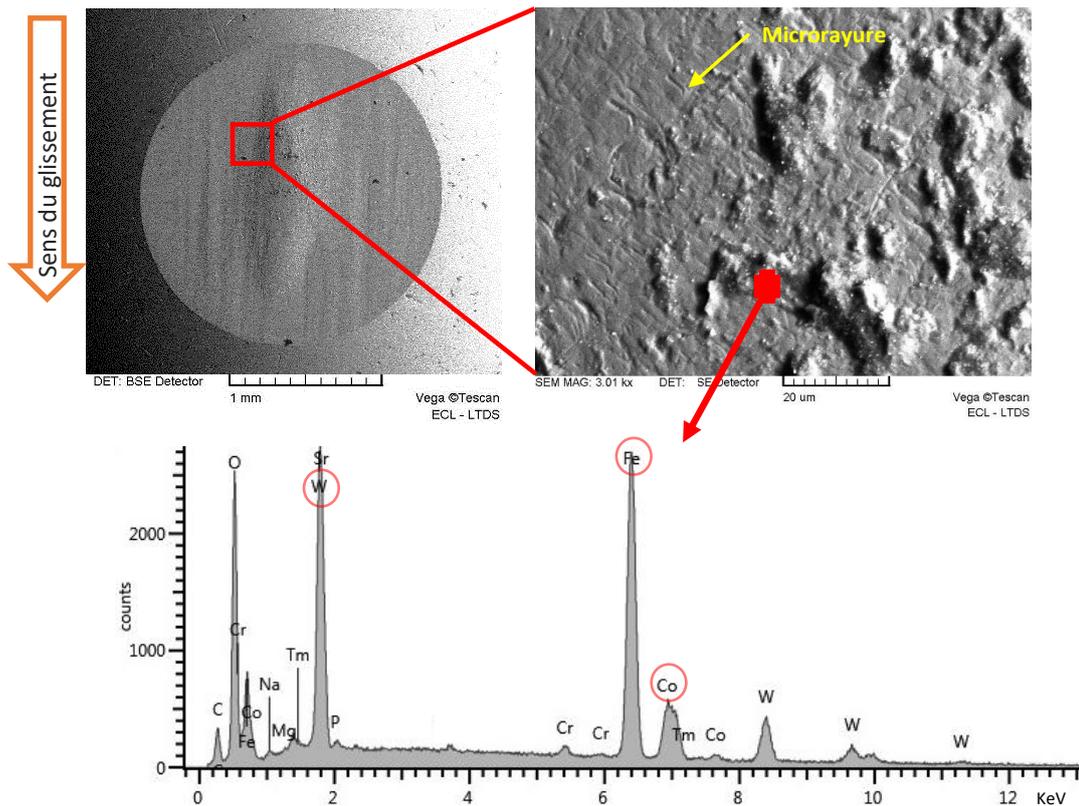


Fig. 3.76. Observations au MEB de la trace d'usure de la bille avec l'analyse EDX à 3 000 J.

En conclusion, les mécanismes d'usure observés sont majoritairement l'abrasion et l'adhésion, comme dans les essais sous air. Par contre, par rapport aux essais sous air, on constate que le processus d'adhésion est ralenti par la présence d'argon à l'interface.

#### V.2.2. Mécanismes d'usure du carbure WNZVC

Les traces d'usure obtenues avec les essais du carbure WNZVC sous argon montrent des faciès d'usure différents des traces obtenues sous air (Fig.3.77). Les traces d'usure sur le carbure et sur la bille sont de mêmes dimensions : elles varient de 750  $\mu\text{m}$  à 875  $\mu\text{m}$  de diamètre. En comparant avec les traces d'usure des essais réalisés sous air, on remarque que les traces à 400 J sous argon sont 1,5 fois plus grandes que celles obtenues sous air. Puis, elles

sont sensiblement de mêmes dimensions à partir de 800 J. La fissuration est très présente en haut de trace aussi bien à 800 J qu'à 1800 J. Le carbure WNZVC, plus fragile que le carbure E6, se fragmente et des grains du carbure sont alors arrachés. Les fissures sont réparties autour de la trace. Par contre, elles ne sont pas uniformément réparties.

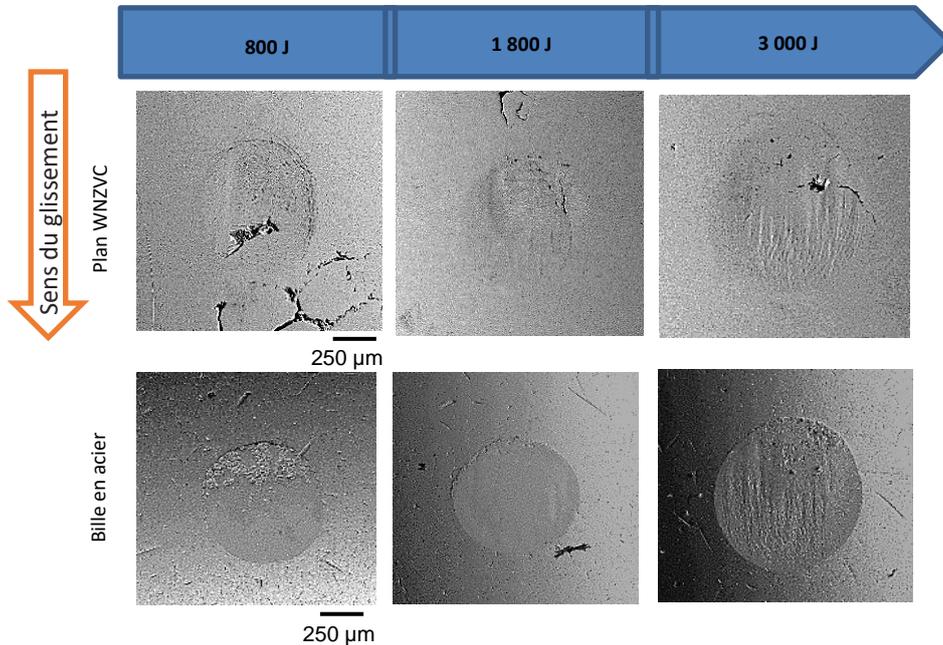


Fig. 3.77. Observations au MEB des traces d'usure des tests plan WNZVC/bille en acier (sous argon).

A 3000 J, les fissures sont moins présentes mais des microfissures sont présentes sur la trace et quelques-unes sont en périphérie (Fig.3.78.b). Des faciès particuliers d'usure sont observables à cette même énergie. En effet, le bas de la trace d'usure du carbure est caractérisé par des sillons suggérant que les débris ou particules arrachés lors des impacts-glissements sont acheminés en dehors du contact.

De plus, le mouvement des débris semble créer des sillons sur le plan (Fig.3.78.c). Quand le contact est maintenu lors du glissement, les débris circulent au contact et contribuent à la formation de sillons. Dès que le contact est rompu par le déplacement vertical imposé à la bille, les débris sont évacués du contact avec l'argon. On voit alors sur les traces d'usure des sillons qui sont interrompus.

Comme pour les essais sous air, les fissures sont plutôt concentrées sur le côté droit de la trace. Cela est dû au point d'impact qui n'est pas centré par rapport à la trace d'usure (avec la flexion du bilame horizontal).

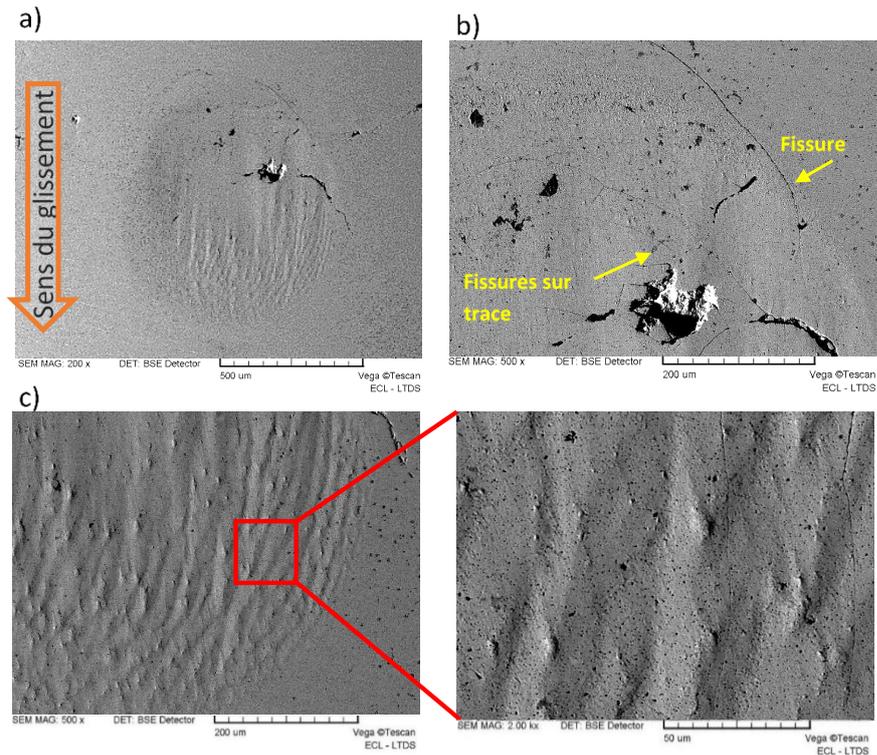


Fig. 3.78. Observations au MEB des essais à 3 000 J :  
 (a) trace du carbure WNZVC,  
 (b) haut de la trace,  
 (c) bas de la trace.

Afin de vérifier si l'oxydation des débris d'usure est réduite par la présence d'argon à l'interface, nous analysons la concentration en oxygène sur la trace d'usure à 3 000 J. On obtient un pourcentage atomique de 15,3% (Fig.3.79).

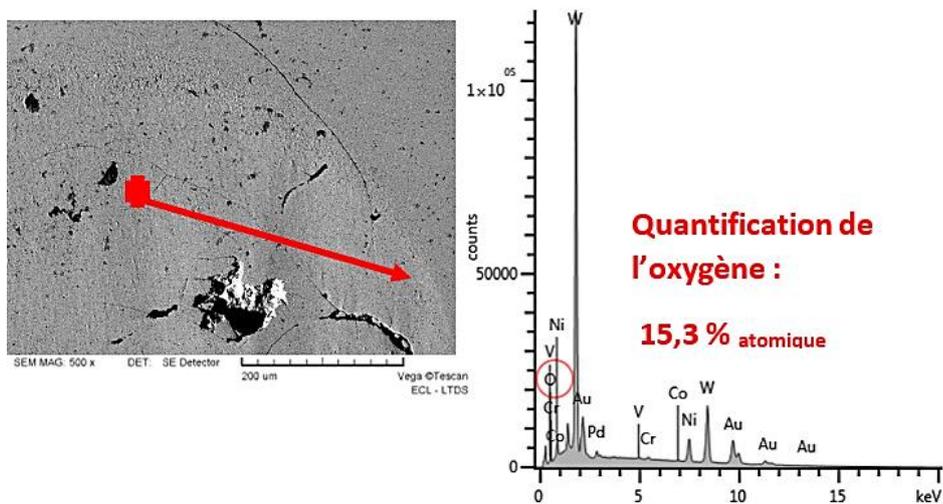
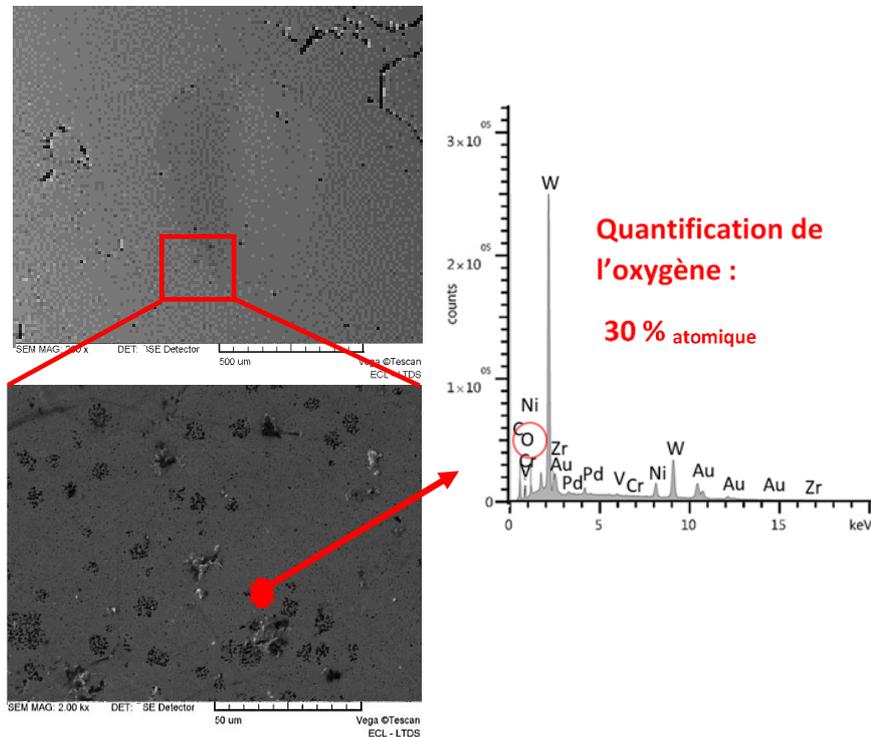


Fig. 3.79. Observations au MEB trace d'usure du carbure WNZVC sous argon à 3 000 J avec l'analyse EDX.

La Fig.3.80 présente l'analyse MEB-EDX sur une trace d'usure du carbure WNZVC sous air. On obtient un pourcentage atomique d'oxygène de 30 %. La concentration en oxygène est faible en comparaison avec une trace à 3 000 J sous air. Ceci pourrait expliquer pourquoi les débris d'usure n'adhèrent pas en surface.



*Fig. 3.80. Observations au MEB trace d'usure du carbure WNZVC sous air à 3 000 J avec l'analyse EDX.*

Les traces d'usure des billes montrent la présence d'usure abrasive avec des rayures qui sont de plus en plus visibles quand l'énergie d'impact totale augmente (Fig.3.81). En effet, des groupements de rayures sont visibles et suggèrent que des débris ont été déplacés en même temps. A 3 000 J, l'acheminement des débris crée des sillons similaires à ceux observés sur le plan. Cependant, la bille en acier, plus susceptible de se déformer que le carbure, présente des rayures fines de profondeur variables. Les gros débris creusent l'acier et forment un groupement de grosses rayures de même direction, tandis que les débris de petites tailles rayent la surface de la bille et créent des micro-rayures.

De plus, nous pouvons observer des rayures plus profondes que ces dernières avec une longueur plus importante. Localisées en bas de trace de la bille, elles sont parallèles au sens du glissement et sont réparties sur plus de la moitié de la trace.

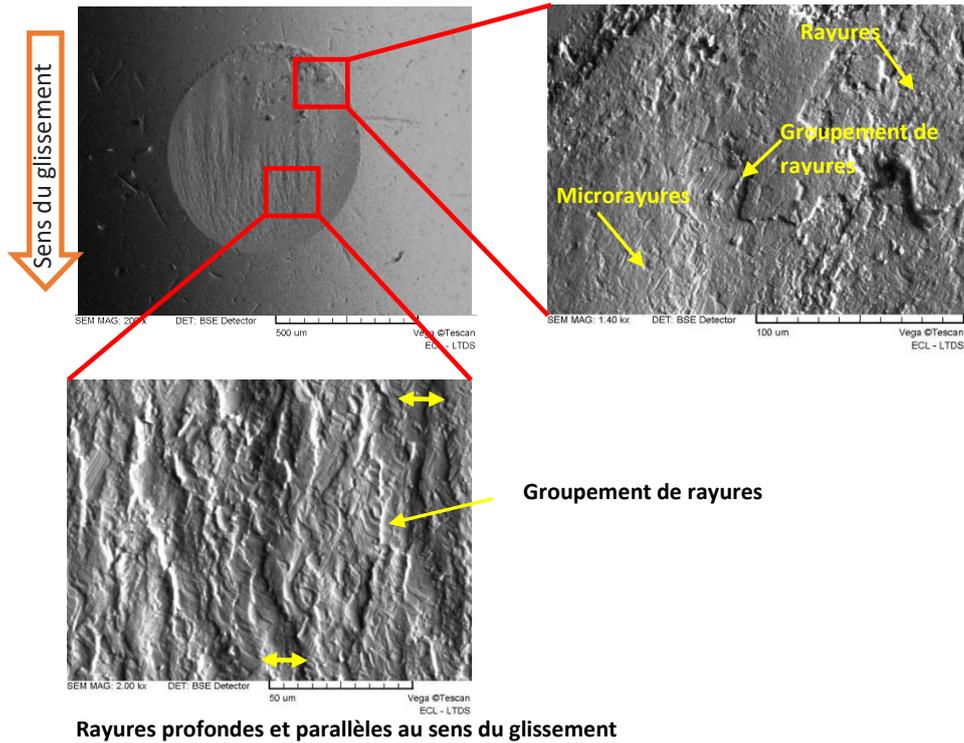


Fig. 3.81. Observations au MEB de la trace d'usure sur la bille à 3 000 J.

### V.3. Analyse quantitative de l'usure

Les volumes d'usure ont tous des évolutions linéaires avec l'énergie d'impact totale. Le carbure E6 et le carbure WNZVC (sous argon) s'usent environ deux fois moins avec un rapport de 1,5 des coefficients énergétiques d'usure (Fig.3.82 et 3.83) que lors des tests sous air.

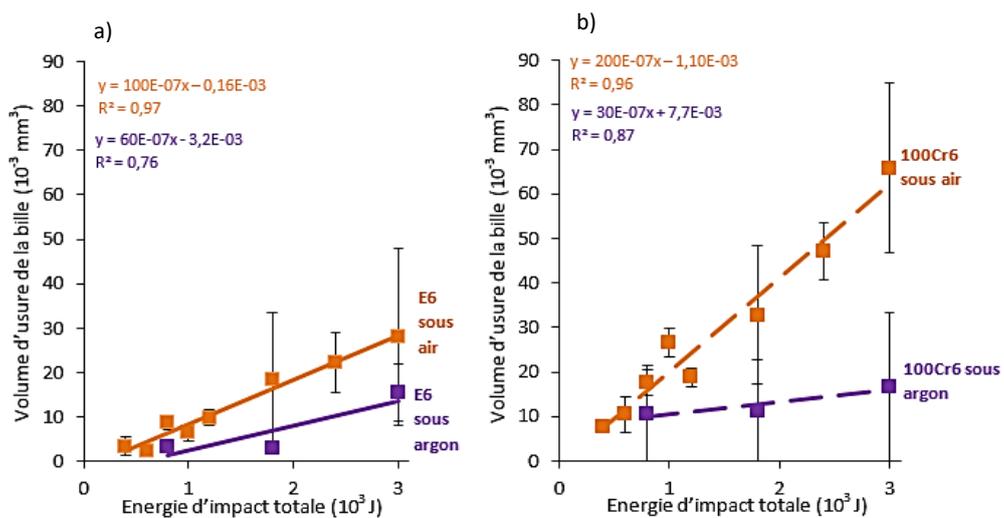


Fig. 3.82. Volumes d'usure en fonction de l'énergie d'impact totale :  
(a) plans en carbure E6,  
(b) billes en 100Cr6.

### Chapitre 3 : Résultats expérimentaux et analyse des traces d'usure

La bille, qui impacte le carbure E6, s'use approximativement 7 fois moins sous argon que sous air. Par contre, on constate que sous argon avec le carbure WNZVC, la bille s'use plus que la bille sous air d'un facteur 2.

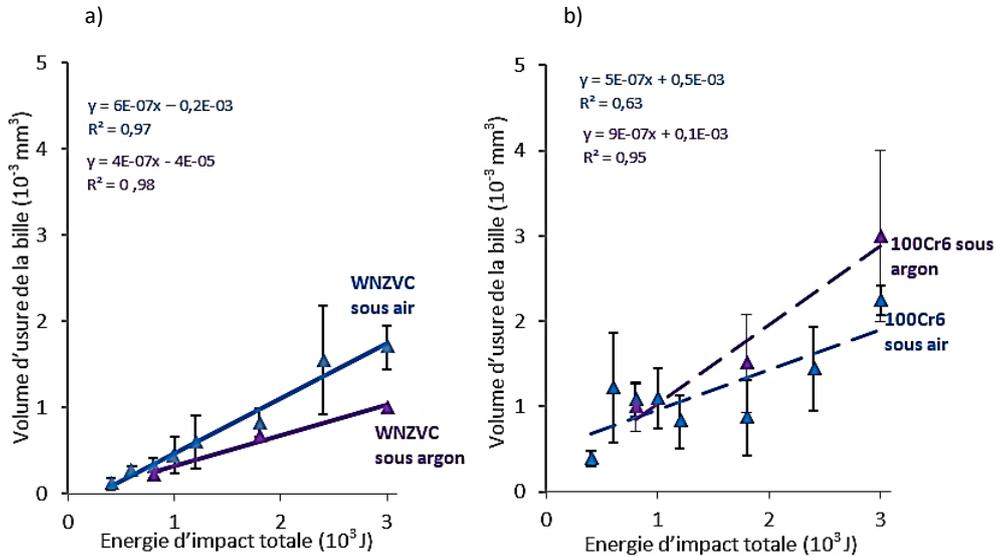


Fig. 3.83. Volumes d'usure en fonction de l'énergie d'impact totale :  
 (a) plans en carbure WNZVC,  
 (b) billes en 100Cr6.

Avec le carbure E6, on note une baisse du coefficient énergétique d'usure de 1,5 pour le plan et de 7 pour la bille, sous argon (Tableau.3.5).

Tableau. 3.5. Coefficients énergétiques d'usure des essais des carbures WNZVC et E6 sous air et sous argon.

<b>Plan E6</b>	<b>Coefficient énergétique d'usure du plan <math>C_u</math> (<math>\text{mm}^3/\text{J}</math>)</b>	<b>Bille 100Cr6 en contact avec E6</b>	<b>Coefficient énergétique d'usure de la bille <math>C_u</math> (<math>\text{mm}^3/\text{J}</math>)</b>
Sous air	$100 \cdot 10^{-7}$	Sous air	$200 \cdot 10^{-7}$
Sous argon	$60 \cdot 10^{-7}$	Sous argon	$30 \cdot 10^{-7}$
<b>Plan WNZVC</b>	<b>Coefficient énergétique d'usure du plan <math>C_u</math> (<math>\text{mm}^3/\text{J}</math>)</b>	<b>Bille 100Cr6 en contact avec WNZVC</b>	<b>Coefficient énergétique d'usure de la bille <math>C_u</math> (<math>\text{mm}^3/\text{J}</math>)</b>
Sous air	$6 \cdot 10^{-7}$	Sous air	$5 \cdot 10^{-7}$
Sous argon	$4 \cdot 10^{-7}$	Sous argon	$9 \cdot 10^{-7}$

On constate également que la bille qui impacte le carbure E6 sous argon s'use deux fois moins que le plan, tandis que l'on observe l'inverse sous air. On peut alors penser que les débris d'usure n'adhèrent pas à l'interface (absence d'oxygène) font que l'usure à 3 corps est amoindrie. La bille, lors des impacts est alors au contact avec le carbure E6 moins dur que le carbure WNZVC, et qui présente une surface moins rugueuse, par l'absence des débris d'usure. Cela conduit à réduire l'usure de la bille.

