

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



UNIVERSITÉ SAAD DAHLEB BLIDA 1

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT MÉCANIQUE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Génie des Matériaux

Thème :

**Etude microstructurale et tribologique après
traitement thermique des composites Inc601/TiC**

Promoteur :

Dr. CHIKER Nabil

Réaliser Par :

-ALIANE NEDJM EDDINE

2024/2025

Dédicace

Au nom d'ALLAH, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux.

Je dédie ce travail, fruit de patience et de persévérance :

À mes très chers parents, ma mère et mon père, pour leur amour inconditionnel, leur soutien moral et matériel, et leurs prières qui m'ont accompagné à chaque étape de mon parcours. Que le Tout-Puissant leur accorde longue vie, santé et bonheur.

À mon frère et ma sœur, pour leur affection et leurs encouragements constants.

*À mon binôme et ami **FAROUK BENZEGHIMI**, pour sa collaboration, son sérieux et les bons moments partagés durant ce travail.*

*À mon promoteur **Dr. CHIKER Nabil**, pour sa disponibilité, ses conseils avisés et son accompagnement sérieux tout au long de ce travail.*

À mes fidèles amis et camarades, pour leur soutien, leur motivation et les bons moments partagés durant ces années d'études.

Enfin, à toute personne qui a contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce mémoire.

ALIANE NEDJM EDDINE

Remerciement

*Louange à **ALLAH**, Seigneur des mondes, de m'avoir accordé la santé et la force pour mener à bien ce travail.*

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mon promoteur **Dr. CHIKER Nabil** pour sa disponibilité, ses conseils avisés et son encadrement tout au long de ce mémoire.*

*Je remercie également l'ensemble des enseignants du **Département de Génie Mécanique** et de la **Faculté de Technologie de l'Université Saad Dahleb Bli-da 1** pour la qualité de l'enseignement dispensé et leur engagement envers la formation des étudiants.*

Une pensée reconnaissante à mes parents et mes proches amis, ainsi qu'à toutes les personnes qui m'ont encouragé et soutenu, de près ou de loin, durant ce parcours.

ALIANE NEDJM EDDINE

Résumé

Les composites à matrice métallique (CMMp) ont connu un développement considérable dans le secteur industriel en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques, aussi bien à température ambiante qu'à haute température. Les composites à base de nickel sont particulièrement utilisés dans les domaines de l'aéronautique, de l'énergie nucléaire et de l'industrie en général.

L'objectif de ce travail est de concevoir des composites à matrice métallique à partir de l'alliage de nickel **Inconel 601**, renforcé par une céramique ternaire **Ti₃SiC₂**, et de soumettre ces composites à un traitement thermique. L'étude porte également sur l'influence du pourcentage de renfort sur la microstructure et les propriétés mécaniques finales, notamment la dureté et le comportement tribologique.

Les résultats de ce travail montrent une amélioration des propriétés mécaniques de nos échantillons après traitement thermique.

Abstract

Metal matrix composites (MMCs) have seen significant advancements in the industrial sector due to their excellent mechanical properties at both ambient and elevated temperatures. Nickel-based composites are widely used in the fields of aerospace, nuclear energy, and various other industries.

The objective of this work is to design metal matrix composites based on **Inconel 601** alloy, reinforced with ternary ceramic (**Ti₃SiC₂**), followed by heat treatment. The study also investigates the effect of the reinforcement percentage on the microstructure and final mechanical properties, particularly hardness and tribological behavior.

The results of this study indicate an enhancement in the mechanical properties of our samples after heat treatment

ملخص

شهدت المواد المركبة ذات المصفوفة المعدنية (CMMp) تطورًا واسعًا في المجال الصناعي، بفضل خصائصها الميكانيكية الممتازة في درجات الحرارة العادية والمرتفعة، وتستخدم المركبات القائمة على النيكل بشكل واسع في مجالات الطيران، الطاقة النووية، وغيرها من القطاعات الصناعية. يهدف هذا العمل إلى تصميم مواد مركبة ذات مصفوفة معدنية اعتمادًا على سبيكة النيكل **Inconel 601**، مع تدعيمها بالسيراميك الثلاثي **Ti₃SiC₂** ثم إخضاعها لمعالجة حرارية. كما يتناول هذا البحث دراسة تأثير نسبة التدعيم على البنية المجهرية والخصائص الميكانيكية النهائية، خاصة الصلادة والسلوك التريبولوجي. تظهر نتائج هذا العمل تحسنًا في الخصائص الميكانيكية للعينات بعد إخضاعها للمعالجة الحرارية.

Table des matières

CHAPITRE I.....	9
I.1. Introduction général	1
I.2. Classification des matériaux composites.....	1
I.3. Propriétés des matériaux composites	2
I.4. Constituants des matériaux composites.....	2
I.4.1. Matrice.....	2
I.4.2. Les Renforts	2
I.5. Elaboration des Composites	3
I.5.1. Fonderie.....	3
I.5.2. Infiltration	4
I.6. Métallurgie des Poudres	5
I.7. Elaboration des Poudres	6
I.7.1. Atomisation.....	6
I.7.2. Electrolyse Les méthodes chimiques	7
I.8. Elaboration des échantillons.....	7
I.8.1. Choix des matériaux	7
I.8.2. Broyage	7
I.8.3. Homogénéisation des poudres.....	8
I.8.4. Mise en forme	8
I.8.5. Frittage.....	8
I.8.5.1. Nature de Frittage.....	9
I.8.6. Finition	10
I.9. Introduction à la Tribologie.....	10
I.9.1. Frottements	11
I.9.2. Types de frottements	11
I.9.3. L'usure.....	11
CHAPITRE II.....	13
II.1. Alliage de nickel	13
II.2. Application	13
II.3. Inconel 601	13
II.4. La décomposition du Ti_3SiC_2	14
II.5. Historique des phases MAX	15
II.6. Microstructure.....	16
II.7. Propriétés Mécaniques	17

II.8. Propriétés thermiques	17
II.9. Résistance à l'Oxydation	17
CHAPITRE III	19
III.1 Objectifs expérimentaux.....	19
III.2 Préparation des échantillons	19
III.3 Elaboration des échantillons.....	19
III.4 Frittage.....	19
III.5 Traitement Thermique	20
III.6 Polissage	21
III.7 Microscopie optique MO	22
III.8 Dureté Vickers	23
III.9 Essais de tribologie	24
III.10 Profilométrie 2D	25
CHAPITRE IV	27
IV.1 Microscope optique MO.....	27
IV.1.2 La dureté de vickers	31
IV.1.3 Essai de tribologie	32
IV.1.4 Coefficient de frottement (μ).....	33
IV.1.5 Résistance à l'usure.....	36
IV.1.6 Trace d'usure.....	38
Conclusion générale.....	43
Conclusion générale.....	43
Références	44

LISTE DES TABLEAUX

Tableau IV.1 : Valeurs de dureté Vickers des échantillons avant traitement thermique.....	30
Tableau IV.1 : Valeurs de dureté Vickers des échantillons après traitement thermique	30
Tableau IV.2 : résultats du taux d'usure des échantillons élaborés après traitement thermique après les différents tests de tribologie	35

LISTE DES FIGURES

Figure1- 1 les constituants de matériaux composites	1
Figure1- 2 Classification des différents types de renforts	3
Figure1- 3 schéma de fabrication des CMMp par infiltration	5
Figure1- 4 technique d'atomisation.....	6
Figure2- 1 Les emplacements des composés des phases MAX.....	16
Figure2- 2 Structure générale d'une céramique polycristalline.....	17
Figure3- 1 Courbe de traitement thermique.....	20
Figure3- 2 L'opération de polissage	21
Figure3- 3 Les solutions diamantées de (0,25, 1 et 3 μm).....	22
Figure3- 4 Microscopie optique	23
Figure3- 5 Duromètre de type INVOATEST Nemesis 9100.....	24
Figure3- 6 tribomètre type ANTON PAAR TRB3 CSM, switzerland équipé d'un profilomètre 2D	25
Figure4- 1 Microscopie optique (avant traitement thermique) de : a) l'Inc601 ; et des composites inc601/Ti3SiC2 : b) (TSC5) c) TSC10 et d) TSC15	27
Figure4- 2 Microscopies optiques de l'inc601 avec différents agrandissements après traitement thermique.....	28
Figure4- 3 Microscopie optique de composite inc601/TiC (TSC 5) avec différents agrandissements après traitement thermique.....	28
Figure4- 4 Microscopie optique de composite inc601/TiC (TSC 10) avec différents agrandissements	

après traitement thermique.....	29
Figure4- 5 Microscopie optique de composite inc601/TiC (TSC 15) avec différents agrandissements après traitement thermique.....	29
Figure4- 6 Dureté Vickers des échantillons élaborés	31
Figure 4- 7 Variation du coefficient de frottement en fonction de la distance de l'Inc601 et des composites TSC5, TSC10 et TSC15, (a,b,c) avant traitement thermique et (d,e,f) après traitement thermique, glissant contre une bille en acier 100Cr6, sous a) 1N, b) 5 N et c) 15 N.....	33
Figure4- 8 Les valeurs μ mesurées à l'état stable obtenues sous différentes charges appliquées pour l'inc601 et les composites élaborés : a) après traitement thermique et b) avant traitement thermique....	34
Figure4- 9 (a), (b) et (c) représentent les profils 2D de toutes les traces d'usure après des tests de tribologie pour les composites inc601 et TSC avant traitement thermique (d) ,(e)et (f) représentent les profils 2D après traitement thermique sous 1N , 5 N et 10 N, respectivement	35
Figure4- 10 Les différentes valeurs du taux d'usure (WR) calculées pour l'inc601 et les composites élaborés sous différentes charges appliquées a) avant traitement thermique et b) après traitement thermique	36
Figure4- 11 (a-d) Microscopies optique des traces d'usure (charge 1N) de l'Inc601 et des composites TSC5, TSC10 et TSC15, respectivement. (e-h) agrandissement de (a-d), respectivement	38
Figure4- 12 (a-d) Microscopies optique des traces d'usure (charge 5N) de l'Inc601 et des composites TSC5, TSC10 et TSC15, respectivement. (e-h) agrandissement de (a-d), respectivement	39
Figure4- 13 (a-d) Microscopies optique des traces d'usure (charge 10N) de l'Inc601 et des composites TSC5, TSC10 et TSC15, respectivement. (e-h) agrandissement de (a-d), respectivement	40

CHAPITRE I

Bibliographie sur

Les Matériaux Composites

Et La Tribologie

I.1. Introduction général :

Un composite est un matériau obtenu par combinaison d'au moins deux matériaux de natures différentes. Cette combinaison complémentaire permet d'élaborer un matériau dont les propriétés recherchées sont nettement supérieures à celles des constituants seuls. D'une manière générale, un composite est constitué d'un ou plusieurs constituants discontinus dispersés dans un milieu continu. Le constituant discontinu est appelé renfort ou matériau de renfort. Il est en général plus rigide et présente des caractéristiques mécaniques plus élevées que celles de la matrice [1].

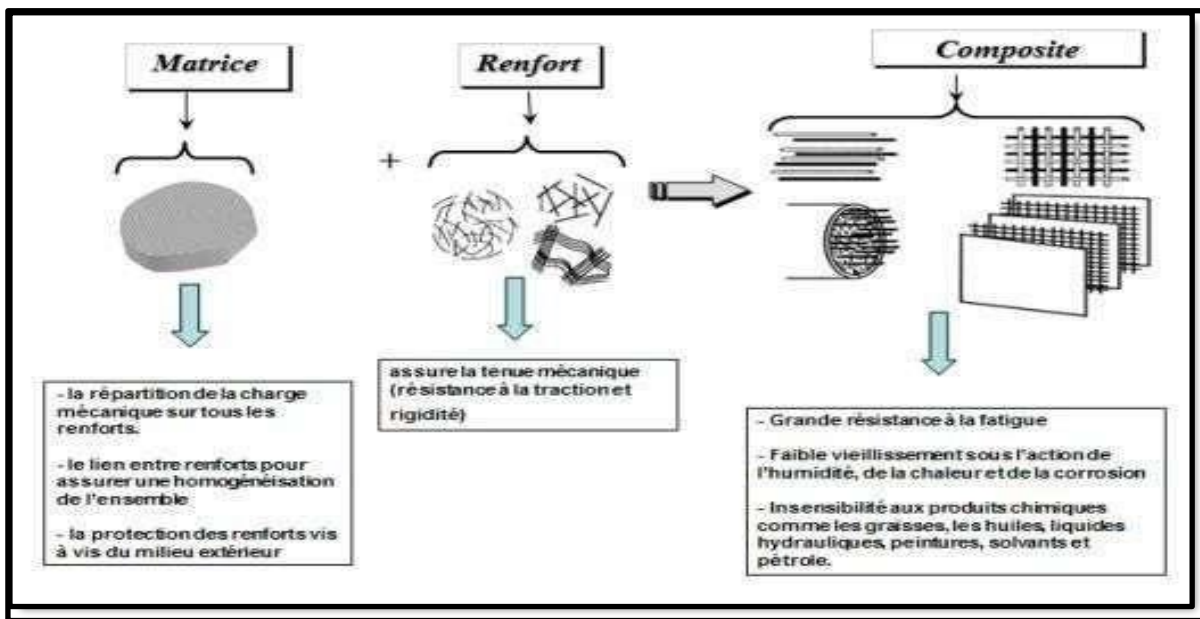


Figure1- 1 les constituants de matériaux composites[2].

I.2. Classification des matériaux composites

Différentes classes de composites émergent :

1. Composites à matrice organique (CMO)
2. Composites à matrice métallique (CMM)
3. Composites à matrice céramique (CMC)

I.3. Propriétés des matériaux composites :

- Légèreté
- Résistance mécanique
- Durée de vie et résistance à la fatigue
- Résistance à la corrosion

I.4. Constituants des matériaux composites :

I.4.1. Matrice :

La matrice joue un rôle très important en permettant d'enclôser le renfort et de répartir le renfort de manière homogène dans l'espace. Du point de vue de la mécanique, la matrice transmet et répartit des efforts extérieurs au renfort. Elle apporte en outre à la structure une résistance chimique et permet de donner une forme préconçue au produit final [3].

