

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

*UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE*



MEMOIRE
De fin d'études

*En vue de l'obtention du diplôme de Master
Académique*

**Spécialité : Génie Mécanique
Option : Génie Des Matériaux**

Thème :

Réalisation des matériaux composites en Carbure de
Tungstène sur les Stabilisateurs de forage pétrolier

Proposé et dirigé par :

M^{me} Ghalia
BAGUENANE

Présenté par :

M^{me} Nadia MECHTOUB

Remerciements

Je tiens à exprimer ma gratitude et ma profonde reconnaissance à Mme Ghalia BAGUENANE d'avoir accepté de me guider tout au long de ce travail, en m'orientant vers un stage pratique au sein de l'ENAFOR (Entreprise Nationale de Forage). Ses explications, ses conseils, ainsi que ses méthodes pédagogiques inspirent certainement le courage et la persévérance de mener un travail jusqu'au bout.

Je remercie également le chef d'atelier de la base tubulaire d'avoir mis à ma disposition le matériel et personnel dont j'avais besoin, ainsi pour son orientation et bon accueil durant ma période de stage pratique au sein de l'entreprise nationale de forage.

J'exprime également mes profonds remerciements à la présidente du Jury Mme MENDIL et membre de jury Mme MOHELLEBI, d'avoir accepté de traiter mon sujet et ainsi leur apport enrichissant à mon mémoire, et surtout leur encouragements pour moi au sein du département Génie Mécanique autant qu'enseignantes.

J'exprime mes profonds remerciements à tous mes enseignants. Avec eux j'ai appris en ces deux années de Master, ce que je n'ai guère discerné auparavant. Je serai toujours reconnaissante pour leur qualité d'enseignement, ainsi je n'oublie jamais d'adresser mes remerciements les plus sincères à toute ma promotion M2 GDM avec lesquels j'ai passé une année d'études pleine de bonne volonté de sérieux d'excellence et surtout de courage.

Je remercie vivement tous ceux et celles qui m'ont aidée, de près ou de loin.

Table des matières

Introduction générale	
-----------------------------	--

Chapitre I : le forage pétrolier

I.1. Introduction.....	1
I.2. Présentation de l'entreprise Nationale de Forage.....	1
I.2.1. Historique de l'entreprise	1
I.2.2. Activité de l'entreprise	2
I.2.3. Stratégie de l'entreprise	3
I.3. Notions de gisement pétrolier	5
I.3.1. Qu'est ce qu'un gisement	5
I.3.2. Types de gisement	5
I.3.2.1. Les gisements de gaz	6
I.3.2.2. Les gisements d'huile	6
I.3.3. Paramètres des gisements	7
I.4. Structure de forage pétrolier	10
I.4.1. Définition d'une structure de forage.....	10
I.4.2. Eléments d'une garniture de forage.....	11
I.4.3. Les phases de forage	12
I.4.3.1. La phase 26''	13
I.4.3.2. La phase 16'	14
I.4.3.3. La phase 12''1/4	14
I.4.3.4. La phase 8''1/2	15
I.4.3.5. La phase 6''	16

Chapitre II : Stabilisation de la garniture de forage

II.1–Introduction	18
II.2- Contrôle de la BHA (Bottom Hole Assembly).....	18
II.3. Les paramètres de forage	19
II.3.1. Paramètres mécaniques	19
II.3.2. Paramètres hydrauliques.....	20
II.4. Stabilisation de la garniture de forage	20
II.4.1. Objectif d’un forage vertical	21
II.4.2. Rôle des alternances des terrains.....	22
II.4.3. Relation entre force de déviation et pendage.....	23
II.4.4. Comportement des garnitures de forage.....	24
II.4.5. Optimisation des garnitures stabilisées (Packed Hole).....	26
II.5. Types de stabilisateurs	27
II.5.1. Stabilisateurs à lames soudées.....	27
II.5.2. Stabilisateurs à lames intégrées	28
II.5.3. Stabilisateurs à chemises interchangeable	28

Chapitre III : La métallurgie des poudres et infiltration

III.1. La métallurgie des poudres.....	29
III.1.1. Définition de métallurgie des poudres	29
III.1.2. Avantages de la métallurgie des poudres	29
III.2. L’infiltration.....	30
III.2.1. L’infiltration conventionnelle	30
III.2.2. Infiltration de poudres libres.....	31
III.2.3. Conditions et paramètres d’infiltration.....	32
III.2.4. Domaines d’application de l’infiltration.....	33
III.3. Le frittage	33
III.3.1. Différents types de frittage.....	33
III.3.1.1. Frittage en phase solide.....	33
III.3.1.2. Frittage en phase liquide.....	34
III.3.2. Energies motrices du frittage.....	38
III.3.3. Paramètres de frittage	39

Chapitre IV : Cermet

IV.1–Introduction.....	40
IV.2- Les matériaux composites	40
IV.3 Les cermets	41
IV.3.1 Définition d'un cermet.....	41
IV.3.2 Les carbures.....	41
IV.4. Les composants des cermets.....	42
IV.4.1 Le tungstène.....	42
IV.4.1.1 Production de la poudre de Tungstène.....	42
IV.4.1.2. Propriétés du Tungstène.....	43
IV.4.2 Carbure de Tungstène	44
IV.4.2.1 Production des Carbures de Tungstène	44
IV.4.2.2 Propriétés de la poudre de Carbure de Tungstène4	4
IV.4.2.3 Structures cristallines du W-C.....	45
IV.4.2.4 Domaine d'application.....	46
IV.4.3. Le cuivre.....	46
IV.4.3.1 Propriétés du Cuivre.....	47
IV.4.3.2 Infiltration des WC par un alliage de Cuivre.....	47
IV.5 Les liants métalliques48	

Chapitre V : Partie Pratique

Première partie pratique : Rechargement manuel par Soudage Deuxième partie pratique : Rechargement par soudage automatique (welding-system)

V.I. Introduction	49
V.2. Matériaux utilisés	49
V.2.1. Matériaux de rechargement	49
V.2.2. Matériaux de soudage	50
V.3. Principe du Rechargement	51
V.4. Les stabilisateurs employés à l'ENAFOR.....	52
V.5. Rechargements manuel employé à l'ENAFOR.....	53
V.5.1. Rechargement HF 1000	53
V.5.2. Rechargement HF 2000	53