Pour le carbure WNZVC, nous constatons que l'usure du carbure est légèrement atténuée, comme celui du carbure E6, sous argon. Par contre, la bille subit une usure plus importante. Le carbure WNZVC plus dur que le carbure E6 présente des traces d'usure dépourvues de débris d'usure. Cela conduit à intensifier les impacts. La bille s'endommage alors rapidement et s'use 2 fois plus que le plan, sous argon. Elle s'use approximativement 2 fois plus que la bille sous air.

La présence d'argon à l'interface réduit l'usure des carbures E6 et WNZVC. Lorsque la bille impacte le carbure E6, l'usure diminue, tandis qu'elle est plus importante avec le carbure WNZVC. Les propriétés des carbures et la présence de l'argon jouent alors un rôle non négligeable dans l'usure de la bille.

### **V.4 Conclusions**

L'étude des traces d'usure sous argon permet d'évaluer l'importance du troisième corps à l'interface sur l'usure et l'oxydation des débris d'usure. Nous constatons que le flux d'argon limite fortement l'oxydation des débris et donc réduit leur pouvoir adhérent. Les débris adhèrent moins à l'interface et sont susceptibles d'être évacués. Nous observons des faciès d'usure particuliers sur les traces d'usure des carbures. Les carbures E6 et WNZVC montrent la présence de grains usés et endommagés. Les rayures sont également observables et elles se présentent par groupement de rayures. Ce sont de gros débris avec des formes irrégulières qui viennent froter contre le carbure et arracher de la matière. Des rayures sur la bille ont des profondeurs et des tailles variables. En effet, des débris de grosses tailles viennent rayer la bille en laissant un groupement de rayures courtes. Les débris de plus petite taille laissent des sillons fins avec une trajectoire non rectiligne. Enfin, les rayures plus profondes et plus étendues sur la trace, parallèles au sens du glissement sont causées par le frottement des matériaux antagonistes.

L'usure du carbure E6 à 3 000 J est caractérisée par une trace avec un centre creux où sont entassés les débris et des zones latérales ondulées qui sont de profondeur variable. Les débris sont répartis de façon non homogène sur toute la trace et la bille présente aussi le même faciès d'usure. Cela signifie que les débris sont emprisonnés au centre de la trace et favorisent l'usure à cet endroit. Par conséquent, cette zone centrale est plus profonde, aussi bien sur la bille que sur le plan.

Nous constatons pour WNZVC que les fissures sont présentes en haut de la trace d'usure. De plus, à 3 000 J, le faciès d'usure témoigne du déplacement répété des débris qui graduellement laissent des sillons d'usure sur le carbure.

Les volumes usés sont faibles lorsque le contact est soumis à un flux d'argon. Nous avons un rapport de 1,5 des coefficients d'usure des carbures E6 et de 7 pour la bille. Pour les essais avec le carbure WNZVC, les volumes d'usure du carbure sont réduits d'un facteur de 1,5 (par rapport aux essais sous air) tandis que la bille s'use 2 fois plus par rapport aux essais sous air. La dureté des carbures et l'absence de débris d'usure contribuent à accélérer ou à diminuer l'usure des matériaux.

## VI. Discussion et synthèse des résultats

L'usure des carbures de tungstène sous impact-glissement se présente comme un ensemble de mécanismes se déroulant simultanément : l'abrasion, la fissuration, l'adhésion avec le mécanisme de transfert. Ces mécanismes peuvent interagir entre eux et accélérer l'usure des matériaux antagonistes.

- Influence de l'énergie d'impact totale

Les trois carbures de tungstène étudiés subissent des processus d'endommagement divers. Néanmoins, les différents mécanismes d'usure qui opèrent à l'interface sont l'usure abrasive, l'adhésion de particules générées à l'interface et la fissuration. Des faciès d'usure particuliers, avec une alternance de zones creuses et de zones en relief, sous forme d'ondulations sur les profils 2D, sont également observables. La Fig.3.84 présente schématiquement les mécanismes d'usure et leur cartographie en fonction de l'énergie d'impact, du nombre de cycles et de la nature du carbure.

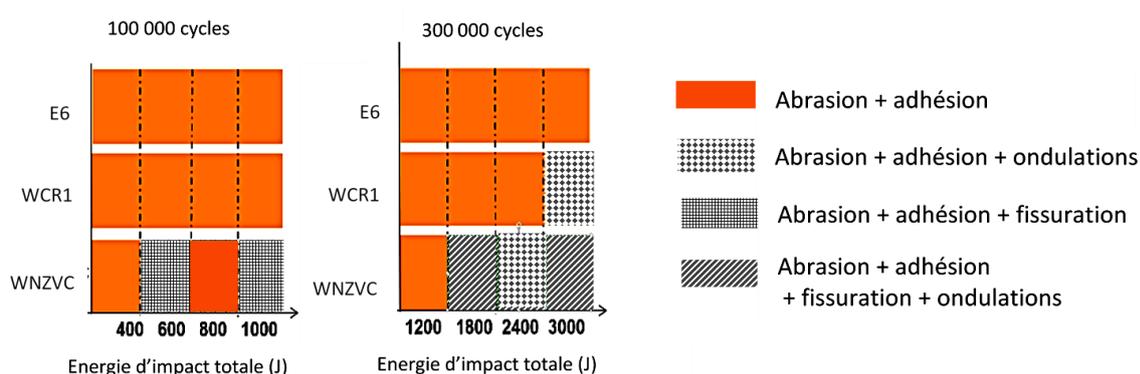


Fig. 3.84. Représentation schématique de l'occurrence des mécanismes d'usure des carbures en fonction de l'énergie d'impact totale.

La fissuration est observée uniquement sur le carbure WNZVC à partir de 600 J. Cela signifie que l'énergie nécessaire pour fragiliser le carbure WNZVC est atteinte à partir de 600J.

Zok *et al*<sup>3,4</sup> parlent d'un facteur de fragilité pour les carbures de tungstène. Ce facteur, défini en fonction de la ténacité, de la dureté et du module d'élasticité, permet de prédire la fissuration. Un facteur de fragilité élevé correspond à un matériau qui se fracture lorsqu'une valeur seuil est atteinte, tandis qu'un facteur faible est associé à un matériau qui s'use avec des déformations plastiques<sup>4100</sup>. Pour les trois carbures de tungstène testés on obtient les facteurs présentés dans le tableau.3.6.

Tableau. 3.6. Facteur de fragilité des carbures de tungstène.

	<b>Carbure E6</b>	<b>Carbure WCR1</b>	<b>Carbure WNZVC</b>
<b>Facteur de fragilité (<math>H_V / Kc</math>)<sup>2</sup>(<math>H_V / E</math>)</b>	12,2	51,1	131,1

Le carbure WNZVC obtient le facteur le plus élevé. Ceci explique son mode d'endommagement caractérisé par une usure fragile et de la fissuration. Le carbure E6 présente le plus faible facteur des trois carbures.

De plus, il y a une certaine compétition entre le mécanisme d'abrasion et la fissuration qui fait que les fissures formées sont « effacées » par l'usure. C'est ce qui se passe à 8 mJ (c'est-à-dire pour les essais de 800 et 2 400 J). La trace d'usure est lisse sans fissures. Les fissures observées aux énergies d'impact totales inférieures ne sont plus présentes. L'adhésion, quant à elle, contribue à créer une couche sacrificielle et protectrice qui réduit la fissuration. La fissuration reprend à 10 mJ ce qui suggère que le mécanisme d'adhésion n'est plus prépondérant par rapport à la fissuration.

Les faciès d'usure observés à 8 000 J pour chacun des carbures montrent que plusieurs paramètres entrent en jeu dans les mécanismes d'endommagement. La localisation des débris au contact bille/plan mais aussi la distribution de contraintes locales et la plastification de la bille en acier font que la surface de contact est progressivement modifiée au cours des cycles d'impacts-glissemments. Pour le cas du matériau de référence, les deux zones latérales sont plus endommagées que la zone centrale. Cette zone centrale en relief est le lieu d'accumulation des débris.

Le carbure WCR1, plus dur que le carbure E6, est caractérisé par des « rangées » de profondeur variables parallèles au glissement avec des surfaces lisses où les deux matériaux antagonistes sont en contact et des surfaces moins lisses où l'usure est plus sévère par la présence de débris d'usure. Cette déformation progressive des surfaces en contact, avec la présence du troisième corps, au cours des cycles d'impacts-glissemments crée des faciès d'usure avec des ondulations. Ces ondulations sont plus marquées à de fortes énergies d'impact totales. Suh *et al*<sup>5101</sup> ont démontré que cette configuration sous forme de surfaces ondulées permet de réduire les coefficients de frottement et de s'affranchir des mécanismes de labourage. Il explique que les aspérités des deux matériaux en contact doivent être

complémentaires pour favoriser le glissement. Pour cela, elles doivent se déformer et former des surfaces ondulées.

Le carbure WNZVC, bien qu'ayant une dureté proche de celle du carbure WCR1, présente une faible ténacité qui favorise la perte de matière par déchaussement puis arrachement de fragments. En effet, des contraintes importantes ou une usure sévère localisée à un défaut du carbure conduisent rapidement à la formation de fissures qui entraînent un arrachement de matière. Cela crée une non uniformisation des profils d'usure. A de fortes énergies d'impact, notamment à 8 000 J, des faciès semblables à ceux observés sur WCR1 sont visibles. Mais l'arrachement de matière fait que la disposition alternée en « creux » et en « bosses » n'est pas uniforme. Ces rangées ne sont pas étendues le long de la trace d'usure, il y a une irrégularité sur toute la trace.

En ce qui concerne l'analyse quantitative des volumes d'usure, on observe des évolutions linéaires des volumes d'usure en fonction de l'énergie d'impact totale. Le carbure E6 est celui qui s'use le plus parmi les trois matériaux étudiés. En tenant compte des propriétés mécaniques de ces matériaux, cela suggère que lorsque la bille est au contact d'un matériau mou, l'usure de la bille et du carbure est conséquente (avec  $C_u$  (bille) est de  $200 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{J}$  et  $C_u$  (E6) est de  $100 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{J}$ ). De plus, la bille s'use deux fois plus que le carbure E6. Cela est dû au caractère ductile du matériau qui est susceptible de perdre de la matière avec la dynamique d'impacts-glissements. En effet, les impacts vont favoriser la formation de débris, tandis que les frottements accélèrent les mécanismes de labourage, d'arrachement de grains et de coupe. La bille est responsable des mécanismes d'usure parce qu'avec sa faible dureté, l'adhésion démarre rapidement dès les premiers impacts. Au fur et à mesure des cycles d'impacts-glissements, la bille usée est au contact d'une surface endommagée et rayée. Cela a donc tendance à accélérer son usure. La surface de contact augmente et les faciès d'usure font que la rugosité de contact augmente aussi. Les deux matériaux contribuent mutuellement au processus.

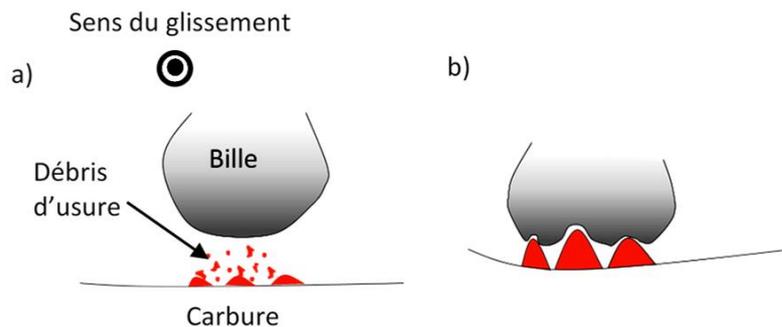
Par contre, les coefficients énergétiques d'usure sont proches pour les deux autres couples de matériaux (WCR1 et WNZVC). Lorsque la bille impacte un matériau plus dur, les coefficients d'usure sont similaires. Les rapports des coefficients énergétiques d'usure, par rapport au carbure E6, sont de 16 pour les carbures et de 30 pour la bille en 100Cr6. A l'interface, les carbures WCR1 et WNZVC subissent peu de mécanisme de coupe. Leur dureté élevée leur confère une meilleure résistance au mécanisme d'abrasion. La bille, quant à elle, reste à l'origine des mécanismes d'usure, avec les processus se déroulant à l'interface qui participent à l'endommagement des matériaux (troisième corps, fatigue). Les volumes usés des billes dans les cas de WNZVC et WCR1 sont donc bien supérieurs aux volumes usés des carbures en question.

De plus, nous constatons que l'adhésion des débris se fait de façon plus importante sur le carbure E6 que sur les carbures WCR1 et WNZVC. En effet, les débris sont répartis sur toute la trace d'usure du carbure E6, tandis que pour WCR1 et WNZVC, les débris sont plutôt

localisés en haut de trace et en bas de trace avec quelques débris dispersés sur la trace d'usure. Une fois en contact avec le plan en carbure de tungstène, le transfert de matière s'opère entre la bille et le plan. Lorsque la bille se retire du contact, les débris adhérant au plan sont arrachés de la bille. Cette perte de matière augmente le volume d'usure de la bille. Ce phénomène est non négligeable pour le carbure E6 et contribue à accélérer l'usure de la bille et par conséquent l'usure du plan aussi.

- Influence de la nature de la bille

L'étude des impacts-glissemements avec la bille en SiC montre que le contact carbure / SiC contribue à réduire l'usure des carbures de tungstène. Mais le processus d'endommagement est différent. La bille en SiC étant quatre fois plus dure que la bille en acier 100Cr6, elle va user le matériau antagoniste. De gros débris viennent rayer le carbure et laissent des sillons avec des bourrelets sur le carbure E6. Des rayures avec des grains arrachés témoignent aussi de la présence de débris, qui au contact du carbure, viennent arracher de la matière. Ces observations sont présentes sur les trois carbures. De plus, les traces d'usure formées sont caractérisées par des débris qui, accumulés lors des cycles, sont disposés selon des rangées plus ou moins parallèles au glissement (Fig.3.85.a).



*Fig. 3.85. Représentation schématique des mécanismes d'usure des carbures WNZVC et WCR1 impactés avec une bille en SiC : (a) formation des débris d'usure, (b) formation de rangées de débris altérant la surface de la bille.*

Cette disposition, aussi bien sur le carbure WCR1 que sur le carbure WNZVC, modifie graduellement la surface de contact bille / carbure et tend à créer des profils d'usure non uniformes sur la bille (Fig.3.85.b). Des rangées profondes et endommagées sont visibles sur les traces des billes dès 400 J. Ce phénomène est accentué à de plus hautes énergies d'impact totales pour le WNZVC.

Par contre, pour le WCR1 à partir de 1800 J, les impacts répétés finissent par recouvrir la trace d'usure du carbure WCR1 en débris d'usure. La bille présente alors un profil plus lisse avec des fissures (Fig.3.86.a). Le carbure WCR1 est alors caractérisé par la formation d'une couche de débris répartie sur toute la trace d'usure (Fig.3.86.b). Cette couche joue le rôle de couche sacrificielle. Les traces de rayures régulières sont encore visibles sur la couche sacrificielle.

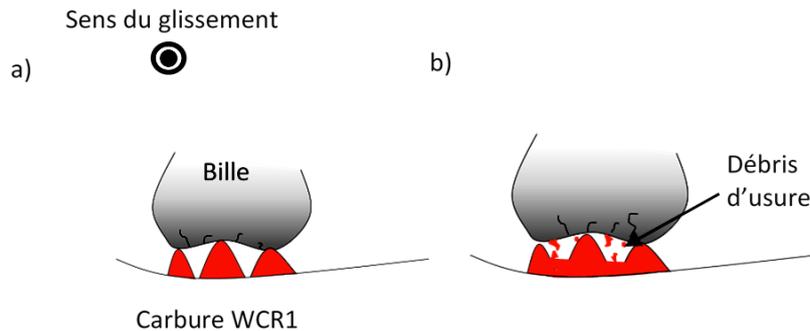


Fig. 3.86. Représentation schématique des mécanismes d'usure du carbure WCR1 impacté avec une bille en SiC à partir de 1 800 J : (a) fissuration de la bille, (b) formation de la couche sacrificielle sur le plan.

- Influence de l'angle d'impact

Un angle d'impact de  $90^\circ$  correspond à un impact normal avec un glissement macroscopique nul. Les traces d'usure du carbure E6 sont circulaires. A 800 J, les débris d'usure sont emprisonnés dans les plissements de la bille et approvisionnent l'interface en troisième corps. Au-delà de cette énergie, les impacts conduisent à déformer les cavités qui renfermaient les débris sur la trace de la bille. Les débris viennent alors approvisionner l'interface. Un glissement parasite est visible par la présence de micro-rayures. L'usure reste néanmoins importante en raison des impacts qui déforment la bille. Cela modifie, comme évoqué précédemment, la surface de contact et contribue à endommager le carbure E6. La comparaison des coefficients énergétiques d'usure à  $60^\circ$  et à  $90^\circ$  montrent que l'usure est réduite d'un facteur 3. Cela est aussi valable pour les volumes d'usure de la bille. Ceci signifie que la composante de glissement à  $60^\circ$  participe de façon importante au processus d'endommagement.

- Influence de l'environnement

Nous avons étudié l'effet de l'oxygène à l'interface en réalisant des essais sous un jet d'argon, ce qui limite l'apport en oxygène dans l'interface par rapport aux essais sous air. L'oxygène joue le rôle de liant chimique sur les débris d'usure en les oxydant. L'absence d'oxygène va donc réduire l'adhérence des débris sur la trace d'usure. Les débris ne peuvent alors s'accumuler à l'interface. Par conséquent, la couche de débris est significativement réduite.

Nous observons la présence d'ondulations à 3 000 J avec une zone centrale plus usée et plus profonde sur la trace d'usure du carbure E6. La bille présente aussi les ondulations témoignant du passage répété des débris (selon la direction du glissement) qui sillonnent le matériau. Mais la bille est caractérisée par une zone en relief, ce qui fait que l'emboîtement des deux matériaux crée un enfoncement de la zone centrale de la bille sur la cavité centrale du carbure E6. Cette zone, plus riche en débris d'usure, consiste à emprisonner les débris et à les isoler de l'interface. La perte de contact, en fin d'impact, permet de les évacuer graduellement.

Ces faciès observés sur la bille et le carbure sont très similaires à ceux des traces d'usure du carbure WCR1 impacté par la bille en acier à 8 000 J. Cela signifie que les conditions requises pour créer ces faciès pour le WCR1 sont plus rapidement atteintes pour le carbure E6 (à 3000 J sous argon). De plus, la profondeur centrale du carbure E6 est de 25  $\mu\text{m}$ , là où elle atteint 9  $\mu\text{m}$  sur le carbure WCR1 (à 8 000 J sous air). L'usure est donc plus importante au niveau de cette zone centrale dans le cas du contact E6 (avec argon). A 3 000 J, le carbure et la bille présentent des faciès d'usure avec des sillons dans le sens du glissement. Ces faciès démontrent que les débris sont entraînés, au fur et à mesure qu'ils sont générés, le long de la trace sur le carbure. Puis, lorsque le contact bille / plan est rompu, les débris quittent l'interface.

Les volumes d'usure sont faiblement réduits avec des rapports des coefficients énergétiques d'usure du carbure E6 et du WNZVC de 1,5. La bille qui impacte le carbure E6 s'use 7 fois moins que la bille sous air. Pour le carbure WNZVC, la bille subit une usure importante et a un coefficient énergétique 2 fois plus important que la bille sous air. La baisse des volumes d'usure indique que l'adhésion est atténuée. Cela réduit l'arrachement de matière de la bille et l'abrasion 3 corps. Les carbures sont en contact avec une surface moins perturbée ce qui réduit leur usure. L'augmentation de l'usure de la bille qui impacte le carbure WNZVC suggère que la dureté du carbure et l'absence de débris conduit à favoriser l'usure. La bille finit par s'user 2 fois plus que le plan.

## VII. Conclusions

L'étude des mécanismes d'usure et des volumes d'usure nous permet de conclure que plusieurs paramètres contribuent à l'endommagement des carbures de tungstène en impact-glissement. La surface de contact bille / plan, les propriétés mécaniques des matériaux antagonistes et la microstructure des carbures sont des principaux facteurs qui entrent en jeu dans les mécanismes d'usure. Les mécanismes d'abrasion et d'adhésion qui ont lieu à l'interface et qui se déroulent simultanément participent aussi à accentuer l'usure.

De plus, la dynamique d'impact-glissement contribue significativement à ce processus d'usure. A cela s'ajoutent les mécanismes cycliques qui engendrent la formation de fissures déstructurant les matériaux et les fragilisant. La propagation des fissures conduit à l'arrachement de matière aussi bien sur la bille en SiC que sur le carbure (WNZVC). De plus, le nombre de cycles d'impact-glissement intensifie les endommagements. Enfin, l'interaction de ces mécanismes et facteurs accroît les phénomènes d'usure, comme la formation graduelle d'une couche sacrificielle de débris d'usure altérant la surface de contact ou encore les interactions chimiques de surface qui favorisent l'adhésion de débris.

Les analyses quantitatives des volumes d'usure permettent de montrer que l'usure varie linéairement avec l'énergie d'impact totale pour les trois carbures testés. De plus, les essais avec les billes en 100Cr6 et en SiC ont montré que l'usure des carbures est fortement réduite. La bille en 100Cr6, plus ductile joue le rôle de précurseur d'usure et s'endommage beaucoup plus que le carbure. Les essais à glissement nul, présentent une usure plus faible

### Chapitre 3 : Résultats expérimentaux et analyse des traces d'usure

que les essais avec les conditions d'impact-glissement. Enfin les essais sous air et sous argon, permettent d'étudier l'environnement de contact et de rendre compte de l'importance du mécanisme d'oxydation sur l'adhésion et donc sur l'usure.

## VIII. Références

1. Marou Alzouma, O. *Durabilité tribologique de matériaux pour insert de dents de tunnelier*. n° 2015-42, 2015, (Ecully, Ecole centrale de Lyon, 2015).
2. Fischer, T. E., Zhu, Z., Kim, H. & Shin, D. S. Genesis and role of wear debris in sliding wear of ceramics. *Wear* 245, 53–60 (2000).
3. Zok, F. W. & Miserez, A. Property maps for abrasion resistance of materials. *Acta Mater.* 55, 6365–6371 (2007).
4. Thakare, M. R., Wharton, J. A., Wood, R. J. K. & Menger, C. Effect of abrasive particle size and the influence of microstructure on the wear mechanisms in wear-resistant materials. *Wear* 276, 16–28 (2012).
5. Suh, N. P. & Saka, N. Surface Engineering. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 36, 403–408 (1987).

## Chapitre 4 : Simulation numérique du contact bille / plan sous impact-glissement

---

Ce chapitre est consacré à l'analyse numérique sous ABAQUS/Explicit des sollicitations sous impact-glissement. Cette étude numérique va nous permettre de mieux comprendre ces sollicitations et les phénomènes d'endommagement. Elle va également nous permettre d'avoir accès à des informations que l'on ne mesure pas expérimentalement. Dans un premier temps, les paramètres qui ont permis de mettre en place ce modèle sont décrits. Puis, l'analyse des résultats numériques est abordée.