I.4.2. Les Renforts :

Les renforts ont un rôle significatif dans les propriétés mécaniques des matériaux composites. Il existe sur le marché un grand nombre de renforts, qui seront choisis en fonction des coûts souhaités et des propriétés mécaniques recherchées pour la structure à être construite. Le renfort introduit dans la matrice en forme de particules ou de fibres doit améliorer les propriétés mécaniques telles que la rigidité, la résistance et la dureté. Il doit aussi améliorer des propriétés thermiques et électriques [4]. Ces renforts sont classés selon leur forme, leur dimension et leur nature chimique.

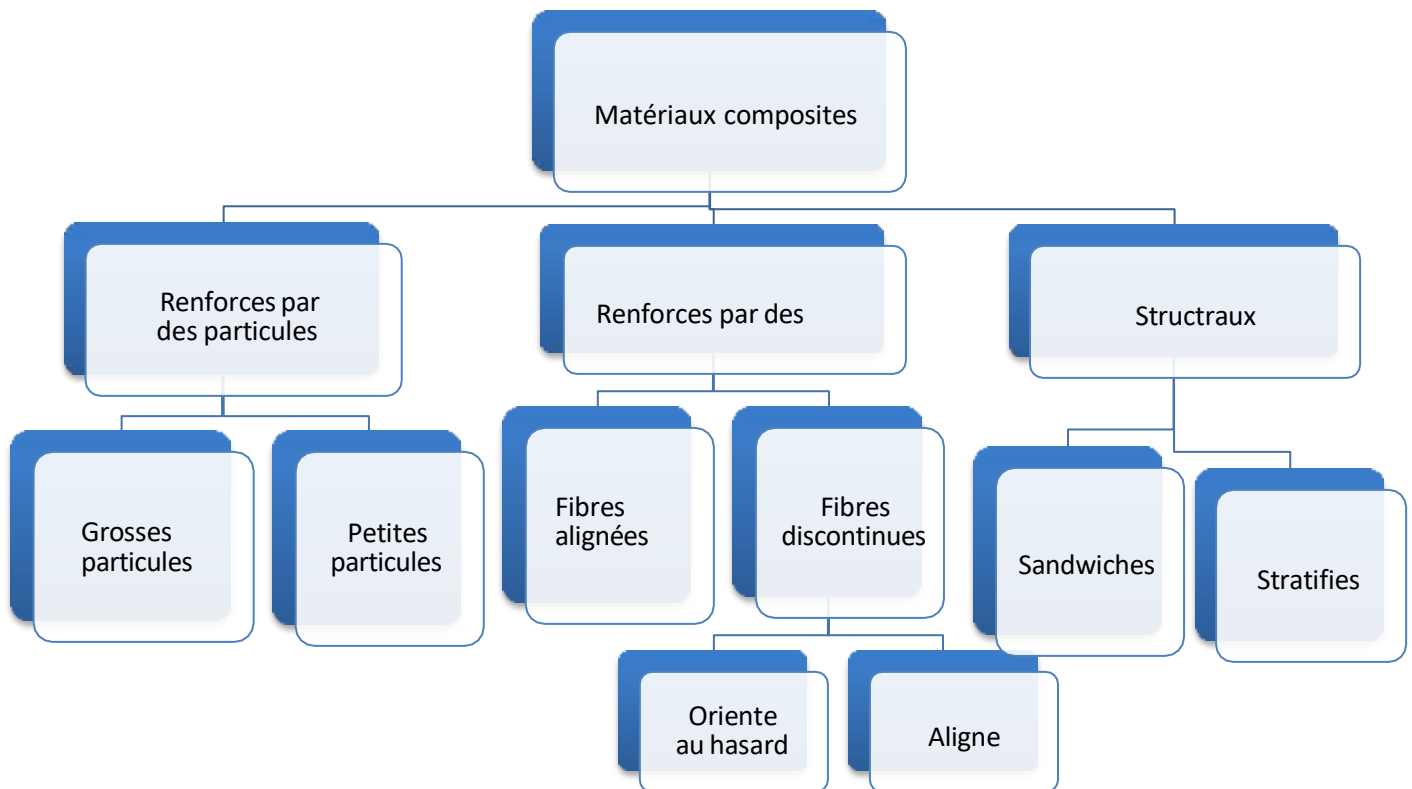


Figure1- 2 Classification des différents types de renforts.

I.5. Elaboration des Composites :

I.5.1. Fonderie :

Le procédé est relativement simple de coulée, ce qui en fait une solution intéressante en termes de productivité. Il permet d'obtenir un composite à matrice métallique (CMM) sous forme d'une pièce moulée, proche de sa géométrie finale. Le principe consiste à introduire des particules dans un alliage à l'état liquide, qui est ensuite coulé en lingots puis refondu pour prendre la forme finale. Cependant, le principe de coulée induit des problèmes pour l'introduction des renforts dans la matrice fondue. Il provoque un risque d'agglomération et de décantation du renfort dans la matrice. Ces phénomènes complexifient encore l'homogénéité du renfort dans la matrice et sont nécessaires pour obtenir une bonne répartition des renforts dans la matrice et faciliter leur introduction dans le métal liquide [5, 6]. L'agitation de la matière lors du malaxage sous courant d'air (vide ou gaz neutre) est bénéfique pour l'homogénéisation des renforts dans le métal liquide. Plusieurs techniques d'agitation, mécanique (mise au point par Alcan) électromagnétique (four à induction) électromagnétique avec ondes ultrasonores.

I.5.2. Infiltration

La fabrication de composites à matrice métallique particulaire (CMMp) s'appuie sur un procédé en deux phases bien définies. Initialement, une préforme particulaire est façonnée via un pressage à froid et on décide ensuite si elle doit subir un frittage. La phase suivante consiste à faire fondre l'infiltrant, qui se répand dans les espaces vides formés par les particules solides de la préforme [7].

Il est possible d'effectuer l'infiltration de deux manières : sous pression ou sous vide. Lorsqu'elle est réalisée sous pression, le métal liquide est forcé à entrer dans la préforme grâce à une pression appliquée, ce qui est facilité par l'utilisation de gaz ou d'un équipement mécanique, influençant ainsi la densité finale du composite. À l'inverse, l'infiltration spontanée sous vide s'appuie sur la gravité et les forces capillaires pour permettre au liquide de s'insérer entre les particules. Cette méthode dépend de nombreux facteurs comme la morphologie des pores de la préforme, la viscosité du métal, la tension de surface entre le liquide et les particules, ainsi que la taille des particules et la pression exercée.

Le développement de ces matériaux composites est motivé par le désir de répondre à des besoins spécifiques dans différentes applications. Par exemple, la fabrication de CMMp composés de carbure de tungstène et d'acier est entreprise par le broyage combiné de poudres de fer-carbone et de WC. Cette poudre est ensuite comprimée à froid et est infiltrée avec du cuivre liquide, qui possède le point de fusion le plus bas parmi les éléments en jeu [8].

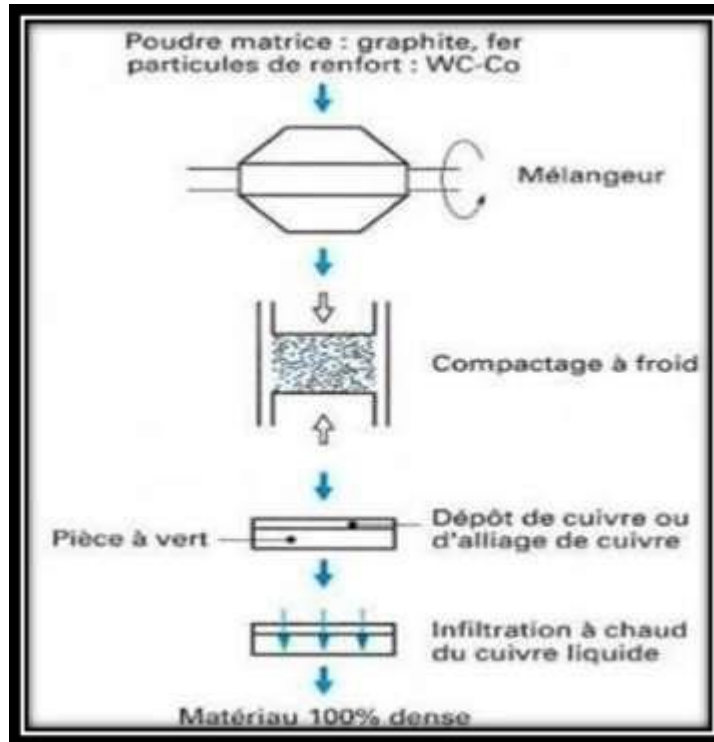


Figure1- 3 schéma de fabrication des CMMp par infiltration [9]

I.6. Métallurgie des Poudres

L'industrie de la métallurgie des poudres (PM) consiste à fabriquer, traiter et consolider de petites particules métalliques afin de générer un métal aux propriétés généralement excellentes en raison de sa microstructure fine et similaire. En réalité, les pellets sont plus anciens que la métallurgie des lingots (IM) car les humains ne peuvent pas atteindre des températures qui permettent de faire fondre les métaux [9]. Cette méthode illustre l'utilisation des premiers êtres humains du pressage et du frittage. Au fil des siècles, les avancées technologiques des fours ont maintenu les PM à l'écart. Jusqu'aux années 1800, le platine et le tungstène ne pouvaient être produits qu'à partir de PM en raison de leurs élevés points de fusion. Aujourd'hui, des matériaux tels que le carbure cémenté et le fil de tungstène sont entièrement produits par PM.

La métallurgie des poudres peut être caractérisée par trois mots clés : poudres, pression et température. Les différentes étapes de fabrication reposent sur ces principes et permettent d'obtenir des pièces poreuses ou non, de formes, de

dimensions et de masses variées. Les techniques utilisées successivement lors de l'élaboration d'un composant peuvent être résumées comme suit :

1. Elaboration de la poudre
2. Densification et mise en forme
3. Frittage
4. Finition

I.7. Elaboration des Poudres :

I.7.1. Atomisation :

L'atomisation consiste à désintégrer un matériau métallique liquide en petites gouttelettes généralement sphériques à l'aide d'un jet d'eau ou de gaz. Cette technique permet d'obtenir des poudres à partir de divers matériaux métalliques. Les poudres de cuivre, de fer, d'aluminium et surtout d'alliages tels que les laitons, les bronzes et les aciers sont les plus courantes. L'atomisation est généralement réalisée avec de l'air, de l'azote, de l'argon ou de la vapeur d'eau sous des pressions allant de 4 à 50 bars.

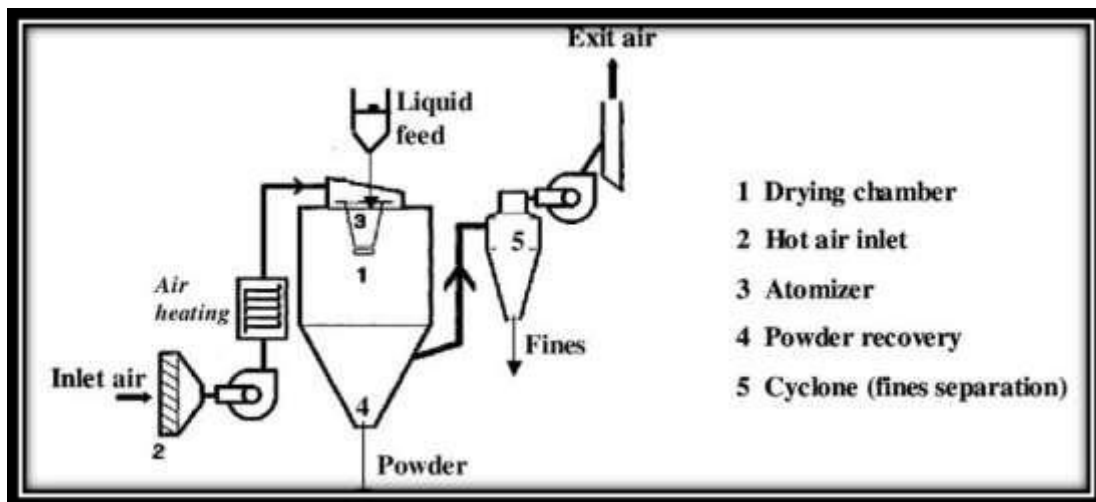


Figure1- 4 : technique d'atomisation

I.7.2. Electrolyse Les méthodes chimiques :

L'électrolyse, méthode chimique, permet de convertir l'énergie électrique en énergie chimique. Elle est utilisée pour activer des réactions chimiques non spontanées en imposant une tension électrique entre deux électrodes plongeant dans une solution électrolytique¹. Voici quelques points clés sur l'électrolyse :

Fonctionnement de l'électrolyse :

- L'électrolyse se base sur des réactions d'oxydoréduction.
- Elle met en jeu des échanges d'électrons entre une anode (où l'oxydation se produit) et une cathode (où la réduction se produit).
- Un oxydant est capable de capter un ou plusieurs électrons, tandis qu'un réducteur peut donner un ou plusieurs électrons.

1. Applications industrielles :

- L'électrolyse permet de produire des espèces chimiques telles que l'hydrogène, le dichlore et la soude.
- Elle est utilisée pour traiter des métaux comme le cuivre et le fer, ainsi que pour fabriquer des accumulateurs.
- Ces procédés industriels respectent les principes de la chimie verte¹.
- Concernant l'élaboration des composites, voici quelques étapes importantes

I.8. Elaboration des échantillons :

I.8.1. Choix des matériaux :

- La composition des matériaux (poudres constituantes) est sélectionnée en fonction des propriétés recherchées, telles que la résistance à l'usure et la trempabilité.
- L'amélioration de la densité relative et la répartition homogène des éléments d'addition sont également prises en compte.

I.8.2. Broyage :

Le broyage est une opération mécanique consistant à fragmenter des matériaux solides en particules de dimensions réduites, généralement dans le but d'augmenter leur surface spécifique, d'améliorer leur homogénéité ou de faciliter leur réactivité. Ce processus implique l'application de contraintes mécaniques au moyen de broyeurs (à billes, à mâchoires, à boulets, etc.). En science des matériaux et en métallurgie des poudres, le broyage est souvent utilisé pour obtenir des poudres fines, homogènes ou nanostructurées.

I.8.3. Homogénéisation des poudres :

- Avant la mise en forme, la poudre est soigneusement sélectionnée pour obtenir un produit économique avec les propriétés souhaitées. [13]
- Des facteurs tels que la forme des particules, la taille, la masse de fluage, la compressibilité et la capacité de frittage sont pris en compte.
- Le mélange peut être réalisé à sec avec des billes d'acier et du tabulât, ou en présence de liquides (hydrocarbures, solvants chlorés, acétone) pour protéger le produit de l'oxydation de l'air et faciliter le mélange. [14].