V.5.3. Rechargement HF 3000	54
V.5.4. Rechargement par procédé TECHNODUR TGG	55
V.6. Présentation de la machine (welding-system)	58
V.6.1. Logiciel FANUC PICTURE	58
V.6.2. Partie mécanique.....	59
V.6.3. Générateur de courant	59
V.6.4. Dévidoir.....	59
V.6.5. Torche Open Arc.....	60
V.6.6. Alimentation électrique	60
V.6.7. Fils de rechargement.....	60
V.7. Procédures de démarrage et arrêt de la machine	61
V.7.1. Démarrage de la machine.....	61
V.7.2. Redémarrage après un Arrêt d’Urgence (ARU).....	62
V.7.3. Arrêt de la machine	62
V.8. Le pupitre de commande.....	62
V.8.1. Interface Homme Machine – Boutonnerie	63
V.8.2. Ecran d’accueil et Bandeau.....	66
V.8.3. Paramétrage des POINTS A et B	67
V.8.4. Choix du mode : CORDON ou OSCILLATION.....	68
V.8.4.1. Paramètres d’oscillation.....	69
V.8.4.2. Paramètres de CORDON	70
V.8.5. Mode reprise.....	70
V.9. Discussion et interprétation	71
V.9.1. Discussion.....	71
V.9.2. Interprétation	71
V.9.3. Mesure de la résistance.....	71

Conclusion Générale

Références bibliographiques

Annexes

Liste des Figures

Chapitre I :

Figure 1.1 : Mise en place de l'organigramme ENAFOR

Figure I.2 : Coupe verticale d'un gisement

Figure I.3 : Milieu poreux

Figure 1.4 : La structure d'un forage pétrolier

Figure I.5 : Les outils d'un forage pétrolier

Figure I.6 : Les phases d'un forage pétrolier

Chapitre II :

Figure II.1 : La BHA en compression et en traction de la garniture

Figure II.2 : La BHA d'une garniture de forage stabilisée

Figure II.3 : Contrôle de l'inclinaison en forage vertical

Figure II.4 : Pendage des terrains et tendance à dévier

Figure II.5 : Pendage des terrains et angle de déviation

Figure II.6 : Combinaison d'effort latéral et frontal dans l'angle de déviation

Figure II.7 : Optimisation des garnitures stabilisées (Packed Hole)

Figure II.8 : Les types de stabilisateurs

Chapitre III :

Figure III.1 : Différentes méthodes d'infiltration.

Figure III.2 : Stade de densification

Figure III.3 : Etapes du frittage en phase liquide.

Figure III.4 : Réarrangement des particules

Figure III.5 : Angle de contact

(Raccordement)**Figure.III.6 :** Ménisque liquide formé au contact entre deux grains.

Figure III.7 : Dissolution-précipitation.

Figure III.8 : Schéma de microstructures au cours du frittage en phase liquide sous l'action des forces capillaires exercées par les ponts de liquide entre particules.

Chapitre IV :

IV.1 : Schéma illustratif d'un matériau composite

Figure IV.2 : Minerai de wolframite

Figure IV.3 : Poudre WC (A : forme irrégulière ; B : forme sphérique.)

Figure IV.4 : Diagramme binaire W-C.

Figure IV.5 : Les structures cristallines des carbures de tungstène. a) W_2C ; b) WC_{1-x} ; c) WC

Figure IV.6: Minerai de Cuivre.

Figure IV.7 : Diagramme d'équilibre (Cu-W).

Figure. IV.8 : Diagramme d'équilibre (Cu-Sn).

Chapitre V :

Figure V.1 : Poudre en carbure de tungstène WC et Fil TGG

Figure V.2 : Equipement de soudage Techno kit : TECHNO 2000

Figure V.3 : Les Stabilisateurs (Spiral Blind Stabiliser)

Figure V.4 : Rechargement du stabilisateur par le procédé HF 1000

Figure V.5 : Rechargement du stabilisateur par le procédé HF 2000

Figure V.6: Rechargement du stabilisateur par le procédé HF 3000

Figure V.7 : Rechargement du stabilisateur par le procédé TGG

Figure V.8. Couverture anti-craque et passage du stabilisateur à la centrifugeuse

Figure V.9. Welding-System DURUM

Figure V.10. Interface Welding-System DURUM

Figure V.11. Ecran d'accueil Welding-System DURUM

Figure V.12. Paramètres du stabilisateur sur a la machine DURUM

Figure V.13. Risque de coulure de bain de soudage limité

Figure V.14. Paramètres de soudage (CORDON ou OSCILATION)

Figure V.15. Mode reprise de soudage sur stabilisateur

Liste des Tableaux

Chapitre I :

Tableau I.1 : Capacité du parc appareil ENAFOR

Chapitre IV :

Tableau IV.1 : Quelques Céramiques qui constituent les Cermets.

Tableau IV.2. Propriétés physiques du Tungstène.

Tableau IV.3. Propriétés mécaniques du Tungstène.

Tableau IV.4. Propriétés de la poudre WC.

Tableau IV.5. Propriétés du Cuivre

Chapitre V :

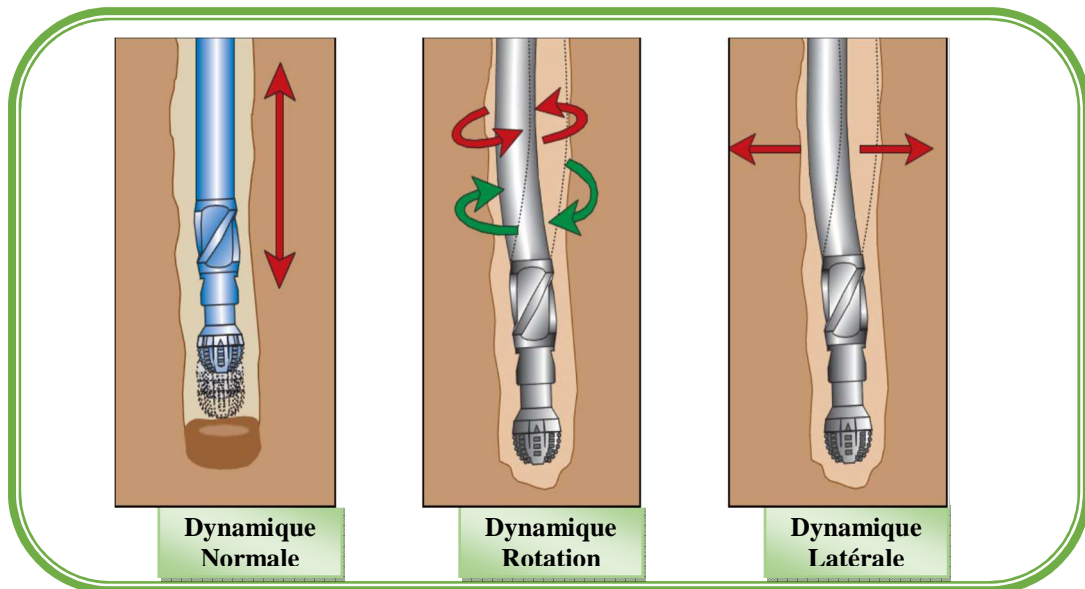
Tableau V.1 : Fiche technique de la poudre TECHNOPOWDER

Tableau V.2. Fiche technique des stabilisateurs employé à l'ENAFOR

Problématique

Je consacre ce mémoire aux matériaux composites élaborés au niveau de la Base tubulaire sise Hassi-Messaoud qui répond aux besoins de l'Entreprise Nationale de Forage pour la réalisation des puits Pétroliers notamment l'exploration et l'exploitation des réserves de Gaz et de Pétrole pour le compte de la Sonatrach.