## Table des matières

<b>I. Introduction.....</b>	<b>133</b>
<b>II. Présentation du modèle numérique .....</b>	<b>133</b>
II.1. Géométrie du modèle et maillage.....	133
II.2. Loi de comportement .....	134
II.3. Définition du contact .....	135
II.4. Conditions limites .....	135
II.4.1. Déplacement imposé à la bille et bridage du système .....	135
II.4.2. Prise en compte des vibrations du banc.....	136
<b>III. Analyse et interprétation des résultats.....</b>	<b>137</b>
III.1. Validation du modèle numérique.....	137
III.2. Aire de contact.....	138
III.3. Distance glissée.....	143
III.4. Energie dissipée par frottement.....	146
III.5. Distribution des contraintes et fissuration.....	149
III.6. Contraintes de cisaillement .....	150
III.7. Déformation plastique.....	151
<b>IV. Conclusions .....</b>	<b>154</b>
<b>V. Références.....</b>	<b>155</b>

## I. Introduction

Un modèle numérique sous ABAQUS/Explicit permet de représenter la dynamique de l'impact-glissement. Ce chapitre comporte deux parties. La première partie présente le modèle 3D mis au point en tenant compte des paramètres expérimentaux. Puis, la deuxième partie montre les résultats obtenus et leur interprétation. Les contacts suivants sont étudiés : plan E6/bille en 100Cr6, plan WNZVC/bille en 100Cr6, plan E6/bille SiC et plan WNZVC/bille SiC. Le carbure WCR1 n'est pas étudié ici car ses propriétés mécaniques et tribologiques sont très proches de celles du carbure WNZVC. Du fait du temps important pour effectuer un calcul éléments finis (16 heures), un seul impact sera modélisé ici.

## II. Présentation du modèle numérique

### II.1. Géométrie du modèle et maillage

Le modèle 3D mis en place permet de représenter le contact bille/plan dans les conditions expérimentales. Afin de simplifier le modèle, un plan de symétrie ( $\vec{x}O\vec{y}$ ) permet de représenter la moitié des pièces. De plus, le quart d'une bille est représenté, au lieu d'une demi-bille, afin de diminuer le nombre d'éléments. Le plan impacté correspond à un échantillon plan combiné au support métallique en acier (porte-échantillon en acier). La bille et le plan ont les mêmes dimensions que celles des échantillons employés dans la partie expérimentale avec respectivement un diamètre de 10 mm et une dimension de 15 x 21 x 5 mm. Les dimensions du support ont été réduites afin de diminuer le nombre d'éléments.

Le maillage de la bille est tétraédrique avec un raffinement de la zone de contact où le maillage possède une taille de 20  $\mu\text{m}$  (voir vue de détail en Fig.4.1). Le support plan possède un maillage hexagonal avec un raffinement au niveau de la zone de contact. Des éléments de taille 30  $\mu\text{m}$  y ont été générés (Fig.4.1).

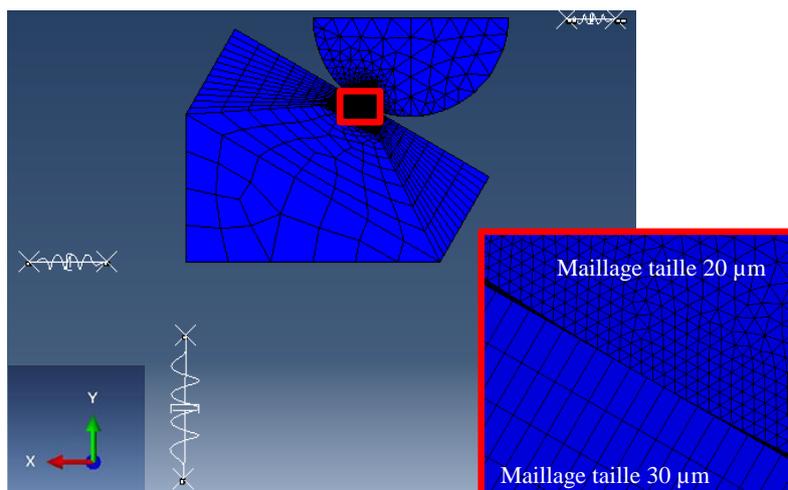


Fig. 4.1. Représentation du modèle bille/plan étudié sous ABAQUS/Explicit avec vue en détail du maillage au niveau de la zone de contact.

Dans les zones où les contraintes et les déformations sont négligeables, un maillage grossier, jusqu'à 1 mm, a été modélisé afin de réduire considérablement le temps de calcul. Le modèle comporte un nombre total de 110 000 éléments environ.

## II.2. Loi de comportement

La bille en 100Cr6 suit la loi de comportement élasto-plastique suivante <sup>102-105</sup> :

$$\sigma = (11,032 + 4783 * \varepsilon^{0,0946} * e^{(-0,0032*T)}) \quad (IV.1)$$

avec  $\sigma$  : la contrainte (Pa)  
 $\varepsilon$ : la déformation  
 $T$  : la température (°C)

Elle a déjà été utilisée dans le cadre d'une autre thèse sur le même matériau. Cette loi est issue des travaux de Poulachon <sup>6</sup>. Un comportement élastique fragile est appliqué aux carbures E6 et WNZVC et à la bille en SiC (Fig. 4.2).

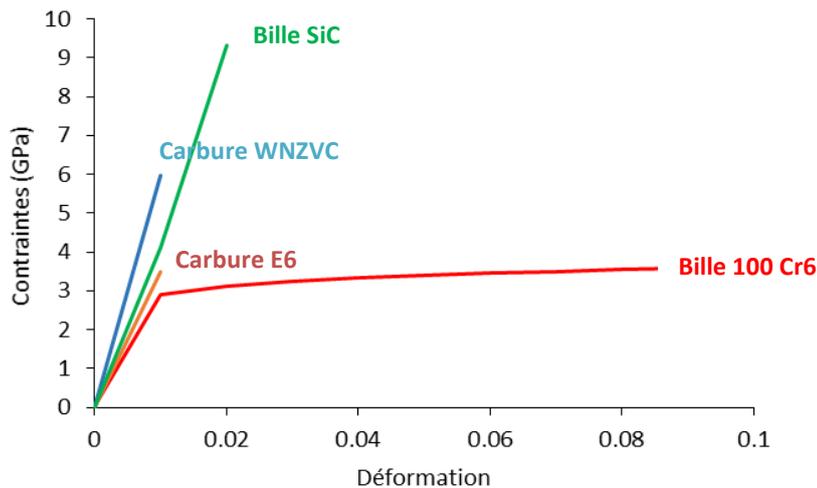


Fig. 4.2. Lois de comportement des matériaux utilisés lors de la simulation.

Plus de détails sur les propriétés mécaniques sont donnés dans le Tableau.4.1.

Tableau. 4.1. Propriétés des matériaux étudiés <sup>8</sup>.

Matériaux	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Coefficient de poisson	Module d'Young (GPa)	Limite d'élasticité (MPa)
Carbure E6	14	0,20	380	3 500
Carbure WNZVC	13,8	0,20	538	5 966
Bille 100Cr6	7,80	0,30	210	2 958
Bille SiC	3,15	0,14	410	9 333

### II.3. Définition du contact

Nous utilisons un contact frottant dans ce modèle. Un coefficient de Coulomb est appliqué entre les deux surfaces. Les coefficients de frottement des couples de matériaux ont été mesurés par des essais avec un banc de frottement rectiligne alternatif (Annexe.1). Nous considérons les coefficients de frottements suivants :

Tableau. 4.2. Coefficients de frottement des couples de matériaux.

	<i>Bille 100Cr6</i>	<i>Bille SiC</i>
<i>Plan E6</i>	0,54	0,42
<i>Plan WNZVC</i>	0,60	0,49

### II.4. Conditions limites

#### II.4.1. Déplacement imposé à la bille et bridage du système

Un déplacement nul suivant z est appliqué au niveau du plan (Oxy) sur la bille, ainsi que sur la pièce acier et le plan céramique. Pour appliquer le mouvement d'impact, un déplacement, qui a été mesuré expérimentalement par le capteur de déplacement de la bille lors d'un impact, est appliqué sur la surface supérieure de la bille (Fig.4.3).

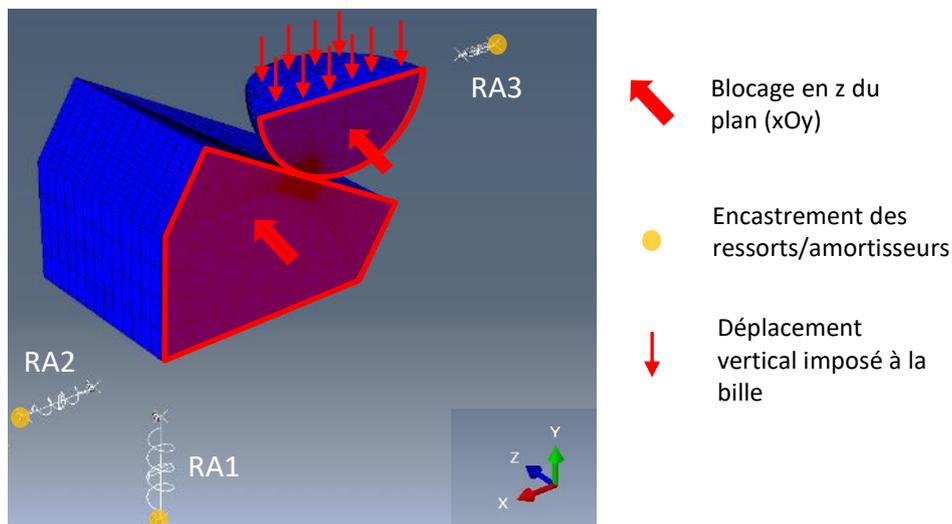


Fig. 4.3. Représentation des conditions limites appliquées dans le modèle.

La Fig.4.4 présente les courbes de force d'impact et déplacement en fonction du temps utilisées pour la simulation pour les 4 couples de matériaux. Ces résultats expérimentaux ont été obtenus en réalisant des essais à 4 mJ/cycle avec des essais de 520 cycles d'impact-glissement.

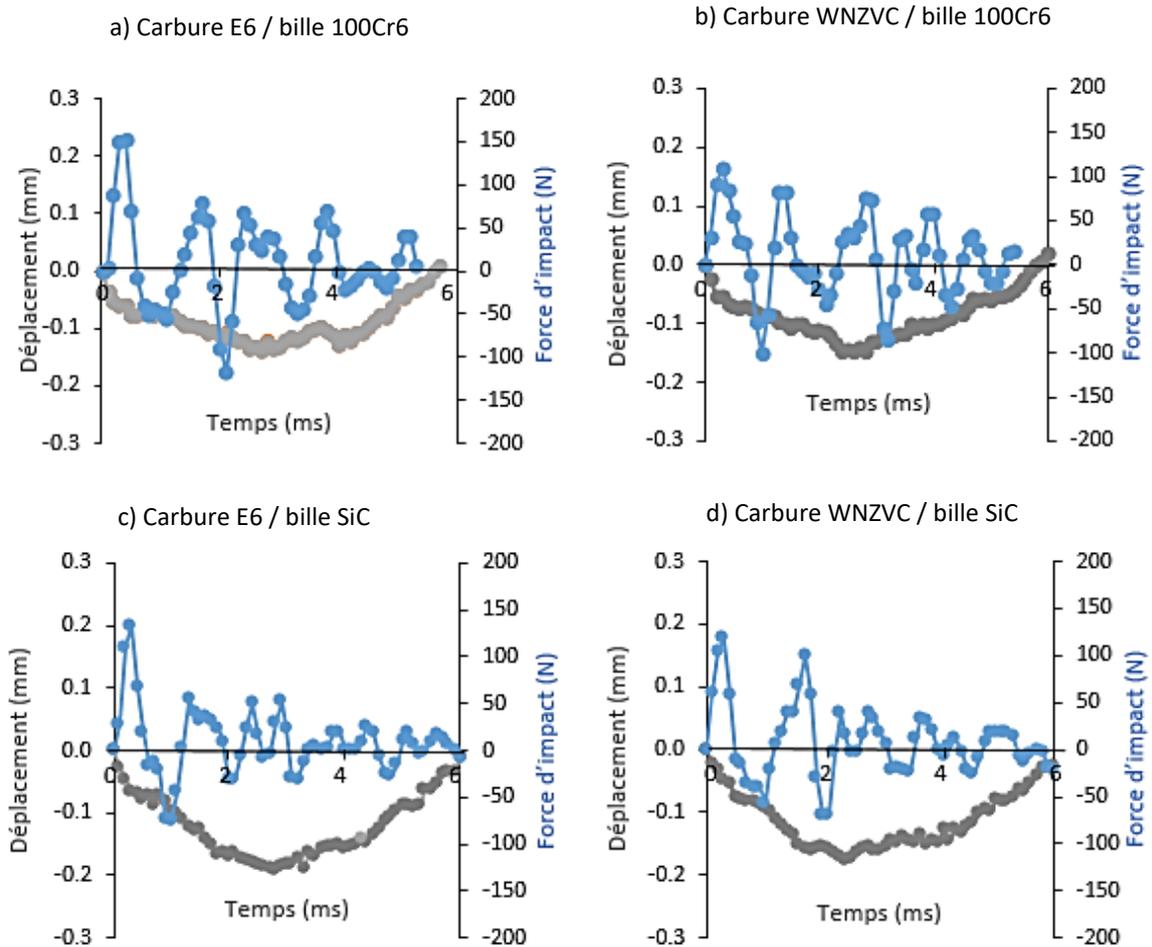


Fig. 4.4. Courbes de déplacement de la bille des couples bille/carbure, et courbes de force d'impact, en fonction du temps, pour les différentes configurations simulées.

Etant donné que le contact représenté par éléments finis considère des surfaces non usées (sans mécanisme d'adhésion), nous avons utilisé des valeurs expérimentales de déplacement concernant les premiers impacts, où les surfaces expérimentales sont supposées non usées. Le point de contact a été déterminé lorsque l'effort devient supérieur à 0 (Fig.4.4).

#### II.4.2. Prise en compte des vibrations du banc

Des vibrations du banc d'essai lors des sollicitations d'impact-glisement peuvent modifier la dynamique d'impact-glisement.

Nous pouvons distinguer:

- les éventuels déplacements latéraux du bilame, relié à la bille, entraînant possiblement des vibrations de celle-ci au contact, ainsi que des rebonds,
- les vibrations du porte-échantillon associées à l'impact, conduisant à un déplacement vertical (vers le bas) du plan,
- les vibrations latérales du porte-échantillon générées par l'impact-glisement. En effet, sous l'effet de l'impact, le porte-échantillon est

susceptible de se déplacer vers l'arrière. Ce déplacement permet de générer le glissement.

Afin de tenir compte de ces vibrations, 3 ressorts et 3 amortisseurs encastrés sont incorporés au système (Fig.4.1). Leur raideur et leur amortissement déterminés en annexe 2 sont des paramètres utilisés dans le modèle (Tableau. 4.3).

*Tableau. 4.3. Paramètres des ressorts déterminés expérimentalement.*

	<b>Raideur (N/mm)</b>	<b>Coefficient d'amortissement (Kg.s<sup>-1</sup>)</b>
<b>Vibrations verticales du porte- échantillon (RA1)</b>	6544	307,6
<b>Vibrations latérales du porte- échantillon (RA2)</b>	66,66	31,01
<b>Vibrations latérales de la bille (RA3)</b>	1,343	4,106

Ces propriétés sont attribuées aux trois ressorts et amortisseurs modélisés et permettent de représenter la raideur et l'amortissement du système. Ainsi, la surface du bas du porte-échantillon est associée au ressort vertical (RA1). Cette surface est aussi assimilée au ressort horizontal (RA2). Enfin le troisième ressort, (RA3) est lié à la section de la bille.

### III. Analyse et interprétation des résultats

#### III.1. Validation du modèle numérique

Le modèle numérique permet de déterminer la force perçue par le capteur piézoélectrique qui est situé sous les lames verticales. Il s'agit de la force obtenue en un nœud au niveau du ressort RA1. Par comparaison de la valeur de cette force et de la force expérimentale, nous pouvons estimer si le modèle est en bonne corrélation avec les conditions d'essai. La Fig.4.5 montre les forces expérimentales et les forces numériques obtenues. Nous pouvons observer que le premier pic de force numérique suit approximativement la même variation que le premier pic expérimental. En revanche, l'amplitude de force numérique est presque deux fois plus élevée. Ceci est probablement dû à quelques raideurs du montage non prises en compte dans le modèle, et difficilement mesurables sur le montage expérimental. Nous pouvons aussi constater que la force numérique s'atténue rapidement après un premier impact dans les deux cas étudiés. Cet amortissement est probablement dû à la complexité du montage expérimental. Il faudrait tenir compte de tous les amortissements et raideurs du montage, ce qui est compliqué à obtenir pour notre système.

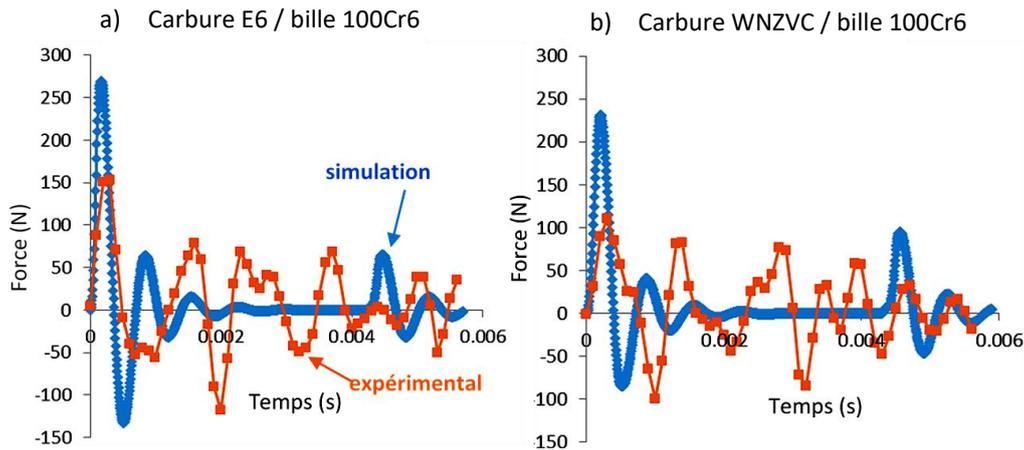


Fig. 4.5. Comparaison des courbes de forces expérimentales et numériques avec :  
(a) le carbure E6, (b) le carbure WNZVC.

Enfin, le deuxième pic observé numériquement correspond au retour du plan qui entre en contact avec la bille. Nous n’observons pas la même chose au niveau de l’effort expérimental, mais les vidéos faites à la caméra rapide montrent que ce phénomène a bien lieu expérimentalement. Nous obtenons des courbes similaires avec les essais avec la bille SiC. Nous constatons donc certaines différences entre nos résultats numériques et expérimentaux. Il faudra être prudent quant à l’interprétation des résultats numériques, surtout au niveau des valeurs des différentes données, étant donné le rapport 2 obtenu au niveau de l’effort lors de l’impact.

### III.2. Aire de contact

Les aires de contact sont obtenues tout au long de la simulation, l’impact durant près de 5 ms. La Fig.4.6 présente l’évolution de l’aire de contact pour les quatre couples de matériaux lors d’un impact, en fonction du temps.

La montée importante de l’aire de contact au début de la simulation correspond au premier impact. Puis, on constate pour 3 couples de matériaux sur 4, une seconde montée, et enfin, entre 4 et 5ms une dernière montée de l’aire de contact. Il y a ainsi, lors d’un cycle d’impact/glissement, plusieurs impacts. Le premier impact généré par le déplacement de la bille induit un déplacement du porte échantillon vers l’arrière (selon la direction x).

Puis, un petit rebond a lieu à 0.4ms. Enfin, le porte-échantillon revient vers sa position initiale et heurte la bille qui remonte vers le haut. Ces déplacements se reproduisant à partir de 4 ms environ (Fig.4.6).

Nous constatons que le couple plan E6/bille 100Cr6 ne présente pas de pic vers 0,4 ms contrairement aux trois autres couples de matériaux. Cela signifie qu’il n’y a pas de rebond après le premier impact (Fig.4.7).

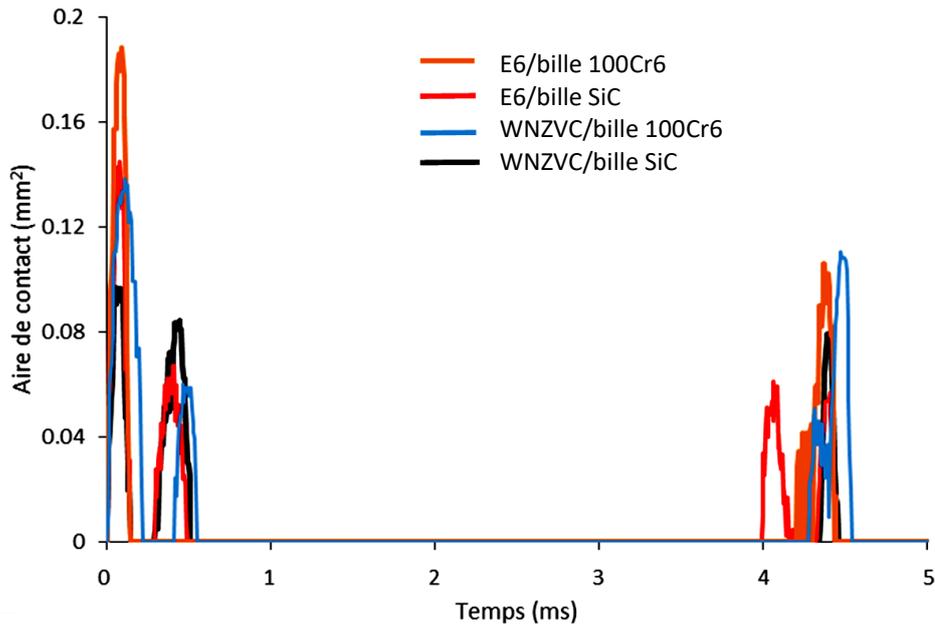


Fig. 4.6. Evolution de l'aire de contact en fonction du temps des quatre couples de matériaux étudiés lors d'un impact.

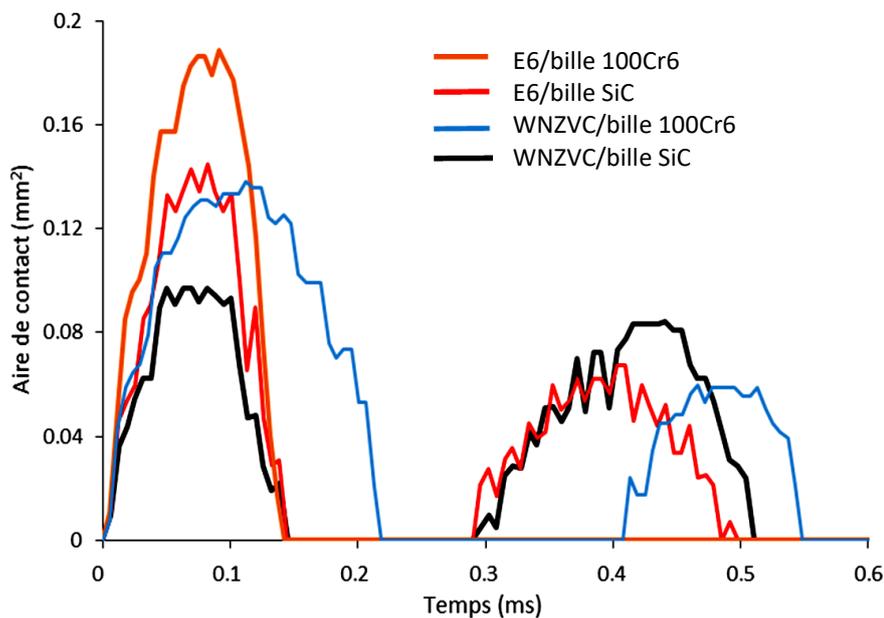


Fig. 4.7. Vue détaillée de l'évolution de l'aire de contact lors des deux premiers impacts.