I.8.4. Mise en forme

La mise en forme de la pièce dépend de ses dimensions et de sa complexité. Elle est généralement réalisée par des techniques telles que la pression uniaxiale. La pièce ainsi obtenue, appelée « pièce crue », est ensuite consolidée et densifiée par un traitement thermique de frittage, permettant d'atteindre une densité comprise entre 90 % et 100 %.

I.8.5. Frittage :

Le frittage est une technique de traitement utilisée pour produire des matériaux et des composants en métal ou en poudres céramiques, en contrôlant leur densité par l'application d'énergie thermique. Cette méthode est classée dans la catégorie de la synthèse et du traitement des matériaux. Au fil des années, le frittage est devenu crucial pour le développement de nouveaux matériaux, et il joue un rôle essentiel dans le domaine du traitement des matériaux.

L'histoire du frittage remonte à l'époque préhistorique, lorsque la cuisson de la poterie était déjà une forme primitive de frittage. Plus tard, la production d'outils à partir d'éponge de fer a également été rendue possible grâce à cette technique. Cependant, ce n'est qu'à partir des années 1940 que le frittage a été étudié de manière fondamentale et scientifique. Depuis lors, des avancées remarquables ont été réalisées dans la science du frittage.

Dans l'ère moderne, l'une des utilisations les plus importantes et bénéfiques du frittage est la fabrication de pièces frittées de toutes sortes, notamment les pièces métallurgiques en poudre et les composants céramiques en vrac. [15]

Les différentes méthodes de frittage sont classées en trois familles :

1. Frittage sans charge :

- Ce procédé économique consiste simplement à chauffer la pièce à la température de frittage.
- Les pièces obtenues présentent une porosité résiduelle importante.

2. Frittage sous charge :

- En plus du cycle thermique, une pression extérieure est appliquée au matériau.
- Dans ce cas, les grains sont sollicités mécaniquement, et des phénomènes de diffusion ou de déformation plastique accélèrent considérablement le taux de densification. [16].
- Il existe deux grands modes de compression pour le frittage sous charge :
- La compression unie axiale à chaud (ou *hot pressing*, abrégé HP).
- La compression isostatique à chaud (abrégée HIP).
- spark Plasma Sintering : le procédé “Spark Plasma Sintering” (SPS; figure utilisé conjointement le principe du hot pressing (HP) et du frottage résistif. Dans ce procédé, le chauffage n’est pas extérieur comme dans le hot pressing, mais est généré par effet joule sur l’ensemble moule pistons échantillon.

I.8.5.1. Nature de Frittage :

Pendant le processus de frittage, les particules de poudre sont mises en contact et soumises à un traitement thermique. Deux principaux mécanismes de frittage sont à distinguer : le frittage en phase solide et le frittage en phase liquide.

1. Frittage en phase solide :

- Ce type de frittage est utilisé pour les matériaux ayant un point de fusion élevé. Il se déroule à une température inférieure à celle de fusion du constituant le moins fusible. Un certain temps de maintien isotherme à cette température est appliqué [17].
- La densification se produit principalement par un transport de matière par diffusion.

2. Frittage en phase liquide :

- Dans ce cas, un composant liquide partiellement fondu est ajouté.
- À la température de frittage, les particules solides sont en présence d'une phase liquide qui les infiltre et les mouille. [18]
- Une proportion de 1% en volume de liquide est suffisante pour mouiller des grains de 1 μm .
- L'avantage du frittage en phase liquide réside dans la diminution de la température de frittage et la facilité d'obtention de densités élevées.

I.8.6. Finition :

Après le frittage, plusieurs procédés de finition sont utilisés :

- **Usinage**
- **Polissage**
- **Inspections et tests**

I.9. Introduction à la Tribologie :

Le terme **tribologie** a été forgé en Angleterre et a été utilisé pour la première fois le 23 novembre 1965 par le Ministre d'État de l'éducation et des sciences, avant d'être publié en février 1966 [19]. Ce mot provient du grec *tribein* (frotter) et *logos* (parole, étude ou science). Ainsi, la tribologie englobe l'étude du frottement, de la lubrification et de l'usure des éléments de machines. Depuis la préhistoire jusqu'à nos jours, l'homme a constamment cherché à réduire les frottements et à prévenir l'usure. Le bitume était déjà utilisé dans l'Antiquité pour réduire les frottements dans les essieux des roues de potiers. Les premiers paliers fabriqués par l'homme étaient les crapaudines de portes, constituées d'un axe en bois tournant à l'intérieur d'un creux pratiqué dans du bois ou de la pierre. Des lubrifiants ont été employés pour faciliter le transport de charges lourdes. Plusieurs bas-reliefs témoignent de cette méthode de transport, dont le plus ancien provient de la tombe de Saqqarah et date de 2400 ans avant J.C. Il illustre le déplacement de la statue de Ti. Le mécanicien Léonard de Vinci est également célèbre pour ses sculptures et ses dessins. Son travail sur le frottement et les machines a été utilisé pendant plus de deux siècles après sa mort [20].

I.9.1. Frottements :

Le frottement peut être défini comme la résistance tangentielle à une interface commune entre deux corps lorsqu'un corps se déplace ou tente de se déplacer par rapport à la surface d'un autre corps sous l'action d'une force extérieure [21].

Le frottement est également défini comme la résistance au mouvement qui existe lorsqu'un solide se déplace contre la surface d'un autre corps en contact, ou lorsqu'un corps tente de déplacer un autre corps. [22].

Cette norme ne définit pas le frottement, mais comme la résistance tangentielle à l'interface entre deux corps lorsqu'un corps se déplace ou tend à se déplacer par rapport à l'autre sous l'action d'une force extérieure définit le frottement [23].

I.9.2. Types de frottements :

1. **Frottement sec** : Lorsque deux solides sont en contact et soumis à des forces qui tendent à provoquer un glissement relatif, le frottement sec se produit. Il s'agit de l'ensemble des phénomènes qui se produisent à l'interface de contact entre les deux corps en l'absence de lubrification.
2. **Frottement mixte** : Le frottement mixte se situe entre le frottement sec et le frottement hydrodynamique. Dans ce cas, un film de liquide, soit absorbé en surface, soit formé par réaction chimique, est présent, mais sa couche est mince.
3. **Frottement fluide** : Lorsque les surfaces en mouvement relatif ne sont pas en contact direct à cause de leurs aspérités, elles sont séparées par un épais film de lubrifiant [24].

I.9.3. L'usure :

L'usure est un phénomène complexe qui entraîne la dégradation des surfaces, accompagnée de pertes de masse, de modifications de forme et de transformations physiques et chimiques. Elle résulte de divers mécanismes, qu'ils soient physiques, chimiques ou mécaniques, et il est difficile de la décrire de manière quantitative. Les approches théoriques visant à mieux comprendre ces processus simplifient souvent les interactions en jeu [25]. Les études sur l'usure prennent en compte de nombreux facteurs, notamment le mode de contact, l'état de surface, la vitesse et la charge. [26]

En ce qui concerne les types d'usure, nous pouvons les regrouper en grandes catégories, chacune caractérisée par un mécanisme spécifique .

I.9.3.1. Mécanisme d'usure :

Usure abrasive :

Elle se manifeste par la présence d'une surface rugueuse au niveau du contact ou par la pénétration dans des matériaux plus tendres. Des particules dures issues des débris d'usure ou de la contamination environnementale contribuent à ce phénomène [27].

Usure adhésive :

Elle se produit lorsque des matériaux se déplacent d'une pièce à l'autre. Ce phénomène est souvent lié à la formation de liaisons entre les surfaces lors du frottement [28].

Usure par fatigue :

Ce type d'usure est associé aux effets du mouvement périodique. Le matériau doit absorber l'énergie de déformation et les contraintes thermiques générées par le frottement [29].

Usure érosive :

Usure érosive est un type d'usure où la détérioration du matériau survient à cause de l'interaction de particules solides ou liquides externes avec sa surface [30].

CHAPITRE II

GÉNÉRALITÉ SUR LES ALLIGES DE NICKEL ET LES PHASES MAX

II.1. Alliage de nickel

Les superalliages sont des matériaux à base de nickel, de fer-nickel et de cobalt, couramment utilisés à des températures supérieures à environ 540 °C (1000 °F). Leur structure cristalline est cubique centrée face (fcc), ce qui signifie qu'elle est austénitique. Le fer, le cobalt et le nickel sont des métaux de transition qui occupent des positions consécutives dans le tableau périodique des éléments.

Les superalliages à base de fer et de nickel sont une extension de la technologie des aciers inoxydables et sont généralement fabriqués par forgeage. En revanche, les superalliages à base de cobalt et de nickel peuvent être forgés ou moulés, selon l'application et la composition spécifiques. Le tableau II.1 présente une sélection des nombreux alliages de nickel disponibles. Leurs propriétés peuvent être ajustées en modifiant leur composition et en appliquant des traitements thermiques. Ces alliages offrent d'excellentes résistances à haute température dans les produits finis [31].

II.2. Application

Les superalliages sont utilisés dans diverses formes telles que coulées, laminées, extrudées, forgées et en poudre. Ils prennent la forme de plaques, tiges, tubes, arbres, huiles d'aviation, disques et récipients sous pression (caisses). Ces matériaux sont largement employés dans des domaines variés, notamment l'aéronautique, les turbines à gaz industrielles et minières, les réacteurs nucléaires, les revêtements d'aéronefs, les structures d'engins spatiaux, la production pétrochimique, les restaurations orthopédiques et dentaires, ainsi que les applications de protection de l'environnement. Bien que conçus pour des conditions de haute température, certains superalliages peuvent également être utilisés à basse température, tandis que d'autres sont adaptés à des températures corporelles

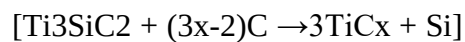
II.3. Inconel 601

L'alliage Inconel 601 (UNS N06601/W.Nr. 2.4851) est un matériau technique polyvalent, idéal pour les applications nécessitant une résistance à la chaleur et à la corrosion. L'une de ses caractéristiques notables est sa résistance à l'oxydation à haute température. Il offre également une bonne résistance à la corrosion aqueuse, une résistance mécanique élevée

et une facilité de formage, d'usinage et de soudage. La composition chimique de l'alliage Inconel 601 est répertoriée, et elle présente une structure cubique centrée sur la face avec une stabilité métallurgique élevée. La base en nickel, associée à une teneur significative en chrome, confère à cet alliage une résistance à de nombreux milieux corrosifs et aux hautes températures. De plus, la présence d'aluminium renforce sa résistance à l'oxydation [32].

II.4. La décomposition du Ti_3SiC_2

Les premiers à rapporter la décomposition du Ti_3SiC_2 en TiC_x et en Si gazeux ont été Racault et ses collègues. Ils ont constaté que la présence de carbone accélérerait cette réaction. Là il y a une décomposition à 1450 °C dans les creusets en alumine, tandis que dans le graphite, elle se produit à 1300 °C. Selon Radhakrishnan et ses collègues, cela a été confirmé. [34] Il n'y a pas eu de trace de décomposition, même si le même traitement jusqu'à 1800 °C dans un four à éléments chauffants en tungstène peut entraîner cela. Selon ElRaghy et ses collègues [35], ces résultats ont principalement été confirmés et ils ont suggéré un processus de carburation ainsi que suit :



où ($x > 0,8$).

Selon les recherches de Gao [33], il a été observé que le Ti_3SiC_2 se décompose en Si et TiC dans la majorité des atmosphères de four à des températures supérieures à 1350 °C. Il était crucial de maintenir une pression partielle de Si dans l'atmosphère du four afin de préserver la stabilité de Ti_3SiC_2 . La décomposition de Ti_3SiC_2 en TiSi_2 à des températures élevées a été observée par les mêmes auteurs [25] lors du frittage par plasma étincelant (SPS) de poudres Ti/Si/TiC.

N. Chiker a également étudié la microstructure et le comportement tribologique d'un composite Ni/ Ti_3SiC_2 . Leurs résultats ont montré que la phase Ti_3SiC_2 se décomposait totalement en TiC, tandis que le Si diffusait dans la maille de Ni, formant une solution solide Ni(Si,Ti) et l'intermétallique $\text{Ni}_3(\text{Si,Ti})$. La **dureté des composites NTSC** a augmenté de manière linéaire en fonction de la teneur en **Ti_3SiC_2** jusqu'à 20 % en poids, ce qui représente une amélioration de **250 %**. Cette amélioration est attribuée à la formation de la phase dure **TiC**. De plus, tous les composites **TiC-Ni (Si, Ti)** ont montré une **meilleure résistance à**

l'usure que le nickel pur. L'ajout de particules de **Ti₃SiC₂** a également eu un effet bénéfique sur les performances tribologiques de ces composites par rapport à l'acier (100Cr6). Les surfaces usées des composites élaborés sous différentes charges présentent la présence de tribofilms lubriques Fe₃O₄-Fe₂O₃.

II.5. Historique des phases MAX :

Des carbures ternaires stratifiés ont été mis au jour dans les années 1960 avec la stœchiométrie M₂AC. Dans ce cas, M est un métal de transition tandis que A est un super métal. On les désigne sous le nom de phases H et elles présentent une structure cristalline de type Cr₂AlC et un réseau hexagonal organisé et dense. Par la suite, après avoir synthétisé et caractérisé le Ti₄AlN₃, ainsi que la présence de plusieurs phases 312, ce groupe a été élargi et désigné sous le nom de phase M_{n+1}AX_n (MAX). Là où M est le métal de transition initial et A est Ath (surtout Ath). Tableau périodique, groupes 13-16), X peut être C ou N, tandis que n est un nombre entier, habituellement 1, 2 ou 3.

Les phases correspondantes sont couramment désignées sous le nom de phases MAX des types 211, 312 et 413.

À la fin des années 1990, on a créé le mot « phase MAX » pour désigner une famille de plus de 60 carbures et nitrures ternaires, qui sont désignés ainsi en raison de leur formule chimique: M_{n+1}AX_n, où M est un métal de transition (Titane, Chrome, Zircône...), A des éléments du groupe A (Silicium, Aluminium, Etain...), et X est un azote ou un carbone. L'indice n est compris entre 1 et 3, et les structures correspondantes M₂AX, M₃AX₂ et M₄AX₃ sont respectivement connues sous les noms 211, 312 et 413 [33].