La dynamique de la garniture de forage à l'intérieur du puits est inévitable, pour remédier aux problèmes liés à ce dynamisme tel le coincement de l'outil, la perte de boue ou même la perte du puits dans le cas extrême, on renforce cette garniture par des stabilisateurs aux lames intégrées en alliages de carbures de tungstènes jouant le rôle de stabilisation des parois du puits et alésage de ces même parois complétant ainsi le rôle de l'outil de forage.



Il s'avère alors que ces lames en alliage de carbure de tungstène s'usent par les roches dures de la formation et l'on observe par la suite une diminution du diamètre des stabilisateurs ou dans le cas extrême une perte totale de l'épaisseur de cet alliage en carbure de tungstène. Cette perte de diamètre du stabilisateur nous renvoie alors à la situation qui présente une garniture sans stabilisateur, et la nécessité de ce diamètre nous oblige à rénover ces alliages par les plus performants possible, ce qui explique l'élaboration d'une multitude de matériaux composite permettant d'atteindre le maximum de propriétés mécanique résistant en dureté et de très bonne résilience avec la durée de vie la plus étendue.

Introduction générale

La métallurgie des poudres englobe des procédés de mise en forme des matériaux ayant comme constituants de base des poudres. Bien que son utilisation remonte à l'antiquité, néanmoins ses procédés se sont développés depuis quelques décennies, et leurs avantages par rapport aux autres procédés de mise en forme des matériaux métalliques ont permis à la MDP de prendre un grand essor dans le secteur industriel.

Parmi les principaux matériaux fabriqués par la MDP, nous pouvons citer les carbures cémentés, communément appelés les cermets. Ce sont des matériaux composites à matrice métallique ayant comme renforts des céramiques tels que les carbures de tungstène WC, qui possèdent une dureté très élevée et une excellente tenue à l'usure, quoique leur fragilité et très grande température de fusion fassent qu'ils ne sont jamais utilisés pour produire des pièces imposantes. Ainsi, l'ajout d'un liant métallique leur confère d'excellentes propriétés mécaniques globales.

C'est la raison pour laquelle les cermets sont utilisés dans l'industrie pétrolière et minière pour la fabrication des composites de rechargement des tiges de forage et stabilisateurs ainsi que les outils. Les lames intégrées des stabilisateurs de la garniture de forage sont constitués de cermets, son élaboration fait intervenir le procédé d'infiltration qui est semblable au frittage en phase liquide et qui consiste en la fusion de l'un des constituants (le liant métallique) et de sa dispersion dans les vides laissés entre les particules des carbures de tungstène.

Le but de notre travail est l'élaboration d'une multitude de composites à base des carbures de tungstène et d'un liant constitué d'un alliage métallique au sein des ateliers de la base tubulaire de l'entreprise nationale de forage ENAFOR, suivi par une comparaison des propriétés de ces composites destinés à supporter des conditions extrêmes à travers les différentes formation géologiques que traverse la garniture de forage pendant la réalisation des puits pétroliers .

Pour l'élaboration de tout ces composites, on fait appel à une multitude de produits importés d'origine TECHNOGENIA fabriqués en France , et on utilise des procédés de soudages certifiés ARNCO qui est une norme internationale Américaine, ainsi les composite réalisés au sein de l'ENAFOR rependent aux exigences et normes de qualité standard des leaders mondiaux en matière de forage, et l'ensemble des opérations de rechargement des stabilisateurs est réalisé avec une main d'œuvre algérienne et destiné à l'économie nationale.

Ce travail est reparti en deux parties, la première qui est dédiée à la revue bibliographique comporte quatre chapitres qui se présentent comme suit :

- Le forage pétrolier ; On se focalise dans ce chapitre sur la stratégie adoptée par l'ENAFOR à la conquête des marchés nationaux et internationaux, ainsi qu'une présentation des différentes phases de forage et les problèmes de puits qui y sont liés.
- La stabilisation de la garniture de forage, ce chapitre présente les stabilisateurs et leur nécessité primordiale dans la garniture de forage, cette dernière étant soumise aux différentes contraintes liées au puits foré, aux formations géologiques, ainsi qu'aux conditions de travail.
- La métallurgie des poudres et l'infiltration.
- Les Cermets.

La seconde partie englobe les techniques expérimentales, les résultats obtenus et leur discussion. Elle comporte deux chapitres traitant de :

- Le rechargement des stabilisateurs par le soudage manuel.
- Le rechargement des stabilisateurs par le soudage automatisé.

Enfin, le mémoire comporte une partie annexe et se termine par une perspective, une conclusion générale et des références bibliographiques.

Chapitre I

Le forage pétrolière

I.1. Introduction

La dépendance au pétrole s'est vue accroître au fil du temps. Du simple caoutchouc au carburant, en passant par les textiles, ce combustible est omniprésent dans notre quotidien et dans nos utilisations, même les plus simples.

Pour explorer et exploiter les profondeurs contenant des hydrocarbures, il faut réaliser un forage.

Sonatrach est le premier groupe d'hydrocarbures en Afrique, grâce à ses 154 filiales dont une quinzaine détenue à 100% citant parmi elles : ENAGO entreprise nationale de géophysique, ENAFOR entreprise nationale de forage, ENGTP entreprise nationale de grands travaux pétrolier, NAFTAL société nationale de commercialisation et de distribution des produits pétroliers.

I.2. Présentation de l'entreprise nationale de forage

I.2.1. Historique

- 1966 Création de ALFOR, compagnie mixte entre SONATRACH et SEDCO, dont le capital est détenu comme suit: SONATRACH 51%, SEDCO 49%.
- 1981-1982 Dissolution de ALFOR et création d'ENAFOR dont le capital est détenu par l'État à 100% : Issue de la restructuration de SONATRACH, ENAFOR a été créée par décret N° 81-170 en date du 1er Août 1981 et mise en place le 1er Janvier 1982 par l'arrêté interministériel du 31 décembre 1981 portant date d'effet de substitution de l'Entreprise ENAFOR à SONATRACH dans une partie de ses compétences en matière de Forage.

Avec son capital d'expérience de plus de 50 ans dans le domaine du forage pétrolier, l'ENAFOR excelle dans son domaine qui lui vaut aujourd'hui sa renommée incontestable sur le plan national et international, opérant pour le compte de SONATRACH et ses opérateurs économiques étrangers

I.2.2 Activité de l'entreprise

➤ **Activité principales**

Le Forage

Réalisation de forages destinés à l'exploration et au développement des gisements d'hydrocarbures.

Le Work-Over

Entretien des puits producteurs de pétrole, de gaz et d'eau.