Les déplacements de la bille et du plan selon la direction d'impact et selon la direction du glissement permettent de comprendre comment les impacts et la perte de contact se produisent. Sous l'effet du premier impact, le plan se déplace verticalement, dans la direction de l'impact (Fig.4.8). Cela se produit pour les quatre couples étudiés.

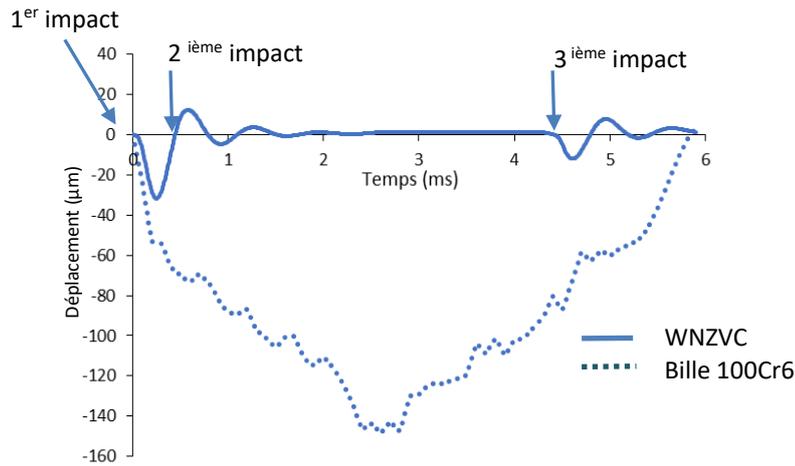


Fig.4.8. Déplacements du carbure WNZVC et de la bille en 100Cr6 dans la direction d'impact.

Le premier impact, conduit également à un déplacement horizontal de la bille (à partir de 0,05 ms), tandis que le plan se déplace vers la direction opposée (Fig.4.9 et 4.10). La bille et le plan ne sont plus alors en contact.

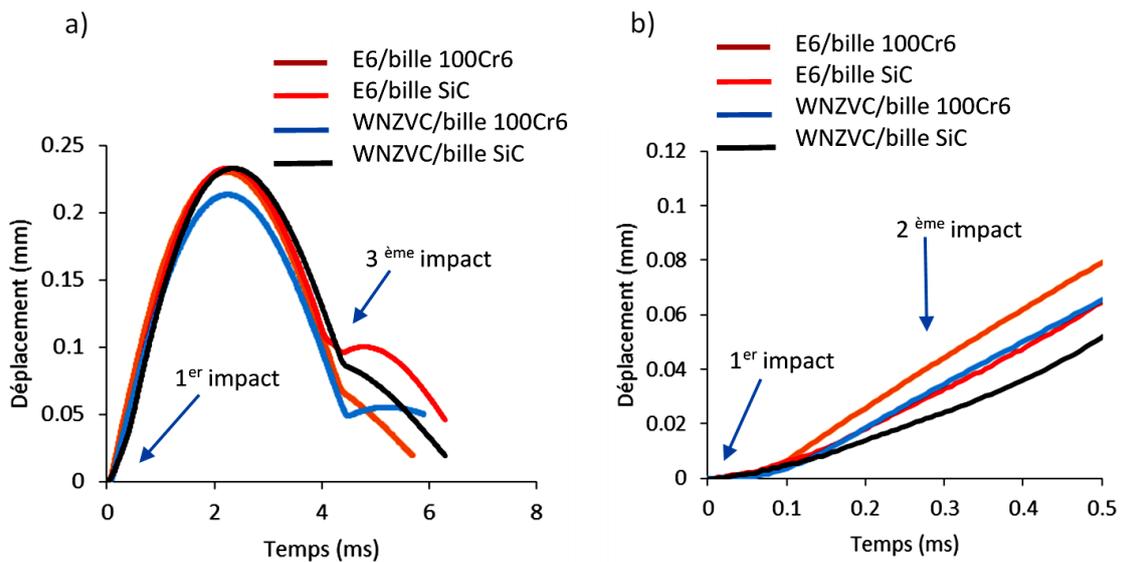


Fig.4.9. Déplacements horizontaux des carbures E6 et WNZVC:  
(a) carbures E6 et WNZVC, (b) vue détaillée de la zone des deux premiers impacts.

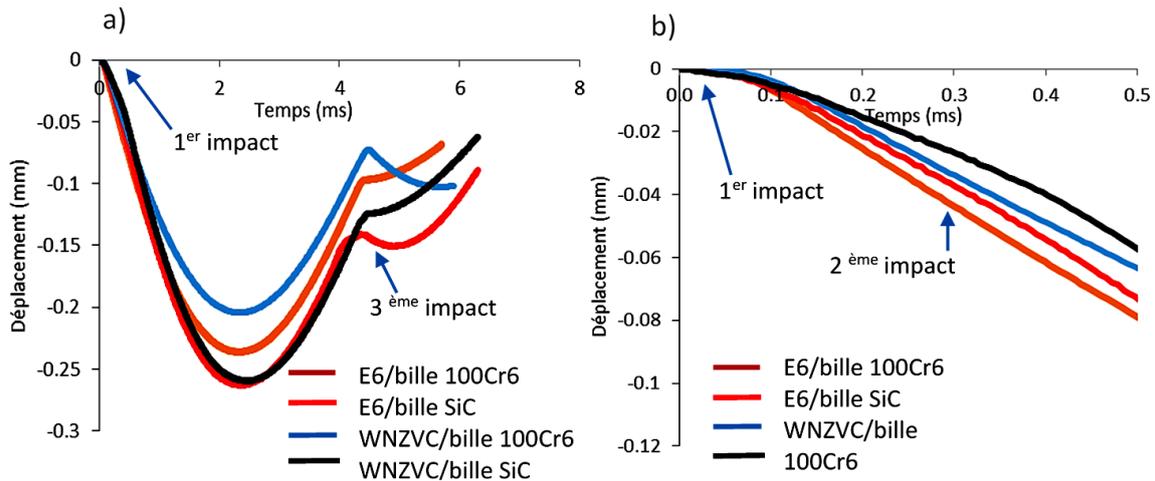


Fig. 4.10. Déplacements horizontal des billes:  
 (a) billes en 100Cr6 et SiC,  
 (b) vue détaillée de la zone des deux premiers impacts.

Le deuxième contact a lieu lorsque le plan remonte (dans la direction opposée de l'impact) alors que la bille continue de suivre sa trajectoire verticale vers le bas (Fig.4.8). La bille continue à se déplacer horizontalement, dans l'axe opposé à Ox (Fig.4.10), et le plan s'éloigne de la bille dans la direction de l'axe Ox (Fig.4.9). La perte de contact a lieu avec le déplacement du plan vers le bas (dans la direction de l'impact), ce qui est une conséquence de l'impact (Fig.4.8).

Comme mentionné précédemment avec les aires de contact, le contact avec le carbure E6 et la bille en 100Cr6 ne présente pas ce rebond. La bille en 100Cr6 et le plan E6 se déplacent avec 10  $\mu\text{m}$  de plus que les autres couples, dans la direction du glissement. En effet, le carbure, vers 0,3 ms se déplace de 43  $\mu\text{m}$  et la bille en 100Cr6 s'éloigne du plan (dans l'axe opposé à l'axe Ox) avec un déplacement de 44  $\mu\text{m}$ .

Le dernier impact se produit lorsque la bille remonte dans la direction de l'impact tout en se déplaçant dans la direction de l'axe Ox: la bille revient à sa position initiale. Le plan à ce moment-là, revient également à sa position initiale. Il se déplace dans l'axe opposé à l'axe Ox. Ce contact éloigne la bille du plan de nouveau (Fig. 4.9.a et 4.10.a).

Nous nous intéressons ici au premier pic. Les temps de contact nous permettent de remonter au moment où la surface de contact entre les deux matériaux est maximale. Les aires de contact sont présentées dans l'histogramme en Fig.4.11.

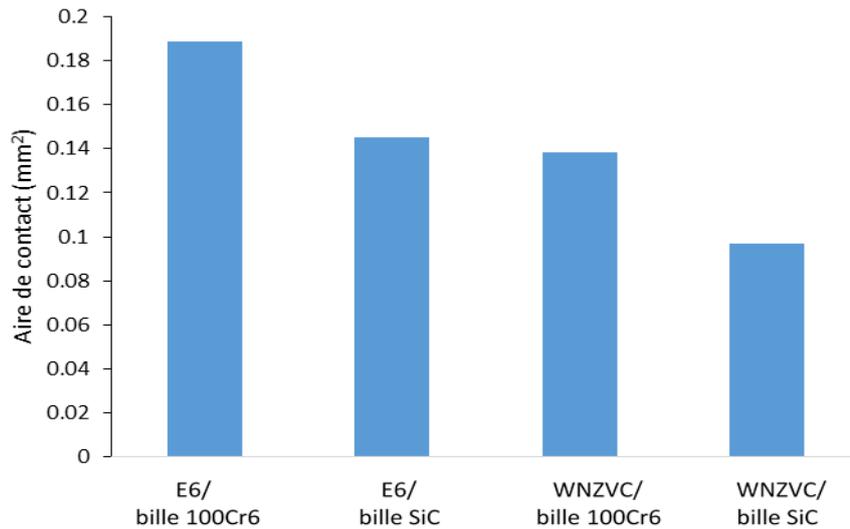


Fig.4.11. Histogramme des aires de contact des quatre couples de matériaux étudiés lors du premier impact.

Nous constatons que les aires de contact pour le carbure E6 sont plus importantes que celles du carbure WNZVC. Nous remarquons que lorsqu'on change de matériau antagoniste, la bille en SiC, plus dure que la bille en 100Cr6, a une aire de contact moins importante. Il faudrait néanmoins considérer l'enfoncement lors du contact en déterminant le déplacement de la bille dans le plan. Nous calculons ce déplacement en considérant deux chemins sur le plan. Un chemin qui correspond à l'interface et un autre chemin situé en profondeur du plan (Fig.4.12).

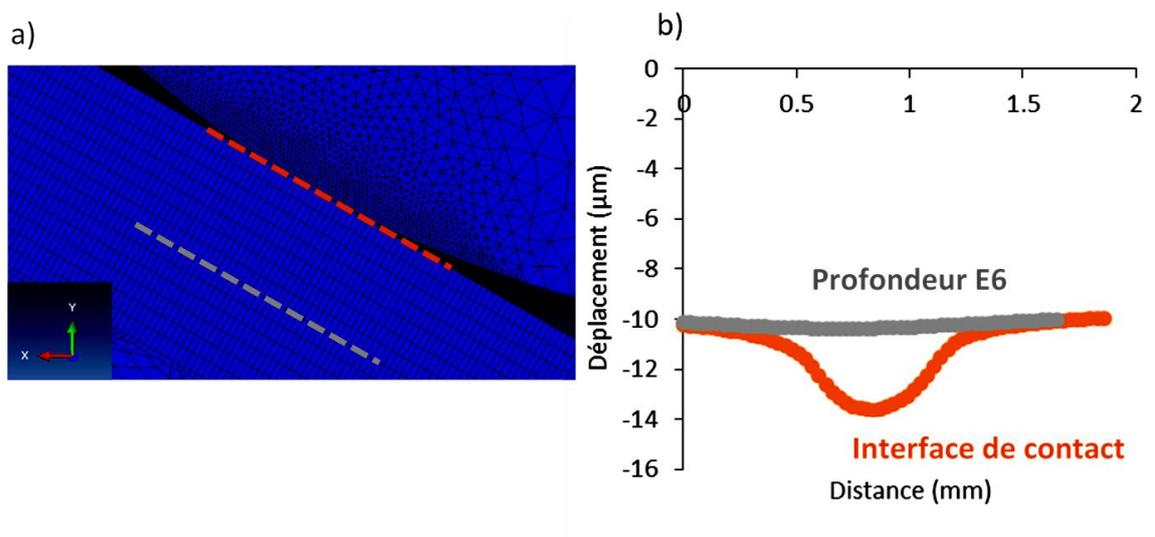


Fig.4.12. Détermination de la pénétration de la bille dans le plan :  
 (a) représentation des chemins utilisés,  
 (b) déplacements obtenus.

On calcule l'enfoncement de la bille sur le plan en soustrayant les deux mesures obtenues (Fig.4.13).

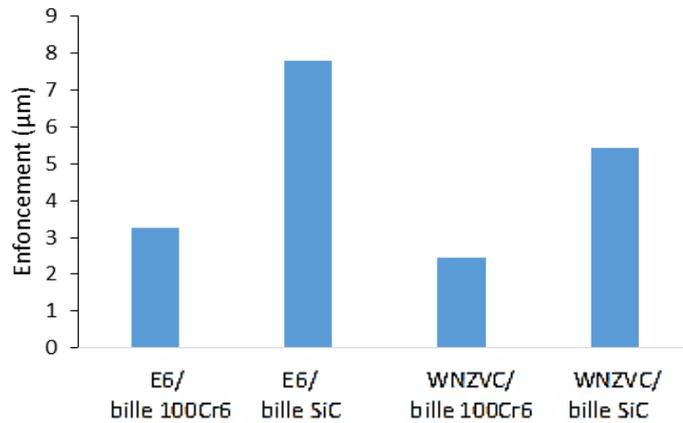


Fig.4.13. Enfoncement de la bille dans le plan pour les quatre couples de matériaux étudiés.

On constate que l'enfoncement est plus important lors du contact avec le carbure E6 qu'avec WNZVC. Ce qui semble logique étant donné que le carbure E6 est moins rigide que le carbure WNZVC. Mais contrairement à l'aire de contact, l'enfoncement est plus important avec la bille SiC.

Par conséquent, on peut conclure que le carbure E6 présente les aires de contact les plus grandes et que la bille SiC permet d'avoir une profondeur de contact plus importante.

### III.3. Distance glissée

La distance glissée correspond à la distance parcourue par la bille sur le plan lorsque la bille est en contact avec le plan. Nous la déterminons à l'aide du logiciel Abaqus en utilisant la fonction FSLIPEQ qui calcule la distance glissée au contact. La Fig.4.14 présente les résultats obtenus pour tous les couples de matériaux:

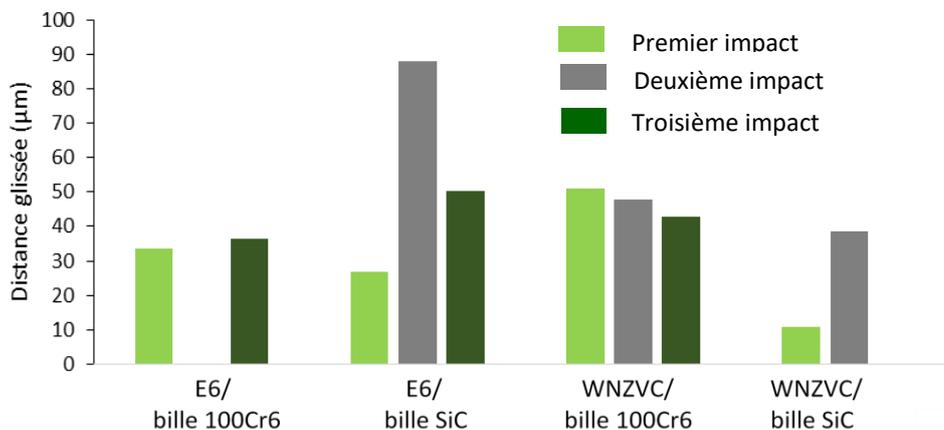


Fig.4.14. Histogramme des distances glissées pour les quatre couples de matériaux.

Puisque le couple plan E6/bille 100Cr6 ne présente pas de rebond après le premier impact, nous obtenons une distance glissée pour le premier impact et une deuxième distance glissée qui correspond au dernier contact vers 4 ms. De même, on obtient deux distances glissées pour le couple WNZVC/bille SiC, car il n'y a pas de glissement lors du troisième impact vers 4 ms.

On remarque, en comparant les premiers impacts, que la bille en 100Cr6 présente la distance glissée la plus importante des quatre couples, au contact du carbure WNZVC (avec  $51\mu\text{m}$ ), lors du premier impact. De plus, on constate que la distance glissée au premier impact est plus importante avec la bille en acier 100Cr6 qu'avec la bille en SiC. Nous obtenons des distances de  $34\mu\text{m}$  au premier impact avec la bille 100Cr6 et un glissement de  $27\mu\text{m}$  avec la bille SiC, pour le carbure E6. Pour le carbure WNZVC, on obtient  $51\mu\text{m}$  avec la bille 100Cr6 et  $10\mu\text{m}$  avec la bille SiC.

On peut remarquer que les deux premiers impacts se font à des endroits distincts et que le troisième impact, sauf pour le couple carbure E6 / bille en SiC, se produit au même endroit que les précédents impacts. En effet pour le couple carbure E6 / bille en SiC, les trois impacts ont lieu à des endroits différents. Par conséquent, on peut estimer la distance glissée totale, en faisant la somme des distances glissées distinctes. La Fig.4.15 présente les distances glissées des quatre couples étudiés.

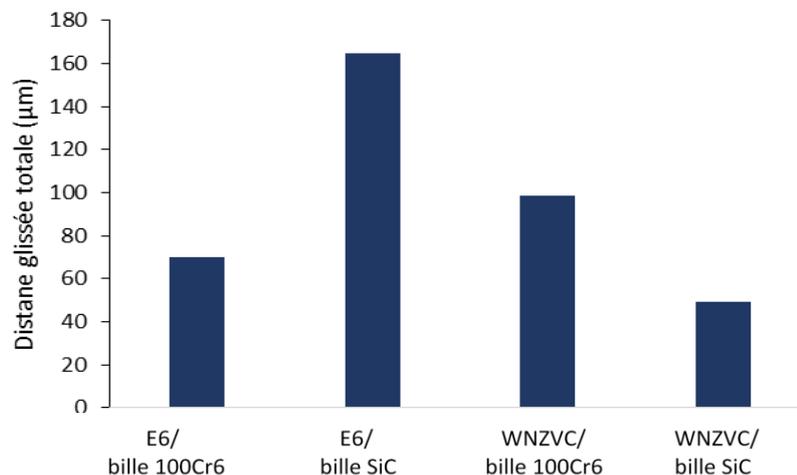


Fig.4.15. Histogramme des distances glissées totales pour les quatre couples de matériaux.

Nous pouvons comparer ces résultats numériques avec ceux déterminés sur les traces d'usure. On constate que les traces d'usure sont le plus souvent circulaires, cependant en soustrayant la longueur de la trace (dans le sens du glissement) avec la largeur de la trace d'usure, nous pouvons remonter à la distance glissée (Fig.4.16).

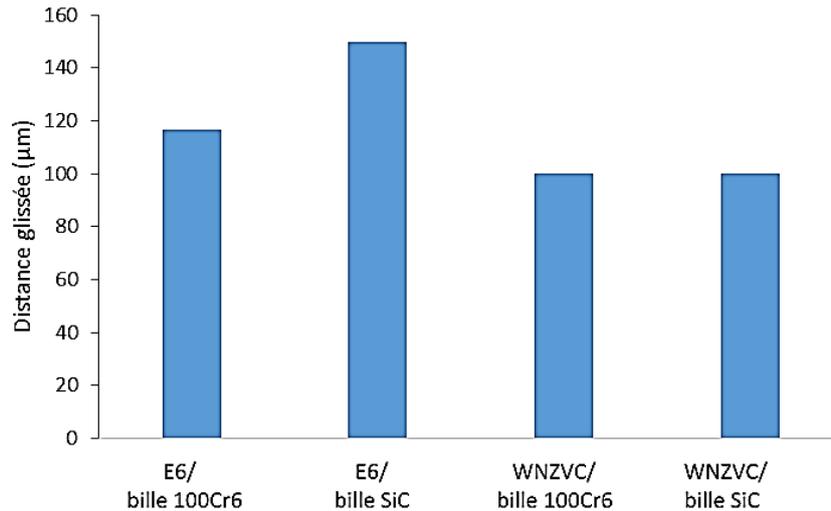


Fig.4.16. Histogramme des distances glissées expérimentales obtenues par mesure des dimensions des traces d'usure des carbures E6 et WNZVC.

On obtient une même tendance avec une distance glissée maximale dans le cas où le carbure E6 est impacté par la bille en SiC. De plus, les distances glissées du couple carbure WNZVC:/ bille en 100Cr6 sont très similaires. En revanche, lors de test sur le carbure WNZVC, les distances glissées expérimentales semblent similaires, ce qui n'est pas le cas au niveau numérique. Cette différence peut provenir du fait que le glissement du troisième rebond n'est pas pris en compte ici dans le modèle, et que ce glissement au troisième rebond n'est pas présent pour tous les impacts. En faisant le rapport de la longueur de la trace d'usure sur la distance glissée calculée, on obtient un facteur de variant entre 5 et 10 (Fig.4.17).

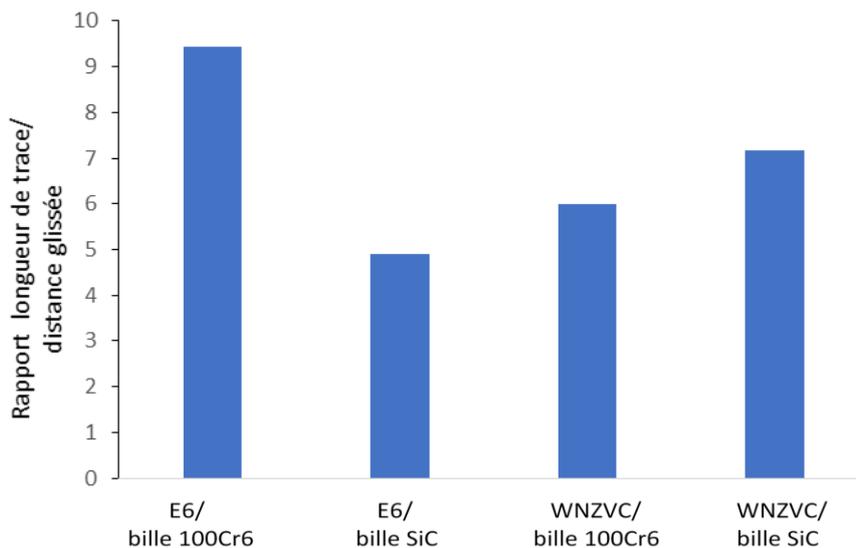


Fig.4.17. Histogramme du rapport longueur de la trace / distance glissée.

Par conséquent la distance glissée reste relativement petite par rapport à la longueur de la trace d'usure. Le glissement est donc négligeable par rapport à l'impact.

