



**République Algérienne démocratique  
Populaire**



**Université Blida1**

**Faculté de génie mécanique  
Master 2**

**Spécialité : Ingénierie des matériaux et des Surfaces**

**Thème :**

**Réhabilitation d'un outil de forage en corps matrice**

**Réalisé par :**

AOUS Abdelaziz

**Encadré par:** BENOMAR Saber

**Co-promoteur:** CHENITI Billel

Année universitaire : 2021-2022

# *Remerciements*

*Je tiens à remercier mon directeur de mémoire Mr A.BENOMAR pour toute l'aide qu'il m'a procurée.*

*Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon Co promoteur Mr.CHENITI Bellel directeur de division au centre de recherche CRTI , pour son accueil, son soutien, sa disponibilité, et son accompagnement tout au long de mon projet de fin d'études.*

*Je remercie toute l'équipe du centre CRTI pour leur accueil, et leur soutien, leur sens pédagogique, et leur disponibilité aux laboratoires lors de mon utilisation du matériel de recherche.*

*Je remercie ma famille : Mes parents, Ma grand-mère, mes frères et sœurs. mes amis et toutes les personnes qui m'ont soutenu , en particulier :Imane , Ali , Abdellatif , Ahmed , Abdeslam , Riyad , Lotfi , Sarah , Mahmoud ....*

## **Résumé**

Ce travail s'intéresse aux outils de forages d'une manière générale. Les circonstances dans lesquelles ces outils fonctionnent font que la partie active de ces outils devient endommagée.

Dans l'optique de réhabilitation de ces outils, nous avons tenté d'effectuer un rechargement dur sur un composite à matrice métallique (W-Sn-Cu) élaboré par infiltration non conventionnelle. Le rechargement dur choisi dans cette étude est le TIG (Tungsten Inert Gas) et le matériau choisi pour le rechargement est (W-Cu-Ni) . sous atmosphère contrôlée pour l'assemblage des deux parties .Ainsi nous avons pu comparer les propriétés mécaniques du matériau après rechargement avec le CMM de base.

## **Abstract**

Drilling tools operate under intense circumstances, which can cause damages in the active part of those tools. In order to rehabilitate damaged ones, we attempted to carry out a hardfacing on a metal matrix composite (W-Sn-Cu) sintered by unconventional infiltration. The hardfacing chosen is the TIG (Tungsten Inert Gas) and the material chosen in the hardfacing is (W-Cu-Ni) with controlled atmosphere, to assembly the two parts. Thus, we were able to compare the mechanical properties of the material after reloading with the basic CMM.

# TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION.....	1
-------------------	---

## CHAPITRE I

I .1.Généralités sur le frittage.....	3
---------------------------------------	---

I .2.Procédés d'infiltration conventionnels.....	7
--	---

I .3.Procédé d'infiltration non conventionnel.....	14
--	----

## CHAPITRE II

II.1.Méthodes d'assemblage cermet/metal.....	17
--	----

II.2.Le brasage.....	19
----------------------	----

II.3 .SOUDAGE TUNGSTEN INERT GAZ (TIG).....	26
---	----

## CHAPITRE III

III.1 Matériaux utilisés.....	32
-------------------------------	----

III.2. Opération d'infiltration.....	32
--------------------------------------	----

III.3 L'opération de rechargement dur.....	34
--	----

III.4 Techniques de caractérisations.....	35
---	----

## CHAPITRE IV

IV.1.Cycle thermique lors de l'opération de rechargement.....	43
---	----

IV.2.Aspect macrographique.....	43
---------------------------------	----

IV.3. Evolution microstructurale des échantillons infiltrés et rechargés...44	
---	--

IV.4.Evolution des propriétés mécaniques.....	47
---	----

IV.5.Propriétés tribologiques.....	50
------------------------------------	----

CONCLUSION.....	55
-----------------	----

## LISTE DES FIGURES

- FigI.1 :** Schéma illustrant la formation de ponts entre deux particules au début du frittage
- FigI.2 :** Les trois stades du frittage en phase liquide : réarrangement (étape 1), dissolution-précipitation (étape 2), et coalescence (étape 3)
- FigI.3 :** Étapes classiques durant le frittage en phase liquide du mélange de poudres
- FigI.4 :** Les différentes méthodes d'infiltration par capillarité
- FigI.5 :** Le Mécanisme d'infiltration
- FigII.1 :** Différents types d'interaction ; (1) courte portée, (2) moyenne portée et (3) longues portées
- FigII.2 :** Brasage oxyacétylénique des outils de forage prise au sein de l'entreprise ALDIM.
- FigII.3 :** Schéma illustratif de la technique de brasage sous vide (a) : Positionnement de la couche intermédiaire pour le brasage par diffusion, (b) : four de brasage sous vide.
- FigII.4 :** Principe de fonction du procédé de brasage laser présenté par Nagatsuka
- FigII.5 :** Schéma illustratif du principe de fonctionnement du Brasage par induction.
- FigII.6 :** Principe du procédé de soudage TIG
- FigII.7 :** Forme d'onde et chemin des électrons en courant alternatif.
- FigII.8 :** Forme d'onde du courant pulsé
- FigIII.1 :** (A) : Mélange de poudres la 142, (B) : Granula du liant IF2 (C) : Moule en graphite usiné
- FigIII.2 :** La pesé du liant.

**FigIII.3 :** Installation dans le four électrique.

**FigIII.4 :** L'infiltration dans le four.

**FigIII.5 :** Poste à souder

**FigIII.6 :** Machine à souder TIG

**FigIII.7 :** La micro tronçonneuse

**FigIII.8 :** La machine d'enrobage

**FigIII.9 :** La Polisseuse

**FigIII.10 :** Appareil de nettoyage a Ultrason

**FigIII.11 :** Macroscopie

**FigIII.12 :** Microscopie optique

**FigIII.13 :** Machine de dureté

**FigIII.14 :** Machine de micro dureté

**FigIII.15 :** Machine de tribologie

**FigIV.1 :** Cycle thermique enregistré lors de rechargement

**FigIV.2 :** Images macrographique du (a) consolidé et de (b) l'échantillon rechargé TIG

**FigIV.3 :** Micrographies optiques de l'infiltré avec différents grossissements. Ax50 bx50 c x200 d x500.

**FigIV.4 :** Micrographie optique de l'échantillon rechargé TIG : a x50 b x200

**FigIV.5 :** Image optique de l'interface consolidé/rechargé

**FigIV.6 :** Profils de dureté le long des échantillons rechargé et infiltré

**FigIV.7 :** Les résultats de l'essai de la microdureté des échantillons (infiltré et rechargé)

**FigIV.8 :** évolution des coefficients de friction en fonction de la distance.

**FigIV.9 :** Profolio de l'infiltré

**FigIV.10 :** Profolio du liant

**FigIV.11 :** Profolio du rechargé

**FigIV.12 :** Les taux d'usure des échantillons

## **INTRODUCTION GENERALE**

Dans le domaine de l'exploitation pétrolière, les entreprises d'exploitation sont confrontées à l'importante logistique déployée par les puissantes compagnies pétrolières étrangères. Face à cette situation, les entreprises algériennes doivent développer une stratégie commune pour mettre les moyens nécessaires pour s'adapter aux mutations technologiques pouvant assurer la réalisation des outils plus performants face aux conditions d'usure les plus sévères de forage.

Pour les formations géologiques tendres à mi-dures, les outils de forage monobloc en taillants PDC (Polycristalline Diamond Compact) sont les mieux adaptés. Le niveau de performance (mètre foré) repose essentiellement sur la réussite de la consolidation des poudres par infiltration et de la cohésion par brasage du couple matrice-taillant (PDC).

Le forage nécessite des outils avec de bonnes propriétés mécaniques, Les carbures cimentés sont les mieux placés pour satisfaire aux exigences des propriétés de service sévères imposées dans le domaine du forage pétrolier, nécessitant la mise au point de nouveaux matériaux, plus performant, possédant une très grande résistance à l'usure et à l'érosion (compromis dureté-ténacité).

L'une des techniques utilisées dans l'élaboration de ces outils de forage a géométrie complexe est l'infiltration non conventionnelle, où un liant est introduit pour remplir le système de pores interconnectés des mélanges de poudres libres et créer un consolidé avec de bonnes propriétés mécaniques. Cette technique est devenue un procédé très important qui combine les meilleures propriétés des éléments métalliques et non métalliques, nécessitant une bonne maîtrise de ses paramètres, tels que le type de poudres appliquées, la granulométrie, le liant utilisé, le temps et le cycle de frittage, et le flux utilisé.



Au cours de l'utilisation des outils de forage et malgré les bonnes propriétés mécaniques de leurs parties actives, ces dernières peuvent subir des endommagements, ce qui met fin à leur fonctionnement et seront par la suite remplacés par de nouveaux outils.

Dans l'optique d'allonger la durée de vie de ces outils de forage, on propose une réparation de la partie active par rechargement, ce qui rendra l'outil réutilisable, et minimisera les dépenses des entreprises.

Ce travail comporte deux parties, une partie théorique et une partie expérimentale :

Le premier chapitre : est un ensemble de notions fondamentales de la métallurgie des poudres, il a pour objectif de définir les procédés d'élaboration à partir des poudres.

Le deuxième chapitre : concerne le rechargement dur, et les techniques de brasage utilisés, notamment le TIG qui fera objet de cette étude.

Le troisième chapitre : c'est la partie expérimentale de cette étude, comporte l'ensemble des matériaux utilisés, les techniques expérimentales, et les essais de caractérisation des échantillons.

Le quatrième chapitre : ce chapitre contient les résultats de la partie expérimentale suivie d'une discussion et interprétation des données obtenues, et une comparaison entre les échantillons.

## CHAPITRE I : LA METALURGIE DES POUDRES ET LES TECHNIQUES D'INFILTRATION

---

IL est important de rappeler les bases du frittage en général et celui en phase liquide en particulier , ces notions de bases de la métallurgie des poudres s'avèrent nécessaires pour permettre une bonne compréhension des phénomènes de la densification par infiltration.

Nous allons donc citer les divers types de frittage, leur processus , les techniques utilisées et les paramètres nécessaire . ainsi que le procédés d'infiltration non conventionnel étant l'objet de cette étude.

Ce chapitre contiendra donc des rappels sur la métallurgie des poudres et le frittage, et une présentation de l'infiltration non conventionnelle dans le cadre de l'elaboration des composites a matrice métallique.

---

## **I.1.Généralités sur le frittage :**

### **I.1.1.Définition**

Le frittage est un procédé qui consiste à consolider un matériau par traitement thermique, à partir d'un solide pulvérulent, sans mener à la fusion. Par ailleurs, le traitement thermique (frittage) se fait à une température inférieure à la température de fusion du produit. Sous l'effet de la chaleur, les grains se soudent entre eux entraînant la cohésion de la pièce et en remarquant aussi la formation des joints de grains. Ces grains commencent à se grossir et les joints de grains disparaissent par le phénomène de coalescence. Après ce traitement thermique, on obtient une pièce dense. Cette méthode permet d'éliminer la porosité et augmente la densité. Donc le but est d'augmenter la propriété mécanique par la densification du matériau. [1]

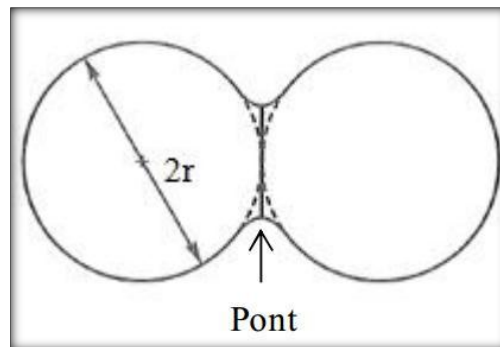
Le frittage est généralement décrit grâce à l'évolution de la porosité "p" ou de la densité relative "dr" (appelée aussi taux de densification, ou compacité) :  $p = \frac{V_p}{V}$  ;  $dr = \frac{V_{th}}{V} = 1 - p$  (1)

où  $V_p$  correspond au volume des pores,  $V$  est le volume total (volume des pores et volume de solide) et  $V_{th}$  est le volume théorique du matériau à densité maximale, soit le volume de solide.

[2]

Donc il est accompagné d'un retrait (réduction des dimensions de la pièce) et d'une densification (réduction de volume de la pièce). Le cycle de frittage comprend généralement une période de chauffage à la température de frittage, ensuite une période isotherme et finalement un refroidissement. Les vitesses de chauffage et refroidissement doivent être contrôlées pour éviter une fissuration, surtout dans les matériaux céramiques. L'élimination

des lubrifiants et liants ajoutés à la poudre avant la mise en forme se déroule au début de la période de chauffage.



FigI.1.Schéma illustrant la formation de ponts entre deux particules au début du frittage [5]

### **I.1.2.Stades de frittage**

#### a- Stade initial

Durant le stade initial, les ponts se forment entre les particules. Cette création des ponts est accompagnée d'une baisse importante de l'énergie de surface, ainsi que des surfaces libres. La structure des pores est, à ce moment, ouverte et complètement interconnectée.

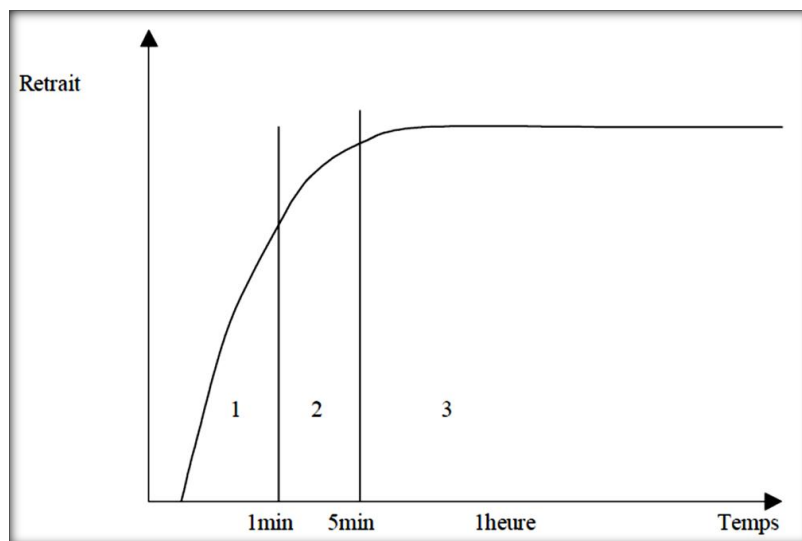
#### b- Stade intermédiaire

Ce stade est caractérisé par une importante densification qui s'accompagne d'un grossissement de grain et une importante croissance du diamètre des ponts. Il est à noter que pratiquement toute la densification de l'agrégat se produit durant ce stade. A ce stade, la majorité des pores restent interconnectés et possèdent une structure cylindrique. Il devient à ce moment plus facile de considérer l'ensemble d'un point de vue particules-pores plutôt que d'un point de vue de ponts entre particules. On observe les mêmes mécanismes de transport de matière que dans le stade initial, en particulier la diffusion volumique. Les pores

prennent une forme cylindrique de taille uniforme et se localisent au niveau des joints de grains de forme polyédrique.