Figure2- 1 Les emplacements des composés des phases MAX

II.6. Microstructure :

La figure II.5 présente la structure générale de la céramique. Il est composé de grains de même phase ou de phases différentes, séparés par des joints de grains. Il est possible qu'il y ait des imperfections liées au processus de production, ce qui peut fragiliser la structure. Ces imperfections peuvent être causées par des porosités qui persistent après le frittage, ou par des microfissures qui se forment aux joints des grains lors du refroidissement.

Il est crucial de connaître la microstructure (taille des grains) ainsi que le type et la taille des défauts présents à l'origine dans la structure, car ces données peuvent avoir un impact significatif.

Le comportement du matériau peut être significatif (par exemple, la rupture dans les failles de la croûte) [36].

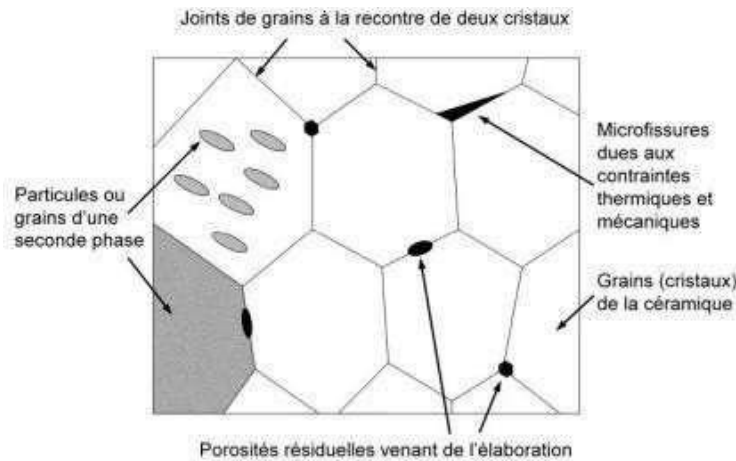


Figure2- 2 Structure générale d'une céramique poly cristalline [35]..

II.7. Propriétés Mécaniques :

Les phases MX et MAX partagent des propriétés physiques semblables, mais elles diffèrent grandement en termes de propriétés mécaniques. Les solides MX sont connus pour être extrêmement durs, mais ils sont également fragiles, indestructibles et vulnérables aux chocs thermiques. À l'opposé, les phases MAX sont remarquablement résistantes aux dommages et aux chocs, offrant des mesures très fiables [37]

II.8. Propriétés thermiques :

Comme la majorité des céramiques techniques, les phases MAX possèdent une conductivité thermique k d'environ $30 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, ce qui en fait des très bonnes conductrices de chaleur [38]. Cette valeur est similaire à celle du nitrure de silicium ($k_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 25 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) ou de l'oxyde d'aluminium ($k_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 32 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) [39]. À température ambiante, le Ti_3SiC_2 présente une conductivité thermique de $34 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, ce qui le rend similaire au titane métallique ($k_{\text{Ti}} = 31 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). La phase MAX ne se décompose pas, mais se vaporise à une température élevée. Cette décomposition génère des carbures ou des nitrures de métaux de transition et des composés du groupe A : $\text{M}_{n+1}\text{AX}_n \Rightarrow \text{M}_{n+1}\text{X}_n + \text{A}$.

II.9. Résistance à l'Oxydation :

La résistance à l'oxydation est cruciale pour les matériaux destinés à être utilisés dans des environnements à haute température. Les oxydes sont les matériaux les plus résistants à l'oxydation, mais ils sont également sensibles aux chocs thermiques. La capacité d'un matériau à former une couche protectrice d'oxyde imperméable sur sa surface détermine sa

résistance à l'oxydation. Seuls quelques éléments peuvent former une couche d'oxyde protectrice efficace contre l'oxydation à des températures supérieures à 1000°C, notamment l'aluminium, le silicium et le chrome.

Les superalliages actuellement utilisés dans les moteurs d'avions sont principalement composés de nickel, mais contiennent aussi du chrome en quantité suffisante pour leur conférer une bonne résistance à l'oxydation. À des températures allant jusqu'à 1000°C et en présence d'oxygène, ils forment une fine couche d'oxyde de chrome (Cr_2O_3), qui est protectrice et adhère bien à la surface. L'ajout de chrome à l'acier le rend inoxydable [41].

CHAPITRE III :

PARTIE EXPERI-

MENTALE

III.1 Objectifs expérimentaux :

Le but de notre travail c'est d'étudier la microstructure et les propriétés mécaniques après traitement thermique des composite MAX/inc601.

Ces composites ont été réalisées au laboratoire LERTI de l'Université de Blida 1, par Ben Mehriez Soraya et Chikhi Nawel [42]. Les différentes étapes d'élaboration sont :

III.2 Préparation des échantillons :

Poudres utilisées : Utilisation de différentes poudres pour former un alliage à base de nickel Inc601 et une poudre de type Ti_3SiC_2 pour le renfort.

Pesée des poudres : Utilisation d'une balance de précision pour mesurer les poudres.

Broyage des poudres : Réalisé avec un broyeur à boulets pendant 10 heures pour modifier la taille, la forme et la surface des particules.

III.3 Elaboration des échantillons :

Variation des pourcentages de poudre pour former plusieurs composites afin d'étudier l'impact du renfort Ti_3SiC_2 sur l'alliage Inc601.

Utilisation d'une méthode manuelle pour homogénéiser les poudres dans des boîtes en plastique avec des billes d'acier.

Mise en forme des échantillons sous forme de pastilles à l'aide d'une presse hydraulique.

III.4 Frittage

Les pastilles ont été frittées à 1200 °C pendant 2 heures sous atmosphère contrôlée d'argon.

III.5 Traitement Thermique :

Les différents échantillons ont subi un traitement thermique à 1050°C pendant 2 Heures, suivi d'un refroidissement à l'eau.

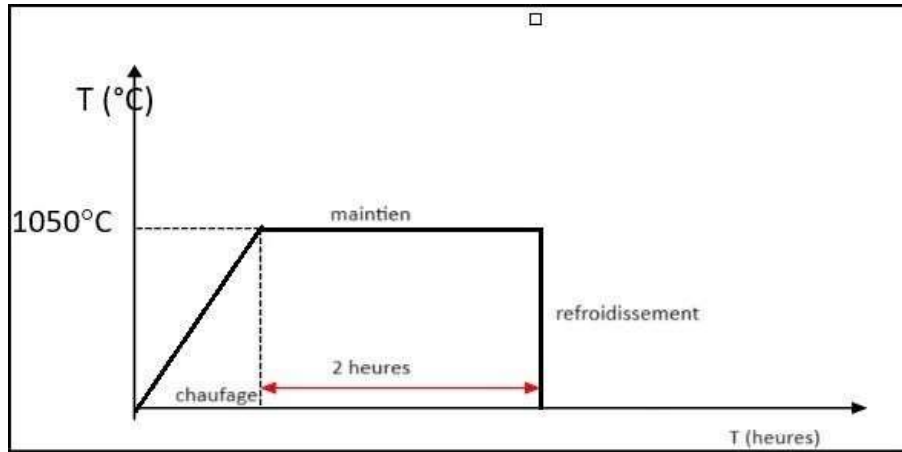


Figure3- 1 : Courbe de traitement thermique

III.6 Polissage :

Après traitement thermique, les échantillons ont été soumis à une opération de polissage manuel nous sommes passés au polissage pour obtenir une surface lisse et finie en utilisant du papier abrasif P280, P400, P600, P800, P1200, P1500, P2000 et P3000. Nous changeons de papier abrasif lorsque toutes les rayures sont dans une seule direction, puis nous changeons l'orientation de l'échantillon.



Figure3- 2 : L'opération de polissage

Après cela les échantillons ont subi une opération de finition à l'aide d'une solution diamantée (3, 1 et 0.25 μm).



Figure3- 3 Les solutions diamantées de (0,25, 1 et 3 μm)

III.7 Microscopie optique MO:

Pour l'observation microstructurale de nos échantillons, nous avons utilisé un microscope optique de type Nikon Eclipse LV150N équipé d'une caméra reliée à un ordinateur pour acquérir et enregistrer les micrographies observées.

La microscopie optique a été faite au sein de laboratoire LERTI – (Département de génie mécanique université Blida 1).



Figure3- 4 : Microscopie optique

III.8 Dureté Vickers :

Les mesures de dureté Vickers après traitement thermique pour les différents composites (Inc601/Ti3SiC2) ont été réalisées à l'aide d'un duromètre de type INOVATEST Nemesis 9100 ; la charge appliquée a été de 5 kgf pendant 10s.

Pour chaque échantillon, on a pris la moyenne de cinq mesures de dureté.

Cette opération a été faite au niveau de laboratoire LERTI – (Département de génie mécanique université Blida 1).



Figure3- 5 Duromètre de type INVOATEST Nemesis 9100.

III.9 Essais de tribologie :

Avec tribomètre "bille sur disque" : Ce test vise à simuler les interactions tribologiques en frottant ensemble les surfaces de deux matériaux antagonistes. Le disque, soumis à une rotation à une vitesse ω et à une charge normale F_n appliquée sur un axe fixe, est au cœur du dispositif. À partir de là, il est possible de déterminer le coefficient de frottement μ (rapport de la force normale à la force tangentielle) ainsi que le taux d'usure WR .

La charge est appliquée par gravité depuis l'extérieur du tribomètre, grâce à un bras de levier équipé d'un contrepoids qui équilibre le poids de l'axe. La vérification directe de la valeur de la charge normale est réalisée en plaçant un capteur de pression entre la broche et le disque, avec l'assemblage approprié. La composante tangentielle de la force est mesurée à l'aide d'un transducteur de force, tandis que la température du disque est surveillée par un thermocouple monté au centre sur sa face inférieure.



Figure3- 6 tribomètre type ANTON PAAR TRB3 CSM, switzerland équipé d'un profilomètre 2D

Les essais tribologiques ont été réalisés au niveau du laboratoire LERTI – (Département de génie mécanique université Blida 1). En configuration bille/disque à l'aide d'un tribomètre de type **ANTON PAAR TRB3 CSM, switzerland** avec les paramètres ci-dessous :

Réciprocation test sur une trajectoire de 4mm Vitesse de glissement : 7 cm/s

Distance de glissement : 150 m

Charge normale : 1N, 5N, 10N

Bille d'acier 100Cr6 (62 HRC)

III.10 Profilométrie 2D :

Pour calculer le volume d'usure des échantillons, des mesures supplémentaires doivent être effectuées sur l'échantillon. L'analyse a été effectuée à l'aide d'un profilomètre 2D.

Cet appareil permet une analyse en 2D grâce au logiciel d'analyse.

Le taux d'usure dans le système de contact étudié (**inc601/Ti₃SiC₂**), se rapporte à l'usure combinée des deux corps antagonistes. Le taux d'usure est exprimé par le volume de la matière usée rapporté à la distance de glissement totale parcourue et à la charge appliquée au contact équation III.2. Le volume d'usure est calculé en multipliant la surface de la trace d'usure déterminée par le profilomètre 2D par la distance de la trajectoire de la piste d'usure (qui est 4mm dans notre cas).

$$W = \frac{V}{F \cdot d} \quad \text{I.2.}$$

Où

W : représente le taux d'usure (mm³/N/m) V : Volume d'usure (mm³),

F : la force normale du contact (N) d : la distance totale parcourue (m).

CHAPITRE IV:

RÉSULTATS ET

DISCUSSION

IV.1 Microscope optique MO :

Les figures La figures 4-1 représentent les observations réalisées par la microscopie optique sur les échantillons élaborées avant le traitement thermique.

La figure 4-2, micrographie optique de l'inc601 après traitement thermique, met en évidence une structure complexe et granuleuse de formes irrégulières à contours noirs (porosité) et des contrastes variés, témoins de différentes compositions ou des particules de seconde phase.

Les figures 4-3 présentent des micrographies optiques de **TSC5**. Il faut retenir une texture hétérogène plus ou moins finement granuleuse avec des grains présentant des nuances d'aspect noir, blanc et gris, des motifs aléatoires, des multiples agglomérats, ce qui signifie une présence de **TiC** dispersés de façon à peu près homogène dans la matrice sur des échelles intéressant des pas de 125 μ m jusqu'à 100 μ m.

Les figures 4-4 et Les figures 4-5 présentent des micrographies optiques de **TSC10** et **TSC15** respectivement. On montre que le taux de porosité est particulièrement élevé dans **TSC15** résultant d'un mauvais frittage

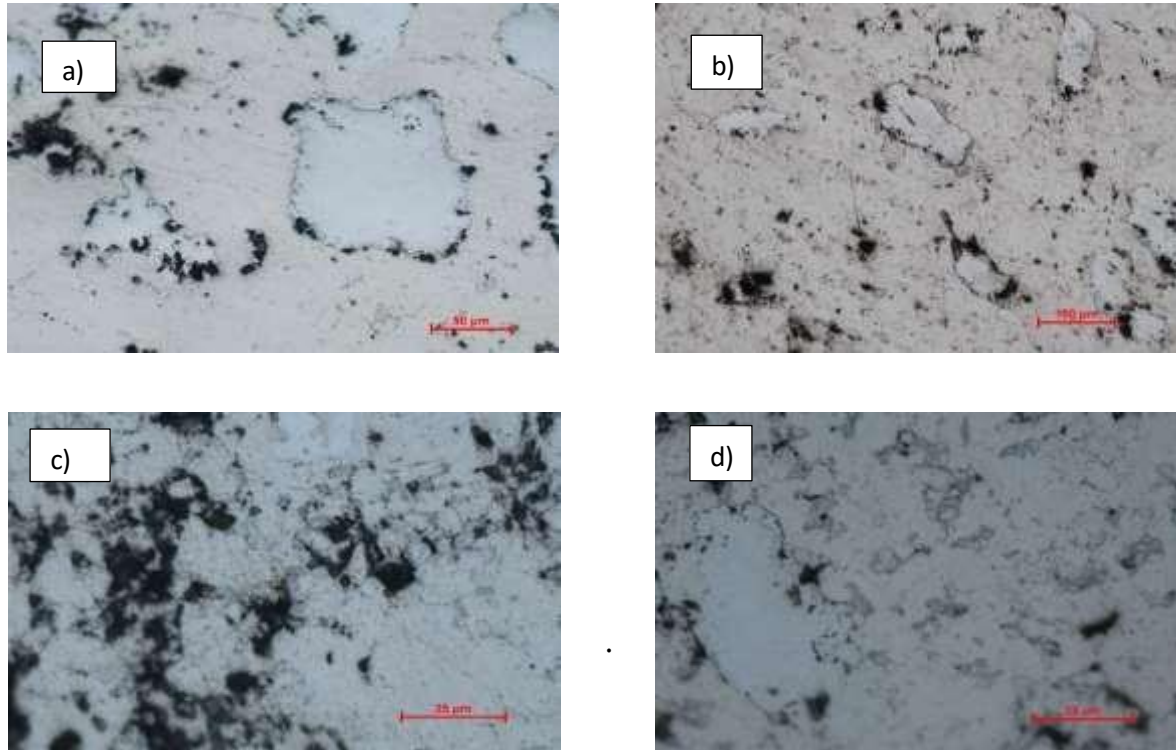


Figure4- 1 Microscopie optique (avant traitement thermique) de : a) l'Inc601 ; et des composites inc601/Ti3SiC2 : b) (TSC5) c) TSC10 et d) TSC15 [42]