➤ **Activités de soutien**

La Maintenance Pétrolière

Rénovation des appareils et camps de forage et réparation des équipements de forage et des équipements tubulaires

Le Transport

Déménagement des appareils et camps de forage, approvisionnement des appareils en consommables et pièces de rechange, Rénovation & Maintenance des véhicules et des engins.

L'Hôtellerie

Prestations d'hébergement et de restauration du personnel ENAFOR ou du personnel des compagnies pétrolières et de leur sous traitants.

L'ENAFOR dispose actuellement de 52 appareils de type lourd et moyen répartis comme suit

Tableau I.1. Capacité du parc appareil ENAFOR [5]

TYPE APPAREIL	PUISSANCE	NOMBRE	
Drillmec MAS 8000 GD	3000 HP	1	
National Oil Well D-2000 UE	2000 HP	6	
Oil Well E 2000		5	
National 1320 UE		2	
Bentec DW E-2000		2	
Drillmec MAS 7000 GD		5	
Oil Well 840 E		1500 HP	10
National Oil Well D-1500 E	3		
Bentec E-1500 DC	4		
Bentec E-1500 AC	5		
Oil Well 840 SE	1		
Card Well K 1000	1000 HP		1
National Oil Well 760 E			2
Ideco 900	900 HP	4	
Oil Well 650 E	800 HP	1	
TOTAL PARC APPAREILS	52		

I.2.3.Stratégie de l'entreprise

L'ENAFOR a inséré dans sa stratégie de développement une batterie de mesures qui touchent aussi bien le volet Production que le volet Management, et qui sont contenues dans le PMTE.

➤ **Volet Production**

- renforcement de la capacité et mise à niveau de l'outil de production.
- Acquisition de nouveaux appareils ;
- Revamping et modernisation du parc existant.

➤ **Volet Management**

- modernisation des outils de gestion.
- Obtention des certifications QHSE (Quality-Health-Sécurité-Environnement)
- Mise en place d'un système ERP supporté par un réseau VSAT (composé des modules ; Analytique, Budget, Gestion de projets, GMAO gestion de la maintenance par ordinateur, Gestion des Ressources Humaines, Gestion des Approvisionnement, Gestion des Stocks,...).

➤ **L'international**

Les efforts déployés par l'entreprise dans le cadre de l'exportation de ses services à l'étranger ont été couronnés de succès par

- La pré qualification auprès de PDO (Petr oléum Développement Oman) pour l'ensemble des activités de forage et de Work-Over.
- La signature officielle, le 10 août 2005, du contrat de forage de 5 puits de développement Gaz à Mascate avec PDO (Oman) pour une durée estimée à une année et demi avec options de deux extensions d'une année chacune.
- La création d'une filiale dénommée LLC de droit Omanais, enregistrée a la chambre de commerce Omanaise (Mascate) le 28 août 2005.
- La prospection des opportunités du marché extérieur (Libye, Emirats Arabes Unis, Arabie Saoudite, Soudan).

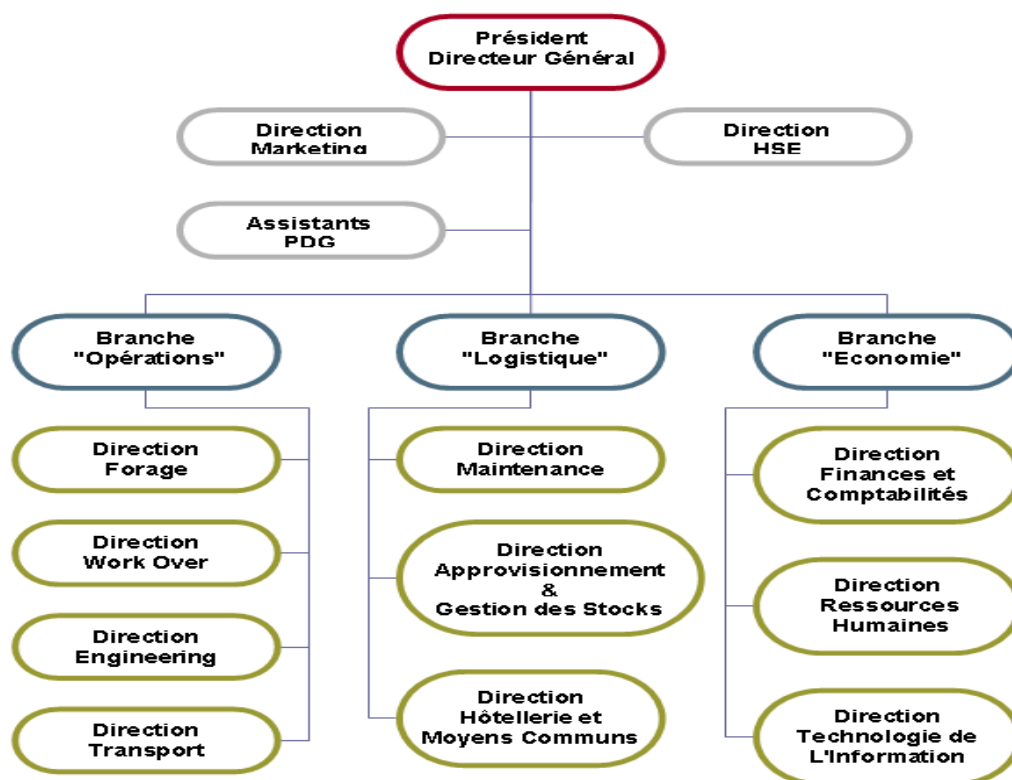


Figure I.1.Mise en place de l'organigramme ENAFOR [5

I.3. Notions de gisement pétrolier

I.3.1. Qu'est ce qu'un gisement pétrolier

C'est une opinion encore assez répandue dans le public peu au fait des réalités pétrolières que les hydrocarbures se trouvent stockés sous terre dans de vastes cavités naturelles. Ainsi parle-t-on couramment de "poches de gaz" et imagine-t-on les "nappes de pétrole" à la manière des lacs ou des mers souterraines que décrit Jules Verne dans le "Voyage au centre de la terre".

La réalité est toute autre et un "réservoir" imprégné d'hydrocarbures ressemble déjà plus à un énorme pain de sucre imbibé de café par exemple, et piégé dans le sous-sol. En fait un gisement est constitué d'une (ou plusieurs) roche(s) réservoir(s) contenant des hydrocarbures à l'état monophasique (huile ou gaz) ou diphasique (huile et gaz), de l'eau, et pouvant être en communication avec une formation aquifère parfois très étendue, le tout surmonté d'une roche couverture étanche faisant piège.