#### c- Stade final

Le stade final est un processus très lent où les pores auparavant de forme cylindrique, s'effondrent pour former des pores complètement sphériques, rétrécissent au fur et à mesure par mécanisme de transport en volume. Ils se localisent au niveau des points triples des joints de grains avant de s'isoler complètement à l'intérieur des grains. La porosité est à ce moment entre 10% et 5% et la densification peut être considérée comme étant importante. Un temps de frittage prolongé provoque la coalescence des pores par un phénomène dit d'Oswald-Ripening. Durant ce stade, les mécanismes de transport de matière en surface demeurent actifs donnant des pores sphériques. Par un maintien suffisamment long, nous pouvons atteindre la densité théorique.



FigI.2. Les trois stades du frittage en phase liquide : réarrangement (étape 1), dissolution-précipitation (étape 2), et coalescence (étape 3) [3]

### I.1.3.Types de frittage

#### a- Frittage en phase solide

La poudre est chauffée à haute température mais aucun des constituants ne fond. Les liaisons entre les particules se font principalement par déplacement d'atomes, on parle de diffusion de matière à l'état solide. La force motrice de ce processus spontané, activé par la température, est la réduction de la grande énergie de surface présente dans le matériau au début du frittage.

Cette réduction est opérée par différents mécanismes de transfert de matière, selon le système en question.

#### b- Frittage en phase liquide

Dans ce procédé de frittage l'un des constituants (minoritaire) du mélange de poudres passe en phase liquide. Comme dans le frittage en phase solide la réduction de l'énergie libre est la force motrice. La propriété de mouillage de la phase solide par la phase liquide est importante pour réaliser le frittage. La densification durant le frittage en phase liquide se déroule en 3 étapes

Réarrangement : La première étape du frittage en phase liquide est caractérisée par une augmentation très rapide de la densité apparente du matériau .

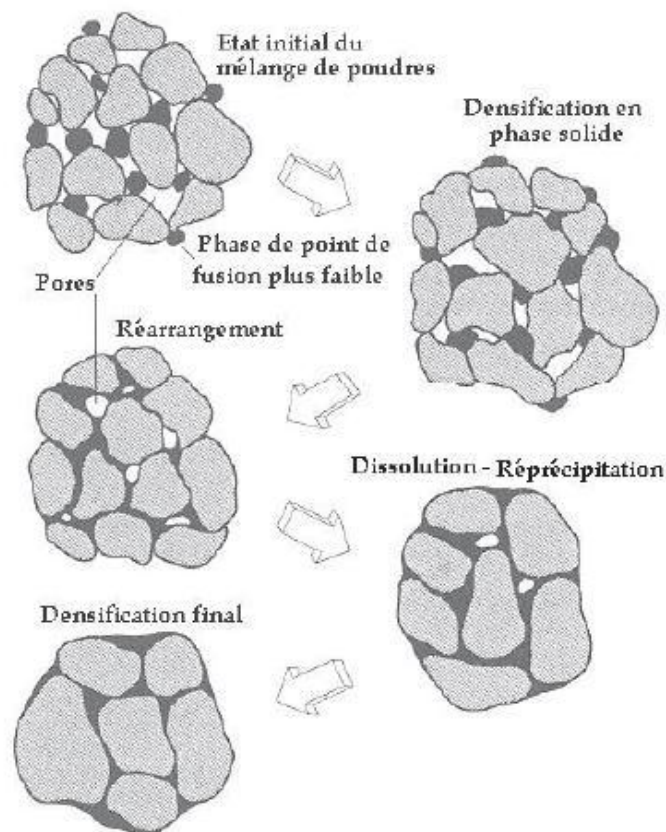
Ce phénomène est lié à l'apparition de la phase liquide qui, jouant le rôle de lubrifiant, permet le glissement des particules les unes sur les autres sous l'effet des différentes contraintes existant au sein de l'empilement. Cette étape n'intervient pratiquement pas lors du frittage en phase solide, pour peu que la mise en forme ait été effectuée correctement.

Dissolution-précipitation : À la fin du réarrangement, les particules en contact sont séparées par un film fin de liquide. à pression, température et composition constantes. Le potentiel chimique des espèces présentes dans la phase solide située du côté convexe de l'interface solide/liquide se trouve augmenté. Cette augmentation est liée, pour les grains sphériques de

rayon  $r$ , à la tension interfaciale il y a un ajustement de forme des grains qui conduit à une élimination importante de pores.

Grossissement des grains : Le frittage en phase liquide s'accompagne d'un grossissement des grains dû à la dissolution des petites particules et à leur précipitation sur les plus grosses.

Cette coalescence par mûrissement d'Ostwald est régie par des lois cinétiques analogues à celles vues au frittage en phase solide. Dans la majorité des cas, le liquide se comporte comme une impureté qui ralentit la migration des joints (croissance contrôlée par la diffusion entre les grains). [5] [14]



FigI.3. Étapes classiques durant le frittage en phase liquide du mélange de poudres [5]

## I .2.Procédés d'infiltration conventionnels

## **I.2.1. Techniques conventionnelles d'infiltration**

Plusieurs techniques d'infiltration furent utilisées tout au long des processus de développement de la technologie d'infiltration. Cependant, selon le système concerné et les caractéristiques de qualité du produit, des outils, les dispositifs, ou le type de moulages utilisés peut nous amener à choisir l'une ou l'autre.

L'infiltration par immersion partielle : Le corps squelettique est en partie immergé dans un bain de métal en fusion contenu dans un creuset. Le liquide est aspiré et s'élève dans le matériau compacté sous l'action des forces capillaires. Cette montée de fluide expulse les gaz contenus dans les pores. Le bain peut être dosé pour remplir exactement le volume occupé par les pores dans le solide.

L'infiltration par immersion totale : Le squelette est complètement immergé dans le métal liquide. La pénétration du liquide se produit de tous les côtés vers le cœur du matériau. Pour éviter l'emprisonnement des gaz dans le corps infiltré, cette immersion doit être effectuée lentement ou par étapes. Cette infiltration peut être réalisée sous vide pour faciliter le dégazage.

Infiltration par contact : L'infiltrant est initialement placé en contact avec le matériau à infiltrer. Après la fusion de l'infiltrant, un film de liquide se forme et pénètre les pores. Si l'infiltrant est placé au-dessus du corps squelettique, la tension superficielle peut répandre le film au-dessus de toutes les faces du squelette avant que la pénétration vers l'intérieur ne se produise. L'évacuation des gaz contenus dans les pores est facilitée en mettant l'infiltrant sous le squelette ou sous un vide. La quantité exacte du métal infiltrant pour remplir les pores peut être calculée, de ce fait on doit utiliser un réservoir contenant le métal liquide. Cette méthode est une adaptation de frittage classique en phase liquide.



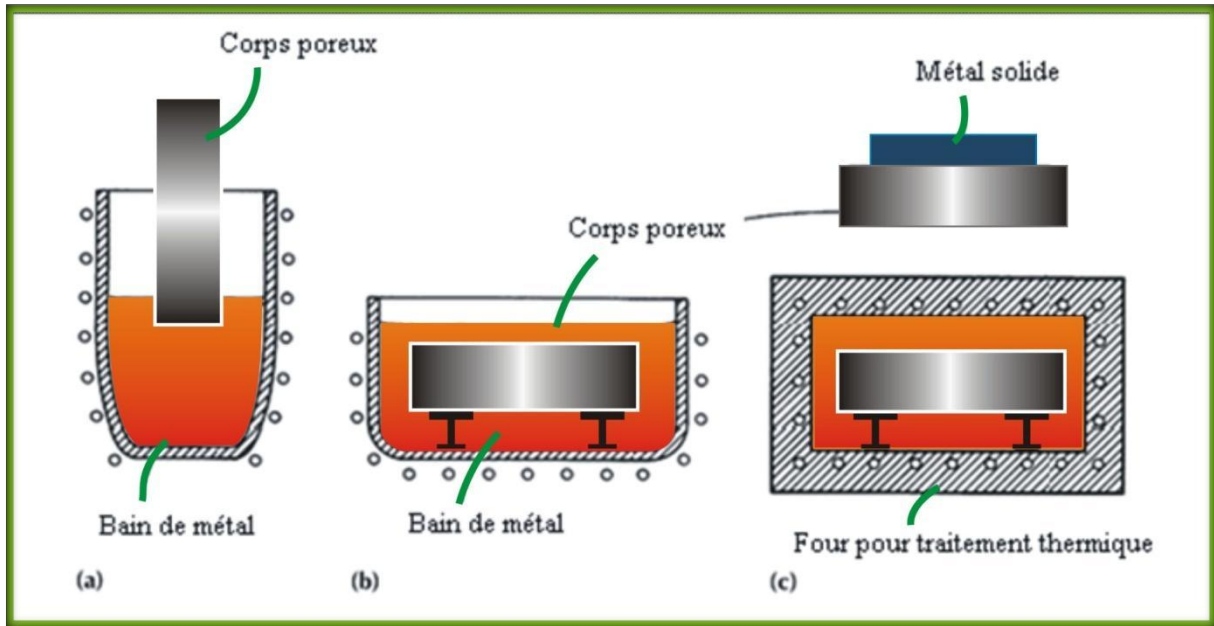


Fig.I.4. les différentes méthodes d'infiltration par capillarité [4]

Infiltration sous gravité : Dans cette méthode, des forces capillaires sont augmentées par la pression externe due à la présence d'un réservoir contenant l'infiltrant en fusion au-dessus du matériau à infiltrer qui à son tour est contenu dans un moule. La force auxiliaire est une fonction de la quantité du liquide contenue dans le réservoir ; si cette quantité est assez importante plusieurs pièces peuvent être infiltrées en même temps.

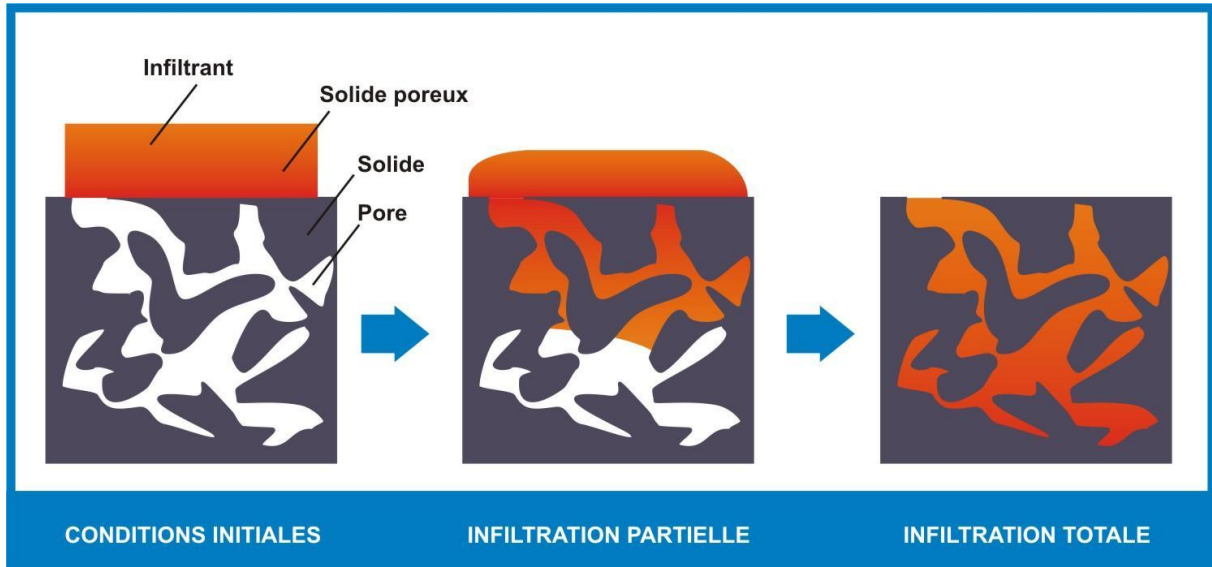
La séparation du produit infiltré de l'infiltrant est des fois nécessaire pour éviter la présence d'une quantité de flux assez importante. Cette séparation peut être soit en graphite, soit une couche de poudres assez grossières, ou un feutre pour faciliter la canalisation et le passage du métal liquide. Si cette séparation à la même composition chimique que le matériau à infiltrer, le liquide peut dissoudre une partie de celle-ci et devenir partiellement saturé en élément d'alliage, de ce fait il empêche l'érosion extérieure du produit infiltré. Ce procédé convient à la production de pièce de précision comme les lames de turbine La séparation du produit infiltré de l'infiltrant est des fois nécessaire pour éviter la présence d'une quantité de flux assez importante. Cette séparation peut être soit en graphite, soit une couche de poudres assez

grossières, ou un feutre pour faciliter la canalisation et le passage du métal liquide. Si cette séparation à la même composition chimique que le matériau à infiltrer, le liquide peut dissoudre une partie de celle-ci et devenir partiellement saturé en élément d'alliage, de ce fait il empêche l'érosion extérieure du produit infiltré. Ce procédé convient à la production de pièce de précision comme les lames de turbine. [4] [7]

Infiltration sous pression : Quand les forces capillaires sont insuffisantes en raison d'une mauvaise mouillabilité, de la taille et de la distribution peu convenable de pore, ou de la grande viscosité du liquide, le corps solide peut être infiltré par le métal en fusion uniquement avec l'aide d'une force externe considérable. Cette force peut être assurée par un gaz ou un liquide pressurisé, ou un piston, et doit exercer une pression sur le métal liquide. L'infiltrant en fusion peut être injecté sur n'importe quel côté du matériau à infiltrer, bien que le dessus ou le bas soient habituellement les surfaces de contact les plus utilisées. Le métal liquide doit être contenu dans un récipient à pression approprié avant et pendant l'imprégnation. Cette méthode s'applique aux systèmes dans lesquels l'infiltrant en fusion se solidifie avant que la pénétration soit complète, en raison des changements de la composition causés par la diffusion. [4] [14]