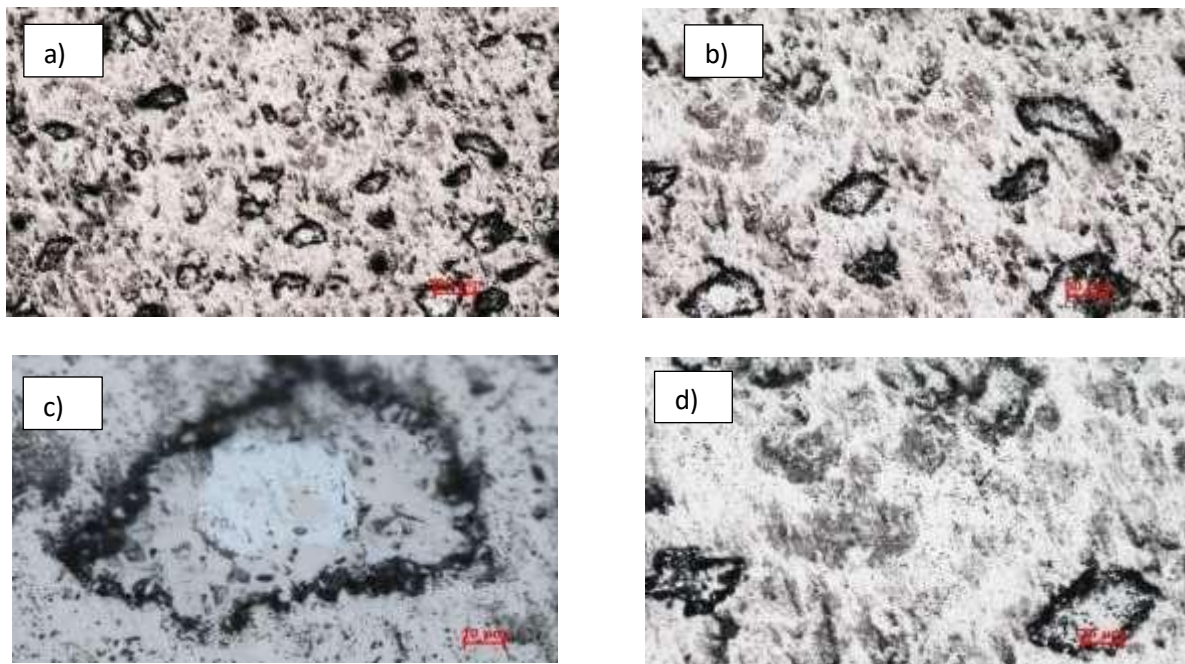


Figure4- 2 Microscopies optique de l'inc601 avec différents agrandissements après traitement thermique

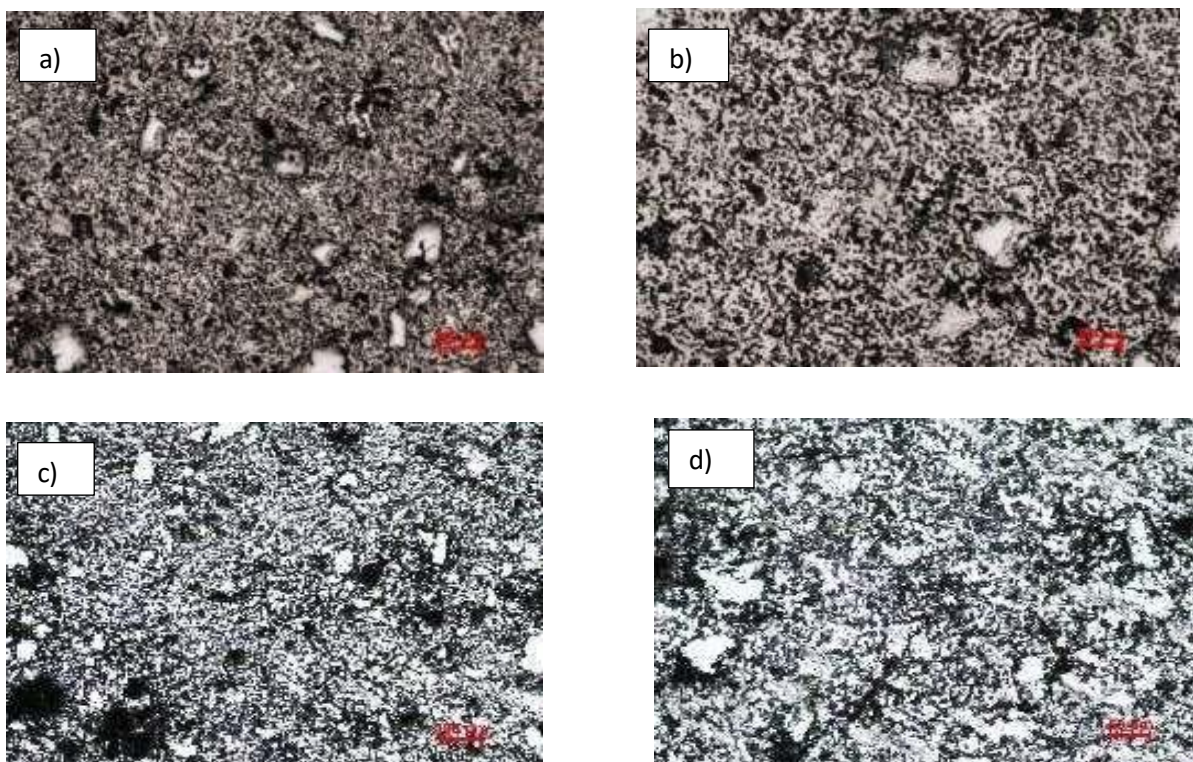


Figure4- 3 Microscopie optique de composite inc601/TIC (TSC 5) avec différents agrandissements après traitement thermique.

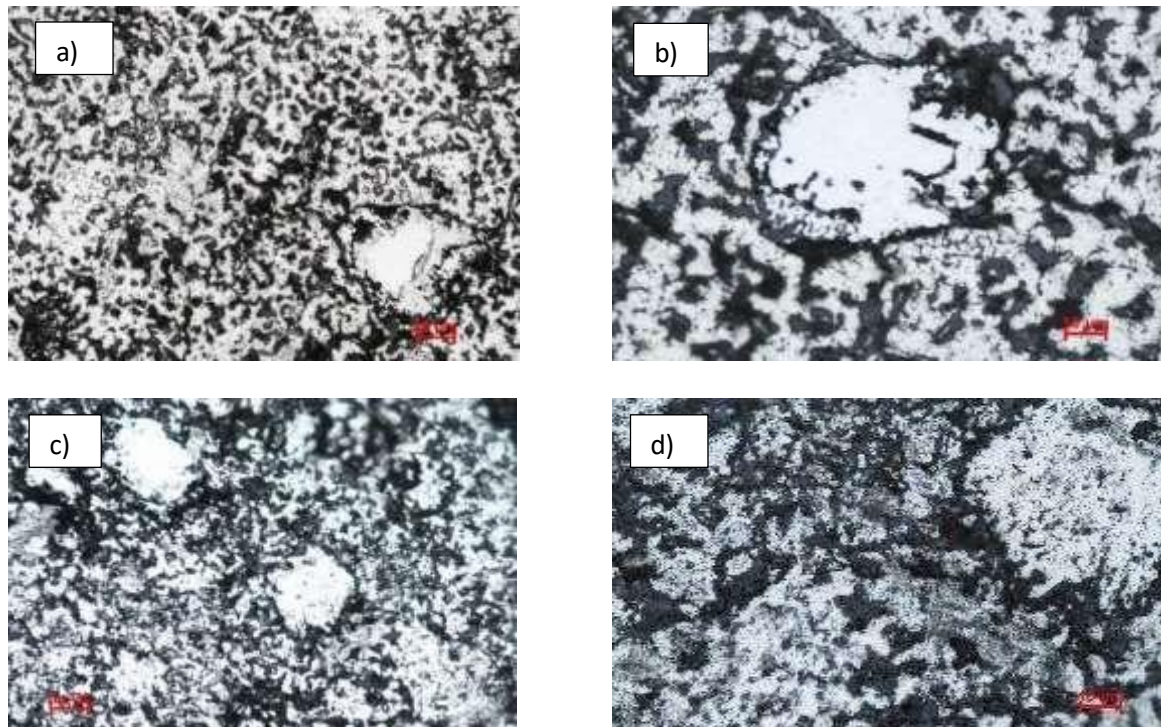


Figure4- 4 Microscopie optique de composite inc601/TiC (TSC 10) avec différents agrandissements après traitement thermique.

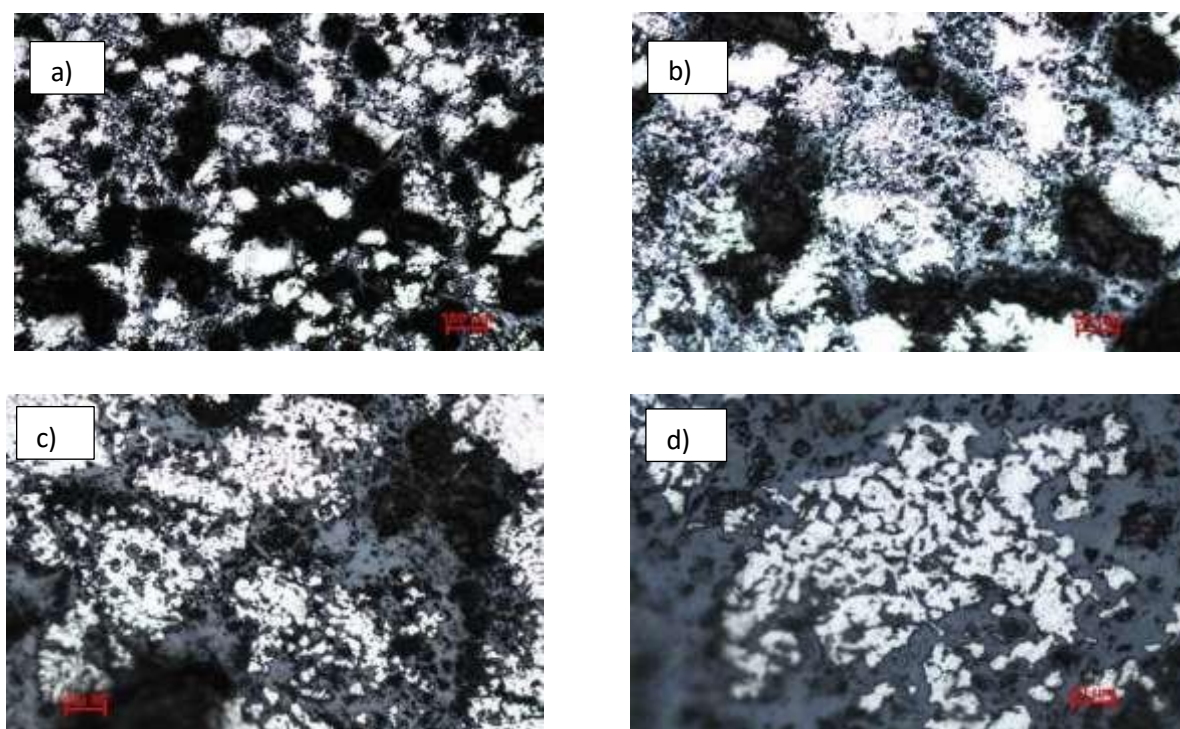


Figure4- 5 Microscopie optique de composite inc601/TiC (TSC 15) avec différents agrandissements après traitement thermique.

L'analyse microstructurale par microscopie optique des composites Inconel 601/TiC après traitement thermique à 1050 °C pendant 2 h montre :

- Présence de particules de **TiC** bien visibles et dispersées dans la matrice pour tous les composites.
- Des précipités clairs peut être sont des phases de **Ni₃(Si,Ti)**, plus ou moins abondants selon la compaction et la diffusion locale du **Ti** et du **Si** pendant le traitement thermique.

Ainsi, le traitement thermique joue un rôle double : il modifie la microstructure via des transformations de phase et améliore les performances mécaniques, mais uniquement si la teneur en renfort reste optimale.

IV.1.2 La dureté de vickers :

Les valeurs de duretés des échantillons après traitement thermique sont introduites dans le tableau :

Echantillons	(HV5) ₁	(HV5) ₂	(HV5) ₃	(HV5) ₄	(HV5) ₅	(HV5) _{moye}
Inc601	81,52	70 ,71	77	80,97	80,61	78,162
TSC5	89,12	80,58	85,09	85,59	80,23	84,122
TSC10	54,40	54	49,71	55,20	50	52,662
TSC15	45,45	42,92	43	50,78	40	44,43

Tableau IV.1 : Valeurs de dureté Vickers des échantillons avant traitement thermique [42].

Échantillons	(HV5) ₁	(HV5) ₂	(HV5) ₃	(HV5) ₄	(HV5) _{MOY}
Inc601	134.84	151.73	132.94	147.27	141.695
TSC5	189.36	175.92	222.35	190.88	194.6275
TSC10	97.50	107.32	132.08	110.65	111.8875
TSC15	146.77	166.34	126.06	145.10	146.0675

Tableau IV.2 : Valeurs de dureté de Vickers des échantillons après traitement thermique.