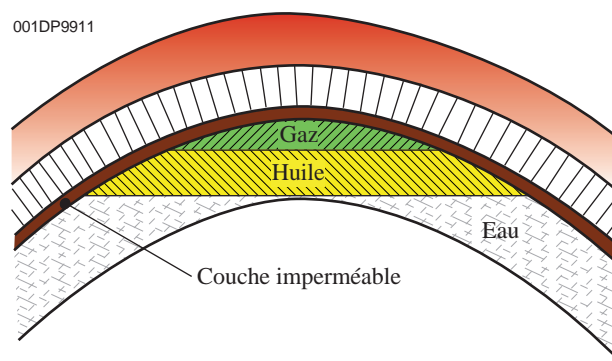


Figure I.2. Coupe verticale d'un gisement [2]

I.3.2. Types de gisement

Les pièges peuvent être structuraux (dôme, anticlinal allongé, piège sur faille, dôme de sel) ou stratigraphiques (variation de faciès, lentilles, biseaux, ...) ou mixtes.

Le réservoir proprement dit est surmonté d'une couche imperméable (argile, sel massif, anhydrite, ...) appelée roche couverture dont la continuité empêche les hydrocarbures de migrer vers la surface.

Les gisements se distinguent aussi par leur contenu : huile, huile et gaz, ou gaz, avec ou sans aquifère.

I.3.2.1. Gisements de gaz

Ce sont des mélanges complexes d'hydrocarbures, contenant essentiellement les premiers éléments de la série paraffinique, à savoir :

- le méthane CH_4 ou C1
- l'éthane $C_2 H_6$ ou C2
- le propane $C_3 H_8$ ou C3
- le butane $C_4 H_{10}$ ou C4

Tous quatre gazeux dans les conditions atmosphériques, ils peuvent contenir en outre d'autres hydrocarbures, de l'azote, de l'hydrogène, du gaz carbonique, de l'hydrogène sulfuré.

Le comportement des gaz naturels n'obéit pas à la loi des gaz parfaits. Il peut être représenté par l'équation qui s'écrit comme suit :

$$I.1). P \cdot V = Z \cdot R \cdot T$$

P : étant la pression absolue

V : le volume moléculaire

R : la constante universelle des gaz parfaits (8,32 en unités SI)

T : la température absolue

Z : étant un facteur dépendant de la pression, de la température et de la composition,

Z tend vers 1 quand P tend vers 0.

I.3.2.2. Les gisements d'huile

Les pétroles bruts sont des mélanges d'hydrocarbures lourds, principalement constitués de :

- Pentane $C_5 H_{12}$ ou C5
- Hexane $C_6 H_{14}$ ou C6
- Heptane } ou C₇₊
- Octane }
- ... }

Sous pression, c'est-à-dire dans les conditions de gisement, ils contiennent aussi des éléments plus légers (C1, C2, C3, C4, H_2S , CO_2 , ...) qui commencent à se dégazer lorsqu'en abaissant la pression on atteint la pression de saturation ou pression de bulle.

C'est-à-dire qu'un brut peut abandonner une grande partie des éléments volatils, d'une part dans le réservoir lui-même au cours de sa vie, d'autre part en cours de production, entre le gisement et le stockage.

La conséquence de ce phénomène est la suivante (pour une huile monophasique dans le gisement, y compris lors de la production) :

pour récupérer 1 m^3 d'huile au stockage, il faut extraire du gisement un volume supérieur d'hydrocarbures, appelé facteur volumétrique de fond (formation volume factor ou FVF) ; en même temps que ce mètre cube d'huile de stockage, un certain nombre volume de gaz a été soit récupéré, soit brûlé. Ce volume mesuré dans les conditions standard (15 °C, 76 cm de mercure) s'appelle solubilité du gaz dans l'huile, RS, ou GOR (Gasoil Ratio) de dissolution.

I.3.3. Paramètres des gisements

Au cours du forage d'un puits, il est très important de connaître les caractéristiques des couches traversées susceptibles d'être productrices. Dans cette intention, on procède généralement à un carottage mécanique qui permet d'extraire des échantillons de roches qu'on analyse en laboratoire. Les mesures effectuées ont pour but de déterminer la porosité, la perméabilité et les saturations en fluides de la roche ainsi que les limites des zones intéressantes. Les diagraphies différées donnant des informations en continu représentent l'autre outil fondamental à cet égard.

Les roches réservoirs sont essentiellement des grès (ou sables) et des carbonates: calcaires et dolomies.

❖ Porosité (\emptyset)

Une roche sédimentaire est constituée de particules solides agglomérées ou cimentées entre lesquelles existent des espaces, appelés "pores" ou parfois "vides", constituant des canaux

microscopiques (diamètre de l'ordre de quelques dixièmes de micron par exemple).

un échantillon de roche de volume total V_t comprenant un volume solide V_s ;

$(V_t - V_s)$ représente le volume occupé par les fluides, c'est-à-dire le volume de pore V_p . Sa porosité s'exprime par le rapport :

$$I.2). \emptyset = V_p / V_t = (V_t - V_s) / V_t$$

On s'intéresse particulièrement à la porosité utile, c'est-à-dire celle qui ne tient compte que des pores qui communiquent entre eux et avec l'extérieur. Les roches réservoirs ont des porosités très variables, généralement comprises entre 10 et 30 %.

Les valeurs de porosité sont obtenues par des mesures sur carottes, et par les diagraphies.

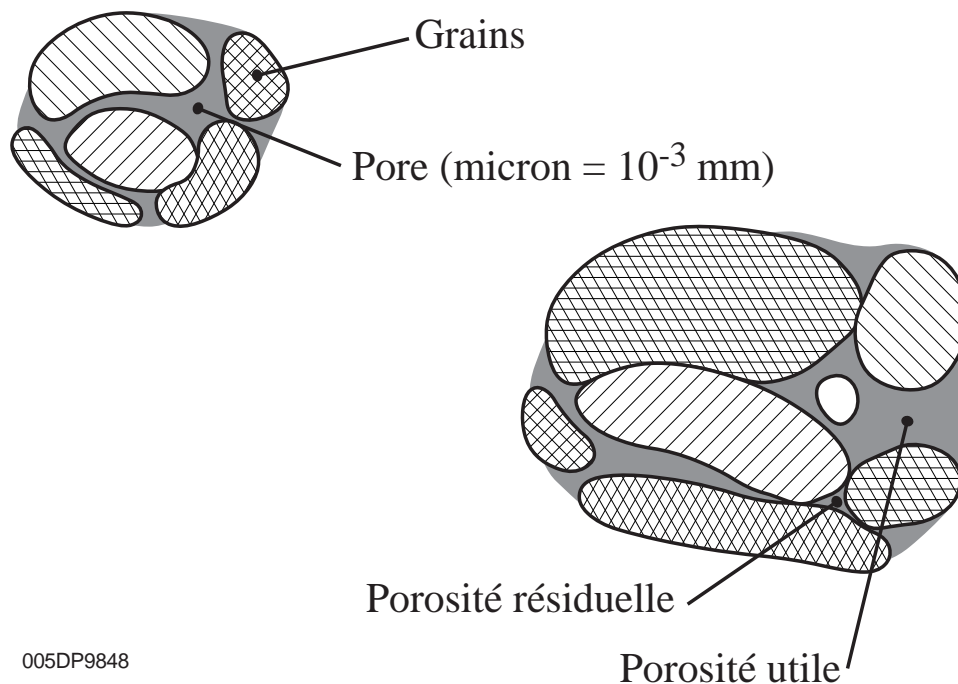


Figure I.3.Milieu poreux [1]