### **I .2.2.Mécanismes d'infiltration conventionnelle**

Durant l'infiltration, c'est la phase liquide (métal en fusion) qui remplit le système de pore d'une phase solide. Ce procédé est semblable au frittage en phase liquide (voir frittage en phase liquide), dans lequel l'un des constituants de la poudre fond et se disperse dans tout le compacté, les pores sont remplis. La densification est assurée par le retrait volumique et le réarrangement des grains. Pendant l'infiltration, le liquide qui vient de l'extérieur entre en contact avec le solide poreux, et c'est les forces capillaires qui le tirent vers l'intérieur. [4]



FigI.5 Mécanisme d'infiltration [5]

En outre, dans beaucoup de systèmes concernant les métaux, la pénétration est suivie d'une deuxième étape de l'infiltration : quand le liquide remplit les pores et réagit avec le solide. L'infiltration réussie d'un solide poreux (squelette) avec une phase liquide exige que toute l'énergie surface-libre du système après infiltration soit inférieure à celle évaluée avant infiltration. Le total inclut les énergies de surface-libres des phases solides et liquides, aussi bien que l'énergie inter faciale entre le solide et le liquide . Cette relation est exprimée par la méthode de Young:

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos\theta$$

D'autres conditions, autres que l'angle de contact ' $\theta$ ', doivent être remplies pour assurer une bonne infiltration du produit fritté. Ces conditions ont été discutées par beaucoup de chercheurs et sont présentés comme suit :

Le squelette : la matrice de poudre compactée (squelette) doit maintenir son réseau de particules ou de grains à l'état solide tout au long du processus d'infiltration. Elle devrait

fournir un système de pores interconnectés et des canaux d'une certaine taille afin de faciliter l'action de la capillarité. Les pores fermés pouvant entraver le passage du liquide, doivent être évités dans la plupart des cas.

**Infiltrant :** il doit avoir une température de fusion plus basse que celle du squelette. La fluidité élevée du liquide est souhaitable parce qu'elle facilite la force d'entraînement de la tension superficielle. Les caractéristiques de la dilatation thermique de l'infiltrant peuvent affecter éventuellement les propriétés mécaniques du corps infiltré. Si la couche de l'infiltrant qui entoure le squelette infiltré se dilate pendant la solidification rapide, la résistance du produit fini peut être réduite; toutefois l'inverse peut être observé si la couche de l'infiltrant se contracte durant le refroidissement. Ce phénomène a été observé pour le fer infiltré avec le cuivre et le bismuth, respectivement

**Compatibilité de système :** L'infiltrant liquide idéal devrait avoir un angle de contact le plus proche du zéro, et les réactions entre le solide et le liquide devrait être minimisées. Quelques systèmes de métaux réfractaires remplissent cette condition. Si les produits de réaction formés pendant l'infiltration (des composés intermétalliques, eutectiques, ou des solutions solides) occupent un certain volume qui est égal ou plus grand que le volume initial, (squelette et infiltrant), la pénétration du liquide est arrêtée avant qu'elle ne soit accomplie. On observe le même phénomène, si les produits de réaction sont dissouts dans la phase liquide, ce qui rend l'infiltrant moins fluide (plus visqueux). Dans l'un ou l'autre cas, l'infiltrant reste à l'extérieur du compacté et la densification n'est pas réalisée (les pores restent vides).

**La solubilité :** Quand la formation de solution solide entre les composants est minimale à de basses températures et quand les conditions d'équilibre à la température d'infiltration conduisent à une dissolution minimale du squelette dans l'infiltrant liquide : les effets de la solubilité sont généralement avantageux. Dans ce cas une température plus basse

suffit largement à assurer une bonne infiltration, elle peut être légèrement au-dessus du liquidus de l'alliage infiltrant. Des liens intenses aux interfaces entre les deux phases sont formés, et une bonne densification est obtenue.

Si l'infiltrant dissout un grand nombre d'éléments du squelette, la vitesse d'infiltration peut être abaissée, et un temps plus long est nécessaire pour que la pénétration soit achevée. En outre, au moment où l'infiltrant liquide entre en contact avec la surface extérieure du corps squelettique celle-ci peut s'éroder.

La pré-saturation de l'infiltrant avec les éléments métalliques du squelette peut remédier à ce problème. Un alliage cuivre-fer dans l'infiltration des squelettes de fer est un exemple typique. Quand la solubilité du solide dans le liquide est grande, elle entraînera une détérioration de la stabilité du compacté. Dans ce cas, un réseau de pores plus grands et un temps d'infiltration plus court sont préconisés. Microstructure : l'intégrité structurale du corps infiltré est intimement liée à la microstructure. Si l'angle de dièdre à l'intersection entre deux grains de la phase liquide est proche du zéro, le métal liquide tend à pénétrer le long du joint de grain. C'est l'exemple du système d'alliage lourd W-Ni-Cu. Pendant l'étape de pénétration de l'infiltrant (alliage de nickel-cuivre), les pores fermés peuvent se remplir. Ce mécanisme peut détruire les contacts entre les grains de tungstène et entraîne une perte de la cohésion du squelette.

En conséquence, l'expansion de volume peut se produire pendant l'infiltration, alors que certains des pores originaux restent non remplis. De nouveaux pores peuvent également être produits par le réarrangement des particules ou par les réactions entre les phases Liquide - solides.

Le changement dimensionnelles du squelette pendant l'infiltration est difficile à contrôler pour les systèmes ayant un angle dièdre zéro, et peut même exiger le confinement du corps

compacté dans un moule. De plus, les propriétés éventuelles du corps infiltrés peuvent être affectées par le niveau de cohésion du squelette qui reste après pénétration de la phase liquide.

Atmosphère sous vide : L'infiltration capillaire peut être augmentée en la réalisant sous vide. Des impuretés sont plus volatiles est sont donc plus aisément enlevées de l'infiltrant et de la surface libre du solide. Pour des infiltrants d'alliage, la température de solidus peut être augmentée, et la solidification prématurée dans le canal peut se produire si la composition atomique changée en raison d'une pression de vapeur élevée. Dans ce cas, l'aspiration de l'air doit être évitée, et une pression doit être appliquée dans un conteneur scellé pendant la pénétration de l'infiltrant en fusion dans le squelette. [7] [8] [9]

### **I.3.Procédé d'infiltration non conventionnel**

Contrairement à l'infiltration conventionnelle les poudres ne sont pas comprimées c'est à dire elles ne forment pas initialement un squelette ce qui leurs donne un comportement différent au contact de l'infiltrant.

L'existence des pores interconnectés entre les poudres libres permet au métal ou alliage qui a un bas point de fusion l'attraction des particules par capillarité qui devient la force motrice de l'infiltration causant la réduction de l'énergie surfacique interfaciale. Le liquide recouvre la phase solide des poudres de la matrice. Ce processus peut prendre place sans retrait substantiel .

Et pour avoir un bon flux capillaire nous devons vérifier :

La porosité du mélange de poudre : généralement, la plus faible porosité est requise dans ce genre de procédé. Elle est réalisée avec une distribution granulométrique adéquate nécessitant des vibrations lors du remplissage du moule. [5]

La durée d'infiltration : qui doit être courte elle est définie par la forme des particules ainsi que par leur surface spécifique. Bien que les particules sphériques correspondent à une valeur faible, mais du point de vue activité de poudres il est plus favorable d'utiliser des poudres de formes irrégulières, auxquelles correspondent des énergies surfaciques élevées, pouvant favoriser la consolidation à l'état solide avant l'arrivée de l'infiltrant liquide et la mouillabilité après.

La mouillabilité : la plus élevée possible du solide par l'infiltrant liquide elle définit entre un solide en contact d'un liquide quand la nouvelle interface qui se forme. (solide-liquide et liquide-vapeur) possède une énergie plus faible que celle d'origine (solide-vapeur). C'est-à-dire  $\gamma_{sl} + \gamma_{lv} \leq \gamma_{sv}$  ; où  $\gamma_{sl}$ ,  $\gamma_{lv}$  et  $\gamma_{sv}$  représentent respectivement les énergies surfaciques des interfaces solide-liquide, liquide-vapeur et solide-vapeur. [5]

## CHAPITRE II : TECHNIQUES DE RECHARGEMENT

---

La liaison cermet/métal est très importante dans un PDC , il faut donc une bonne méthode pour assurer un bon assemblage lors du rechargement. Il est important de comprendre les mécanismes de liaison au niveau atomique , les types d'interactions entre les atomes ainsi que les forces responsables de l'adhésion.

Dans ce chapitre nous allons voir les diverses techniques de rechargement qu'on peut appliquer sur les pastilles endommagées, tel que le brasage oxyacétylénique , par laser et aussi le TIG qui est la méthode utilisé dans cette étude.

---



## **II.1.Méthodes d'assemblage cermet/metal**

Deux méthodes références sur lesquelles de nombreuses techniques pour assembler un métal et un cermet et/ou une céramique en sont dérivées

- a. La première est l'assemblage à l'état solide : que ce soit par diffusion ou par thermocompression, cette technique consiste à mettre les matériaux à assemblé en contact ou sont déformés plastiquement dans un four et sous une atmosphère contrôlée, en faisant varier les paramètres opératoires selon les résultats souhaités.
- b. La seconde est le brasage : elle fait intervenir une phase liquide que ce soit un métal ou un alliage sous forme d'un métal d'apport de poudre ou de couche insérées entre les matériaux à brasés.

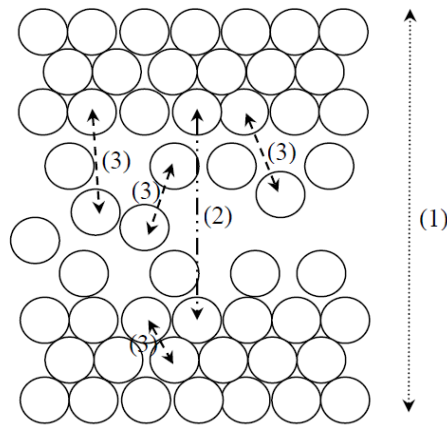
### **II .1.1.Mécanisme de liaison cermet/métal**

Lorsque deux surfaces solides entrent en contact, elles subissent des forces d'attraction de nature différentes :

- Des forces à courte portée, originaire des liaisons chimiques de type intramoléculaire (ionique, covalente, métallique) de l'ordre de 0,1-0,2nm.
- Des forces à moyenne portée, qui correspondent à des interactions de type Van der Waals elle peut atteindre quelques nm.
- Des forces à longue portée d'origine électrostatique, qui sont relié aux mécanismes de polarisation.

Ces forces deviennent mesurables à partir d'une certaine distance. Elles agissent dans et autour des zones de contact, de sorte que tout se passe comme si les deux solides étaient pressés l'un contre l'autre par une force effective P. cette dernière représente la force d'adhésion ; elle dépend des propriétés mécaniques et géométriques des deux solides. La

force d'adhésion ainsi définie n'est pas directement mesurable. Ce qui est mesurable expérimentalement, c'est la force nécessaire pour séparer les deux solides, c'est à dire, leur adhérence. Cette force est généralement plus mal définie que la précédente, et sa



FigII.1 Différents types d'interaction ; (1) courte portée, (2) moyenne portée et (3) longues portées [5]

valeur dépend beaucoup des conditions expérimentales choisies (type d'éprouvette, état de surface, propriétés des matériaux en présence etc...). Pour les forces à courte portée, elles peuvent être vécrantées à la surface des solides par les impuretés adsorbées, l'adhésion des solides a souvent été attribuée aux forces de van der Waals.

Dans le cas des assemblages cermet/métal traité dans cette étude, l'élaboration se fait à haute température, ce qui va permettre aux forces à courte distance de jouer un rôle prépondérant. Pour cela, il doit exister un contact intime entre les deux matériaux[5]

Il faut noter que Les mécanismes de liaisons cermet/métal passeront par 3 étapes; ou les deux premières sont à rapprocher de ceux du frittage en phase liquide vu que la phase liquide est représentée par la fusion du métal d'apport afin de remplir le vide entre les matériaux de base et assurer la jonction. On a :

Etape 1 :

Diffusion superficielle le long des aspérités, Diffusion en volume, Evaporation-condensation,  
Diffusion aux joints de grains, Fluage.

Etape 2 :

Nous avons la création de liaisons chimiques avec formation des nouvelles phases aux interfaces.

Etape 3 :

Dans cette étape nous avons l'évolution des propriétés des matériaux qui est liée à la formation de la liaison et aux contraintes résiduelles générées, entre autres, par la différence de coefficient de dilatation des deux matériaux. Sachant que le cermet est plus souvent le solide rigide indéformable, la force principale qui peut promouvoir la liaison est la force induite par la réduction de surface pendant la formation de l'interface. [5]

## **II.2. Le brasage**

### **II.2.1. Définition**

Le brasage est une technique d'assemblage faisant intervenir une phase liquide par fusion d'un métal d'apport dans l'espace situé entre les pièces à assembler, (dans notre cas entre l'acier/multi-matériaux et le WC-Co). Le métal d'apport doit avoir une température de fusion inférieure à celles des matériaux de base. Leur réunion se fait donc par mouillage. Contrairement au soudage, les surfaces à assembler ne participent pas à la création du bain de fusion. [5]

Dans notre étude, il est important d'utiliser la notion soudo-brasage que la notion brasage.

Car, contrairement au soudo-brasage, le métal d'apport remplit le gap et forme la jonction par capillarité, tandis que dans le soudo-brasage, le métal d'apport remplit le vide entre les matériaux à assembler placés bout à bout.

Le soudo-brasage est une méthode d'assemblage simple et peu onéreuse, particulièrement bien adaptée à l'assemblage des matériaux réfractaires. Pour les cermets, on différencie deux types possibles pour le soudo-brasage : tendre et dur (fort)

Dans le premier cas, la température du travail est relativement basse, le point de fusion du métal d'apport utilisé est inférieure à 425°C. Dans ce cas, le métal d'apport est en général à base de métaux lourds (Zn, Pb, Cd, Sn...), Par ailleurs, et pour le brasage fort la température de travail est souvent supérieure à 425°C. Dans ce cas, le métal d'apport est un alliage à base de Cu, Ag, et Ni

Dans l'application des outils de forage, l'assemblage est réalisé par brasage fort.