### III.4. Energie dissipée par frottement

L'énergie dissipée par frottement dans le matériau est considérée comme l'une des parts énergétiques des 4 mJ qui se propage dans le matériau lors de l'impact-glisement. Nous la déterminons, en utilisant de la fonction CFS (force totale calculée à partir des contraintes de cisaillement) qui représente la force de cisaillement au contact et de la fonction FSLIPEQ (distance glissée). On calcule ensuite l'intégrale de la courbe de l'évolution de la force de cisaillement en fonction de la distance glissée, suivant la relation classique reliant le travail et la force appliquée sur un corps au moment de son déplacement:

$$W = \int F dl \quad (IV.2)$$

avec  $W$  : travail (J)  
 $F$  : force (N)  
 $l$  : déplacement (m)

La Fig.4.18 montre l'évolution de la force de cisaillement en fonction de la distance glissée du premier impact :

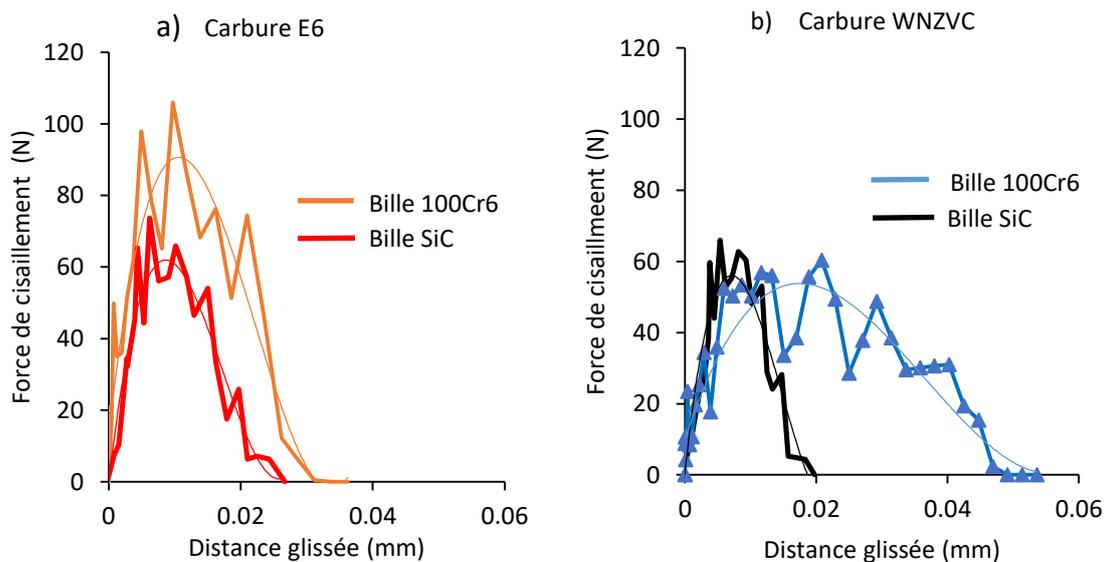


Fig.4.18. Force de cisaillement pour les quatre couples de matériaux étudiés avec :  
 (a) le carbure E6,  
 (b) le carbure WNZVC.

Du fait de la complexité des courbes obtenues, des équations polynomiales de troisième degré ont été déterminées afin de représenter au mieux les courbes de cisaillement et les énergies dissipées sont ensuite calculées. La Fig.19 présente les énergies dissipées par frottement des quatre couples de matériaux étudiés pour chaque rebond:

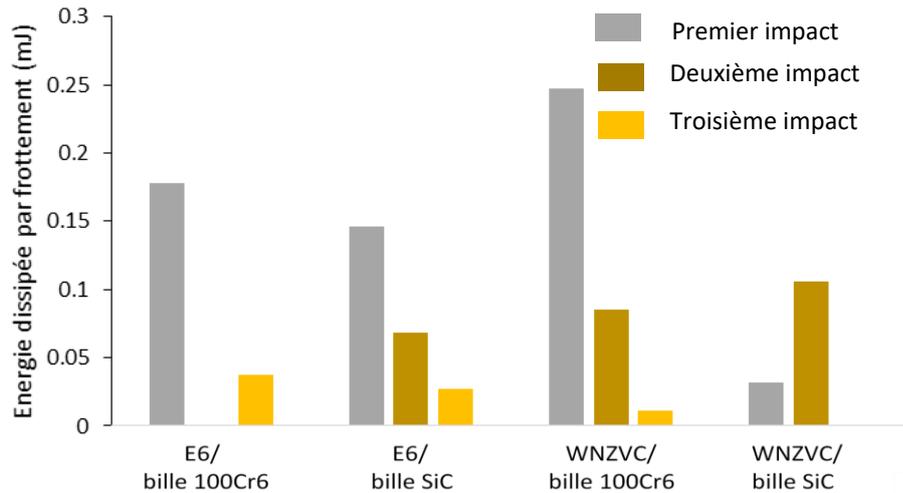


Fig.4.19. Energies dissipées pour les quatre couples de matériaux étudiés.

Nous constatons en premier lieu que les énergies dissipées par frottement sont assez faibles vis-à-vis de l'énergie incidente. En effet, l'énergie par frottement ne représente que 5-10% de l'énergie incidente. Nous constatons que les énergies dissipées par frottement des premiers impacts sont plus importantes avec la bille en 100Cr6 qu'avec la bille en SiC. Les distances glissées obtenues par simulation numérique étant plus faibles que pour les impacts suivants, on peut en déduire que les efforts de cisaillement sont plus importants lors du premier impact. De plus les coefficients énergétiques d'usure obtenus au Chap. 3 (Partie. II. 3) et les énergies dissipées par frottement peuvent être mis en corrélation. On peut constater que les valeurs de coefficient énergétiques d'usure suivent une tendance similaire aux énergies dissipées par frottement lors du premier impact (Fig.4.20).

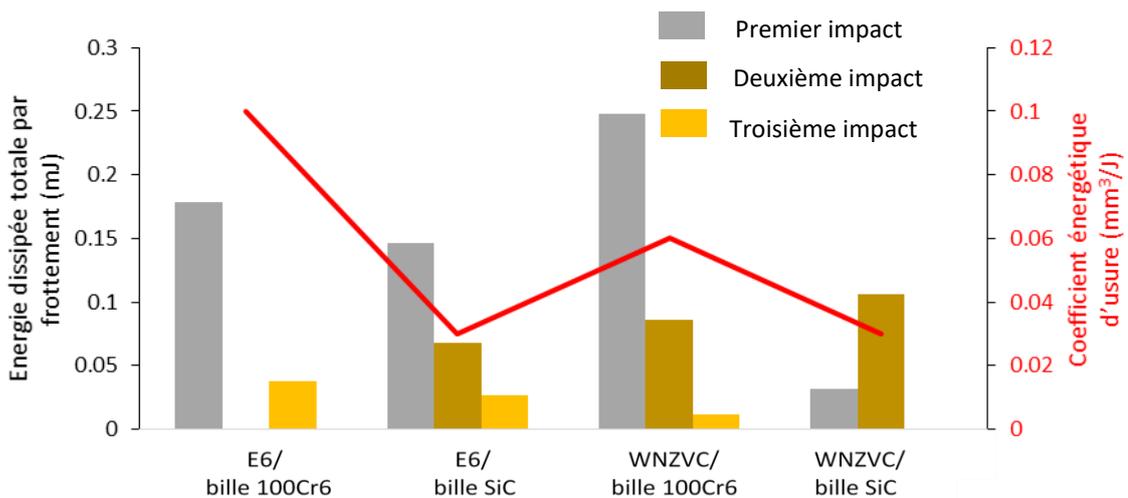


Fig.4.20. Histogramme des énergies dissipées par frottement pour les quatre couples de matériaux étudiés (histogramme) et coefficient énergétiques d'usure (courbe en rouge).

Cela impliquerait que l'usure se fait majoritairement avec le premier impact au cours duquel l'énergie initiale est maximale. Les énergies dissipées du deuxième impact,

correspondant au rebond, semblent les mêmes, quelle que soit le type de matériau, mis à part le couple E6/bille 100Cr6. De plus, en se référant aux coefficients de frottement du tableau 4.2, on peut constater que ces énergies dissipées ont la même tendance que les coefficients de frottement. On obtient pour le contact carbure E6 / bille en SiC le coefficient le plus faible et pour le contact carbure WNZVC / bille en 100Cr6, le coefficient de frottement le plus élevé.

On constate que l'énergie dissipée par frottement lors du 3<sup>ième</sup> rebond est assez faible, vis-à-vis des deux premiers rebonds et que la distance glissée de ce rebond s'effectue là où les deux premiers impacts se produisent. Nous pouvons donc la considérer comme négligeable pour la suite.

Afin d'avoir un aperçu de l'énergie totale dissipée par frottement des quatre couples de matériaux, nous faisons la somme des énergies dissipées (des deux premiers impacts). La Fig.4.21 montre les énergies dissipées totales des couples étudiés. Les valeurs des énergies dissipées par frottement sont très faibles.

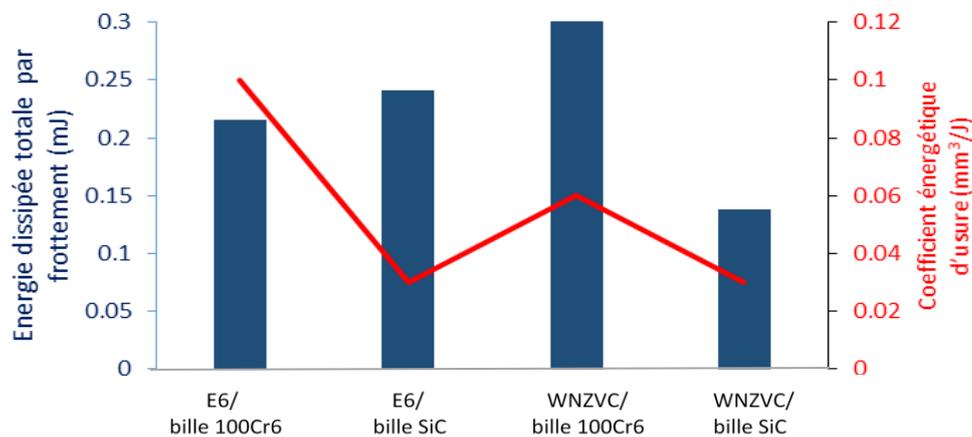


Fig.4.21. Energies dissipées totales pour les quatre couples de matériaux étudiés.

Lorsque la bille en acier 100Cr6 impacte le carbure E6, l'énergie dissipée est de 0,21 mJ. Elle est légèrement inférieure à celle du couple carbure E6 / bille SiC (0,24 mJ). Mais le carbure WNZVC, présente une énergie dissipée totale qui est plus importante avec la bille 100Cr6 (0,34 mJ) qu'avec la bille SiC (0,13 mJ). Les valeurs des coefficients énergétiques d'usure ne coïncident plus avec l'énergie dissipée totale par frottement. Cette différence sera expliquée en partie III.7.

Pour conclure cette partie, on constate que les coefficients énergétiques d'usure et les coefficients de frottement suivent la même tendance. On peut en déduire qu'avec le coefficient de frottement le plus faible (0,4) pour le couple E6 / bille SiC, l'interface est plus propice au glissement, en comparaison avec les autres couples étudiés. De plus, l'énergie dissipée au premier impact semble évoluer de la même manière que le coefficient énergétique d'usure.

### III.5. Distribution des contraintes et fissuration

La distribution des contraintes maximales principales nous permet de distinguer les contraintes de compression et les contraintes de traction (Fig.4.22). Nous remarquons les contraintes de traction à l'arrière de la trace sur le plan et à l'avant de la trace d'usure sur la bille. Elles favorisent la formation de fissures en haut de trace sur le plan.

Les contraintes de compression, situées au centre du contact, sont plus importantes avec la bille en 100Cr6 qu'avec la bille en SiC, quel que soit le carbure utilisé. Elles atteignent 4 400 MPa environ avec le couple E6 / bille 100Cr6 tandis qu'elles sont de 3 400 MPa environ avec le couple E6 / bille SiC. De même, pour le carbure WNZVC, les contraintes de compression diminuent de 4 100 MPa environ, avec la bille en 100Cr6, à 3 200 MPa environ avec la bille en SiC. Il est à noter que, dans le cas du contact ZVC/100Cr6 et E6/100Cr6, les contraintes de compression maximales sont atteintes au niveau de la bille.

En revanche, le couple E6 / bille 100Cr6 présente des contraintes de traction sur la bille qui sont les plus élevées avec 1 700 MPa environ (elles sont autour de 1 500 MPa pour les autres couples de matériaux). Ces contraintes sont légèrement plus faibles sur le plan.

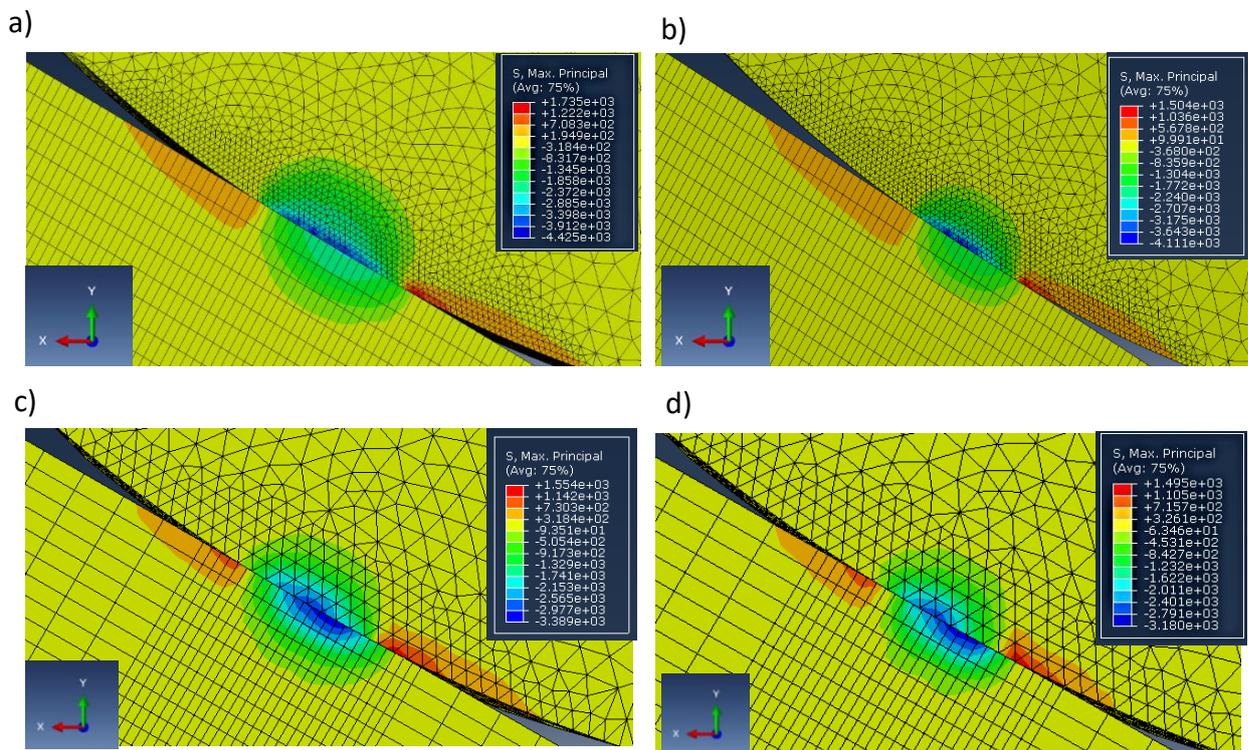


Fig. 4.22. Répartition des contraintes maximales principales avec les couples :  
 (a) plan E6/bille acier,  
 (b) plan WNZVC/bille acier,  
 (c) plan E6/bille SiC,  
 (d) plan WNZVC/bille SiC.

Nous pouvons corrélérer ces contraintes de traction avec la fissuration qui a lieu pour le carbure WNZVC impacté avec une bille en acier. En effet, les contraintes de traction à l'arrière du plan favorisent l'ouverture des fissures en haut de trace sur le plan (Fig.4.23). Nous observons des fissures concentriques.

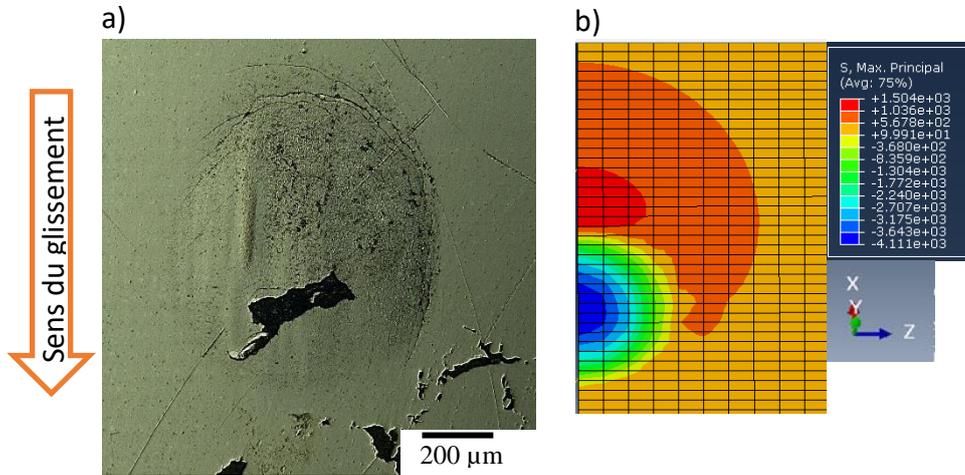


Fig. 4.23. Trace d'usure du carbure WNZVC à 400 J sous argon :  
 (a) observations au microscope numérique de la trace d'usure,  
 (b) vue du dessus de la répartition de contraintes maximales principales.

### III.6. Contraintes de cisaillement

Les contraintes de cisaillement selon l'axe de glissement, nous permettent de voir la direction des contraintes au contact pour la bille et pour le plan. La Fig.4.24 présente ces contraintes pour les quatre couples de matériaux lorsque la surface de contact est maximale.

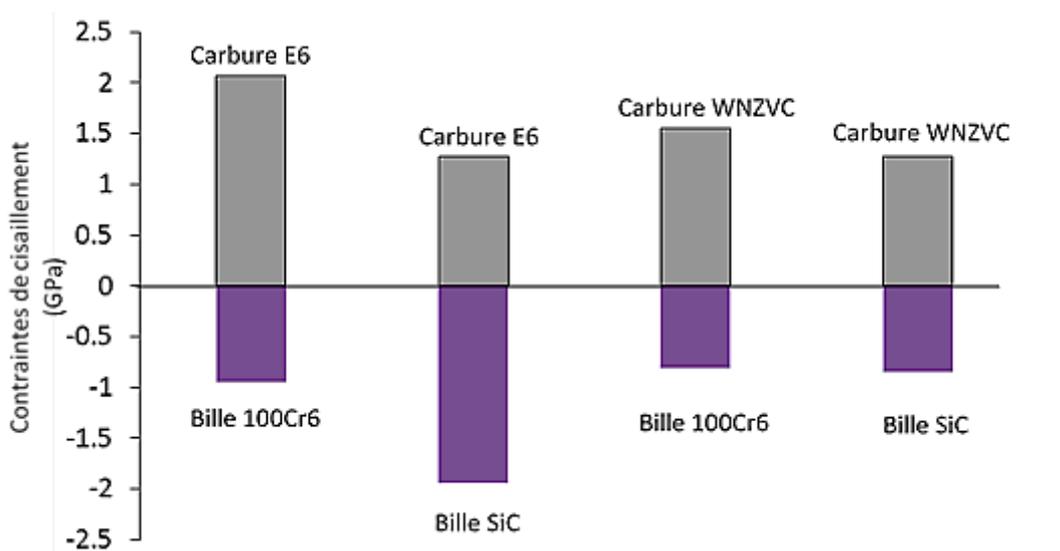


Fig.4.24. Contraintes de cisaillement des couples de matériaux étudiés.

Ces contraintes orientées selon l'axe (Ox) témoignent de l'action du glissement. Lors du glissement la bille subit des contraintes de cisaillement orientées dans la direction opposée à celle de l'axe (Ox).

Nous pouvons constater que les contraintes de cisaillements du carbure, du couple carbure E6 / bille en 100Cr6, présentent des contraintes maximales de 2 GPa. Les autres couples ont des contraintes de cisaillement qui varient autour de 1,5 GPa (avec des contraintes de cisaillement légèrement plus faible pour un contact avec la bille en SiC). Par contre les contraintes de cisaillement de la bille sont maximales pour le couple carbure E6 / bille en SiC, avec 2 GPa.

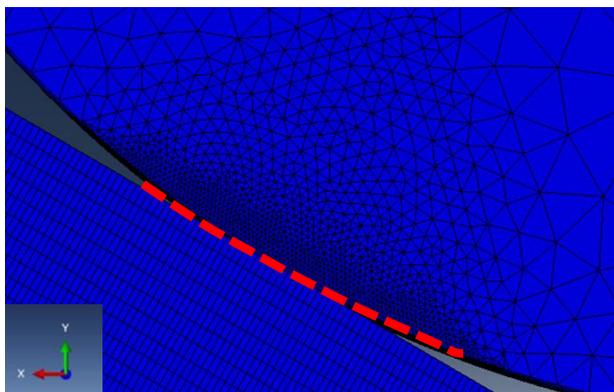
Dans le cas du contact E6 / bille en SiC, le faible coefficient de frottement favorise le glissement. Cela peut expliquer pourquoi les contraintes de cisaillement pour le carbure diminuent (1,3 GPa), par rapport à celles du couple carbure E6 / bille en 100Cr6. De plus, la contrainte très élevée pour la bille en SiC s'explique par le fait que la pénétration de la bille en SiC dans le plan est plus importante que la pénétration de la bille en acier (Fig.4.13).

Pour le couple carbure WNZVC / bille en SiC, caractérisé par deux matériaux les plus durs, le cisaillement est moins plausible sur la bille comme sur le plan. On obtient des contraintes de cisaillement du carbure WNZVC, qui sont les plus faibles avec 1,2 GPa.

En conclusion, les contraintes de cisaillement de la bille diminuent lorsque le plan est en contact avec la bille en SiC et celles du carbure WNZVC sont les plus faibles.

### III.7. Déformation plastique

La déformation plastique a été analysée afin de voir la part de ce type de déformation lors de l'impact/glisement. La Fig.4.25 montre le chemin utilisé sur la bille pour déterminer la déformation plastique. Les plans et les billes en SiC ne présentent pas de déformation plastique compte tenu de la loi de comportement qui leur est attribuée.



*Fig.4.25. Représentation du chemin sur la bille utilisé pour la détermination de la déformation plastique.*

La Fig.4.26 présente la répartition de la déformation plastique des billes en 100Cr6 en contact avec E6 et WNZVC.

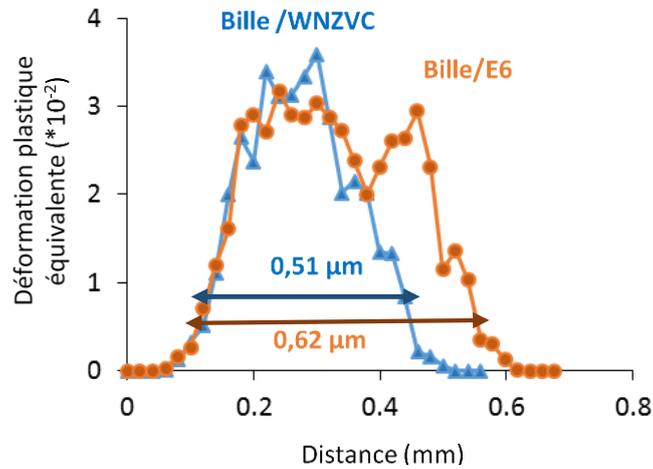


Fig.4.26. Déformation plastique sur le chemin de la bille avec les carbures E6 et WNZVC:  
 (a) bille 100Cr6,  
 (b) bille SiC.

Nous remarquons que l'amplitude de la déformation plastique est la même que l'on soit en contact avec E6 ou WNZVC. En revanche, la distribution spatiale de la déformation plastique est plus importante pour le couple E6 / bille en 100Cr6 avec un diamètre de contact de 0,62 mm qu'avec le couple plan WNZVC / bille en 100Cr6 (0,51 mm). Les observations des traces d'usure permettent de rendre compte de cela avec le diamètre des traces qui est de 1mm pour la bille (Fig.4.27.a) pour le couple plan E6/bille en 100Cr6. La trace d'usure de la bille a un diamètre de 600 µm pour le couple plan WNZVC/bille en 100Cr6 (Fig.4.27.b).