❖ Perméabilité (k)

C'est le paramètre clé pour le producteur. La perméabilité caractérise l'aptitude qu'à une roche à laisser s'écouler des fluides à travers ses pores. La perméabilité (k) est le coefficient de

proportionnalité qui relie le débit (Q) d'un fluide de viscosité (μ) qui passe à travers un échantillon de roche de section (S) et de longueur (dl), à la chute de pression (dP) nécessaire à son passage, la loi de Darcy pour un liquide en écoulement linéaire et en régime permanent s'écrit alors comme suit :

$$\mathbf{I.3). Q = k * \frac{S*dP}{\mu*dL}}$$

Q mesuré dans les conditions de l'écoulement, On utilise en pratique le milli Darcy (md) comme unité de mesure, les gisements exploités ayant généralement une perméabilité de 20 à 300 md. Le Darcy est la perméabilité d'un milieu qui laisse passer 1 cm^3 par seconde d'un fluide dont la viscosité est de 1 centipoise (viscosité de l'eau à 20 °C) sous l'effet d'un gradient de pression d'une atmosphère par centimètre à travers une surface de 1 cm^2 .

A noter que la perméabilité a les dimensions d'une surface.

La perméabilité d'une roche varie avec la direction considérée et l'on peut distinguer les perméabilités horizontales, verticale, parallèle au pendage et perpendiculaire à celui-ci. Les valeurs des perméabilités sont obtenues par mesures sur carottes, et aussi à partir des essais dans les puits.

❖ Saturations (S)

Il est essentiel de connaître la nature des fluides qui occupent les pores de la roche. La saturation d'un échantillon de roche en un fluide est le rapport du volume de ce fluide dans l'échantillon au volume de pore V_p de l'échantillon.

On définit ainsi :

La saturation en eau :
$$S_e = \frac{V_e}{V_p}$$

La saturation en huile :
$$S_h = \frac{V_h}{V_p}$$

La saturation en gaz :
$$S_g = \frac{V_g}{V_p}$$

$$\mathbf{I.4). S_e + S_h + S_g = 1}$$

Lors de la migration des hydrocarbures le déplacement de l'eau sus-jacente n'a jamais été complète. En effet, la perméabilité à un fluide devient nulle quand la saturation en ce fluide devient trop faible : ce seuil est appelé la saturation irréductible (pour le fluide considéré). En conséquence, il y aura toujours de l'eau dans un gisement. Appelée eau interstitielle. Ceci est la conséquence des phénomènes capillaires liés à l'exiguïté des pores : l'eau est un fluide "mouillant" qui s'étale sur les surfaces solides et va rester piégée dans les pores les plus petits. Les valeurs courantes de la saturation en eau interstitielle sont de : 10 % $<S_{ei}<$ 35 %.

Les mesures des saturations proviennent essentiellement des diagraphies.

I.4. Structure de forage pétrolier

I.4.1. Définition d'une structure de forage

Le procédé essentiel de l'exploration et de l'exploitation des gisements pétroliers reste le forage rotary qui permet d'atteindre de grandes profondeurs dans de bonnes conditions techniques et de sécurité. Cette technique consiste à utiliser un outil de forage visse à l'extrémité basse d'un train de tiges (garniture de forage) et sur lequel sont appliquées une force et une rotation. La force, appelée poids sur l'outil (WOB) et la rotation, combinées, permettent de couper la roche. La rotation est appliquée le plus souvent en surface. Le poids est assuré par un ensemble de tiges lourdes (masses-tiges) qui constituent la partie inférieure de la garniture. Les tiges permettent aussi d'acheminer sous pression du fluide de forage (la boue). Celle-ci refroidit l'outil et assure l'évacuation des débris de roche. Pour assurer la solidité à long terme du puits et le préserver contre les venues d'eau, des tubages sont descendus et cimentés à la paroi du puits.

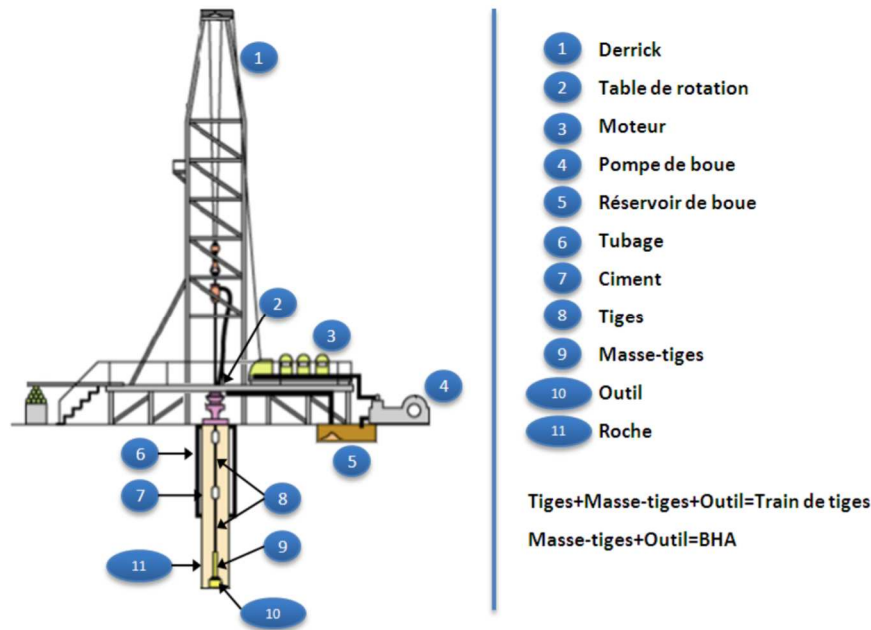


Figure 1.4 : La structure d'un forage pétrolier [6]

I.4.2. Eléments d'une garniture de forage

La profondeur des forages est généralement comprise entre 2000 m et 4000 m. Dans certains cas extrêmes, la profondeur forée peut atteindre 10000 m. Le diamètre du trou fore est compris entre 10 et 50 cm. Sur toute sa longueur, la garniture de forage est constituée par des tiges d'acier de 9 m de long chacune raccordées entre-elles par des joints filetés. La partie inférieure de la garniture constitue la BHA dont les éléments sont :

- Masse-tiges : ce sont des tiges lourdes et de plus grand diamètre qui assurent non seulement la transmission du poids sur l'outil mais aussi l'encaissement des chocs.
- Stabilisateurs : ils servent à centrer la tige dans le trou et permettent également de contrôler le comportement directionnel de la garniture suivant leurs nombre et position. Les stabilisateurs continuent à jouer ce rôle malgré l'utilisation croissante des nouveaux systèmes de plus en plus sophistiqués de contrôle de la direction de forage.
- Equipements de mesure (MWD) : ils sont placés au fond (à quelques mètres au-dessus de l'outil de forage) ou bien en surface. Ces équipements contiennent des instruments sophistiqués pour la mesure des différents paramètres, en particulier les paramètres de la direction du forage (inclinaison, azimut du puits au point de mesure). Les données mesurées au fond sont transmises à la surface sous forme de pulse de pression.
- Equipements d'amortissement des chocs : ils amortissent les vibrations axiales pour protéger les tiges et l'outil contre des chocs violents
- Moteur fond de trou : c'est un moteur de type moineau qui utilise la puissance hydraulique de la boue de forage pour fournir à l'outil de forage plus de couple en

rotation. C'est un élément indispensable du forage directionnel mais il peut entraîner des vibrations latérales à l'outil.