Brasage fort

Il existe deux grandes catégories de procédés de brasage fort suivant l'utilisation ou non de flux :

Le brasage fort sans flux

Les procédés de brasage sans flux, bien qu'exigeant l'utilisation des techniques de protection autre que le flux, s'avèreraient plus économiques du point de vue des coûts de fabrication par rapport au brasage utilisant un flux du fait de :

La suppression du flux, coûteux en lui-même.

La suppression des processus d'enduction et de nettoyage dans les étapes de brasage.

La diminution des problèmes de corrosion des pièces en acier constituant les fours et les supports d'assemblage.

Deux types de brasage sans flux existent :

Le brasage sous vide est utilisé pour l'assemblage de certains échangeurs utilisés dans l'industrie automobile.

Le brasage sous atmosphère inerte : est également utilisé mais requiert quelques conditions particulières. Il est par exemple nécessaire d'ajouter certains éléments d'alliages au placage (Bi, Sr, Ba...) pour améliorer sa mouillabilité et sa fluidité.

Le brasage fort avec flux

Son rôle est d'éliminer la couche d'oxyde présente à la surface des pièces, en favorisant le mouillage du métal d'apport sur le métal de base et en prévoyant une éventuelle oxydation des sites. À la base, le flux est une suspension aqueuse ou une pâte à base de chlorures et de fluorures alcalins et alcalino-terreux qui se déshydrate puis fond à une température inférieure à la température de brasage. Le métal d'apport doit au préalable avoir été dégraissé et décapé.

Il est conseillé dans la plupart des cas d'éliminer le flux résiduel à la fin du brasage.

Quatre procédés de brasage avec flux sont utilisés :

1. Le brasage à la flamme ou soudo-brasage
2. Le brasage au trempé en bain de flux
3. Le brasage au four ou par induction
4. Le brasage sous gaz inerte avec flux non corrosif

## II.2.2. Brasage oxyacétylénique

La connexion entre les matériaux de base est assurée grâce à une source de chaleur produite par une réaction chimique de deux gaz, l'oxygène ( $O_2$ ) et l'acétylène ( $C_2H_2$ ).

. Le brasage de WC-Co aux aciers est généralement un brasage semi tendre avec une température dépassant les  $600^\circ C$ .



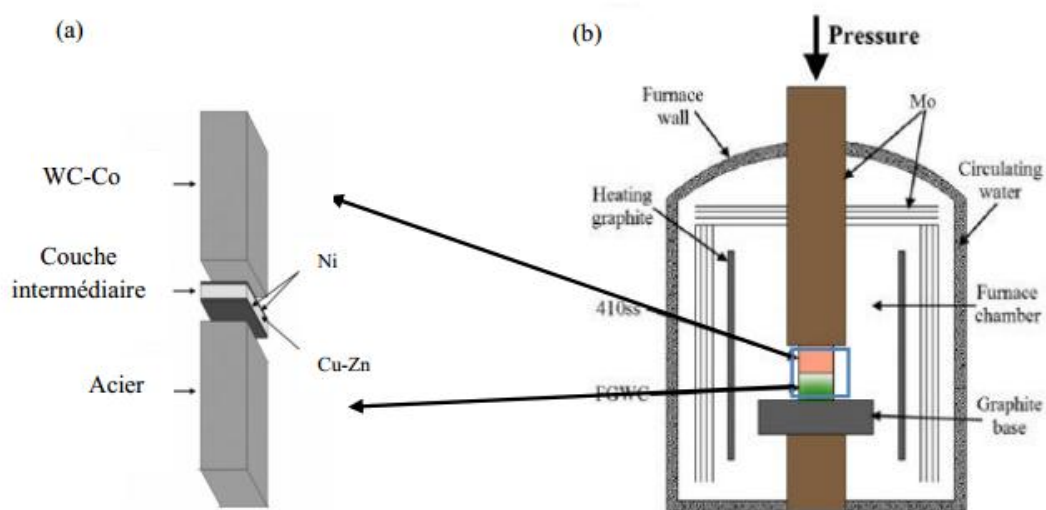
FigII.2 brasage oxyacétylénique des outils de forage prise au sein de l'entreprise ALDIM. [5]

Très peu sont les travaux effectués en utilisant cette technique. Nous pouvons citer celui d'Uzkut et al. sur le brasage de WC-Co avec l'acier de cimentation destiné aux outils de forage, le brasage de WC-Co à l'acier SAE 1045 en employant une brasure à base d'Ag, Cu, Zn et Ni ou la température de travail ne dépassait pas les  $775^\circ C$ . Ils ont montré qu'avec une vitesse de refroidissement faible un joint brasé de bonnes qualités peut être obtenu. De plus, la diffusion du Ni de la brasure vers l'acier sur l'interface acier/brasure provoque une augmentation de la dureté et des propriétés mécaniques sur cet interface. Idem pour

l'interface brasure/WC-Co ou la migration du Co engendre l'amélioration de la dureté de la brasure juste à proximité de l'interface.

### II.2.3. Brasage par diffusion dans un four sous vide

L'assemblage de carbure cimenté (WC-Co) à l'acier peut être obtenu par différentes techniques. La réduction des contraintes thermiques lors du refroidissement est peut-être l'élément primordial pour obtenir une jonction plus résistante. L'utilisation d'une couche intermédiaire favorisant ainsi ces contraintes les dissipe grâce au coefficient de dilatation thermique du matériau choisi. Cette technique est basée sur l'introduction d'un élément intermédiaire entre les matériaux de base à savoir le WC-Co et l'acier, l'élément intermédiaire peut être sous forme de poudre comme il peut être sous forme de couche d'un métal de transition (Ni, Cr, Ti, Cu...).



FigII.3Schéma illustratif de la technique de brasage sous vide (a) : Positionnement de la couche intermédiaire pour le brasage par diffusion, (b) : four de brasage sous vide.

### II.2.4. Brasage laser

Conventionnellement, le brasage est la technique la mieux adoptée pour assembler les céramiques et les cermets aux métaux. Ces matériaux sont généralement chauffés à une

température élevée afin d'obtenir la fusion du métal d'apport ou de la couche intermédiaire. Dans le but d'assurer un chauffage localisé et ne pas affecter les matériaux de base, la technique de brasage par fuseau laser est inventée. Elle est basée sur la diminution de l'étendue des zones thermiquement affectées que ce soit dans l'acier ou dans le cermet par la focalisation du fuseau laser sur le joint brasé. Le fuseau est orienté vers la brasure et légèrement décalé vers l'acier. La température est bien contrôlée par ce procédé ainsi que le temps d'exposition par une table de cofonde assurant le bon déroulement de l'opération de brasage. [5] [12]

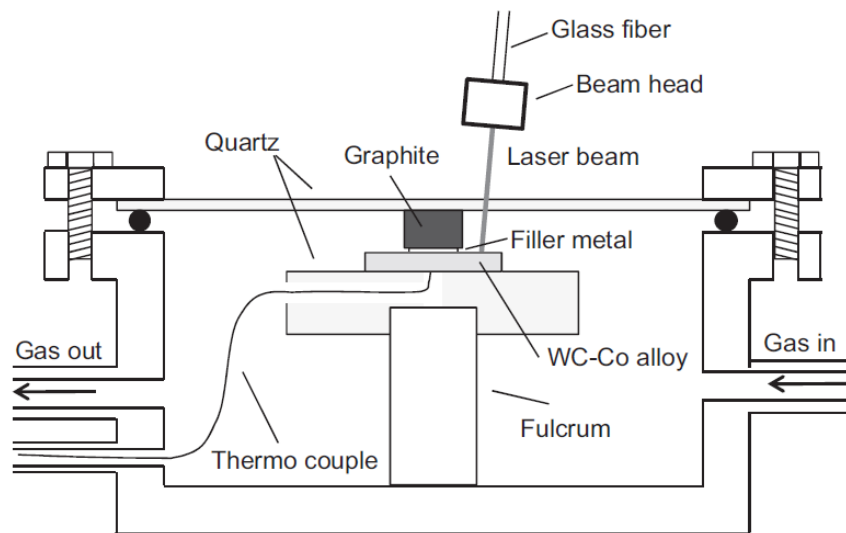
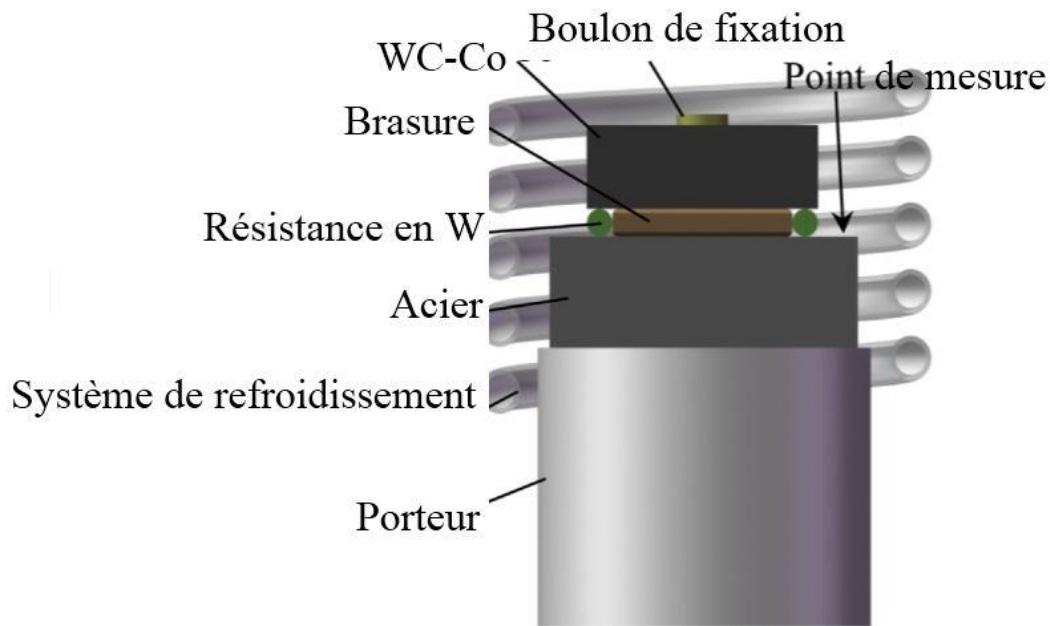


Fig2.4 Principe de fonction du procédé de brasage laser présenté par Nagatsuka [5]

## II.2.5. Brasage par induction

En termes d'application, c'est une technique relativement nouvelle pour l'assemblage de WC-Co aux aciers/ Elle consiste à boulonner le WC-Co avec l'acier en insérant la brasure entre eux (sandwich). La température de travail est assurée grâce à une résistance hélicoïdale à base de tungstène entourant les pièces à braser et qui par induction magnétique provoque le chauffage comme il est illustré sur la figure ci-dessous :





FigII.5 Schéma illustratif du principe de fonctionnement du  
Brasage par induction. [5]

Les joints obtenus en utilisant cette technique sont des joints de grande qualité. Jaing et al ont pu braser par induction le WC-Co à l'acier 35CrMn, en utilisant une brasure sous forme d'une couche intermédiaire à base d'Ag, Cu, Zn et Ni comme il est illustré sur la figure. III.14. La microstructure de la brasure a montré la présence de trois phases distinctes, la première riche en Ag tandis que la deuxième est riche en Cu, il y'a aussi la troisième qui est un eutectique de ces deux phases.

### II.2.6. Brasage TIG

Le brasage TIG, est un procédé de soudage sous atmosphère inerte ou contrôlée avec électrode de tungstène non fusible ou les matériaux de base ne participent pas à la fusion. Il produit des assemblages d'un aspect irréprochable, qui dans la plus par des cas, ne nécessitent aucune reprise ultérieure. Il s'applique à des matériaux aussi divers que les aciers, les alliages de nickel, le titane, le zirconium, les alliages d'aluminium et de cuivre. Mais sa productivité est limitée

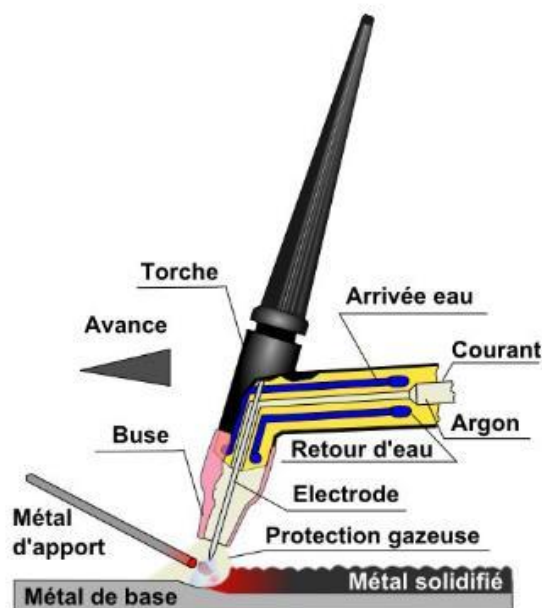
par son faible potentiel de pénétration (3 mm maximum pour une soudure bord à bord) c'est-à-dire sans chanfrein. [10] [11]

## II.3.SOUDAGE TUNGSTEN INERT GAZ (TIG) :

### II.3.1.Mode de fonctionnement

Un arc électrique est généré entre l'électrode de tungstène réfractaire et la pièce à souder.

L'électrode concentre la chaleur de l'arc tandis que le métal de la pièce à souder fond, formant ainsi le bain de fusion. Le métal fondu de la pièce à souder et l'électrode ne doivent pas entrer en contact avec l'oxygène présent dans l'atmosphère. On utilise alors un gaz de protection inerte comme l'argon, par exemple Si l'ajout de métal s'avère nécessaire, on ajoute directement au bain de fusion, du fil d'apport qui fond grâce à l'énergie générée par l'arc électrique Ce procédé à l'avantage de réaliser des cordons lisses, d'un bel aspect, exempts de défaut de surface, les propriétés mécaniques du joint sont donc excellentes . [6]



FigII.6Principe du procédé de soudage TIG[15]

### **II.3.2.Paramètres de soudage Tungsten Inert Gaz (TIG)**

La source de courant : fournit du courant de soudage qui peut être CA, CC ou pulsé, et une tension de soudage qui permet l'amorçage et le maintien de l'arc.