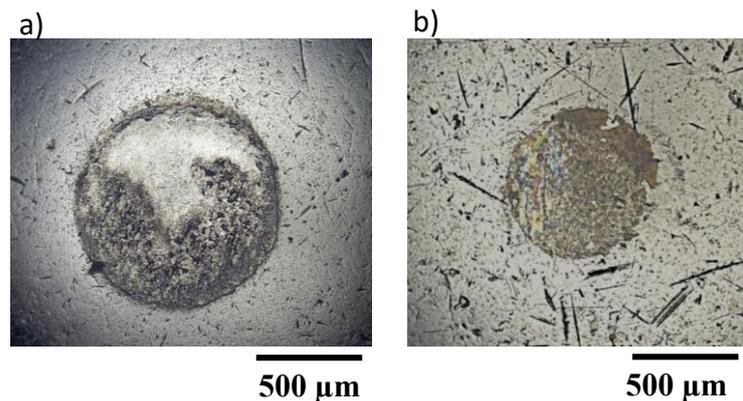


Fig.4.27. Observations des traces d'usure de la bille en acier pour :  
 (a) le couple plan E6/bille 100Cr6,  
 (b) plan WNZVC/bille 100Cr6.

Ainsi, on en déduit que, quel que soit le matériau antagoniste ici, l'énergie de déformation plastique reste la même dans la bille. En revanche, du fait que le matériau E6 est moins rigide, la surface de contact est plus importante, induisant une déformation plastique

(et par conséquent de l'usure) sur une plus grande zone de contact. Nous pouvons déterminer avec le modèle les énergies de déformation plastique des quatre couples de matériaux étudiés (Fig.4.28). Cette énergie évaluée avec la fonction ALLPD, permet de calculer l'énergie dissipée plastiquement sur tout le modèle 3D, lors de la sollicitation d'impact-glissement.

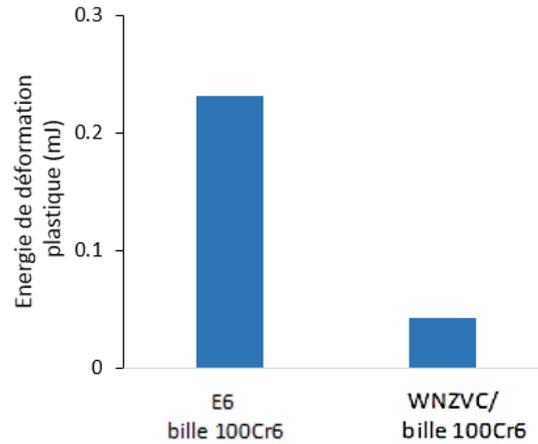


Fig.4.28. Histogramme des énergies de déformation plastique des couples de matériaux étudiés.

On obtient une énergie élevée de 0,23 mJ pour le carbure E6 et de 0,05 mJ pour le carbure WNZVC, avec la bille en 100Cr6. L'énergie nécessaire pour plastifier la bille en 100Cr6 est donc 5 fois plus importante avec le carbure E6, qui est moins dure, qu'avec le carbure WNZVC. En faisant un rapprochement entre l'énergie totale dissipée par frottement, le coefficient énergétique d'usure et l'énergie dissipée, on peut mieux comprendre ce qui se passe au contact. La Fig. 4.29 présente l'évolution de trois grandeurs pour les quatre couples étudiés.

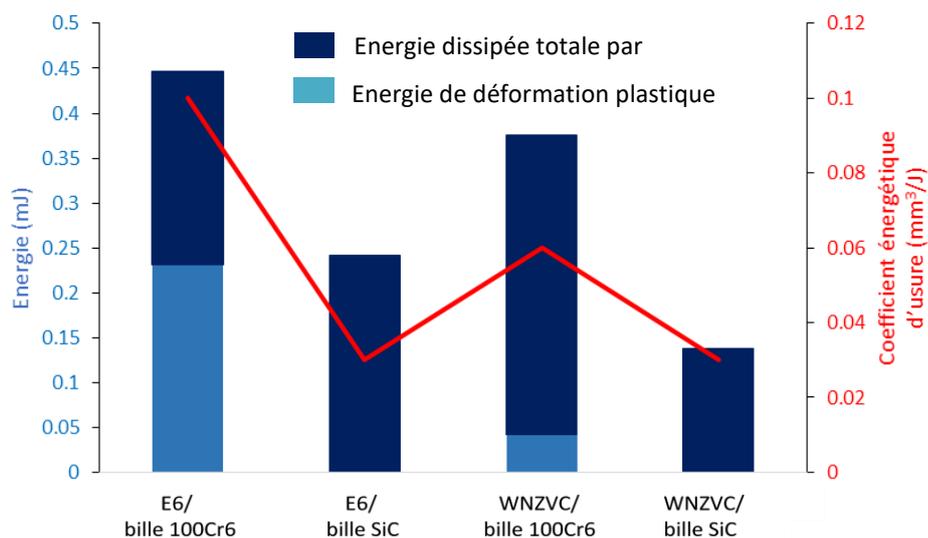


Fig.4.29. Histogramme de l'énergie dissipée par frottement avec l'énergie de déformation plastique et des coefficients énergétiques d'usure (courbe en rouge).

On constate que le coefficient énergétique d'usure augmente quand l'énergie de déformation plastique est non nulle. On peut penser que le coefficient énergétique d'usure expérimental peut représenter la somme de l'énergie totale dissipée par frottement et de l'énergie de déformation plastique.

### IV. Conclusions

Ce chapitre présente les mécanismes qui se déroulent lorsque la bille et le plan sont soumis à des sollicitations d'impact-glissement. Le modèle élaboré sous Abaqus Explicit tient compte de la dynamique d'impact-glissement ainsi que des phénomènes vibratoires associés au banc d'essai. Le modèle élaboré est valide. Néanmoins, les forces numériques sont supérieures aux forces expérimentales. Une analyse qualitative et comparative semble donc plus judicieuse.

Les distances glissées obtenues numériquement et expérimentalement sont faibles par rapport à la longueur de la trace d'usure. On peut en conclure que le glissement n'est pas prépondérant par rapport à l'impact (angle d'impact de 60°). Nous avons pu exploiter les coefficients énergétiques d'usure qui évoluent comme les coefficients de frottement. De plus l'énergie de déformation plastique non nulle avec la bille en 100Cr6, permet de comprendre pourquoi les coefficients énergétiques d'usure augmentent pour les couples comportant la bille 100Cr6. Les énergies dissipées des premiers impacts suivent une même évolution que les coefficients énergétiques d'usure. Cela suggère que le premier impact contribue beaucoup à l'usure que les rebonds.

Les contraintes de compression au centre du contact et les contraintes de traction permettent de comprendre la formation et l'ouverture des fissures observées dans le couple WNZVC / bille 100Cr6. Par ailleurs la dureté des matériaux et les coefficients de frottement permettent de mieux appréhender les contraintes de cisaillement des billes et des plans et apportent une complémentarité à l'étude.

Nous pouvons dresser un bilan des observations faites sur les quatre couples étudiés :

- Le couple E6 / bille 100Cr6 est caractérisé par une aire de contact supérieure aux trois autres couples testés avec un faible enfoncement de la bille dans le plan. Lors du contact, il n'y a eu que deux impacts successifs sans rebond, avec la faible rigidité du carbure E6. Les contraintes de compression et de traction sont les plus importantes. La bille présente une énergie de déformation plastique et des contraintes de cisaillement du carbure qui sont les plus élevées. La faible rigidité du carbure E6 favorise l'augmentation de l'aire de contact et augmente la surface de cisaillement du carbure.
- Le couple E6 / bille en SiC présente le plus faible coefficient de frottement, et la distance glissée est la plus importante. L'enfoncement de la bille dans le plan est maximal. Les contraintes de cisaillement de la bille sont les plus

élevées, mais réparties sur une petite surface. Le coefficient énergétique d'usure est le plus faible des quatre couples de matériaux.

- Le couple WNZVC / bille 100Cr6 se distingue avec une énergie totale dissipée par frottement qui est la plus élevée et un coefficient de frottement élevé (0,6). Des fissures à l'arrière du contact, sur le plan sont générées et la bille se plastifie. Le coefficient énergétique d'usure est également important.
- Le couple WNZVC/ bille en SiC constitue le contact où les deux matériaux en contact sont les plus durs. L'aire de contact est la plus faible. De même, l'énergie dissipée est la plus faible. Les contraintes de compression et de cisaillement diminuent considérablement par rapport aux trois autres couples de matériaux.

## V. Références

1. Messaadi, M., Kermouche, G. & Kapsa, P. Numerical and experimental analysis of dynamic oblique impact: Effect of impact angle. *Wear* 332–333, 1028–1034 (2015).
2. Cobb, F. *Structural Engineer's Pocket Book*, 2nd Edition: British Standards Edition. (Elsevier, 2009).
3. Lamri, S., Langlade, C. & Kermouche, G. Damage phenomena of thin hard coatings submitted to repeated impacts: Influence of the substrate and film properties. *Mater. Sci. Eng. A* 560, 296–305 (2013).
4. Poulachon, G., Moisan, A. & Jawahir, I. S. On modelling the influence of thermo-mechanical behavior in chip formation during hard turning of 100Cr6 bearing steel. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 50, 31–36 (2001).
5. Poulachon, G., Moisan, A. & Jawahir, I. S. Comportement, propriétés et usinabilité des aciers durcis, *Tournage dur de l'acier à roulement 100Cr6*. (2002).
6. Marou Alzouma, O. Durabilité tribologique de matériaux pour insert de dents de tunnelier. n° 2015-42, 2015, (Ecully, Ecole centrale de Lyon, 2015).



# Conclusion et perspectives

Ce mémoire de thèse présente une étude expérimentale couplée à une étude numérique des sollicitations d'impact-glissement sur trois types de carbures de tungstène. Ces matériaux sont impactés avec des billes en acier 100Cr6 ou en SiC sous diverses conditions (énergie d'impact, nombre d'impacts, angle d'impact, nature de l'impacteur et de l'environnement).

Le carbure E6 se caractérise par des faciès d'usure représentatifs de l'usure abrasive et de l'usure adhésive. En effet, de nombreux débris d'usure sont observables sur la trace d'usure dès une énergie totale d'impact de 400 J. A partir de 1 200 J, les traces d'usure évoluent et nous observons des cavités latérales sur le plan et une unique cavité centrale sur la bille. Le carbure WCR1 présente des faciès plus lisses avec de l'abrasion et de l'adhésion. Mais, à 3 000 J, nous constatons des faciès avec des ondulations qui sont encore plus perceptibles à 8 000 J. La fissuration accompagnée de l'abrasion est uniquement observable sur le carbure WNZVC, à des énergies d'impact totales spécifiques. La compétition des mécanismes d'abrasion et de fissuration font que les fissures s'amorcent puis disparaissent par usure. Très peu de débris d'usure sont observables sur le carbure WNZVC. Des ondulations sont visibles à 8 000 J, mais elles sont moins régulières que celles obtenues avec le carbure WCR1. Le carbure E6 présente les volumes usés les plus importants en comparaison avec les carbures WNZVC et WCR1.

Les mécanismes d'usure observés sur les essais conduits avec la bille en SiC montrent des mécanismes d'abrasion et d'adhésion avec des faciès d'usure particuliers sur les trois carbures. De plus, les traces d'usure sur les carbures WCR1 et WNZVC présentent des sillons formés par l'accumulation de débris d'usure et les billes forment des surfaces qui épousent la forme de ces sillons. Les volumes d'usure des trois carbures testés diminuent significativement. Néanmoins, la bille en SiC s'use quatre fois plus que la bille en 100Cr6 avec le carbure WNZVC, et légèrement moins avec le carbure WCR1. Seul le contact carbure E6 / bille en SiC présente une baisse des volumes usés de la bille, en raison de la faible quantité de troisième corps. L'importance des débris d'usure qui forment des sillons sur les carbures WCR1 et WNZVC est mise en relief dans cette étude. Ils vont atténuer l'usure de ces carbures et accélérer celle de la bille.

L'influence de l'angle d'impact a été étudiée en faisant des essais à impact normal et avec un angle d'impact de 60° avec le couple carbure E6 / bille en 100Cr6. Ils permettent de rendre compte de l'importance du glissement sur l'usure. En impact normal, nous observons des traces circulaires avec des débris qui sont retenus à l'interface à 800 J. A partir de 800 J, les traces deviennent lisses avec des débris d'usure qui deviennent mobiles à l'interface. Les volumes d'usure diminuent d'un facteur trois aussi bien sur la bille que sur le plan, par rapport aux essais à 60°. La présence du glissement conduit donc à accentuer l'usure.

## Conclusion et perspectives

La présence d'oxygène dans le contact permet aux débris d'usure de mieux adhérer et d'augmenter l'usure des matériaux en contact. La réalisation d'essais sous argon permet de diminuer l'oxydation des débris d'usure à l'interface. Le carbure E6 présente des faciès avec des ondulations dans le sens du glissement qui s'emboîtent avec celles de la bille. Des fissures apparaissent avec le carbure WNZVC dès 800 J, avec également présence de sillons dans le sens du glissement. Quantitativement, l'usure des carbures E6 et WNZVC, ainsi que l'usure de la bille qui impacte le carbure E6, diminuent. En revanche, la dureté du carbure WNZVC et le manque de débris d'usure à l'interface font que la bille qui impacte le carbure WNZVC s'use deux fois plus que le plan. La Fig.CG.1 rassemble les paramètres expérimentaux étudiés ainsi que les observations faites.

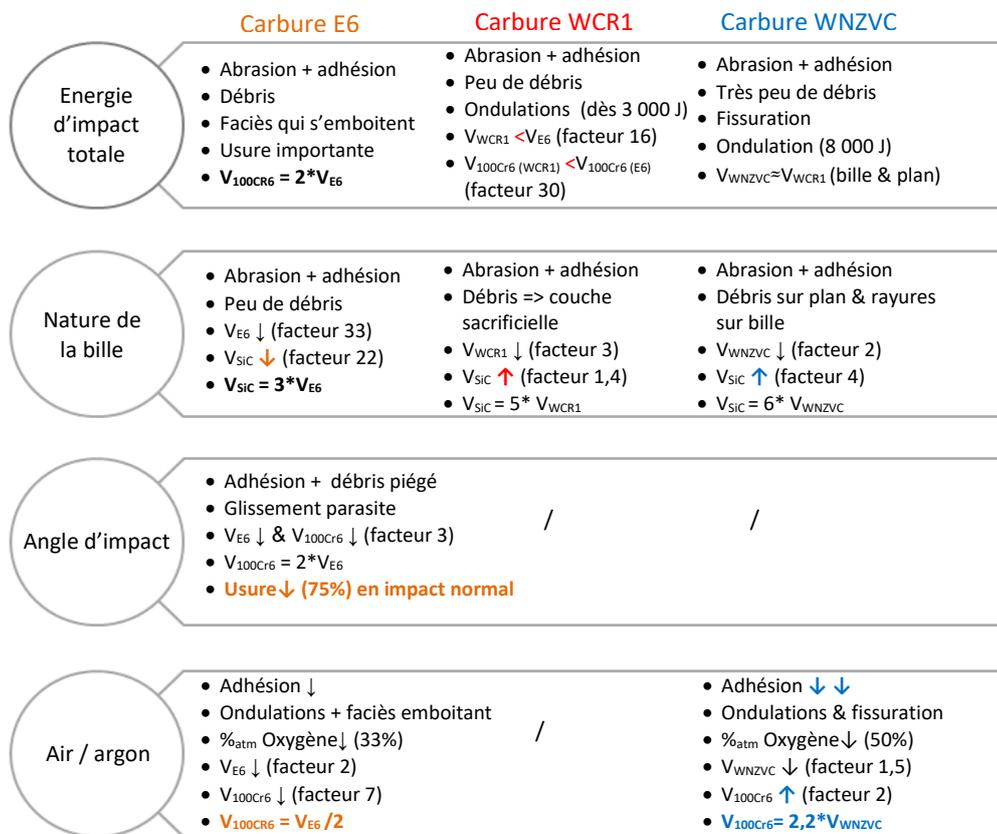


Fig.CG.1. Diagramme de l'effet des paramètres expérimentaux étudiés.

L'analyse numérique par éléments finis sous Abaqus/Explicit, avec un modèle 3D, simule la configuration bille / plan du banc d'essai. Les contacts avec les carbures E6 et WNZVC sont modélisés avec les billes en 100Cr6 et en SiC. Chaque impact génère des rebonds, mais le premier impact se distingue des autres avec une énergie dissipée plus importante. Les coefficients énergétiques d'usure ainsi que les coefficients de frottement présentent une même tendance. Les distances de glissement sont obtenues pour chaque impact et sont comparées aux distances mesurées à partir de l'analyse des traces d'usure de 100 000 cycles d'impact-glissement. Nous obtenons des distances de glissement qui sont sensiblement proches. Cela suggère que la contribution du glissement reste relativement constante au cours

## Conclusion et perspectives

des essais et que la distance de glissement n'évolue pas énormément au cours des 100 000 cycles.

La déformation plastique des billes en 100Cr6 est associée à l'augmentation des coefficients énergétiques d'usure. Par ailleurs, la distribution des contraintes de traction et de compression permettent de mettre en exergue la formation et la propagation des fissures sur le carbure WNZVC.

En conclusion, ce travail nous a permis d'appréhender cette problématique d'usure sous deux angles. La partie expérimentale nous apporte des éléments sur les mécanismes d'usure et les paramètres qui peuvent accélérer ou ralentir l'usure. Concernant la comparaison du comportement des différents carbures, il ressort que les carbures WCR1 et WNZVC présentent une meilleure résistance à l'impact-glissement que le E6, ce qui était déjà le cas lors d'essais d'abrasion pure. Les risques de fissuration pour WNZVC peuvent limiter l'utilisation de ce matériau dans des conditions d'excavation où l'on s'attend à une composante d'impact importante, alors que l'on peut favoriser l'emploi de ce matériau pour des conditions plus sévères d'abrasion. La seconde partie numérique met en exergue des caractéristiques du contact comme la distribution des contraintes et la distance de glissement. Les résultats numériques obtenus permettent de faire une corrélation avec la partie expérimentale (coefficient énergétique d'usure, fissuration, coefficient de frottement...) et ainsi de mieux comprendre les mécanismes d'usure. Les énergies de déformation plastique et les énergies dissipées par frottement sont aussi calculées. Ceci nous permet de conclure sur le bilan suivant :  $E_{\text{initiale}} = E_{\text{déformation plastique}} + E_{\text{rebond}} + E_{\text{dissipée par frottement}}$

En perspectives, nous pourrions compléter l'étude expérimentale en faisant des essais à impact normal avec les carbures WCR1 et WNZVC, ainsi que des essais sous argon avec le carbure WCR1, afin de confirmer les résultats obtenus pour les 3 matériaux étudiés. Du point de vue numérique, des modèles sous Abaqus/Explicit avec des angles variés peuvent être étudiés. De plus, nous obtenons des forces numériques qui sont supérieures aux forces expérimentales (facteur 2). Nous pourrions améliorer le système dynamique du modèle afin de réduire cet écart, en ajoutant un ressort représentatif des lames horizontales situés au-dessus du capteur d'effort. Les lois de comportement pour les carbures de tungstène et pour les billes en SiC pourraient être aussi améliorées afin de considérer leur caractère fragile. Enfin, nous pourrions élaborer un modèle avec une surface usée, afin de mieux étudier la distribution des contraintes au contact au cours de la sollicitation.

## Conclusion et perspectives

# Annexes

---

Annexe 1 : Détermination des coefficients de frottement pour la simulation numérique

Annexe 2 : Détermination de la raideur et de l'amortissement des ressorts

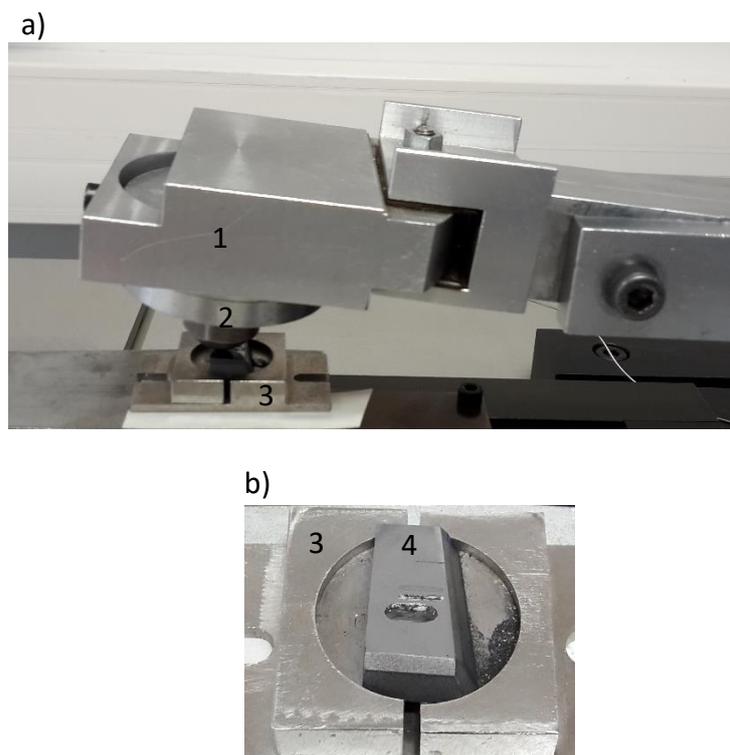
Annexe 3 : Détermination du coefficient de frottement (méthode alternative)

### Annexe 1 : Détermination des coefficients de frottement pour la simulation numérique

Un tribomètre linéaire a été utilisé pour déterminer les coefficients de frottement des quatre couples de matériaux utilisés pour la simulation numérique. Cette valeur est une donnée d'entrée dans le modèle numérique. La bille, appuyée sur le plan avec un effort normal de 100 N, effectue un mouvement alternatif linéaire à une fréquence de 5 Hz et une amplitude de 5 mm. Des essais à sec et à température ambiante ont été effectués avec 5 000 cycles pour chacun des couples de matériaux suivants :

- Plan E6 / bille acier 100Cr6
- Plan E6 / bille SiC
- Plan WNZVC / bille 100Cr6
- Plan WNZVC / bille SiC

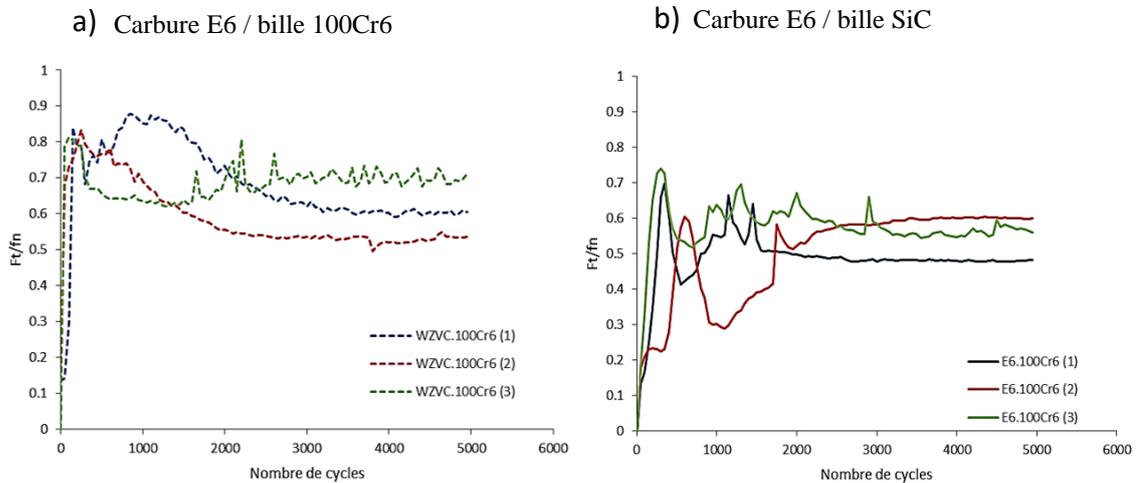
Les échantillons sont parallélépipédiques de longueur 21 mm, de 15 mm de largeur et de 5 mm de hauteur. Les billes sont de 10 mm de diamètre. La Fig.1 présente une partie du banc d'essai.