- Outil de forage : il existe deux classes principales d'outils; les outils tricônes et les outils PDC. Les outils tricônes (RC5) possèdent trois molettes coniques qui tournent librement autour de leurs axes qui détruisent la roche suite à son poinçonnement par les dents du tricône. L'outil PDC est un monobloc constitué par des taillants fixes sur le corps de l'outil, les outils PDC sont de plus en plus utilisés.



Figure 1.5 : Les outils d'un forage pétrolier [1]

I.4.3. Phases de forage

Le programme de forage d'un puits est réalisé au niveau de la Sonatrach (nombres de phases et leur côtes respectives, diamètres et types des outils pour chaque phase, Type de boue et côte finale de fin de puits), ce programme est transmis à l'ENAFOR pour la réalisation avec un personnel qualifié dans le métier et des équipements normalisés de très haute qualité, dans le but d'atteindre la profondeur recherchée selon l'architecture du puits (voir en annexe architecture d'un puits de forage) tout en respectant le programme et les mesures de sécurité standard.

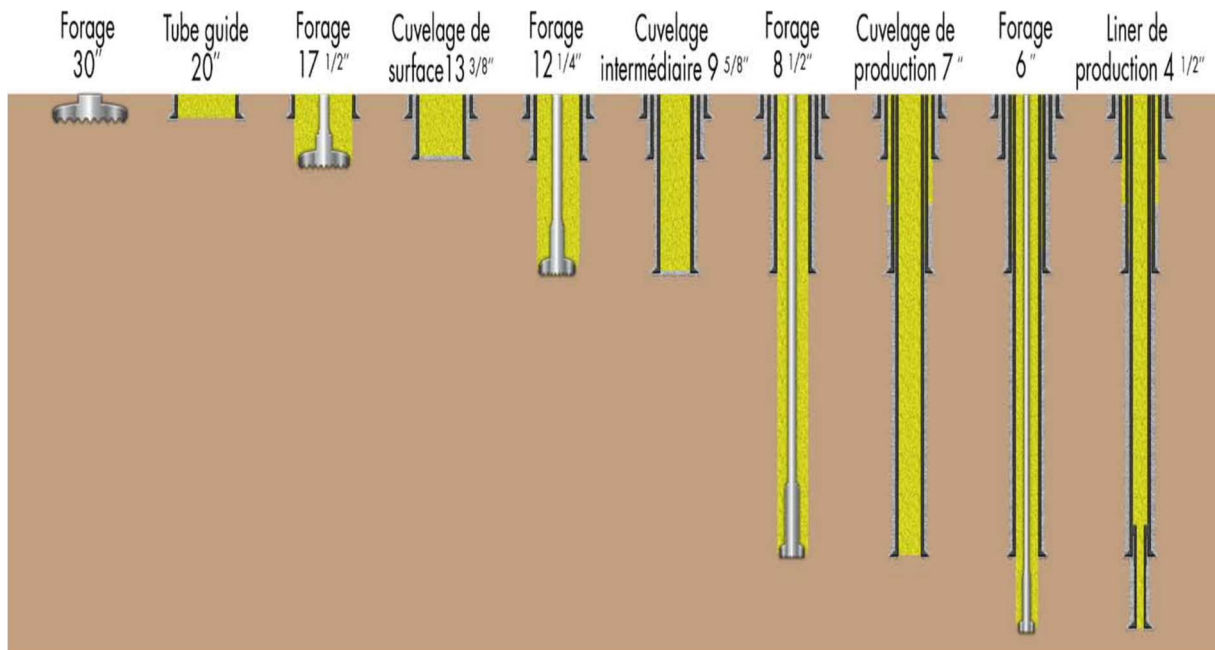


Figure 1.6 : Les phases d'un forage pétrolier [4]

I.4.3.1.Phase 26''

Cette phase dont le but est de tuber en 18''5/8 les formations de surface (Tertiaire), peut être réalisée en moins de 5 jours. La côte d'arrêt est à environ 500 mètres, à 40 mètres maximum dans le Sénonien anhydritique. Les problèmes encourus au cours de cette phase sont liés aux possibilités de pertes partielles ou totales dans les niveaux carbonatés du Mio Pliocène, dans les calcaires dolomitiques de l'Eocène.

L'apparition des pertes dans le MioPliocène peut être à l'origine d'éboulements des sables de surface pouvant aller jusqu'à la déstabilisation de l'appareil de forage.

➤ Paramètres de forage

- Poids : 10 à 25 tonnes (disponible 26 tonnes à 100 %)
- Rotation : 90 à 100 tr / min.
- Débit : 3200l / min. De la surface à la dalle, forer à 2500 l/min.
- Densité de boue : 1,05 à 1,08 (Bentonitique à base d'eau)
- Outil : 26'' dusé, a siège TOTCO

I.4.3.2. Phase 16''

Cette phase dont le but est de tuber en 13''3/8 les formations de surface (Tertiaire), peut être réalisée en moins de 5 jours. La côte d'arrêt est à environ 500 m, à 40 mètres au maximum dans le Sénonien anhydritique.

Les problèmes encourus au cours de cette phase sont liés aux possibilités de pertes partielles ou totales dans les niveaux carbonatés du Mio-Pliocène, dans les calcaires dolomitiques de l'Eocène, l'apparition de pertes dans le Mio-Pliocène peut être à l'origine d'éboulements des sables de surface pouvant aller jusqu'à la déstabilisation de l'appareil.

-Risques de déviation sur les niveaux carbonatés du Mio-Pliocène pouvant entraîner des difficultés à descendre le tubage 13''3/8.

➤ Paramètres de forage:

De la surface à la cote de la dalle calcaire

- Débit : 2000 à 2201/min 0
- Poids : 5 à 10 t
- Rotation : 90 à 100 tr/min

10 mètres après la dalle à TD

- Débit : 3000 à 3400 l/min
- Poids : 10 à 25 t
- Rotation : 10 à 120 tr/min
- Densité de boue : 1,05 à 1,08 (Bentonitique à base d'eau)
- Outil : 16'' dusé, à siège TOTCO

I.4.3.3. Phase 12''1/4

Le but de cette phase est de tuber en 9''5/8 les formations du Crétacé et d'une partie du Jurassique (Malmes Dogger), formations qui ne supporteraient pas la densité requise à la traversée du Lias. C'est une phase intermédiaire sans intérêt pétrolier qui doit être réalisée rapidement.