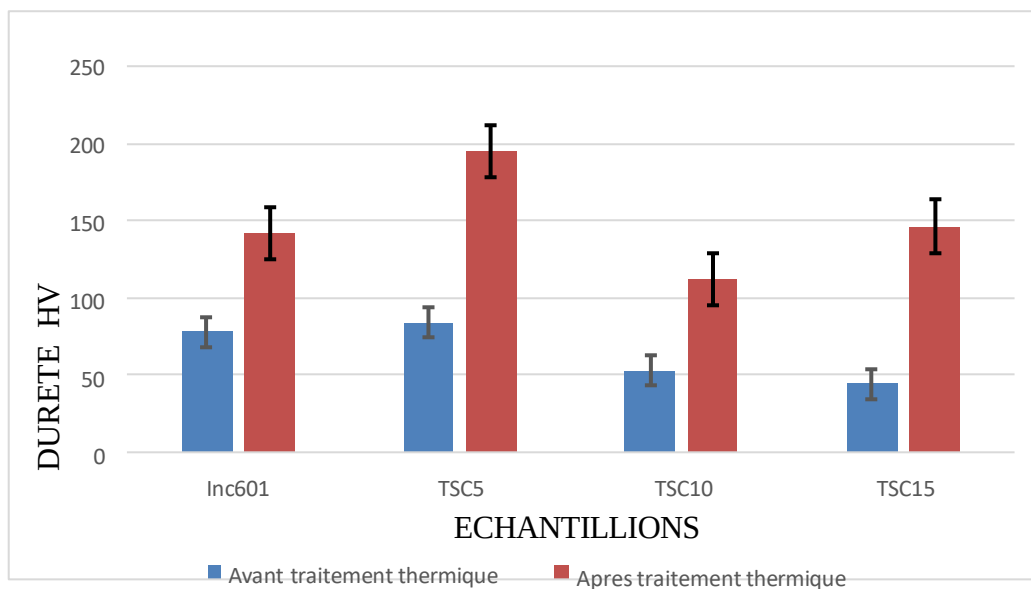


Figure4- 6 Dureté Vickers des échantillons élaborés.

Les mesures de dureté Vickers effectuées après traitement thermique montrent une augmentation globale de la dureté des composites par rapport aux échantillons avant tt. La hausse de la dureté pour **TSC5** s'explique par le durcissement combiné : précipitation de **Ni₃(Si,Ti)** durant le traitement thermique [46] et effet de renfort dispersion des particules **TiC** qui bloquent les joints de grains [47, 45]. Au-delà de 5 wt.% **TiC**, la porosité induite par les agglomérats annule partiellement ce gain, phénomène déjà observé par Ghosh et al. [48]. »

La remontée de la dureté dans l'échantillon **TSC15** après traitement thermique après qu'elle soit descendue dans **TSC10** s'explique probablement par une diffusion plus importante et plus homogène du **Ti** et du **Si** dans la matrice, favorisant ainsi la précipitation d'une quantité plus importante de phase **Ni₃(Si,Ti)**. Cette précipitation améliore localement la cohésion de la matrice et compense partiellement les effets négatifs de la porosité, ce qui justifie l'augmentation de la dureté enregistrée.

IV.1.3 Essai de tribologie :

Les essais tribologiques ont été réalisés en configuration bille/disque sous des charges de 1 N, 5 N et 10 N. Les résultats obtenus montrent une évolution significative du comportement au frottement et à l'usure selon le taux de renfort et la charge appliquée.

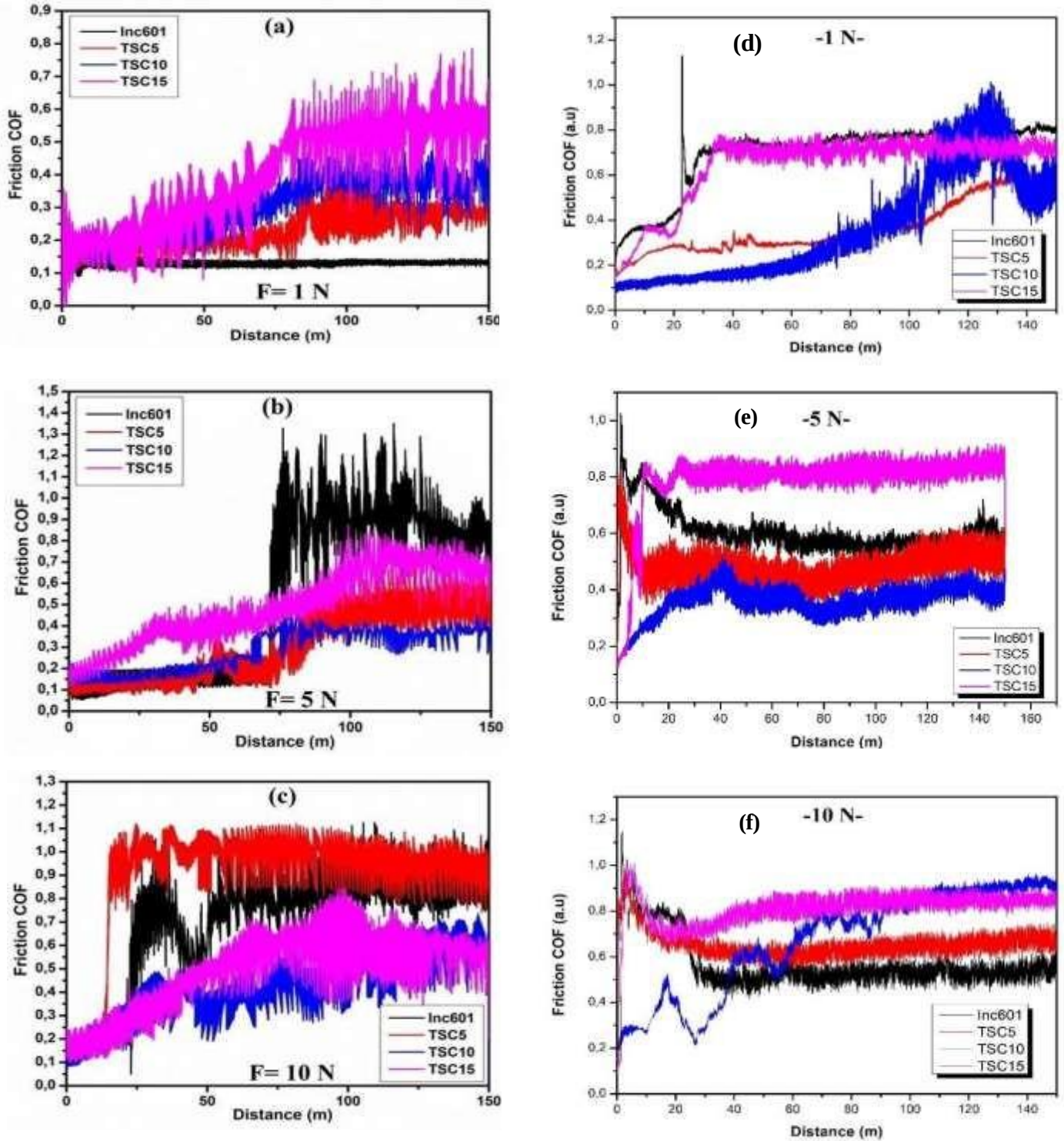
IV.1.4 Coefficient de frottement (μ)

Figure4- 7 Variation du coefficient de frottement en fonction de la distance de l'Inc601 et des composites TSC5, TSC10 et TSC15, (a,b,c) avant traitement thermique [42] et (d,e,f) après traitement thermique, glissant contre une bille en acier 100Cr6, sous a) 1 N, b) 5 N et c) 15 N

Lors des essais de frottement bille/disque réalisés à température ambiante et sous une charge de 10 N, les résultats ont montré que le coefficient de frottement (COF) des composites **Inconel 601/TiC** était inférieur à celui de **l’Inconel 601** seul.

Le COF le plus faible a été enregistré pour les composites **TSC5** et **TSC10**, tandis qu’une légère augmentation a été observée pour TSC15.

Cette diminution du COF s’explique principalement par :

- L’augmentation de la dureté de la matrice suite à l’ajout des particules de **TiC**. Ces dernières, ayant une dureté bien supérieure à celle de l’Inconel, améliorent la résistance à la déformation des aspérités en contact, réduisant ainsi les phénomènes d’adhérence et donc le frottement. Patil et al. [49] ont confirmé que l’introduction de **TiC** dans une matrice **Ni** améliore la dureté globale, ce qui entraîne une diminution du COF.
- La formation d’un tribofilm oxydé à base pendant le frottement. Ce film protecteur se forme sous l’effet de la température générée par le glissement et agit comme une couche lubrifiante solide, réduisant l’adhésion et facilitant le glissement. Cette observation a été signalée par Zhang et al. [50], qui ont montré que la présence de **TiC** favorise la formation de ces films protecteurs, abaissant ainsi le COF.

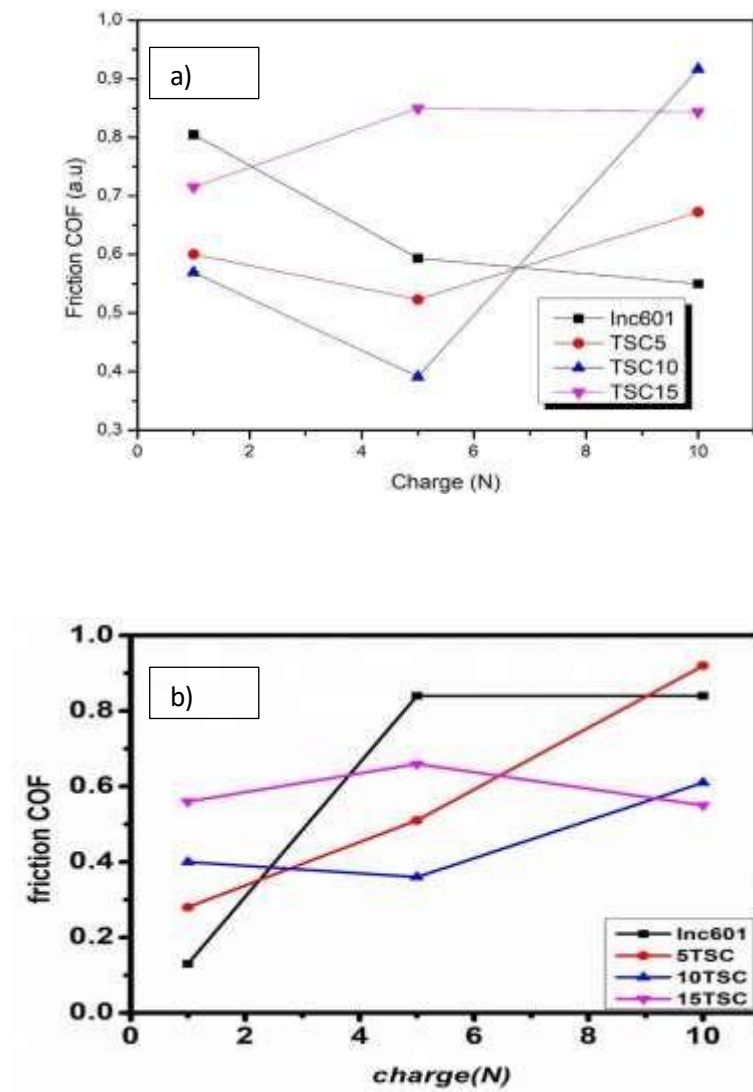


Figure4- 8 Les valeurs μ mesurées à l'état stable obtenues sous différentes charges appliqués pour l'inc601 et les composites élaborés : a) après traitement thermique et b) avant traitement thermique [42].

IV.1.5 Résistance à l'usure

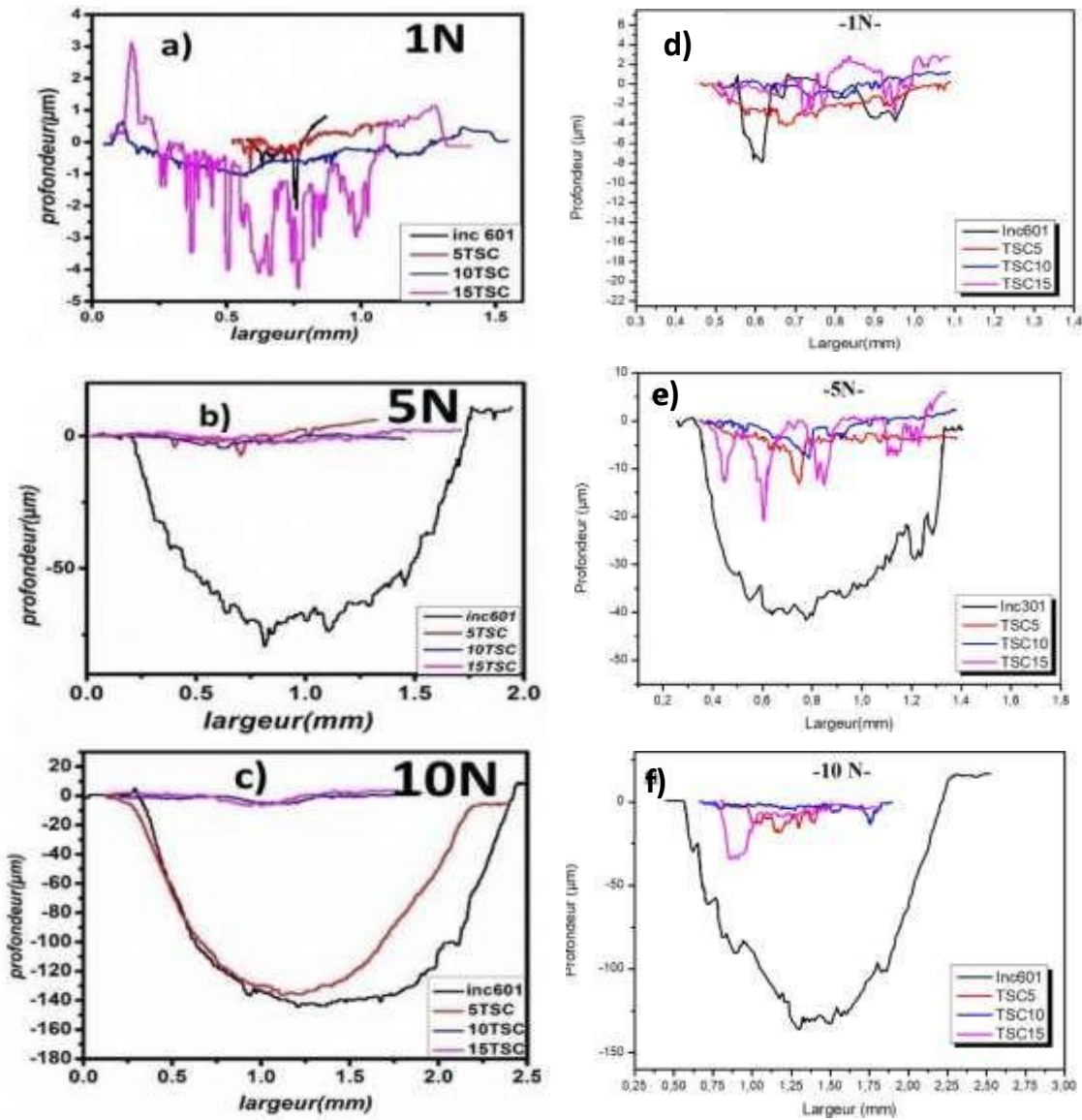


Figure4- 9 (a), (b) et (c) représentent les profils 2D de toutes les traces d'usure après des tests de tribologie pour les composites inc601 et TSC avant traitement thermique et (d) ,(e) et (f) représentent les profils 2D après traitement thermique sous 1N , 5 N et 10 N, respectivement.

charge N	Taux d'usure ($\text{mm}^3/\text{N.m}$)			
	Inc601	TSC5	TSC10	TSC15
1	$2.46 \cdot 10^{-5}$	$2.62 \cdot 10^{-5}$	$9.07 \cdot 10^{-6}$	$1.64 \cdot 10^{-5}$
5	$16.21 \cdot 10^{-5}$	$6.33 \cdot 10^{-6}$	$1.06 \cdot 10^{-5}$	$3.11 \cdot 10^{-5}$
10	$36.67 \cdot 10^{-5}$	$1.49 \cdot 10^{-5}$	$8.18 \cdot 10^{-6}$	$1.93 \cdot 10^{-5}$

Tableau IV.3 : résultats du taux d'usure des échantillons élaborés après traitement thermique après les différents tests detribologie.