Le gaz de protection : est dirigé vers l'extrémité de l'électrode au tungstène afin de maintenir l'arc, de protéger le bain de soudage ainsi que l'électrode.

La torche : munie d'un faisceau de câbles et tuyaux distribuant le gaz, parfois l'eau.

La tête de torche maintenant l'électrode réfractaire qui assure le transfert de courant. Ceci permet à l'arc de s'établir et de se maintenir allumé.

L'électrode non fusible au Tungstène : est montée sur la torche TIG et joue un rôle important dans le procédé TIG. Pour obtenir de bons résultats il faut choisir parmi les différents types et les différents diamètres.

La masse : doit être parfaite afin d'assurer la fermeture du circuit électrique et garantir ainsi les amorçages et la stabilité de l'arc

Types de courants :

Courant Alternatif (CA) : En courant alternatif, le courant de soudage alterne entre les polarités positive et négative. C'est le mode idéal pour le soudage de l'aluminium et autres

matériaux revêtus d'oxydes réfractaires. La polarité négative est utilisée pour créer le bain de fusion tandis que la polarité positive a un rôle de décapage et de perforation de la couche d'oxyde qui se forme en surface.

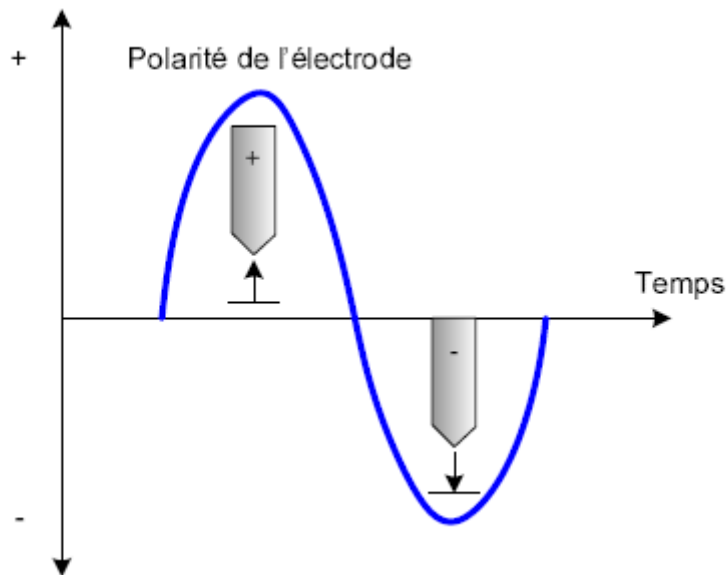
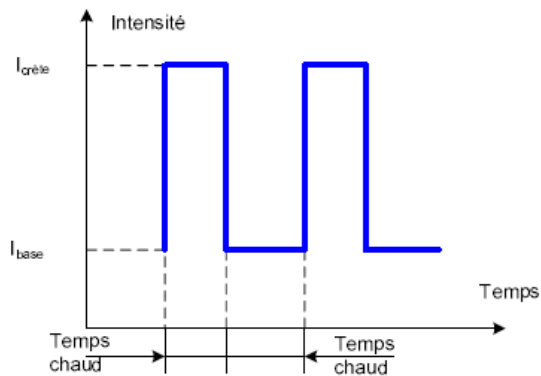


Figure II.7 : Forme d'onde et chemin des électrons en courant alternatif[6]

Courant pulsé : Tout comme pour le soudage avec fil électrode fusible, les nouvelles technologies des sources de courant ont permis une meilleure maîtrise du procédé par l'utilisation du soudage par impulsion parfois appelé également « pulsage thermique ». mais le phénomène physique qui intervient dans ce cas est très différent de celui qui est mis en œuvre dans le cas du soudage avec fil électrode fusible



FigII.8 : Forme d'onde du courant pulsé[6]

Courant continu (CC) : En courant continu, polarité négative (CC-), la torche (l'électrode) est reliée à la borne négative et la pièce à souder sur la borne positive. Le courant CC permet de travailler plus rapidement sur pratiquement toutes les nuances métalliques.

Cette polarité permet aussi de souder avec précision sur des épaisseurs très fines et est souvent employé pour les passes de racine. [15]

Application du soudage Tungsten Inert Gaz (TIG) :

Le soudage TIG s'applique sur tous les métaux soudables. De plus, c'est un procédé facilement mécanisable, il est très utilisé, dans la construction aéronautique, les industries

chimiques et alimentaires, la fabrication des réservoirs, des citernes, des carrosseries, La soudure TIG est une soudure de qualité, avec la possibilité de souder les faibles épaisseurs, un arc stable. Elle nécessite une dextérité particulière du soudeur. Les domaines d'application les plus courants sont : L'aéronautique, L'automobile et La tuyauterie industrielle .

### II.3.3. Avantages du soudage Tungsten Inert Gaz (TIG)

Le procédé s'applique facilement à tous les aciers dont l'acier inoxydable, ainsi qu'aux alliages de nickel résistants à la corrosion ou réfractaires, le titane, l'aluminium; le magnésium, le cuivre, le laiton, le bronze ou l'or. Les pièces à souder composées de différents alliages ou de différents métaux (soudures hétérogènes) peuvent également être assemblées moyennant l'utilisation d'un métal d'apport approprié.

Le procédé est très stable et fiable permettant d'abaisser les taux de défaut ou de reprise, à des niveaux inférieurs à 1 %.

Les paramètres de soudage sont adaptables et, pour la plupart, indépendants les uns des autres.

Le procédé de soudage TIG peut être mis en œuvre avec ou sans fil d'apport suivant l'application.

### **II.3.4. Inconvénients du soudage Tungsten Inert Gaz (TIG)**

Comparé à d'autres procédés de soudage à l'arc, le taux de dépôt du procédé TIG est relativement faible.

L'établissement des procédures et des paramètres de soudage nécessaires au bon fonctionnement du procédé nécessite du temps ainsi qu'un certain coût de développement.

La sophistication de l'équipement de soudage implique des coûts d'investissement supérieurs à ceux d'un équipement de soudage manuel. [6] [13] [16]

## CHAPITRE III : MATERIEL ET TECHNIQUES UTILISES

---

Dans ce chapitre nous allons exposer les matériaux utilisés et les techniques expérimentales : L'infiltration non conventionnelle utilisée dans l'élaboration et le TIG étant une technique d'assemblage dans l'opération du rechargement.

Les techniques de caractérisation utilisées sont pour mesurer la dureté et la rugosité, ces derniers sont les propriétés les plus importantes pour évaluer un outil de forage et sa résistance à la pénétration et à l'usure.

---

### III.1 Matériaux utilisés

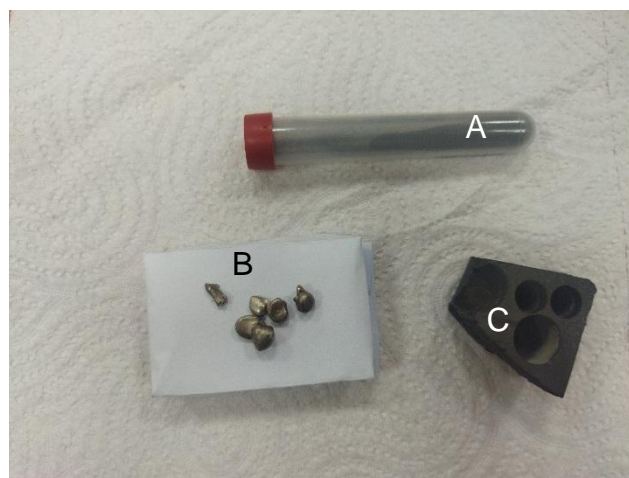
Les matériaux utilisés dans notre étude sont ceux utilisés dans l'industrie pour la fabrication des outils de forage/PDC en corps matrice (réalisés par infiltration) et en corps acier (réalisés par usinage). Ils proviennent de l'unité de production d'outils de forage pétrolier et minier ENSP-Direction Fabrication (ex-ALDIM). Pour des raisons pratiques, nous avons adapté une désignation alphanumérique des différents matériaux utilisés. Les poudres de bases prisent comme référence sont désignées par leurs symboles chimiques ; il s'agit de la poudre du nickel (Ni), tungstène (W) et carbure de tungstène (WC/W<sub>2</sub>C). Le mélange de poudres industriel est désigné par la 142 et le liant utilisé pour l'infiltration des poudres est désigné par IF2 .

Deux échantillons font parties de cette étude , un témoin qui représente une pastille élaborée par infiltration , et un autre déjà endommagé qui va subir un rechargement de réparation .

### III.2. Opération d'infiltration

L'infiltration a été réalisée en trois étapes comme suit :

- la fabrication du moule en graphite par usinage
- le remplissage des moules par le mélange des poudre 142 ainsi que le liant avec l'utilisation du flux (borax).



**Fig III.1** : (A) : Mélange de poudres la 142, (B) : Granula du liant IF2 (C) : Moule en graphite usiné

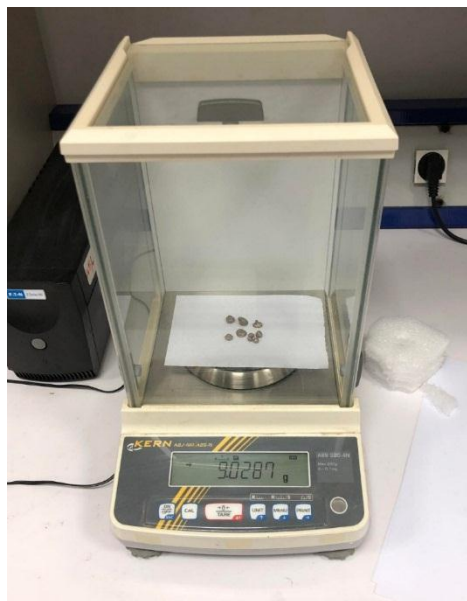


- L'application d'un cycle thermique aux poudres dans le four électrique.

Afin d'assurer une bonne répartition du liquide à travers les poudres à consolider, nous avons fixé la température pratique d'infiltration au-dessus du point de fusion du liant qui est 1180°C

-Avant d'infiltrer les poudres de base, nous avons usiné les moules en graphite sous forme cylindrique.

Les poudres ont été mis à la base ensuite on a mis au-dessus le liant sous forme de granulats et on a fini par remplir le tout par le borax .



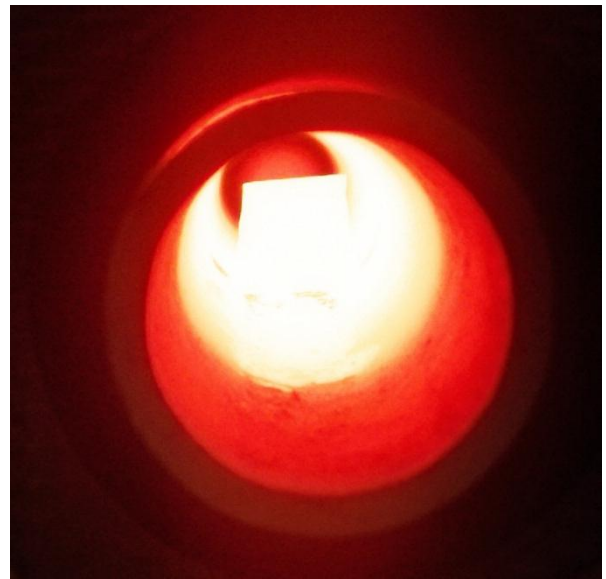
**Fig III.2 : La pesé du liant IF2**

La quantité de Liant utilisé est de 60 % de la quantité de poudre de base, ceci est pour assurer une bonne infiltration et un bon remplissage du consolidé.

-Le processus d'infiltration non conventionnel des poudres libre est assuré par un four .



**Fig III.3 :** Installation dans le four électrique



**Fig III.4:** L'infiltration dans le four

### **III.3 L'opération de rechargement dur**

Afin de surveiller la température pendant l'opération du TIG , nous avons soudé par point l'échantillon avec des fils qui seront branché a un thermocouple durant le soudage TIG , UN poste a souder a été utilisé pour le soudage par point.



**Fig III.5 :** Poste à souder

pour l'échantillon endommagé nous avons effectué un brasage TIG et suivi la température au cours du brasage à l'aide d'un thermocouple , pour le connecter aux thermocouple on a utilisé un poste à souder.

Le brasage de l'échantillon a été effectué avec en présence d'Argon , La torche était munie d'une baguette enrobée .



**Fig III.6 :**Machine a souder TIG

Et c'est ainsi que nous obtenons l'échantillon rechargé

## **III.4 Techniques de caractérisations**

### **III.4.1 préparation métallurgique**

Une fois les échantillons infiltrés ont été réparé nous avons procédé à une préparation métallographique des derniers (découpage, enrobage, polissage...)

#### **III.4.1.1Le découpage**

Les échantillons ont été découpés avec une micro tronçonneuse fr types STUERSACCUTOM5.



**Fig III.7 : La micro tronçonneuse**

### **III.4.1.2.L'enrobage à chaud**

Les échantillons ont été enrobé avec une enrobeuse à chaud afin de passer au polissage.



**Fig III.8 :Enrobeuse**

### **III.4.1.3.Le polissage mécanique**

On a effectué le polissage avec une polisseuse semi automatique. Pour les papiers abrasifs, nous avons polissez de 80 à 4000 grains par  $\text{cm}^2$  en passons par (120, 180, 220, 320, 500, 800, 1200, 2400, 4000 et papier de finition) afin d'avoir des surfaces parfaites pour l'observation.





**Fig III.9 : Polisseuse**

#### **III.4.1.4. Bain ultrason**

Les échantillons subissent une procédure du nettoyage associant l'action d'un détergent et d'un bain à ultrasons afin de dégraisser les surfaces et de les obtenir propre.

##### **Les étapes du nettoyage :**

- Les échantillons sont placés dans une solution d'alcool sous ultrasons pendant 10 min.
- Les échantillons sont séchés avec un séchoir.