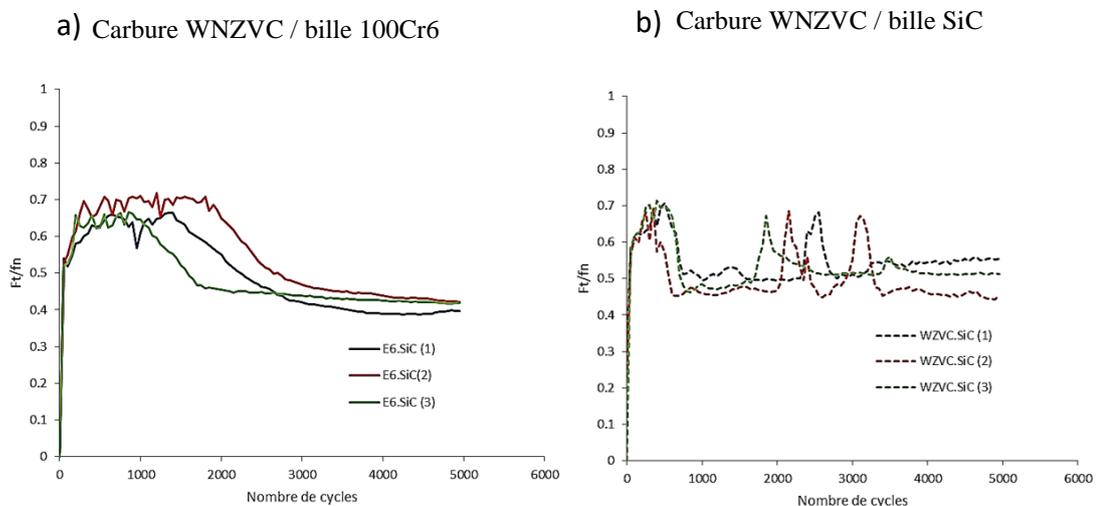
*Fig. 1. Illustration du contact du tribomètre linéaire :  
(a) Contact bille / plan,  
(b) Porte-échantillon avec l'échantillon.  
(1: bras alternatif, 2: porte-bille, 3: porte-échantillon,  
4: échantillon en carbure de tungstène)*

## Annexe 1 : Détermination des coefficients de frottement pour la simulation numérique

Les Fig.2 et 3 présentent les évolutions du coefficient de frottement en fonction du nombre de cycles.



*Fig. 2. Evolution des coefficients de frottement avec le nombre de cycles :  
 (a) couple plan E6 / bille 100Cr6,  
 (b) plan E6 / bille en SiC.  
 (3 essais ont été réalisés pour chaque couple de matériaux).*



*Fig. 3. Evolution des coefficients de frottement avec le nombre de cycles :  
 a) plan WNZVC / bille 100Cr6,  
 b) plan WNZVC / bille SiC.  
 (3 essais ont été réalisés pour chaque couple de matériaux).*

Le tableau 1 regroupe les valeurs des coefficients de frottement moyens, obtenus pour les différents couples entre 2 000 et 5 000 cycles. En prenant ces valeurs on ne considère pas les variations du coefficient de frottement en début de test.

Annexe 1 : Détermination des coefficients de frottement pour la simulation numérique

Tableau. 1. Coefficients de frottement moyens entre 2 000 et 5 000 cycles pour les couples de matériaux.

	<i>Bille 100Cr6</i>	<i>Bille SiC</i>
<i>Plan E6</i>	0,54	0,42
<i>Plan WNZVC</i>	0,60	0,49

Ces valeurs ont été utilisées dans la simulation numérique présentée au chapitre IV.

La Fig 4 présente les observations en microscopie optique des traces d'usure sur les plans et les billes en fin de test.

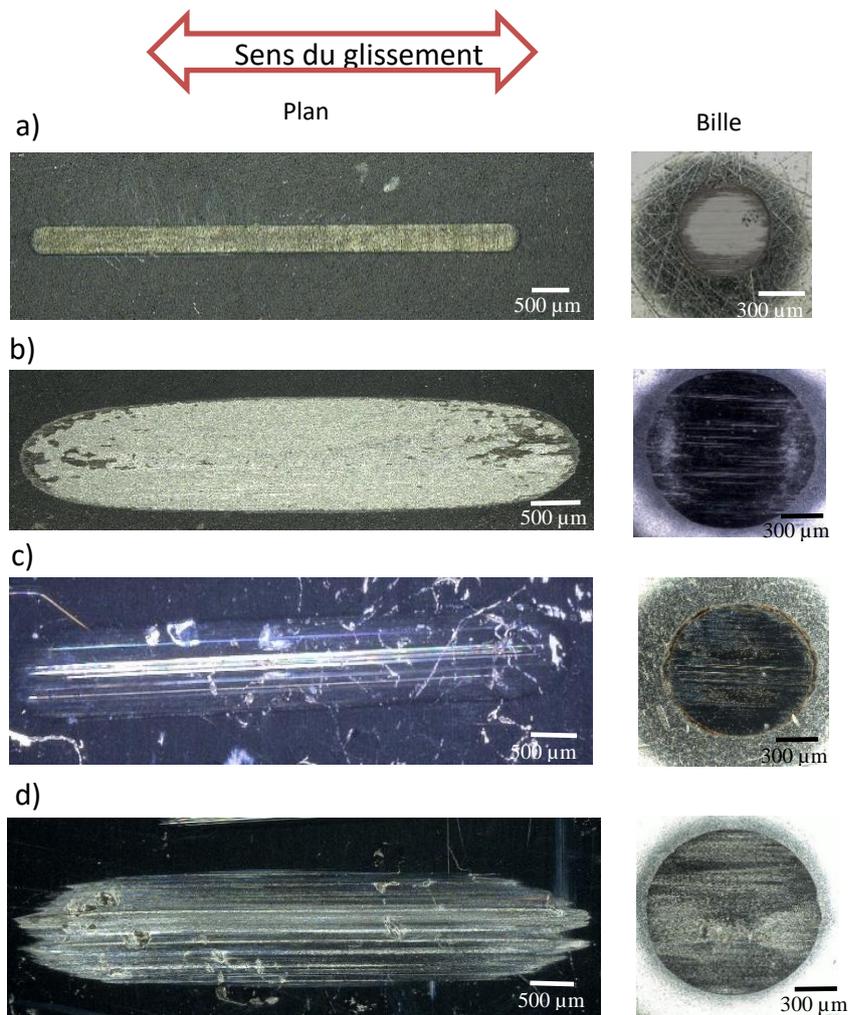


Fig.4. Observation des traces d'usure après essai au microscope optique :  
 (a) plan E6 / bille 100Cr6, (b) plan E6 / bille en SiC, (c) plan WNZVC / bille 100Cr6,  
 (d) plan WNZVC / bille SiC.

## Annexe 1 : Détermination des coefficients de frottement pour la simulation numérique

Lorsque le carbure E6 est en contact avec la bille 100Cr6, les traces d'usure sur le carbure E6 sont les plus fines (400  $\mu\text{m}$  de large). Les traces avec le carbure E6 sont dépourvues de fissure. Des rayures dans le sens du glissement sont visibles.

Les essais avec la bille SiC donnent des traces d'usure 4 fois plus larges, avec des débris accumulés au bord de la trace. Ces débris peuvent accentuer l'usure à l'interface et conduire à augmenter la surface de l'interface de contact. Sur la bille, on observe des zones en bord de traces qui sont plus usées. La trace d'usure n'est pas uniforme. Lors des essais, beaucoup de débris sont accumulés aux extrémités de la trace rectiligne. Par contre le carbure WNZVC au contact de la bille 100Cr6 présente des traces aussi larges que celles avec la bille en SiC.

## Annexe 2 : Détermination de la raideur et de l'amortissement des ressorts

### Calcul de l'amortissement des ressorts

Afin de mettre au point un modèle 3D sous Abaqus/Explicit qui puisse représenter au mieux les conditions expérimentales, il est nécessaire de connaître la rigidité et l'amortissement du banc d'essai. Trois ressorts et amortisseurs sont représentés dans le modèle :

- un ressort/amortisseur vertical du porte-échantillon est modélisé pour représenter la compression des lames flexibles lors de l'impact (RA1);
- un deuxième ressort/amortisseur latéral du porte-échantillon représente le déplacement des lames flexibles vers l'arrière (RA2);
- un troisième ressort/amortisseur latéral du porte-bille permet de représenter la rigidité du bilame qui est relié au porte-bille ; sous l'effet de l'impact, il peut vibrer dans le sens perpendiculaire au déplacement de la bille (RA3).

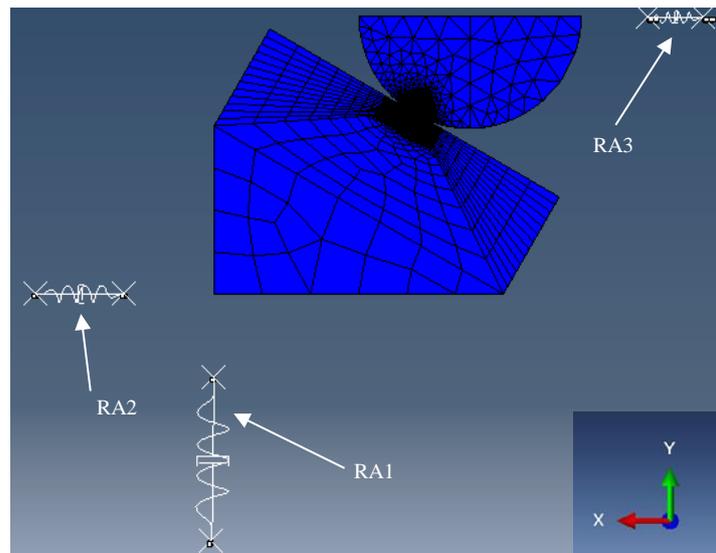


Fig.1. Schéma du modèle 3D du banc d'essai sous Abaqus/Explicit.

### Calcul de la raideur des ressorts

Pour déterminer la raideur des ressorts, un capteur laser de déplacement a été installé sur le banc d'essai d'impact-glisement. Pour chaque ressort, le capteur laser est placé dans la direction de la vibration dans le sens considéré. Après avoir placé le capteur laser, on donne un coup sur le bilame pour qu'il résonne. A ce moment-là, on mesure le déplacement. Ensuite, on ajoute une masse connue et on répète l'opération (on fait résonner le bilame et on mesure le déplacement). Le déplacement provoqué par une masse connue permet de déterminer la raideur du ressort.

## Annexe 2 : Détermination de la raideur et de l'amortissement des ressorts

On considère le bilame relié à la bille ainsi que les lames verticales flexibles comme des systèmes sans frottement. La pulsation propre est déterminée par la formule suivante :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m_0}}$$

avec  $\omega_0$  : la pulsation propre (rad.s<sup>-1</sup>)  
 $k$  : la raideur du ressort (N/m)  
 $m_0$  : la masse dynamique du système (kg)

Pour déterminer  $k$  et  $m_0$ , on ajoute une masse supplémentaire au système,  $m_1$ , la pulsation  $\omega_1$  devient alors :

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k}{m_0 + m_1}}$$

avec  $\omega_1$  : la pulsation avec la masse  $m_1$  (rad.s<sup>-1</sup>)  
 $m_1$  : la masse ajoutée (kg)

Sachant que :

$$\omega_0 = 2\pi f_0 \quad \text{et} \quad \omega_1 = 2\pi f_1$$

avec  $f_0$  : la fréquence propre (Hz)  
 $f_1$  : la fréquence propre avec la masse  $m_1$  (Hz)

On obtient ainsi :

$$k = 4\pi^2 f_0^2 m_0 \quad \text{et} \quad k = 4\pi^2 f_1^2 (m_0 + m_1)$$

On calcule  $f_0$  et  $f_1$  avec la Transformée de Fourier (FFT) sur le signal de déplacement. On obtient alors les valeurs de la raideur et de la masse dynamique du système (Tableau 1).

### Calcul du coefficient d'amortissement

Le coefficient d'amortissement est calculé par la méthode du décrement logarithmique. On détermine la pseudo-période de la courbe de déplacement,  $T_j$ , en prenant deux maxima consécutifs. On en déduit le décrement logarithmique,  $\delta$ . Il correspond à l'amortissement de l'amplitude des oscillations et se définit comme étant le logarithme du rapport des deux maxima successifs de la courbe de déplacement (Fig. 2).

Annexe 2 : Détermination de la raideur et de l'amortissement des ressorts

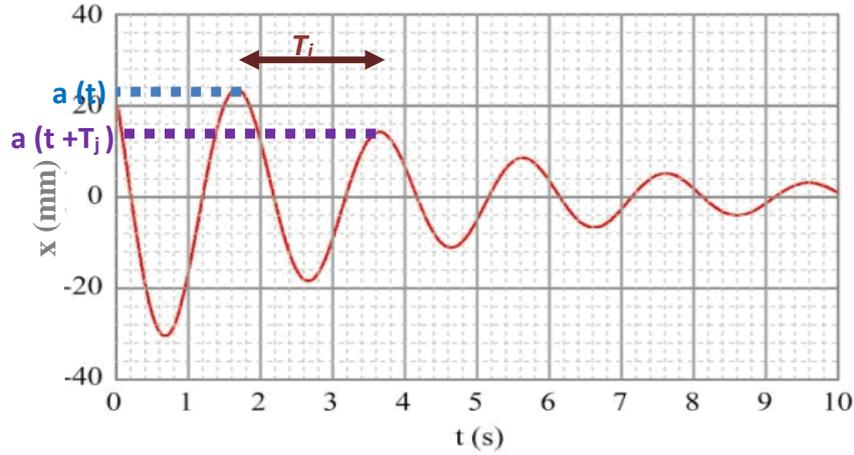


Fig.2. Schéma de la détermination graphique du décrément logarithmique.

Le décrément s'écrit alors :

$$\delta = \ln \frac{a(t)}{a(t + T_j)}$$

- avec  $\delta$  : décrément logarithmique  
 $a(t)$  : amplitude d'un maximum à  $t$  (mm)  
 $a(t+T_j)$  : amplitude d'un maximum à  $t + T_j$  (mm)

On peut ensuite déterminer le taux d'amortissement,  $\zeta$ , à partir du décrément logarithmique avec la relation suivante :

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}}$$

avec  $\zeta$  : taux d'amortissement

Puis, le coefficient d'amortissement  $C$  est calculé avec l'expression suivante:

$$C = 2 \zeta \sqrt{k m_o}$$

- avec  $C$  : coefficient d'amortissement ( $\text{Kg.s}^{-1}$ )  
 $\zeta$  : taux d'amortissement  
 $k$  : la raideur ( $\text{N.m}^{-1}$ )  
 $m_o$  : la masse dynamique du système (Kg)

Les valeurs des raideurs et des amortissements obtenues sont regroupées dans le tableau1 :

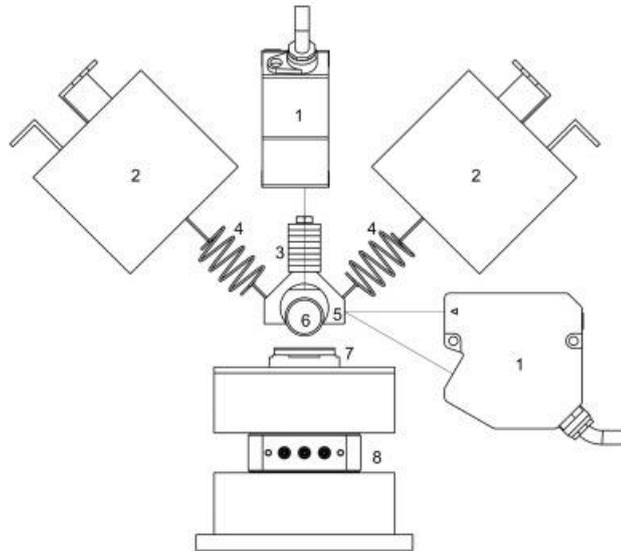
Annexe 2 : Détermination de la raideur et de l'amortissement des ressorts

*Tableau : Paramètres des ressorts déterminés expérimentalement*

	<b>Raideur (N/mm)</b>	<b>Coefficient d'amortissement (Kg.s<sup>-1</sup>)</b>
<b><i>Vibrations verticales du porte- échantillon (RA1)</i></b>	6544	307,6
<b><i>Vibrations latérales du porte- échantillon (RA2)</i></b>	66,66	31,01
<b><i>Vibrations latérales de la bille (RA3)</i></b>	1,343	4,106

### Annexe 3 : Détermination du coefficient de frottement (méthode alternative)

On utilise un banc d'essai d'impact qui permet de travailler à différents angles incidents et permet de connaître à tout instant les forces tangentielles et normales. On peut alors remonter aux valeurs du coefficient de frottement. Ce banc d'essai a été développé dans le cadre de la thèse de Thibaut Souilliat [1, 2]. La Fig.1 présente une illustration schématique du banc d'essai.



*Fig. 1. Représentation schématique du banc d'essai d'impact avec mesure de coefficient de frottement [1] :1: capteurs de déplacement, 2: pots vibrants, 3: masse impactante, 4: ressorts, 5: porte-bille, 6: bille, 7: échantillon en carbure de tungstène, 8: capteur de force triaxial.*

La bille fixée dans un porte-bille est reliée à deux ressorts eux même reliés à deux pots vibrants. La bille effectue un impact avec des angles incidents contrôlables. La fréquence d'acquisition est de 50 kHz, et la fréquence d'impact est de 20 Hz. L'énergie d'impact est de 0,5 mJ et l'angle d'impact suit une variation linéaire de 0° à 90° (un angle d'impact de 90° correspond à impact pur). Nous effectuons des essais à sec et à température ambiante pour les couples de matériaux suivants :

- Plan WNZVC / bille 100Cr6,
- Plan WNZVC / bille SiC.

La Fig.2 présente l'évolution du coefficient de frottement en fonction de l'angle incident pour les deux couples de matériaux.

### Annexe 3 : Détermination du coefficient de frottement (méthode alternative)

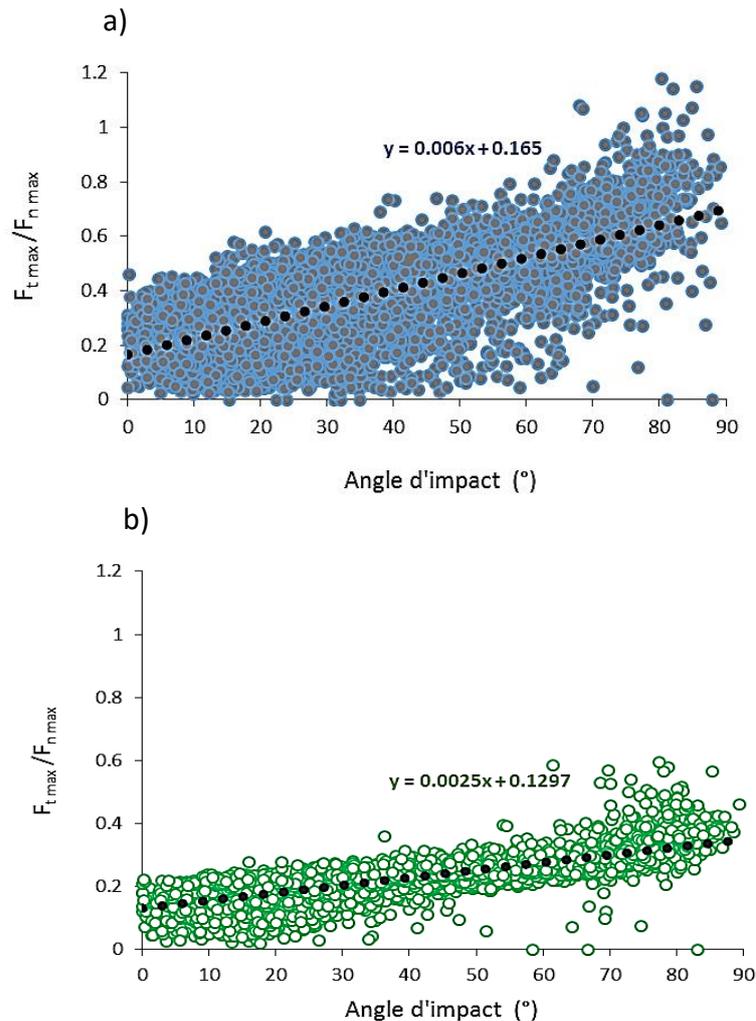


Fig. 2. Evolution du coefficient de frottement avec l'angle d'impact:  
a) plan WNZVC / bille 100Cr6,  
b) plan WNZVC / bille SiC.

Pour un angle d'impact de 60°, on obtient avec la bille 100Cr6 un coefficient de frottement de l'ordre de 0,5, tandis qu'avec la bille en SiC, on obtient un coefficient de frottement plus faible (environ 0,3). Les coefficients de frottement à angle d'impact nul sont très faibles par rapport aux coefficients obtenus avec le tribomètre linéaire (Annexe 1). En effet contrairement au banc d'impact, le tribomètre linéaire ne tient pas compte de la composante d'impact.

Le tableau 1 regroupe les valeurs de coefficient de frottement obtenues pour les deux couples de matériaux considérés dans cette annexe avec le banc d'impact et à l'aide du tribomètre linéaire.

### Annexe 3 : Détermination du coefficient de frottement (méthode alternative)

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des coefficients de frottement.

<i>Couple de matériaux</i>	<i>Plan WNZVC / bille 100Cr6</i>	<i>Plan WNZVC / bille SiC</i>
<i>Coefficient de frottement par la méthode impact à angle d'impact de 60°</i>	0,55	0,31
<i>Coefficient de frottement par la méthode impact à angle d'impact nul</i>	0,17	0,13
<i>Coefficient de frottement sur tribomètre linéaire (annexe 1)</i>	0,60	0,49

Le contact utilisé dans le modèle numérique est un contact frottant, on considère alors les valeurs des coefficients de frottement obtenus avec le tribomètre linéaire (Annexe 1) car elles peuvent mieux représenter ce qui se passe au contact.

#### Références:

1. Souilliant, T., Rigaud, E., Le Bot, A., et Phalippou, C., Energy-based wear law for oblique impacts in dry environment. Tribol. Int 105, 241–249, (2017).
2. Souilliant, T., Rigaud, E., Le Bot, A., et Phalippou, C., An energy approach for impact wear in water environment, Wear 376–377, 738–746 (2017).