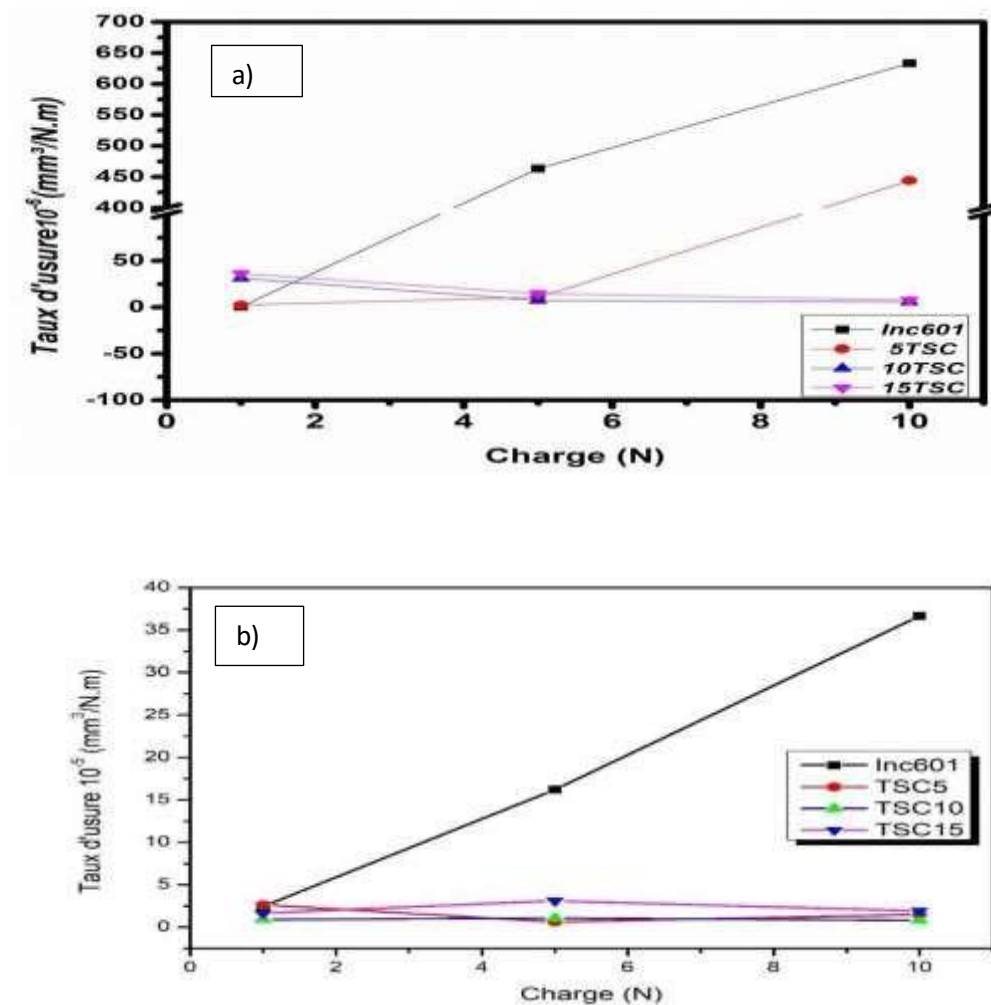


Figure4- 10 Les différents valeurs du taux d'usure (WR) calculées pour l'inc601 et les composites élaborés sous différentes charges appliquées a) avant traitement thermique [42] et b) après traitement thermique

L'évaluation du taux d'usure a montré une amélioration significative pour les composites **TSC5** et **TSC10** par rapport à l'Inconel seul. Le taux d'usure le plus bas a été obtenu pour **TSC10**, tandis qu'il augmente légèrement pour **TSC15**.

Cette amélioration s'explique par :

- L'effet barrière des particules de **TiC**, qui jouent le rôle de points durs dans la matrice métallique. Elles limitent la pénétration de la bille antagoniste et réduisent la propagation des fissures en surface. Patil et al. [49] ont observé que l'ajout de 10–20 % de **TiC** permettait de réduire l'usure de 60 à 70 % dans des composites similaires.
- Probablement La formation d'un tribofilm protecteur riche en oxydes au cours du frottement. Ce film réduit le contact métal-métal direct, diminue les arrachements de matière et protège la surface, comme indiqué par Zhang et al. [50]. La présence de ce tribofilm sont clairement visible dans les figures **4-11** et **4-12** et **4-13**

IV.1.6 Trace d'usure :

La figure montre les microscopies optiques des traces d'usure après une charge de 1N , 5N , 10N pour les différents échantillons élaborés après traitement thermiques.

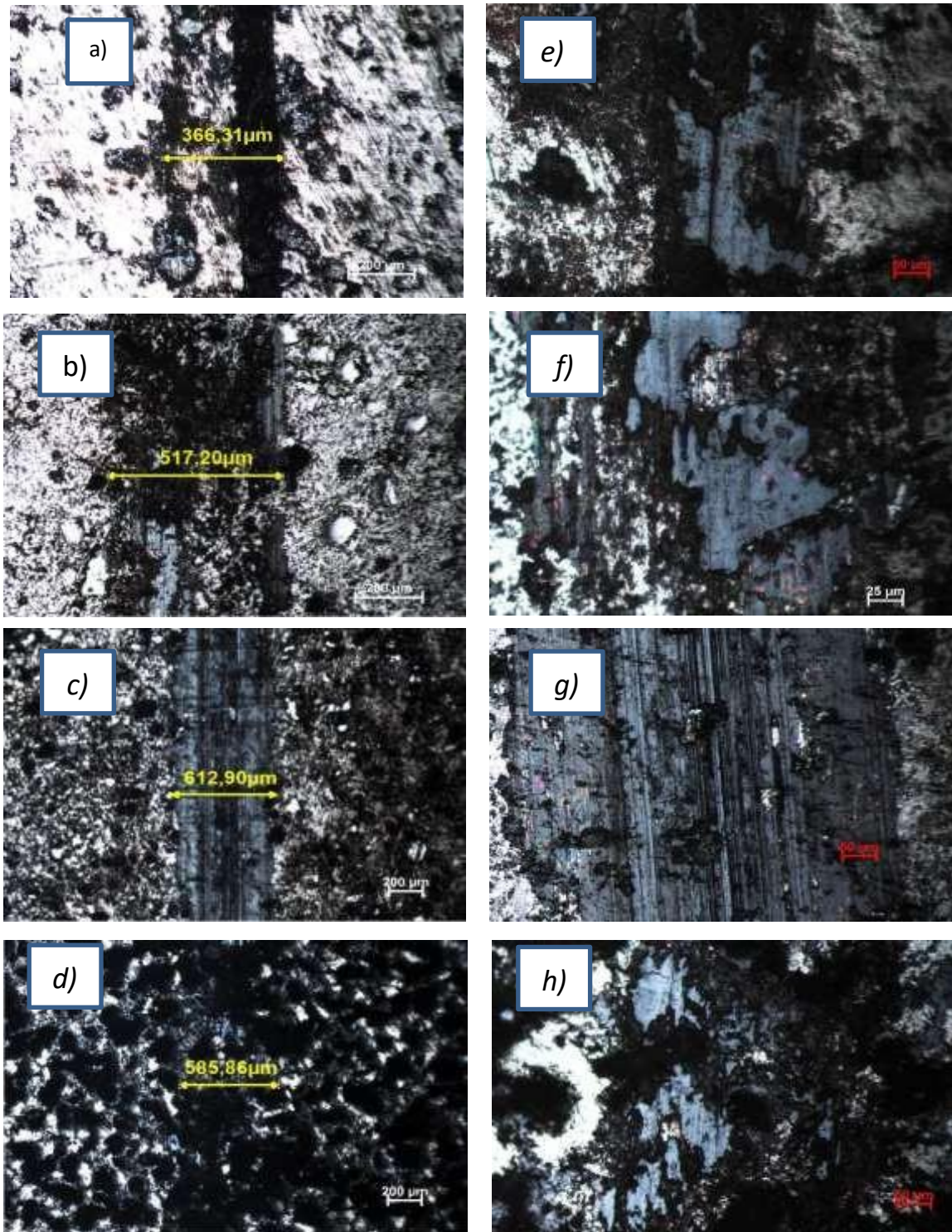


Figure4- 11 (a-d) Microscopies optique des traces d'usure (charge 1N) de l'Inc601 et des composites TSC5, TSC10 et TSC15, respectivement. (e-h) agrandissement de (a-d), respectivement.

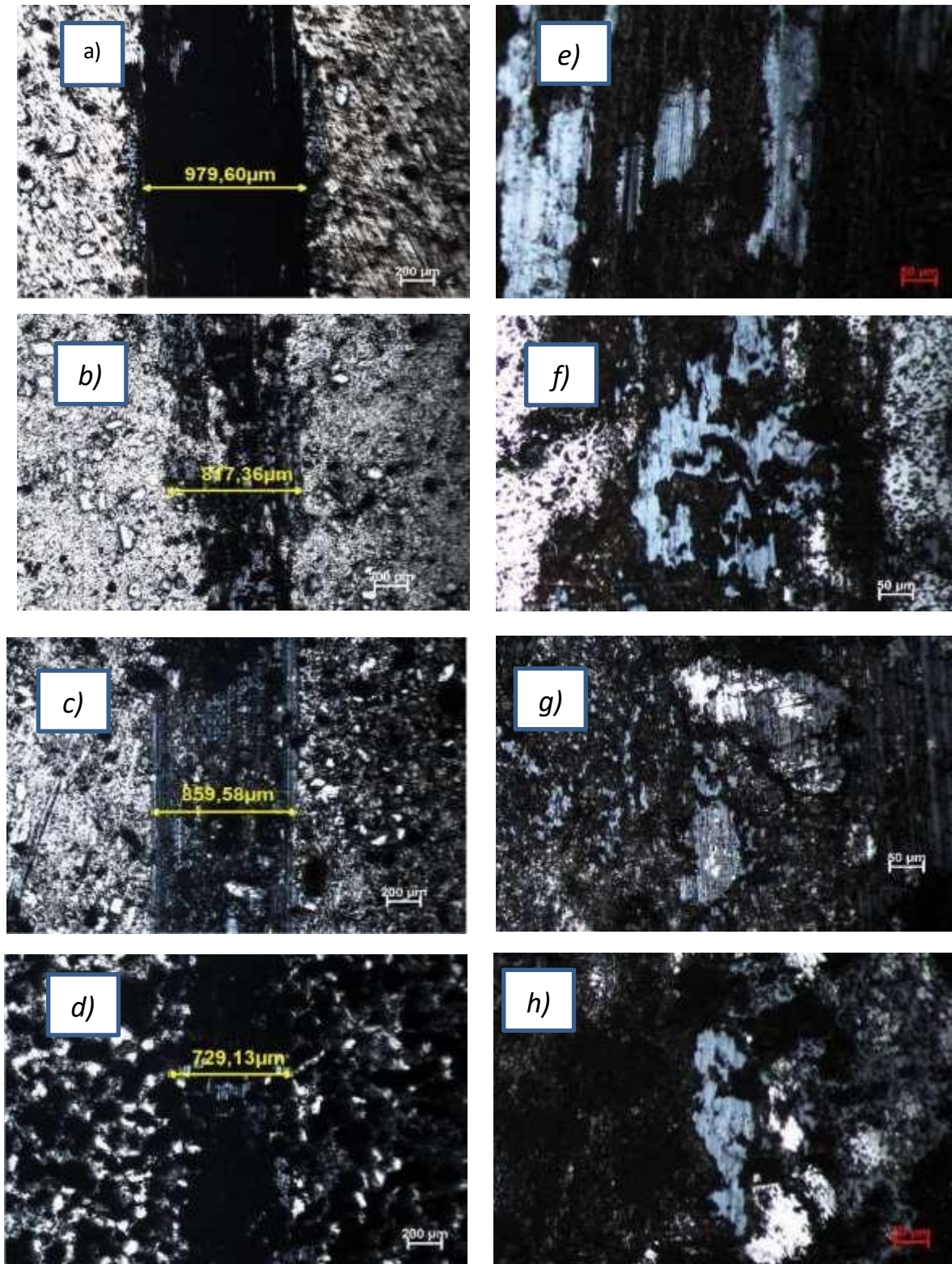


Figure4- 12 (a-d) Microscopies optique des traces d'usure (charge 5N) de l'Inc601 et des composites TSC5, TSC10 et TSC15, respectivement. (e-h) agrandissement de (a-d), respectivement