**Fig III.10 : Appareil de nettoyage a Ultrason**

### **III.4.2 caractérisation microscopique :**

#### **III.4.2.1 Observation macroscopie**

Pour cette étape on a utilisé un macroscopie optique pour révéler les défauts et les endommagements au niveau des échantillons, ainsi la continuité de matière. Un macroscopie est un photomicroscope spécialisé, adapté à la photographie en lumière réfléchiée en haute résolution aux faibles rapports d'agrandissement du domaine de la photomacrographie, de  $1\times$  à  $20\times$  environ. Ce macroscopie optique capture des photos est réglable est idéale pour une utilisation dans les domaines de la science, le contrôle de qualité Grâce à sa taille.



**Fig III.11 : Macroscopie**

#### **III.4.2.2 Observation microscopie :**

Après la préparation des échantillons on peut commencer l'observation à l'aide d'un microscope optique de type NIKONEPIPHOT 300 qui est muni d'une caméra qui permet la transmission de l'image à un ordinateur qui s'affiche sur l'écran. Ainsi l'image de chaque type d'échantillons (sans attaque et avec attaque chimique) est enregistrée dans des fichiers, pour être analysée ultérieurement. L'observation de chaque échantillon a été faite à différents grossissements ( $X50$ ,  $X100$ ,  $X200$ ,  $X500$ ,  $X1000$ ,  $X1500$ ). Le microscope optique est composé

principalement par une source lumineuse, un condenseur, des objectifs et un oculaire. La source lumineuse émet des rayons qui éclairent l'échantillon, grâce à un condenseur et la lentille objective. Les rayons réfléchis par l'échantillon sont repris par la lentille objective qui donne une première image intermédiaire et grâce à un miroir semi réfléchissant, l'observateur peut obtenir une image finale et agrandie de l'échantillon à travers la lentille oculaire on obtient aussi une image réelle qui sera projetée sur un écran ou un film.



**Fig III.12 :**Microscope optique

### **III.4.3 Caractérisation mécanique :**

#### **III.4.3.1 L'essai de dureté :**

L'essai de dureté est un essai mécanique qui sert à avoir une idée sur la résistance d'un matériau à la pénétration d'un autre corps plus dur. Il est simple, rapide et peu destructif. On applique à la surface de l'échantillon un poinçon sous charge, on maintient cette charge pendant une dizaine de secondes. L'empreinte laissée par le poinçon peut être caractérisée soit par calcul de la surface de cette dernière (essai de Brinell, Vickers et Knoop) soit par calcul de sa profondeur (essai de Rockwell). On parlera dans notre projet seulement sur l'essai de Vickers. Dans cet essai le pénétrateur est une pyramide en diamant à base carrée, l'angle entre les deux faces opposées est de  $136^\circ$ . La charge appliquée dans cet essai est comprise entre 1 et 120 Kgf. La dureté Vickers est calculée à l'aide de la formule suivante :

### III.5.3.1.1 La machine utilisée :

Dans nos essais on a utilisé une machine automatique qui nous donne les résultats de dureté directement sans avoir à faire des calculs. Le centre de recherche dispose d'une machine d'essai de dureté INNOVATEST, étalonnée avec des forces allant de 10 kgf à 300 kgf pour un processus de mesure rapide et fiable.



Fig III.13 :duromètre

### III.4.3.2 L'essai de micro dureté :

Faits sous très faible charge, les essais de micro dureté permettent des mesures très localisées (sur environ  $100 \mu\text{m}^2$ ). À l'aide d'un micro duromètre, on peut par exemple déterminer la dureté d'une phase donnée dans un échantillon polyphasé ou celle d'un échantillon très fragile et mince.



Fig III.14 : micro duromètre



### III.4.3.3 L'essai tribologique :

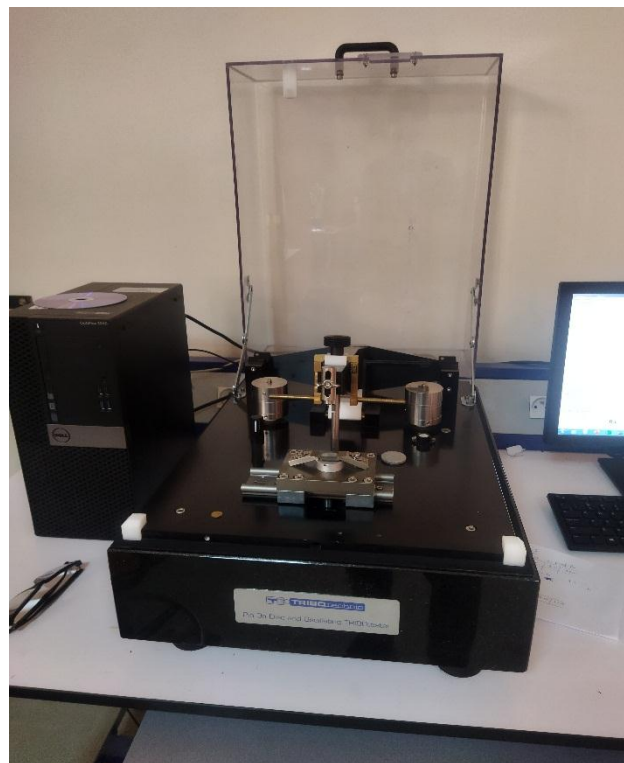
L'essai tribologique a été effectué à l'aide d'un tribomètre en suivant la norme ASTM G99 , c'est un essai de bille sur disque rotatif .

les paramètres de l'essai ont été définis comme suit :

-Température ambiante

- une charge de 10 N , une vitesse de glissement de 50 mm/s , et une distance de 200m.

-La Bille utilisée est en Alumine  $Al_2O_3$ .



**Fig III.15 : tribomètre**

## CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSIION

---

Les échantillons rechargés et infiltrés ont subi des tests tribologique et de dureté, cette caractérisation a pour but de connaitre les propriétés des échantillons infiltrés et rechargés et de les comparer.

Dans ce chapitre nous allons voir les résultats de l'observation micro et macroscopique, et de la caractérisation mécanique et tribologique des échantillons étudiés et les comparer, nous allons donc comparer leurs duretés et leurs résistances à l'usure étant des propriétés très importantes dans le fonctionnement d'un outil de forage.

Nous allons aussi discuter la structure microscopique à partir des images de la microscopie optique, et interpréter les résultats de la caractérisation mécanique et tribologique

---

## IV.1.Cycle thermique lors de l'opération de rechargement

La figure IV.1 montre le cycle thermique enregistré lors de l'opération de rechargement TIG au niveau de l'interface. Nous remarquons une montée rapide de la température jusqu'à atteindre 976°C puis un refroidissement à l'air libre. L'information sur la température du rechargement est utile afin de pouvoir comprendre les phénomènes de diffusion au niveau de l'interface.

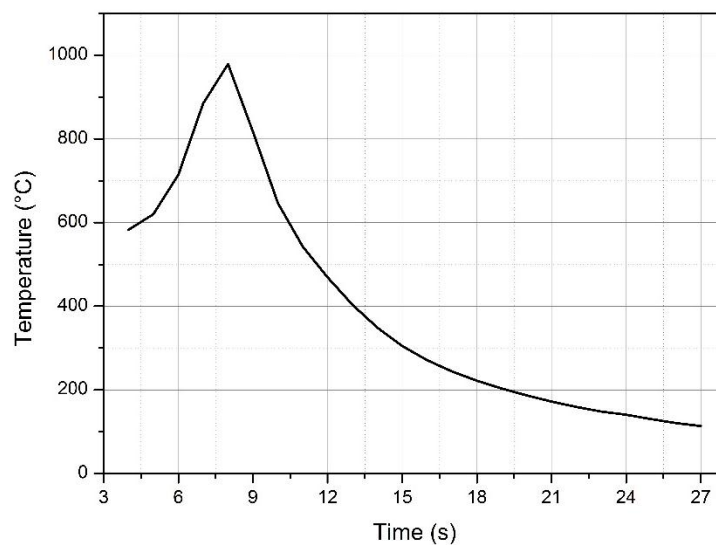
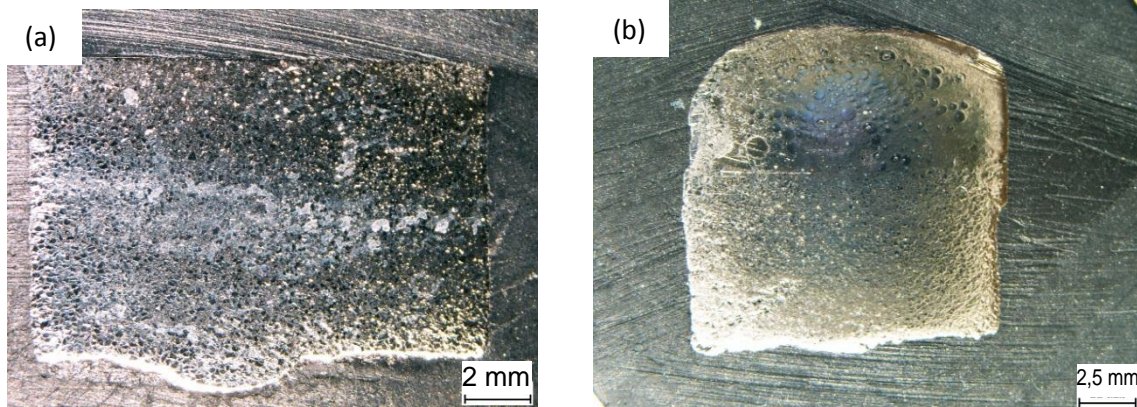


Figure IV. 1 : Cycle thermique enregistré lors de rechargement

## IV.2.Aspect macrographique

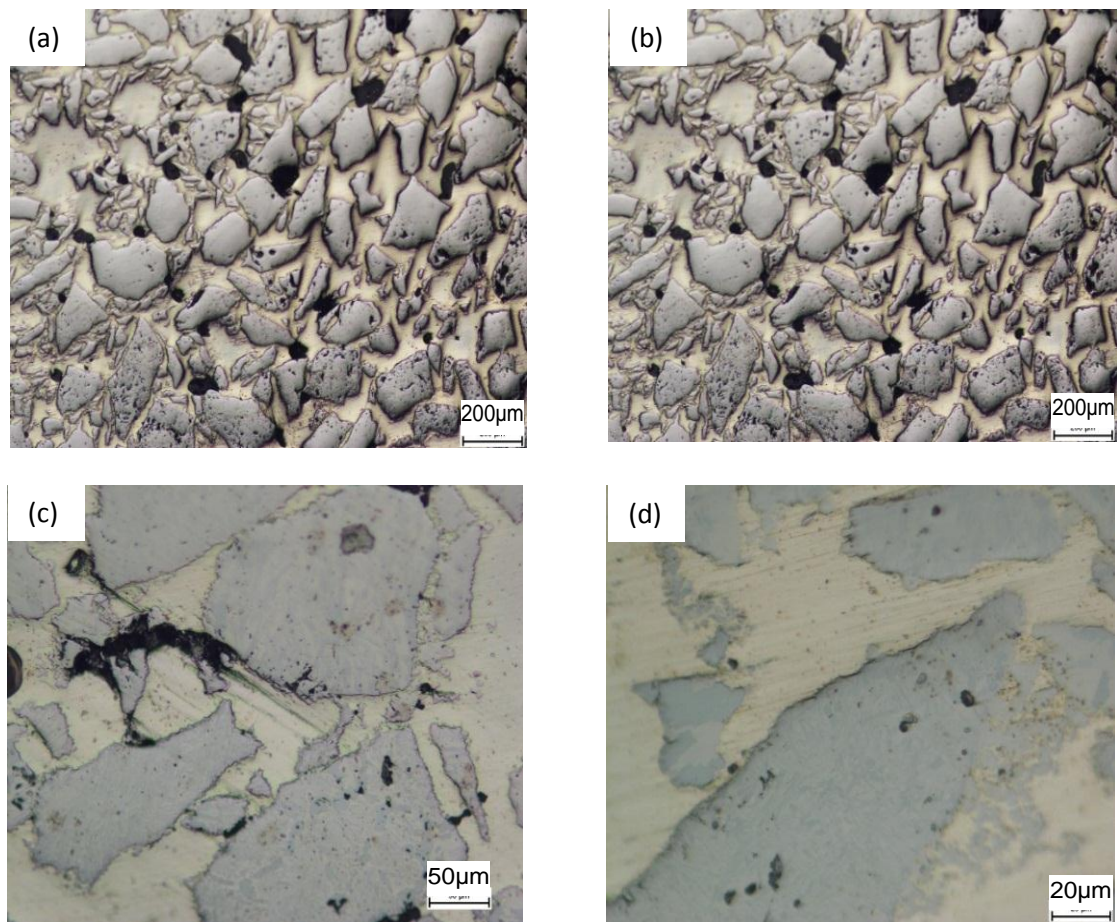
La figure IV 1a et 1b montre l'aspect macrographique des deux échantillons : consolidé et rechargé, respectivement ; Le consolidé montre une distribution homogène des particules de WC de forme irrégulière de taille faible (pas d'orientation spécifiques) avec l'absence de zones de ségrégation et de fissure. Une observation similaire est constatée sur l'échantillon rechargé TIG. A l'exception de grandes particules de WC de forme sphérique visiblement observée sur la figure IV 1b. Par ailleurs, l'interface entre l'infiltré et le rechargé est clairement distinguée avec l'absence de défaut et de porosité au niveau de cette interface.



**Figure IV.2 :** images macrographique du (a) consolidé et de (b) l'échantillon rechargé TIG

### **IV.3. Evolution microstructurale des échantillons infiltrés et rechargés**

La figure IV.2(a-b) illustre des micrographies optiques prises aux différents endroits de l'infiltré. A faible grossissement, nous constatons une bonne infiltration du bronze allié au nickel (liant) des particules de WC/W<sub>2</sub>C avec une fusion totale des particules de Ni présentes dans la composition initiale du mélange de poudres. Une certaine porosité est détectée qui est probablement formée lors de la solidification (retassure). Un fort grossissement montre l'aspect irrégulier des particules de WC enfoncées dans le liant métallique Ce qui indique une éventuelle inter-diffusion entre les particules et le liant comme montré sur la figure IV. 2(c, d).