### Annexe 3 : Détermination du coefficient de frottement (méthode alternative)

# Liste des figures et des tableaux

## Liste des figures

Fig.IG.1. Diagramme de l'organisation des quatre chapitres. ....	2
Fig. 1.1. Domaines d'application des carbures de tungstène (Roskill 2011)[2]. ....	7
Fig. 1.2. Image présentant un tunnelier créant un tunnel. ....	8
Fig. 1.3. Vue en coupe d'un tunnelier [3]. ....	9
Fig. 1.4. Tête de coupe d'un tunnelier pour des sols tendres [8].....	9
Fig. 1.5. Schéma des forces exercées sur la roue de coupe.....	10
Fig. 1.6. Schéma des forces intervenant sur la tête de coupe (a) et coupe transversale du tunnelier (b) [9]. ....	11
Fig. 1.7. Schéma des différents éléments d'un tunnelier. ....	11
Fig. 1.8. Train suiveur du tunnelier. ....	12
Fig. 1.9. Voussoirs préfabriqués en béton (a) et intérieur du tunnel après revêtement (b). ..	13
Fig. 1.10. Carte géologique représentant une vue globale de la complexité du terrain [10]. .	13
Fig. 1.11. Coupe transversale géologique du sol de la ligne de métro L10 [10] en Barcelone.	14
Fig. 1.12. Surface de coupe et différents outils de coupe. ....	14
Fig. 1.13. Forces qui entrent en jeu dans la fragmentation du sol (a) et processus de fissuration de le sol sous l'action du disque à molette (b) [11]. ....	15
Fig. 1.14. Traces concentriques et circulaires du sol après le contact avec les disques à molette.....	15
Fig. 1.15. Dent de tunnelier avec les inserts (1), le rechargement de protection métallique (2), le corps en acier (3) et la vis de serrage (4) [8]. ....	16
Fig. 1.16. Schéma de la dent de tunnelier en contact avec le sol provoquant des débris. ....	16
Fig. 1.17. Différents mécanismes de l'usure abrasive.....	18
Fig. 1.18. Mécanisme de l'abrasion à deux corps.....	20
Fig. 1.19. Représentation schématique de l'usure à trois corps. ....	20
Fig. 1.20. Sites et modes d'accommodations.....	21
Fig. 1.21. Les différentes cinématiques de contact. ....	23
Fig. 1.22. Evolution de la profondeur d'usure en fonction du nombre de cycles selon Engel.	24
Fig. 1.23. Illustration schématique de la déformation en profondeur suite à des glissements répétés. ....	25
Fig. 1.24. Illustration des cupules observées sur un tube de générateur vapeur [54]. ....	26
Fig. 1.25. Observations microscopiques de sections réalisées au niveau des cicatrices d'usure : (a) formation de la zone lamellaire, (b) fissuration et oxydation, (c) décohésion [55]. ....	27
Fig. 1.26. Profils 2D des traces d'usure et observations microscopiques pour un angle d'impact de 45° [56]. ....	28
Fig. 1.27. Opérateur au niveau de la roue de coupe du tunnelier analysant l'usure des disques [57]. ....	29
Fig.1.28. Tracé de la ténacité en fonction de la dureté Vickers [62]. ....	30

## Liste des figures et des tableaux

Fig.1.29. Microstructure d'un carbure de tungstène contenant 6% de cobalt [63].	30
Fig. 1.30. Processus de fragmentation de la roche lors du contact carbure/roche [2] : (a) dent au contact avec les aspérités du sol, (b) propagation des microfissures, (c) ..fragmentation du sol.	32
Fig. 1.31. Usure abrasive des carbures avec perte de grains et formation de microfissures [8].	33
Fig. 1.32. Représentation schématique des mécanismes d'usure observés [8].	33
Fig. 1.33. Phénomènes de fissuration, de fracture et d'abrasion sévère sur les inserts de forme triangulaires [8].	34
Fig. 1.34. Endommagement d'un dragbit avec des inserts de carbure de tungstène usés [8].	34
Fig. 1.35. Illustration des modes d'endommagement des dents de tunnelier.	35
Fig.2.1. Schéma du banc d'essai avec les états "avant impact" et "impact-glisement".	49
Fig. 2.2. Banc d'essai avec un angle $\alpha$ de 60° : (a) vue générale, (b) image rapprochée de la zone de contact bille / plan.	50
Fig.2.3. Schémas des porte-échantillons : (a) angle d'impact à 60°, (b) angle d'impact à 90°.	50
Fig.2.4. Exemple d'un essai à 4 mJ : (a) évolutions de la force d'impact et du déplacement de la bille, (b) agrandissement du graphe au moment où se produit l'impact, (d) tension appliquée au pot vibrant.	52
Fig.2.6. Schéma du banc d'essai avec le flux d'argon à l'arrière du contact.	53
Fig.2.7. Photographies des échantillons : (a) inserts en carbure de tungstène avant utilisation, (b) échantillons découpés dans les inserts et utilisés pour les essais.	54
Fig.2.8. Observation du carbure E6 par microscopie électronique à balayage [8].	54
Fig.2.9. Observation par microscopie électronique à balayage du WCR1 [8].	55
Fig.2.10. Observation du WNZVC par microscopie électronique à balayage [8].	56
Fig.2.11. Billes utilisées pour les tests d'impact-glisement.	57
Fig. 3.2. Observations microscopiques au MEB des traces d'usure sur les plans en carbure de tungstène et sur les billes.	64
Fig. 3.3. Diamètre des traces d'usure en fonction de l'énergie d'impact totale. (traits interrompus : longueur dans le sens du glissement, trait plein : largeur dans le sens perpendiculaire au glissement).	65
Fig. 3.5. Profondeurs des traces d'usure en fonction de l'énergie d'impact totale (traits interrompus : profondeur de la trace sur la bille, trait plein : profondeur de la trace sur le plan en carbure de tungstène).	66
Fig. 3.6. Observations à l'interféromètre numérique : (a) trace d'usure du carbure E6 à 1200 J, (b) profil longitudinal de la trace d'usure, (c) profil transversal de la trace d'usure.	67
Fig. 3.8. Observations à l'interféromètre numérique : (a) trace d'usure de la bille à 1 200 J après redressement du profil, (b) profil longitudinal de la trace d'usure, (c) profil transversal de la trace d'usure.	68
Fig. 3.9. Observations au MEB de la trace d'usure du carbure E6 à 800 J : (a) trace d'usure du carbure E6, (b) vue en détail à la frontière trace/zone non usée, (c) centre de la trace d'usure.	68

## Liste des figures et des tableaux

Fig. 3.10. Observations au MEB de la trace d'usure du carbure WCR1 à 1000 J. ....	<b>69</b>
Fig. 3.11. Observation au microscope optique des traces d'usure à 1 200 J : (a) carbure WCR1, (b) bille en 100Cr6. ....	<b>69</b>
Fig. 3.12. Observations au MEB de la trace d'usure du carbure WNZVC à 1000 J. ....	<b>70</b>
Fig. 3.13. Observations au MEB de la trace d'usure du carbure E6 essai à 800 J : (a) trace d'usure sur le carbure, (b) analyse EDX effectuée sur les débris de la trace d'usure. ....	<b>71</b>
Fig. 3.14. Observations au MEB de la trace d'usure de la bille à 800 J : (a) trace d'usure sur la bille, (b) analyse EDX effectuée sur les débris de la trace d'usure. ....	<b>71</b>
Fig. 3.15. Observations au MEB-EDX à 1 000 J : (a) trace d'usure sur le carbure WCR1, (b) cartographies des éléments O, W et Fe. ....	<b>72</b>
Fig. 3.16. Observations au MEB de la trace d'usure du carbure WNZVC à 1 000 J. ....	<b>72</b>
Fig. 3.18. Observations au microscope optique d'un essai à 600 J : (a) trace d'usure du carbure WNZVC, (b) trace sur la bille. ....	<b>74</b>
Fig. 3.19. Observations au microscope optique des traces d'usure sur la bille 100Cr6 pour les tests effectués avec du carbure WNZVC. ....	<b>74</b>
Fig. 3.20. Observations au microscope optique de la trace d'usure du carbure WNZVC à 3 000 J. ....	<b>75</b>
Fig. 3.21. Observations au microscope optique pour des essais à 3 000 J : (a) trace d'usure sur la bille avant nettoyage, (b) après passage aux bains ultrasons. ....	<b>75</b>
Fig. 3.22. Représentation graphique des observations sur la fissuration faites sur les traces d'usure du carbure WNZVC. ....	<b>76</b>
Fig. 3.24. Observations en interférométrie et profils d'usure : (a) plan, (b) bille, (c) tracé des profils 2D de la bille et du plan. ....	<b>77</b>
Fig. 3.25. Observations au MEB de la trace d'usure du carbure E6 à 8 000 J : (a). zone centrale rugueuse, (b) zone latérale lisse. ....	<b>78</b>
Fig. 3.26. Observations au MEB : (a) trace d'usure du carbure E6 à 8 000 J, (b) analyse EDX sur une ligne. ....	<b>79</b>
Fig. 3.27. Observations au MEB de la trace d'usure sur le carbure E6 : (a) image MEB de la trace, (b) section de la trace, (c) zone centrale, (d) zone latérale. ....	<b>80</b>
Fig. 3.28. Observations au MEB suite à une coupe transversale du carbure E6 : usure abrasive des grains (a et b) au milieu de la trace d'usure. ....	<b>81</b>
Fig. 3.29. Observations au MEB couplée à l'EDX de la coupe transversale de la trace du carbure E6 à 8 000 J. ....	<b>81</b>
Fig. 3.30. Observations au MEB pour un essai de 8 000 J : (a) trace d'usure du carbure WCR1, (b) trace d'usure de la bille. ....	<b>82</b>
Fig. 3.31. Observations à l'interféromètre numérique : (a) trace d'usure du carbure WCR1 à 8 000 J, (b) différents profils d'usure de la trace d'usure, (c) profil redressé des ondulations d'un profil 2D. ....	<b>83</b>
Fig. 3.32. Observations à l'interféromètre numérique à 8 000 J : (a) trace d'usure de la bille, (b) différents profils d'usure de la trace d'usure de la bille. ....	<b>83</b>

## Liste des figures et des tableaux

Fig. 3.33. Observation à l'interféromètre et au MEB : (a) profil 3D de la trace du carbure WCR1, (b) profil 3D de la trace de la bille, (c) trace d'usure du carbure WCR1, (d) trace d'usure de la bille. ....	<b>84</b>
Fig. 3.34. Observations au MEB de la trace d'usure du carbure WCR1 à 8 000 J (détecteur BSE). ....	<b>85</b>
Fig. 3.35. Observation au MEB : (a) trace d'usure sur le carbure WCR1 à 8 000 J, (b) zones lisses creuses, (c) zones rugueuses profondes. ....	<b>85</b>
Fig. 3.36. Observation au MEB de la trace d'usure sur la bille à 8 000 J : (a) vue générale et détail, (b) zone lisse des ondulations, (c) zone rugueuse des ondulations. ....	<b>86</b>
Fig. 3.37. Représentation schématique des surfaces en contact et de l'interface dans le cas du carbure WCR1 et de la bille. ....	<b>87</b>
Fig. 3.38. Observations au MEB d'un essai à 8000 J : (a) trace d'usure du carbure WNZVC, (b) bille en acier. ....	<b>88</b>
Fig. 3.39. Observation à l'interféromètre numérique : (a) trace d'usure carbure WNZVC, (b) profil longitudinal de la trace du carbure WNZVC, (c) profil transversal de la trace du carbure WNZVC, (d) profil 3D de la trace sur la bille. ....	<b>88</b>
Fig. 3.40. Observations au MEB d'une coupe pour un essai à 8 000 J : (a) trace d'usure du carbure WNZVC, (b) fissure en profondeur. ....	<b>89</b>
Fig. 3.41. Volumes d'usure en fonction de l'énergie d'impact totale : (a) usure des carbures, (b) usure de la bille. ....	<b>90</b>
Fig. 3.42. Volumes d'usure en fonction de l'énergie d'impact totale : (a) usure des carbures, (b) usure de la bille. ....	<b>91</b>
Fig. 3.43. Rapport des volumes d'usure de la bille et du plan en fonction de l'énergie d'impact totale. ....	<b>92</b>
Fig. 3.44. Observations au MEB des traces d'usure du carbure E6 et des billes en SiC pour différentes énergies totales. ....	<b>94</b>
Fig. 3.45. Observations au MEB du haut de la trace d'usure du carbure E6 à 400 J. ....	<b>94</b>
Fig. 3.46. Observations au MEB de la trace d'usure sur le carbure E6 à 3 000 J. ....	<b>95</b>
Fig. 3.47. Observations au MEB de la trace d'usure sur la bille à 3 000 J. ....	<b>95</b>
Fig. 3.49. Observations au MEB avec EDX de la bille SiC à 1 800 J. pour différentes énergies totales. ....	<b>97</b>
Fig. 3.51. Observations au MEB des essais à 400 J : (a) usure du carbure WCR1, (b) bille en SiC. ....	<b>98</b>
Fig. 3.52. Observations au MEB à 3 000 J : (a) trace d'usure du carbure WCR1, (b) trace d'usure sur la bille en SiC. ....	<b>98</b>
Fig. 3.53. Observations au MEB avec EDX des essais à 3 000 J : (a) trace d'usure du carbure WCR1, (b) trace d'usure sur la bille SiC. ....	<b>99</b>
Fig. 3.55. Observations au MEB de la trace d'usure du carbure WNZVC à 400 J. ....	<b>100</b>
Fig. 3.56. Observations au MEB des essais à 1 800 J : (a) trace d'usure du carbure WNZVC avec vue détaillée, (b) trace d'usure de la bille en SiC avec vue détaillée. ....	<b>101</b>
Fig. 3.57. Observations au MEB avec EDX à 3 000 J : (a) trace d'usure du carbure WNZVC, (b) trace d'usure de la bille SiC. ....	<b>102</b>

## Liste des figures et des tableaux

Fig. 3.58. Volumes d'usure en fonction de l'énergie d'impact totale : (a) plans en carbure E6, (b) billes en SiC. ....	<b>103</b>
Fig. 3.59. Volumes d'usure en fonction de l'énergie d'impact totale : (a) plans en carbure WCR1, (b) billes. ....	<b>104</b>
Fig. 3.60. Volumes d'usure en fonction de l'énergie d'impact totale : (a) plans en carbure WNZVC, (b) billes. pour les essais avec les carbures WCR1 et WNZVC. ....	<b>105</b>
Fig. 3.61. Observations au MEB des traces d'usure du carbure E6 et de la bille. ....	<b>107</b>
Fig. 3.62. Observations au MEB de la trace d'usure du carbure E6 à 400 J. ....	<b>107</b>
Fig. 3.63. Observations au MEB de la trace d'usure de la bille 100Cr6 à 400 J. ....	<b>108</b>
Fig. 3.64. Observations au MEB des essais à 800 J : (a) trace d'usure du carbure E6 avec vue détaillée d'une partie de la trace, (b) trace d'usure de la bille, (c) trace d'usure du centre de la bille. ....	<b>108</b>
Fig. 3.65. Observations au MEB des essais à 3 000 J de la trace d'usure du carbure E6. ....	<b>109</b>
Fig. 3.66. Observations au MEB des essais à 3 000 J : (a) trace d'usure de la bille, (b) haut de la bille, (c) centre de la bille. ....	<b>109</b>
Fig. 3.67. Volumes d'usure en fonction de l'énergie d'impact totale : (a) plans en carbure E6, (b) billes en 100Cr6. avec le carbure E6 à 60° et à 90°. ....	<b>110</b>
Fig. 3.68. Observations au MEB des traces d'usure des essais plan E6 / bille acier sous argon. ....	<b>112</b>
Fig. 3.69. Observations au MEB des essais à 800 J : (a) trace d'usure du carbure E6, (b) trace d'usure de la bille. ....	<b>112</b>
Fig. 3.70. Observations au MEB de la trace d'usure du carbure E6 à 1 800 J. ....	<b>113</b>
Fig. 3.71. Observations au MEB de la trace d'usure de la bille à 1 800 J. ....	<b>113</b>
Fig. 3.72. Observations à l'interféromètre numérique des essais à 3 000 J : (a) trace d'usure du carbure E6, (b) profil 2D de la trace du carbure E6. ....	<b>114</b>
Fig. 3.73. Observations au MEB de la trace d'usure du carbure E6 couplée à l'analyse EDX sous argon à 3 000 J. ....	<b>114</b>
Fig. 3.74. Observations au MEB de la trace d'usure du carbure E6 couplées à l'analyse EDX sous air à 3 000 J. ....	<b>115</b>
Fig. 3.75. Observations à l'interféromètre numérique (a) de la trace d'usure de la bille sans redressement et (b) des profils 2D de la trace d'usure à 3 000 J. ....	<b>115</b>
Fig. 3.76. Observations au MEB de la trace d'usure de la bille avec l'analyse EDX à 3 000 J. ....	<b>116</b>
Fig. 3.77. Observations au MEB des traces d'usure des tests plan WNZVC/bille en acier (sous argon). ....	<b>117</b>
Fig. 3.78. Observations au MEB des essais à 3 000 J : (a) trace du carbure WNZVC, (b) haut de la trace, (c) bas de la trace. ....	<b>118</b>
Fig. 3.79. Observations au MEB trace d'usure du carbure WNZVC sous argon à 3 000 J avec l'analyse EDX. ....	<b>118</b>
Fig. 3.80. Observations au MEB trace d'usure du carbure WNZVC sous air à 3 000 J avec l'analyse EDX. ....	<b>119</b>
Fig. 3.81. Observations au MEB de la trace d'usure sur la bille à 3 000 J. ....	<b>120</b>
Fig. 3.82. Volumes d'usure en fonction de l'énergie d'impact totale : (a) plans en carbure E6,	

## Liste des figures et des tableaux

(b) billes en 100Cr6.....	<b>120</b>
Fig. 3.83. Volumes d'usure en fonction de l'énergie d'impact totale : (a) plans en carbure WNZVC, (b) billes en 100Cr6, des carbures WNZVC et E6 sous air et sous argon. ....	<b>121</b>
Fig. 3.84. Représentation schématique de l'occurrence des mécanismes d'usure des carbures en fonction de l'énergie d'impact totale. ....	<b>123</b>
Fig. 3.85. Représentation schématique des mécanismes d'usure des carbures WNZVC et WCR1 impactés avec une bille en SiC : (a) formation des débris d'usure, (b) formation de rangées de débris altérant la surface de la bille.....	<b>126</b>
Fig. 3.86. Représentation schématique des mécanismes d'usure du carbure WCR1 impacté avec une bille en SiC à partir de 1 800 J : (a) fissuration de la bille, (b) formation de la couche sacrificielle sur le plan.....	<b>127</b>
Fig. 4.1. Représentation du modèle bille/plan étudié sous ABAQUS/Explicit avec vue en détail du maillage au niveau de la zone de contact. ....	<b>133</b>
Fig. 4.2. Lois de comportement des matériaux utilisés lors de la simulation.....	<b>134</b>
Fig. 4.3. Représentation des conditions limites appliquées dans le modèle.....	<b>135</b>
Fig. 4.4. Courbes de déplacement de la bille des couples bille/carbure, et courbes de force d'impact, en fonction du temps, pour les différentes configurations simulées.....	<b>136</b>
Fig. 4.5. Comparaison des courbes de forces expérimentales et numériques avec : (a) le carbure E6, (b) le carbure WNZVC. ....	<b>138</b>
Fig. 4.6. Evolution de l'aire de contact en fonction du temps des quatre couples de matériaux étudiés lors d'un impact.....	<b>139</b>
Fig. 4.7. Vue détaillée de l'évolution de l'aire de contact lors des deux premiers impacts. ...	<b>139</b>
Fig.4.8. Déplacements du carbure WNZVC et de la bille en 100Cr6 dans la direction d'impact. ....	<b>140</b>
Fig.4.9. Déplacements horizontal des carbures E6 et WNZVC: (a) carbures E6 et WNZVC, (b) vue détaillée de la zone des deux premiers impacts. ....	<b>140</b>
Fig. 4.10. Déplacements horizontal des billes: (a) billes en 100Cr6 et SiC, (b) vue détaillée de la zone des deux premiers impacts.....	<b>141</b>
Fig.4.11. Histogramme des aires de contact des quatre couples de matériaux étudiés lors du premier impact. ....	<b>142</b>
Fig.4.12. Détermination de la pénétration de la bille dans le plan : (a) représentation des chemins utilisés, (b) déplacements obtenus.....	<b>142</b>
Fig.4.13. Enfoncement de la bille dans le plan pour les quatre couples de matériaux étudiés.....	<b>143</b>
Fig.4.15. Histogramme des distances glissées totales pour les quatre couples de matériaux. ....	<b>144</b>
Fig.4.16. Histogramme des distances glissées expérimentales obtenues par mesure des dimensions des traces d'usure des carbures E6 et WNZVC. ....	<b>145</b>
Fig.4.17. Histogramme du rapport longueur de la trace / distance glissée. ....	<b>145</b>
Fig.4.18. Force de cisaillement pour les quatre couples de matériaux étudiés avec : (a) le carbure E6, (b) le carbure WNZVC. ....	<b>146</b>
Fig.4.19. Energies dissipées pour les quatre couples de matériaux étudiés. ....	<b>147</b>

## Liste des figures et des tableaux

Fig.4.20. Histogramme des énergies dissipées par frottement pour les quatre couples de matériaux étudiés (histogramme) et coefficient énergétiques d'usure (courbe en rouge).	147
Fig.4.21. Energies dissipées totales pour les quatre couples de matériaux étudiés.	148
Fig. 4.22. Répartition des contraintes maximales principales avec les couples : (a) plan E6/bille acier, (b) plan WNZVC/bille acier, (c) plan E6/bille SiC, (d) plan WNZVC/bille SiC.	149
Fig. 4.23. Trace d'usure du carbure WNZVC à 400 J sous argon : (a) observations au microscope numérique de la trace d'usure, (b) vue du dessus de la répartition de contraintes maximales principales.	150
Fig.4.24. Contraintes de cisaillement des couples de matériaux étudiés.	150
Fig.4.25. Représentation du chemin sur la bille utilisé pour la détermination de la déformation plastique.	151
Fig.4.26. Déformation plastique sur le chemin de la bille avec les carbures E6 et WNZVC: (a) bille 100Cr6, (b) bille SiC.	152
Fig.4.27. Observations des traces d'usure de la bille en acier pour : (a) le couple plan E6/bille 100Cr6, (b) plan WNZVC/bille 100Cr6.	152
Fig.4.28. Histogramme des énergies de déformation plastique des couples de matériaux étudiés.	153
Fig.4.29. Histogramme de l'énergie dissipée par frottement avec l'énergie de déformation plastique et des coefficients énergétiques d'usure (courbe en rouge).	153
Fig.CG.1. Diagramme de l'effet des paramètres expérimentaux étudiés.	158

## Liste des tableaux

Tableau.2.1. Dureté et ténacité des matériaux en carbures de tungstène [8]. La dureté est obtenue en utilisant une machine Indectec HV, avec six mesures réalisées pour chaque matériau [8]. La ténacité est déterminée par indentation, à l'aide du logiciel Omnimet Imaging [8], [104].	56
Tableau.2.2. Propriétés mécaniques et rugosité Ra des billes.	57
Tableau. 3.1. Coefficients énergétiques d'usure des plans et des billes.	91
Tableau. 3.2. Coefficients énergétiques d'usure du plan en carbure E6 et des billes en 100Cr6 et en SiC.	103
Tableau. 3.3. Coefficients énergétiques d'usure pour les essais avec les carbures WCR1 et WNZVC.	105
Tableau. 3.4. Coefficients énergétiques d'usure des essais avec le carbure E6 à 60° et à 90°.	110
Tableau. 3.5. Coefficients énergétiques d'usure des essais des carbures WNZVC et E6 sous air et sous argon.	121
Tableau. 3.6. Facteur de fragilité des carbures de tungstène.	124
Tableau. 4.1. Propriétés des matériaux étudiés [6]	134
Tableau. 4.2. Coefficients de frottement des couples de matériaux.	135
Tableau. 4.3. Paramètres des ressorts déterminés expérimentalement.	137

## Liste des figures et des tableaux