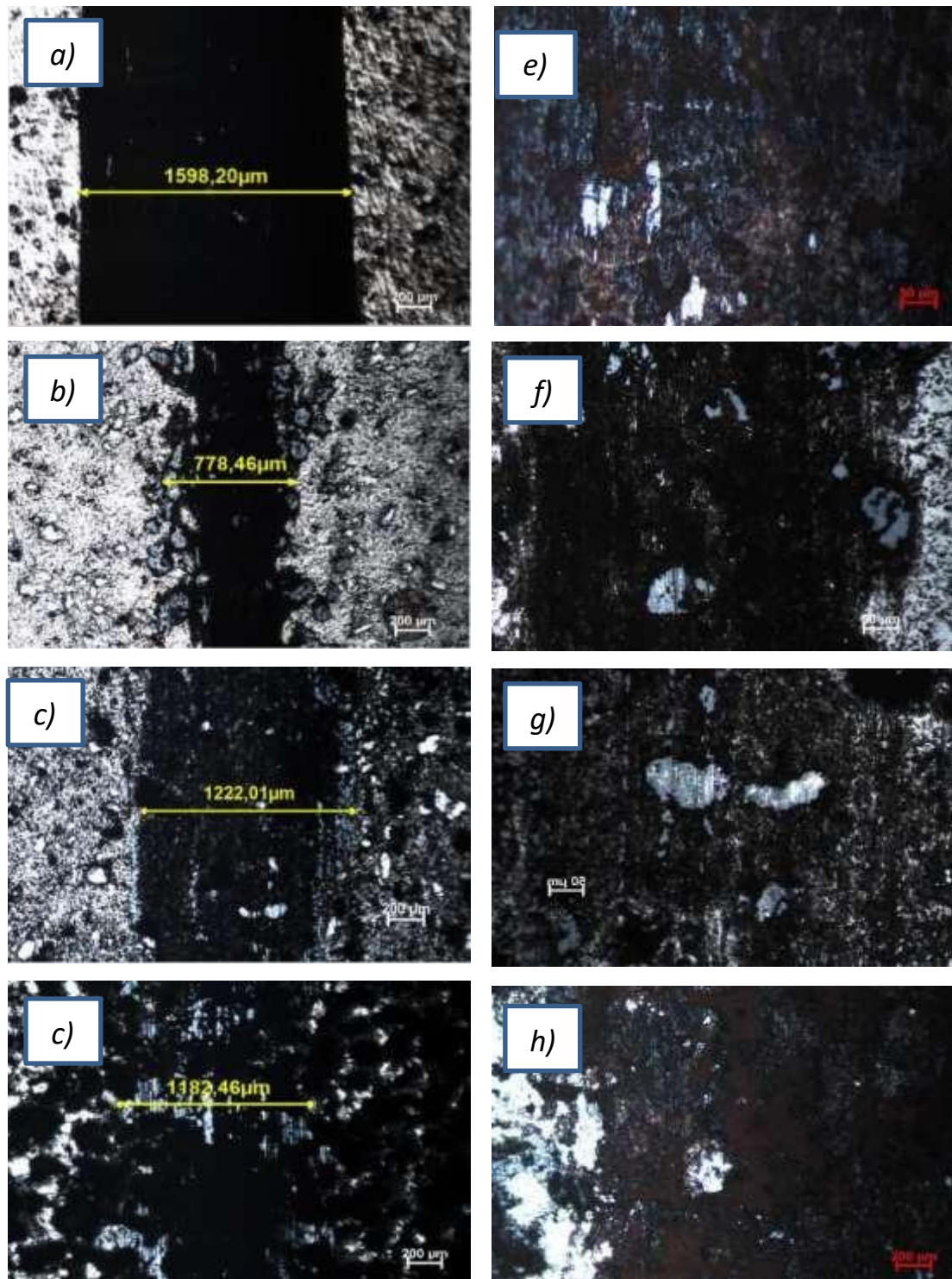


Figure4- 13 (a-d) Microscopies optique des traces d'usure (charge 10N) de l'Inc601 et des composites TSC5, TSC10 et TSC15, respectivement. (e-h) agrandissement de (a-d), respectivement.

L'observation des surfaces usées montre des différences selon la nature du matériau. L'échantillon **Inconel 601** présente des marques d'usure plus marquées, liées à un mécanisme adhésif dominant. En comparaison, les composites **TSC5**, **TSC10** et **TSC15** montrent des stries plus fines et régulières, ce qui reflète une usure abrasive plus douce.

Ce comportement est attribué à la présence des particules dures de **TiC** qui renforcent la surface et peut être à la formation de films d'oxydes protecteurs pendant le frottement [47]. Ces films jouent un rôle important dans la réduction de l'usure en servant de couche de glissement. Les résultats sont cohérents avec ceux rapportés dans la littérature [44, 47].

Conclusion générale

Conclusion générale :

Ce mémoire a porté sur l'élaboration de composites Inconel 601 renforcés par du Ti_3SiC_2 , obtenus par métallurgie des poudres, puis soumis à un traitement thermique à 1 050 °C pendant 2 heures avec trempe à l'eau. L'objectif principal était d'étudier les effets de ce traitement thermique sur les propriétés microstructurales, mécaniques et tribologiques des composites. Nos échantillons ont été préparés en utilisant la méthode de métallurgie des poudres.

Durant le frittage, le Ti_3SiC_2 se décompose, formant du TiC et des phases intermétalliques. Le traitement thermique après frittage active alors les mécanismes de diffusion dans la matrice, ce qui favorise la formation de composés intermétalliques du type $\text{Ni}_3(\text{Si},\text{Ti})$. La quantité et la finesse de ces intermétalliques augmentent avec la teneur en renfort.

Les échantillons à teneur modérée en renfort (5 à 10 wt %) présentent une bonne homogénéité microstructurale et une amélioration significative de la dureté. À 15 wt %, la dureté est encore plus élevée, en raison de la plus grande quantité de TiC et de précipités formés. Toutefois, cette amélioration est contrebalancée par une porosité accrue, susceptible de nuire à la compacité et à d'autres propriétés mécaniques.

Sur le plan tribologique, le traitement thermique contribue à réduire le coefficient de frottement et à améliorer la résistance à l'usure, notamment pour les teneurs intermédiaires en renfort. Ces performances sont liées à l'action combinée des particules dures de TiC et à la formation de tribofilms oxydés pendant le glissement.

En conclusion, le traitement thermique permet d'optimiser les propriétés des composites **Inconel601/ Ti_3SiC_2** en activant des phénomènes de diffusion. Une teneur bien ajustée en renfort céramique permet d'obtenir un bon compromis entre dureté, résistance à l'usure et stabilité microstructurale.

Ce travail ouvre la voie à des applications dans des environnements à haute température et à forte sollicitation mécanique. Des études complémentaires pourraient viser à améliorer la densification ou à caractériser plus finement la cinétique de formation des précipités.

Références

1. Bahlouli, N., « Comportement mécanique en température du pli élémentaire d'un stratifié carbone/époxy », 1994, Cachan, Ecole normale supérieure.
2. Berthelot, J.M., « Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures
3. » Livre, éditions : Lavoisier, 2005
4. « Glossaire des matériaux composites » - carma –Actualisation octobre 2006.
5. Ly, E.H.B., Nouveaux matériaux composites thermoformables à base de fibres de cellulose. 2008, Grenoble, INPG.
6. S. Azem, M. Nechiche, M. Hakkoum : Elaboration et caractérisation d'un composite ceramique-métal (WC-bronze) par la methode d'infiltration. Labortoire d'Elaboration, Caractérisation et Modélisation des Matériaux (LEC2M). Université Mouloud Mammeri de tizi- Ouzou, Algérie.
7. S. H. Hong, B. K. Kim: Fabrication of W-20 wt% Cu composite nanopowder and sintered alloy with high thermal conductivity. Materials Letters 57, pp. 2761- 2767 : 2003.
8. S. Tariolle, F. Thévenot, M.P. Dariel, N.Frumin, N.Frage : cermets carbure de dore infiltrés par un alliage de cuivre. Matériaux 2002.
9. J. Masounave, N. Villar : Elaboration des composites a particules. Techniques de l'Ingénieur, M2 448 ; 2001.
10. K.H. ROLL, in "Modern Developments in PM" Vol. 3, edited by H. H. Hausner (Plenum Press, New York, 1965) p. 261.
11. H. FISCHMEISTER, PMI 10 (1978) 119.[11] R.W. CAHN, Nature 276 (1978) 209.
12. R. S. Sirohi, F. S. Chau, Optical Methods of Measurement, Marcel Dekker, Inc. New York, 1999.
13. D. Bouvard et G. Cizeron « La métallurgie de poudre », N° 270, volume 25, 1994.
14. M. Eudier « Métallurgie des poudres », Technique de l'Ingénieur ; M866.
15. Suk-Joong L. Kang: [Sintering](#) Densification, Grain Growth, and Microstructure 2005, Pages 3-8
16. Charles MANIER « Spark Plasma Sintering : couplage entre les approches modélisation, instrumentation et Matériaux »
17. Michel EUDIER. Fabrication des produits frittés. M864 Techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques.
18. Didier Bernache – Assollant : Frittage en phase liquide technique de l'ingénieur AF 6621.

19. D. Abdenasser, Contribution à la compréhension des modes d'action tribologique par usinage, Projet de fin d'étude, Université de M'sila, 2016.
20. Jean Frêne, La tribologie de l'antiquité à nos jours ; Mécanique & Industries · January 2001.
21. OECD, Glossary of terms and definition in the field of friction, Organization for economic cooperation and development, 1969.
22. E. RABINOWICZ, Friction and wear of materials, John Wiley and sons Inc, New York, London, Sydney, 1965. (168, 169) pages.
23. ASTM, Norme G40-90A, 1990.
24. N. KHANAFI-BENGHALEM, Etude des mécanismes d'usure et de frottement de deux aciers X12CrNiMoSi25-20 et le 25CrMo4 (Etude comparative. Thèse de doctorat, Université de Sétif. 2007
25. Mathieu, H.J., E. Bergmaan, and R. Gras, Analyse et technologie des surfaces : couches minces et tribologie. Vol. 4. 2003 : PPUR presses polytechniques.
26. J. Dhersn (1978). Usure avaries corrosion, Facteurs de destruction des matériels industriels
27. Nourouzi, S., Contribution à l'étude du procédé arc-fil pour la réalisation de dépôts métalliques durs résistants à l'usure abrasive. 2004, Limoges.
28. Mathieu, H.J., E. Bergmann, and R. Gras, Analyse et technologie des surfaces : couches minces et tribologie. Vol. 4. 2003 : PPUR presses polytechniques.
29. Barrau, O., Etude tribologique de revêtement en régulation de turbines. Rapport de stage Turboméca-ENIT, 1999.
30. Stachowiak, G.W. and Batchelor, A.W., 2013. Engineering tribology. Butterworth-heinemann.
31. J.R. Davis, editor, ASM Specialty Handbook: Nickel, Cobalt, and their Alloys, p 68-91
32. Publication Number SMC-028 Copyright © Special Metals Corporation, 2005 (Feb 05).
33. T. lapauw, k. lambrinou, t. cabioch, joseph halim, Jun Lu, a. pesache.
34. M. Amer, M.W. Barsoum, T. El-Raghy, I. Wiess, S. LeClair, and D. Liptak. The Raman spectrum of Ti_3SiC_2 . J. Amer. Cer. Soc., 84(10) :58175819, 1998.
35. M.W. Barsoum and T. El-Raghy. The MAX phases: unique new carbide and nitride materials. American Scientist, 89 :334343, 2001.
36. Alexandra SOUCHET : « Comportement tribologique d'une phase MAX : Transition et

effets d'échelle sur différents Ti_3SiC_2 », 2004.

37. Miladin Radovic and Michel W. Barsoum ‘‘MAX phases: Bridging the gap between metals and ceramics’’
38. M.W. Barsoum. The $\text{Mn}_{n+1}\text{AlX}_n$ phases: a new class of solids; thermodynamically stable nanolaminates. *Prog. Solid St. Chem.*, 28 :201-281, 2000.
39. M.W. Barsoum, H.I. Yoo, I.K. Polushina, V.Yu. Rud, Yu.V. Rud and T. ElRaghy. Electrical conductivity, thermopower, and Hall Effect of Ti_3AlC_2 , Ti_4AlN_3 , and Ti_3SiC_2 . *Physical review B - American Physical Society*, 62(15):10195-10198, 2000
40. M.W. Barsoum. *Fundamentals of ceramics*. Mc Graw-Hill, 1997.
41. Noël HADDAD. Thèse de doctorat : Etude des propriétés diélectriques des phases $\text{Mn}_{n+1}\text{AlX}_n$ par spectroscopie de pertes d'énergie des électrons, 2009.
42. Chikhi Nawel et Ben Mehriez Soraya. Etude Microstructural Et Tribologique sur Des Composites à Matrice Métallique Élabores à Partir Des Poudres D'alliage De Nickel Et De Céramique Ternaire
43. Tang S., Chen Y., Liu J., & Zhao X. (2022). *Effect of TiC content on friction and wear behaviour of Inconel-625/TiC composites prepared by SPS*. **Tribology International**, 167, 107407.
44. Li Y., Wang L., Zhang H., et al. (2023). *Microstructure and tribological performance of Inconel 718 matrix composites reinforced with TiC*. **Materials & Design**, 232, 112143.
45. Zhang H., Liu S., & Zhou Y. (2024). *Wear resistance of nickel matrix composites reinforced by nano-TiC particles*. **Journal of Alloys & Compounds**, 956, 170349.
46. Farhadi M., Mozafari V., & Emami H. (2020). *Influence of heat treatment on friction and wear behaviour of Inconel 601 alloy*. **Wear**, 460-461, 203506.
47. Ahmed L., Peng Z., & Jiang J. (2024). *Formation of protective tribofilms in Ni-based MMCs reinforced with TiC under dry sliding*. **Surface & Coatings Technology**, 498,
48. Ghosh D., Dhar N., & Roy S. (2021). *Influence of reinforcement size on wear mechanisms of Ni–TiC MMCs*. **Tribology International**, 152, 106542.
49. Patil, A., et al. (2020). *Mechanical and Tribological Behavior of Mechanically Alloyed Ni–TiC Composites Processed via Spark Plasma Sintering*. *Materials*, 13(22), 5306.
50. Zhang, D., et al. (2022). *Effect of TiC content on the microstructure and wear performance of Ni–TiC composites*. *Vacuum*, 195, 110648.
51. Liu, Z., et al. (2021). *Enhanced wear resistance of spark plasma sintered TiC/Ni composites: Effects of reinforcement content and porosity*. *Journal of Materials Research and Technology*, 13, 93–104. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.04.003>