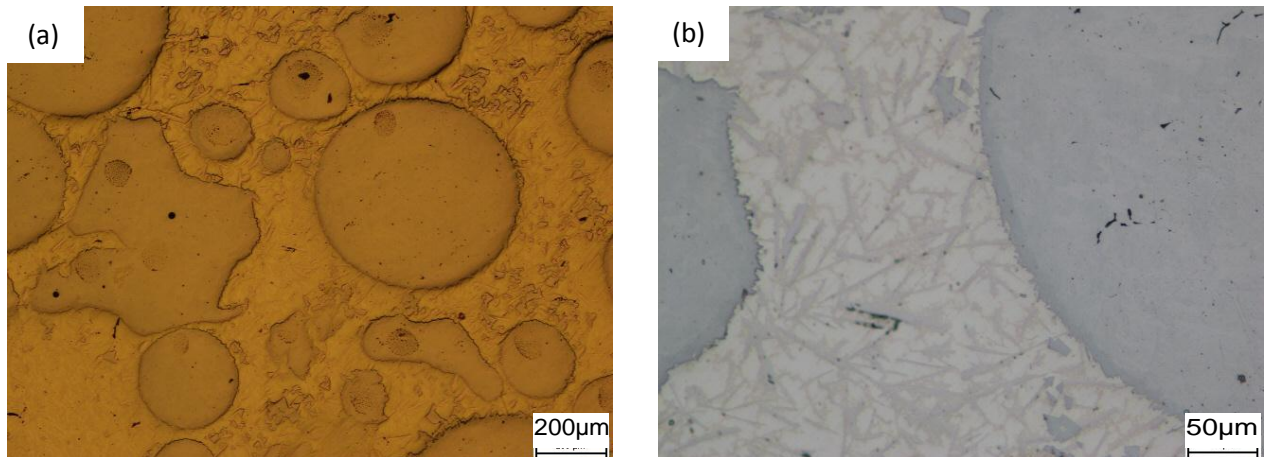


**FigIV.3** Micrographies optique de l'infiltré avec différents grossissements. Ax50 bx50 c x200 d x500.

Des images micrographiques de l'échantillon rechargé TIG sont illustrées sur la figure IV.3 (a, b). Les particules de WC sont uniformément distribuées dans la matrice métallique NiCr de taille allant de 10µm à quelques centaines de micromètres (250 µm). Pas de porosité ou de défaut de détachement des particules WC est observé le long de la surface de l'échantillon rechargé. Par ailleurs la matrice métallique montre une structure dendritique comme il est observé sur la figure IV. 3b. la littérature reporte que la dendrite est riche en W Ni tandis que l'espèce inter-dendritique est riche en NiCr. Nous pouvons voir aussi qu'une grande quantité

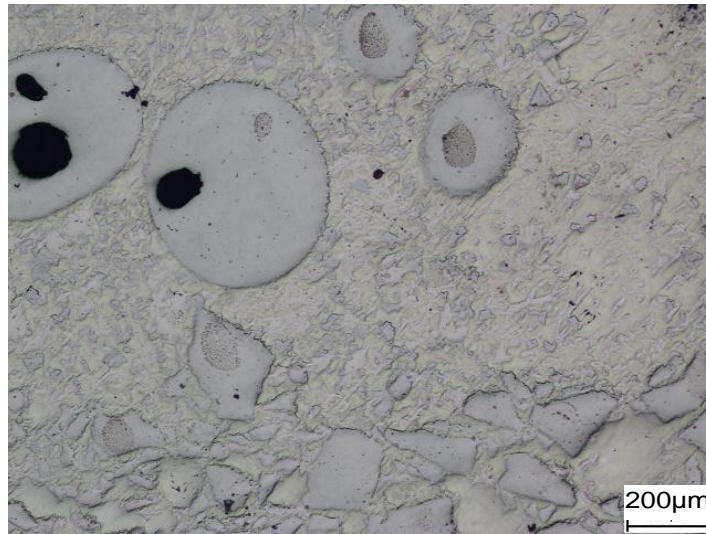


des particules de WC de très faible taille est présente dans la matrice NiCr ce qui peut influencé la dureté du rechargement.



**FigIV.4** Micrographie optique de l'échantillon rechargé TIG : a x50 b x200

L'interface entre le rechargement et la partie infiltrée est illustrée sur la figure IV.4. Mis à part le changement de forme des particules de WC (sphérique ; irrégulière), il est difficile de distinguer l'interface entre les deux parties ce qui reflète la bonne adhérence métallurgique (inter-diffusion des éléments) entre partie rechargée/ infiltrée. De plus, des particules de forme irrégulière sont détectées dans la partie rechargée ce qui peut être expliqué par une éventuelle diffusion des petites particules de WC de l'infiltré envers le rechargé lors de l'opération de rechargement TIG sous l'effet de la température.

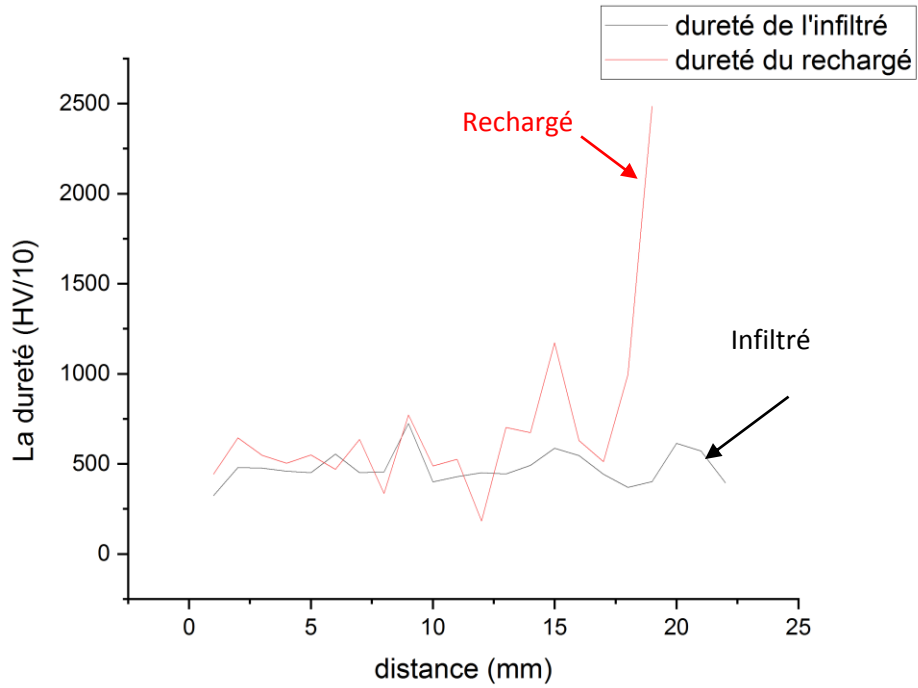


**Figure IV. 5** : image optique de l'interface consolidé/rechargé

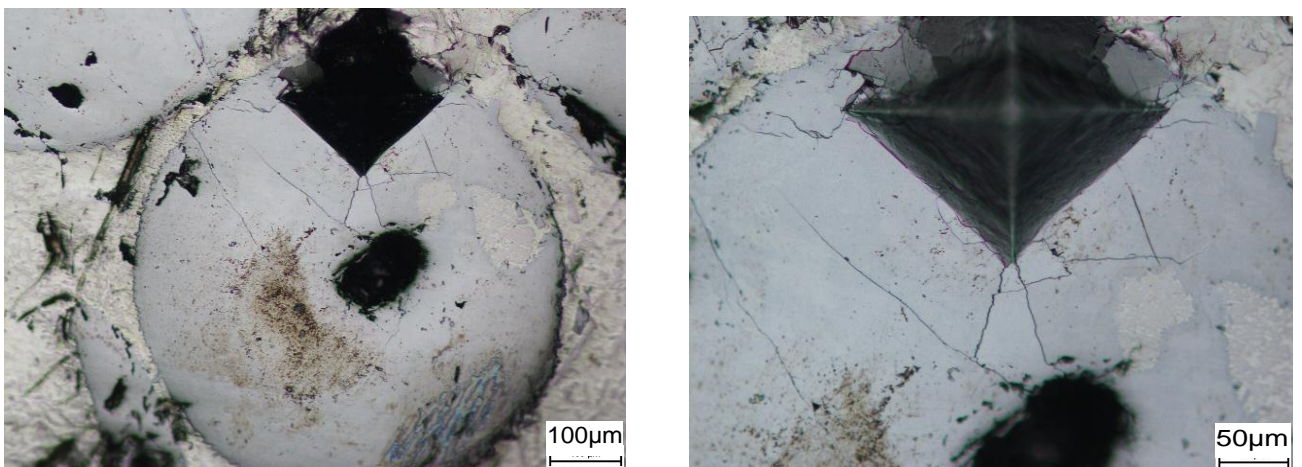
## **IV.4.Evolution des propriétés mécaniques**

### **IV.4.1.La dureté :**

Le graphe ci-dessous (Figure IV.5) représente les profils de duretés des échantillons (infiltré et rechargé) d'après l'essai de dureté de Vickers HV10. On remarque que la dureté du rechargé est plus importante que celle de l'infiltré avec une moyenne de 450 HV pour l'infiltré et 600 HV pour le rechargé, cela est dû au fait que les matériaux du rechargement (Ni, Cr) sont plus durs que ceux de la partie infiltrée (Cu, Sn). De plus, la porosité élevée enregistrée dans le consolidé abaisse considérablement sa dureté ; Des empreintes de dureté sur les particules de WC présenté sur la figure IV 6a et 6b, montre l'aspect fragile des particules sphériques avec l'apparition des fissure au niveau des coins de l'empreinte. Nous notons une dureté de 1500 HV10 est enregistrée au niveau de la particule de WC.



**Figure IV.6.** Profils de dureté le long des échantillons rechargé et infiltré

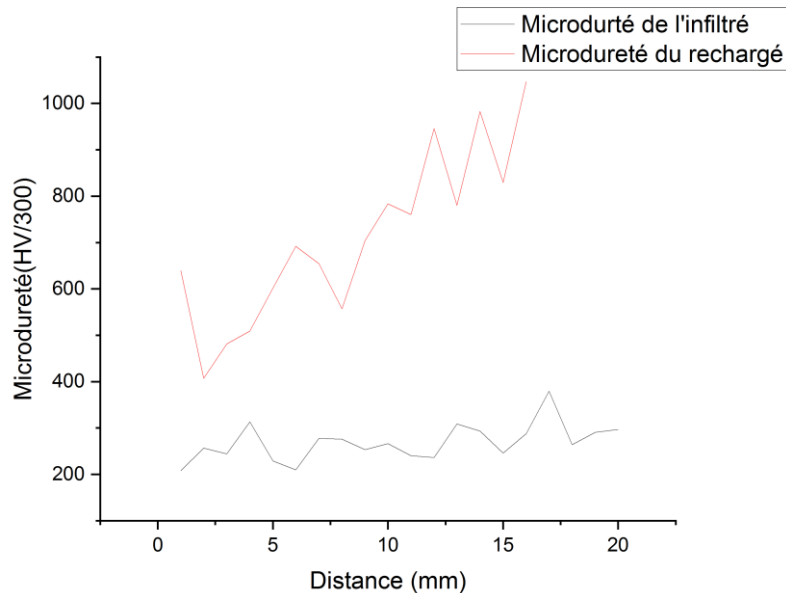


**Figure IV.6 :** Micrographie optique montrant l'aspect fragile des particules de WC



#### IV.4.2. Micro-dureté

Des profils de micro-dureté HV0.3 réalisés dans la partie métallique (liant et matrice NiCr) sont représentés dans la figure IV.7



#### IV.7. Les résultats de l'essai de la microdureté des échantillons (infiltré et rechargé)

On remarque que les valeurs de dureté de l'échantillon rechargé sont deux fois plus élevées que celles de l'infiltré. Cette différence de dureté est attribuée en grande partie à la microstructure de la matrice de NiCr riche en particule de WC. De plus la nature dure des éléments constituant la matrice NiCr et l'absence de porosité fait en sorte d'augmenter la dureté de ce dernier.

## IV.5. Propriétés tribologiques :

### IV.4.1. Coefficient de friction :

La figure IV. 8 montre l'évolution des coefficients de friction du liant, infiltré et du rechargé en fonction de la distance. Nous remarquons que l'infiltré et le rechargé atteignent le régime stationnaire après 25 m de distance tandis que le liant a pris 55 m pour l'atteindre. Ceci peut être expliqué par l'aspect de la surface de départ (aspérité) de l'infiltré (rugosité, saleté, oxydation...) qui lui ont pris plus du temps (distance) pour les éliminer et atteindre le régime stationnaire.

On remarque que le rechargé montre un coefficient de friction le plus faible suivi par l'infiltré puis celui du liant. Cela est expliqué par leur dureté respective qui proportionnelle au coefficient de frottement.

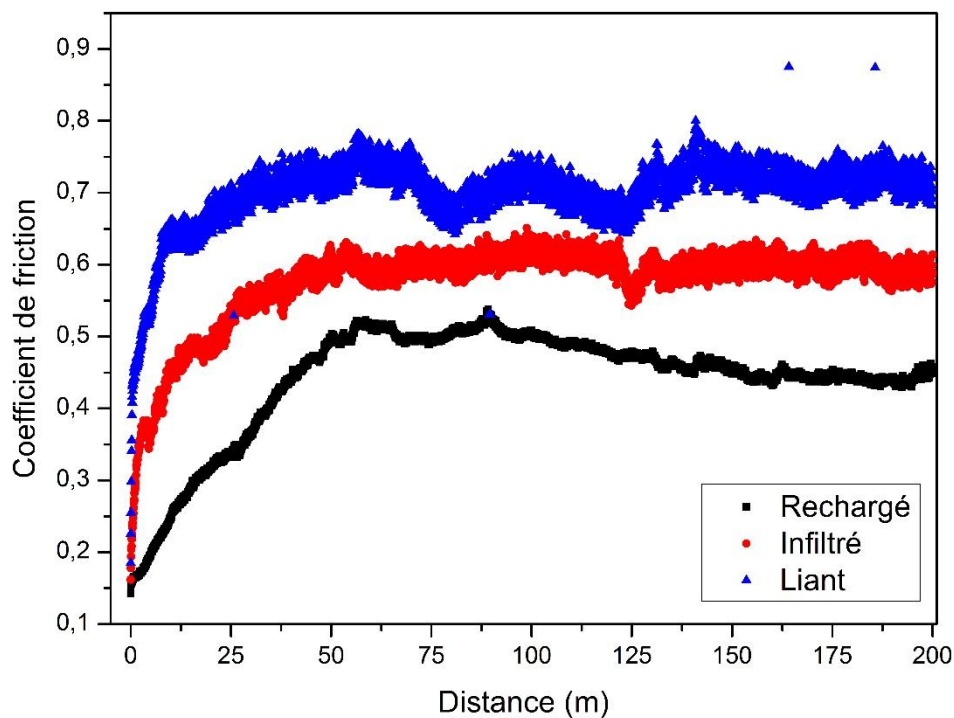


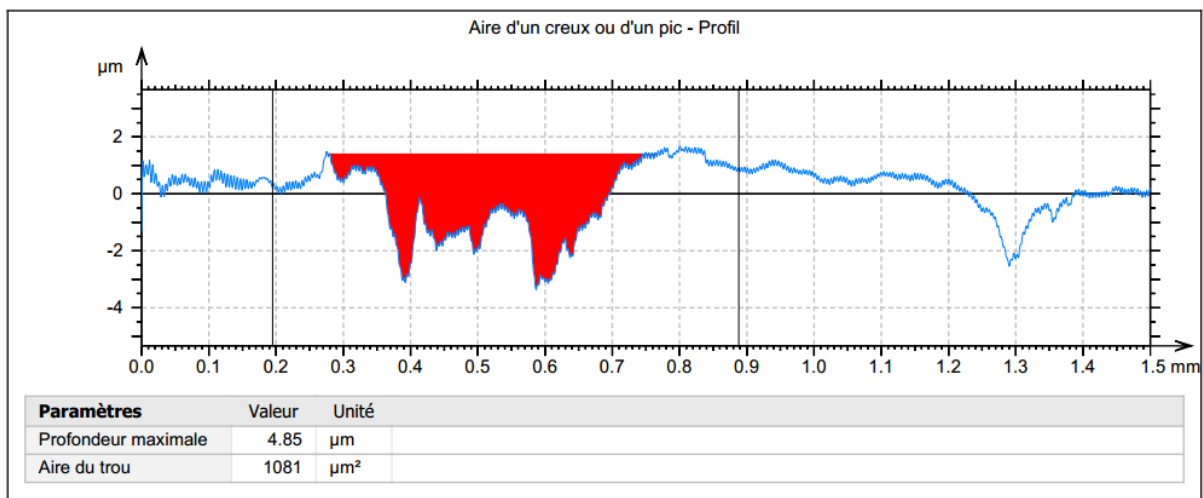
Figure IV. 8 : évolution des coefficients de friction en fonction de la distance.

**Tableau IV. 1** : valeurs des coefficients de friction du liant, infiltré et rechargé

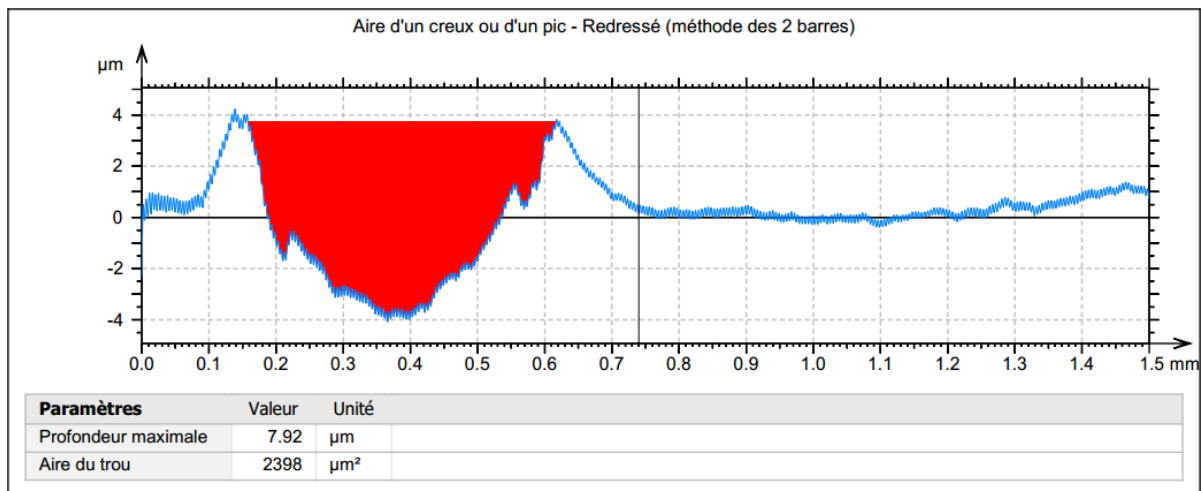
Echantillon	Liant	infiltré	rechargé
Coefficient de friction	0.7	0.6	0.45

#### IV.4.2. Le taux d'usure :

Grace au profilo-mètre, nous avons pu obtenir les profolios suivants :

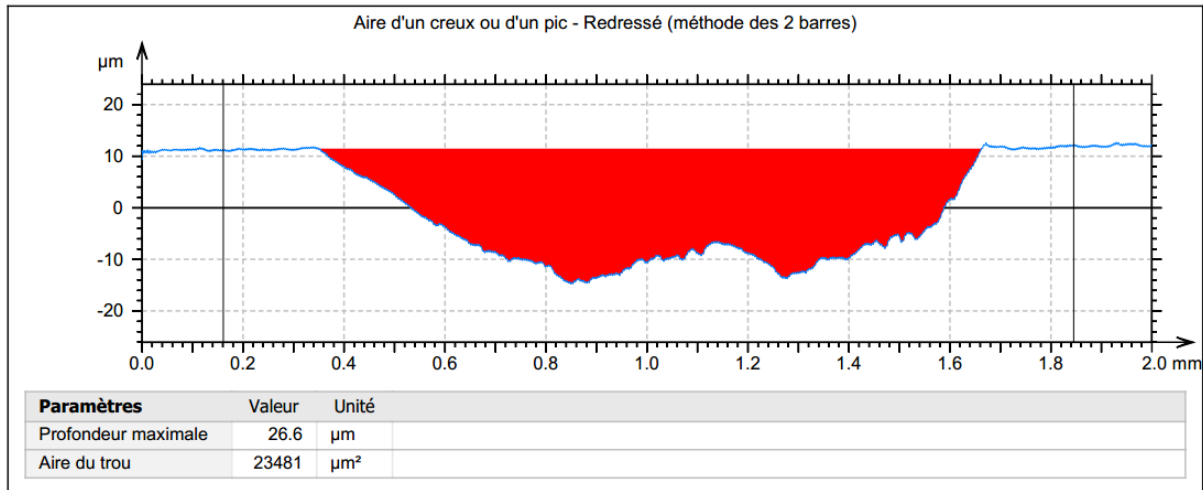


**IV.9.** Profolio de l'infiltré



**IV.10.** Profolio du liant

rechargé



#### IV.11.Profolio du rechargé

Le taux d'usure est calculé par la formule suivante :

$$W_s = \frac{V}{F L}$$

$W_s$  : Le taux d'usure

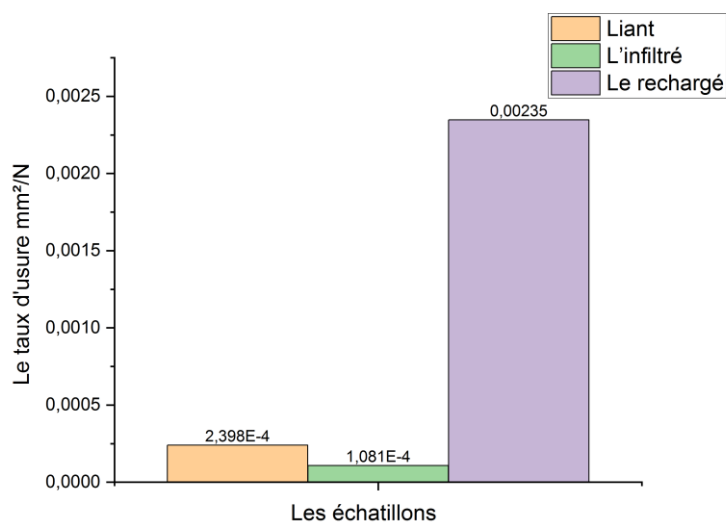
$V$  : Le Volume d'usure

$F$  : La force appliquée

$L$  : La distance

On obtient les résultats suivants :

échantillon	Liant	L'infiltré	Le rechargé
Taux d'usure mm <sup>2</sup> .N <sup>-1</sup>	2.398 E-4	1.081 E-4	2.3481 E-3



#### IV.12.Les taux d'usure des échantillons

On remarque que le taux d'usure le plus important est celui de l'échantillon rechargé comparé au liant et à l'infiltré.

L'infiltré résiste mieux à l'usure comparé au liant seul grâce à l'existence des grains durs qu'il contient.

On peut dire que la matrice du rechargement en Cr-Ni a une résistance à l'usure inférieure à l'infiltré et au liant.

On remarque que malgré sa dureté élevée, le rechargé montre un taux d'usure très grand comparé à l'infiltré, ce qui est en contradiction avec sa dureté ce qui peut être expliqué par le changement des mécanismes d'usure.

Les particules de WC sont un peu éloignées les unes des autres comparées aux grains de l'infiltré, ce qui rend la surface qui occupe le Cr-Ni dans le rechargé plus importante est donc le taux d'usure sera plus important.

## CONCLUSION

L'élaboration par infiltration instantané est une technique rapide qui laisse peu de pore dans le consolidé.

Le rechargement TIG et le choix des matériaux du rechargement ont permis une bonne adhérence entre infiltré/rechargement..

Cette tentative de réparation par TIG a montré une bonne adhérence infiltré/ rechargement, ce qui est une bonne chose, et une certaine différence de dureté entre le rechargé et l'infiltré qui est tolérable.

En revanche le taux d'usure élevé du rechargé lors de l'essai tribologique, comparé à l'infiltré ne répond pas aux exigences des propriétés requises pour un bon fonctionnement de l'outil de forage.

La contradiction entre la dureté élevé du rechargé et le taux d'usure important nécessite une investigation plus approfondie sur les mécanismes d'usure responsable de cet effet.

Les résultats obtenu dans cette étude montre que l'idée de réparation des outils de forages mérite d'être exploitée, d'autre essais et analyses peuvent être menés pour explorer cette piste qui paraît prometteuse, surtout que cela permettrait de minimiser les dépenses des entreprises, et développer les techniques du rechargement dur.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M. R. Sedra, "CARACTERISATION ET ESSAI DE TRAITEMENT THERMIQUE PAR FRITTAGE DE LA MONAZITE DE MADAGASCAR," Master2, UNIVERSITE D'ANTANANARIVO, 2015.
- [2] J. JOUANNAUX, "DEVELOPPEMENT DE STRUCTURES POREUSES ET DE MEMBRANES DENSES A BASE DE PEROVSKITES POUR LA PRODUCTION DE COMBUSTIBLES SOLAIRES," L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE CHIMIE DE MONTPELLIER, 2021
- [3] H. BOUCHAFAA, "EFFET DES ADDITIONS DU FER SUR LA CONSOLIDATION DU MELANGE DE POUDRES LIBRES WC-W-Ni/Fe PAR LE PROCEDE D'INFILTRATION.," Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2011.
- [4] Z. BOUTAGHOU, "Elaboration et caractérisation d'un matériau multi-phasé WC-W-Ni obtenu par le procédé d'infiltration spontané de poudres libres.," Université des sciences et de la technologie, 2012.
- [5] B. Cheniti, "Evolution microstructurale et propriétés mécaniques d'un assemblage WC-Co/Ag-Cu-Zn et WC-Co/WC-W-Ni obtenu par soudo-brasage," Faculté de Génie Mécanique et de Génie des Procédés, 2018.
- [6] O. H. H. Selma, "Influence des paramètres de soudage sur les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des soudures," Master2, UNIVERSITÉ de BLIDA 1, 2017.
- [7] N. Bouzegzi, D. Miroud, K. Khenfer, and H. Bouchafaa, "Étude du comportement électrochimique du composite WC-W-Mn-Ni/Cu-Sn, obtenu par le procédé d'infiltration," in Conférence Internationale sur le Soudage, le CND et l'Industrie des Métaux, IC-WNDT-MI'14, 2014.
- [8] B. Hamida, B. Zoheir, B. Nourdine, and M. Djamel, "Elaboration et caractérisation d'un multimatériau WC-W-Ni obtenu par infiltration: Effet du nickel sur la consolidation du W," in Conférence Internationale sur le Soudage, le Contrôle Non Destructif et l'Industrie des Matériaux et Alliages (IC-WNDT-MI'14), 2014.
- [9] D. MIROUD, M. ZIDANI, S. AKLOUCHE, and M. TATA, "Effet de la formation d'agglomérats de W/Ni au cours du chauffage sur la densification du composite W-15Ni infiltré par le bronze industriel Cu-9Ni-6Sn," Revue Science des Matériaux, pp. 22-28, 2017.μ
- [10] C. Billel, M. Djamel, Y. Youcef, B. Zoheir, D. Ismail, B. Noureddine, et al., "Propriétés microstructurales et mécaniques d'un assemblage WC-W-3Fe/WC-Co obtenu par brasage," in IC-WNDT-MI'14, 2014.

[11] D. Allou, "Etude des propriétés mécaniques et électrochimiques d'un multi-matériau fonctionnel obtenu par rechargement dur base Ni-Cr-Fe," 2020.

[12] Y. Yahmi, "Élaboration et qualification d'une procédure de réparation par soudage TIG d'aube de turbine à gaz en superalliage à base de Nickel-INCONEL 738," Université M'hamed Bougara de Boumerdès, 2007.

[13] A. Kellai, "Étude comparative d'un rechargement d'une fonte truitée et une fonte grise par métallisation et par soudage," Ecole nationale polytechnique d'Alger, 2009.

[14] D. Miroud, "Etude du frittage en phase liquide de mélanges multi-constitués W/WC-Ni, par le procédé d'infiltration du liant Cu-9Ni-6Sn-5Mn," Alger, 2007.

[15] Metalshandbook Vol.1 «Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys», ASM International, USA, 2005.

[16] MISE EN OEUVRE ET CARACTERISATION D'ASSEMBLAGES SOUDES PAR PROCEDES TIG ET LASER DE TOLES D'ALLIAGES DE TITANE REFRACTAIRES le 9 novembre 2005 Institut National Polytechnique de Toulouse.