La côte d'arrêt se situe à environ 100 mètres sous le toit du Dogger lagunaire, soit aux environs de 2300/2400m. Le sabot devra être positionné de façon à ce que les 4 derniers mètres soient forés avec un avancement $> 20\text{min/m}$, avec les paramètres de forage normaux.

Les risques encourus sont limités et de deux types :

- coincements dans le Sénonien Salifère, Turonien et Cénomaniens.
- Venues d'eau douce de l'Albien (D équivalente 1.20 maximum) ne pouvant être liées, compte tenu des densités de boue utilisées pour cette phase, qu'à un mauvais remplissage en manœuvre ou un effet de pistonage.

Le métrage à réaliser pour cette phase est d'environ 1850 m. C'est la phase la plus longue. Actuellement, le développement des outils PDC 12"1/4 nous permet de réaliser cette phase de forage en moins de 8 jours.

➤ **Paramètres de forage:**

- Débit : 2800 l/min
- Rotation : 120 à 180 tr/min
- Poids : 5 à 18 tonnes
- Densité : 1,18 (Boue à l'huile à émulsion inverse)
- Outil : 12"1/4 PDC

I.4.3.4. Phase 8"1/2

Le début de la phase 8"1/2 commence lorsque l'outil 8"1/2 passe à travers la table, Le but de cette phase est d'isoler le Lias et le Trias salifères, demandant une densité boue comprise entre 2.00 et 2.20, avant d'entrer dans les réservoirs à hydrocarbures du Cambro-Ordovicien.

La cote d'arrêt se situe à environ 4 mètres sous le toit du Cambrien, cote déterminée par le Département Géologie SH. Les risques encourus sont de trois types :

- Venues d'eau chlorurée calcique du LD2, déstabilisant la boue par diffusion progressive.
- Coincements au niveau des argiles fluides du Trias salifère
- Pertes totales dès l'entrée dans le Trias Argilo-gréseux en raison de la densité requise pour éviter les risques mentionnés ci-dessus.

C'est la phase la plus délicate du puits en raison des problèmes encourus, du traitement et maintien des caractéristiques boues, de la durée des traitements des pertes du TAG qui est

variable selon l'implantation du puits. Le tubage 7" doit impérativement être posé à 4 mètres sous le toit du CAMBRIEN, c'est une autre difficulté essentielle de cette phase, un tubage posé au-dessus du Cambrien impliquera, une poursuite du forage en 6" avec une densité élevée qui ne correspond pas aux objectifs de production.

Le métrage à réaliser pour cette phase est d'environ 1000 m. Les outils PDC qui sont actuellement développés nous permettent de forer jusqu'au repère G35 en moins de 4 jours.

La durée du reste de la phase dépend de la virulence des pertes. On considère que le temps de résolution du problème des pertes est de deux jours et demi par bouchon de ciment.

➤ **Paramètres de forage**

- Débit: 1800l/min maximum
- Poids: 5 à 16 tonnes
- Rotation: 120 à 160 tr/min
- Densité : 2 à 2,2 (Boue à base d'huile à émulsion inverse)
- Outil : 8''12 à dents, sans d'uses

I.4.3.5. Phase 6''

C'est la phase de carottage ou forage du réservoir Cambro-ordovicien et de la complétion du puits après test. Dans quelques cas particuliers le test n'est pas fait.

Peu de risques durant cette phase sauf dans le cas d'un mauvais positionnement du sabot 7" plus haut que le cambrien. Les risques de coincement, compte tenu de la densité de la boue utilisée, sont alors importants et très complexes à résoudre. De ce fait on devra tenir compte, en début de phase de tous les signes pouvant être pris en compte (Reforages, Tractions...) et agir en conséquence.

Les risques de venues sont assez limités compte tenu de la connaissance actuelle du champ. Il reste toutefois nécessaire d'être vigilants et de se conformer aux règles de sécurité indispensables dans une phase de forage de réservoir.

-A la fin du carottage ou forage les opérations sont entièrement prises en main par HYD-DPR pour la partie test de puits et complétion. Il est toutefois important que le superviseur HYD-FOR reste conscient des problèmes de sécurité et de la notion de performance en collaboration avec le superviseur HYD-DPR.

➤ **Paramètres de forage**

- Débit : 900 à 1000 l/min
- Poids : 4 à 8 T
- Rotation : 70 à 100 t/min
- Densité : à base d'huile définie par HYD-DPR
- Outil : 6'' définit par HYD-DPR

Chapitre II
Stabilisation de la garniture
de forage

II.1 – Introduction

On appelle "Forage Pétrolier" l'ensemble des opérations permettant d'atteindre les roches poreuses et perméables du sous-sol, susceptibles de contenir des hydrocarbures liquides ou gazeux.

L'implantation d'un forage pétrolier est décidée à la suite des études géologiques et géophysiques effectuées sur un bassin sédimentaire. Ces études permettent de se faire une idée de la constitution du sous-sol et des possibilités de la présence des gisements, mais elles ne peuvent pas préciser la présence des hydrocarbures. Seuls les forages pourront confirmer les hypothèses faites et mettre en évidence la nature des fluides contenus dans les roches.

II.2- Contrôle de la BHA (Bottom-Hole-Assembly)

Le poids sur l'outil qu'il faut fournir pour forer la roche peut atteindre 25 tonnes, sachant que le poids total de la garniture peut atteindre 300 tonnes. Il faut alors ajuster la force de tension en surface pour assurer un poids sur l'outil convenable. Ce poids, et donc cette force de compression, ne doit pas dépasser une certaine limite pour éviter le phénomène de flambage des tiges et la force de tension en surface doit rester en dessous de la résistance à la traction des tiges. La partie inférieure de la garniture de forage est donc en compression alors que la partie supérieure est en traction. Typiquement, la longueur des masse-tiges est calculée de telle sorte que le point neutre soit toujours situé au niveau des masses tiges qui ont une résistance plus importante au flambage que les tiges. Les fluctuations du poids sur l'outil entraînent des fluctuations de la position du point neutre.

On parle donc plutôt de « zone de transition » dans laquelle la tige est soumise à des cycles de traction/compression ce qui peut induire un phénomène de fatigue. Bien évidemment, la détermination de cette zone doit prendre en compte les interactions et les frottements de la garniture de forage avec la paroi du puits en particulier pour les forages déviés.

Le schéma suivant illustre la partie inférieure (BHA) sollicitée en compression qui représente 20% de la garniture de forage, tandis-que le reste la partie supérieure 80% sollicitée en traction.

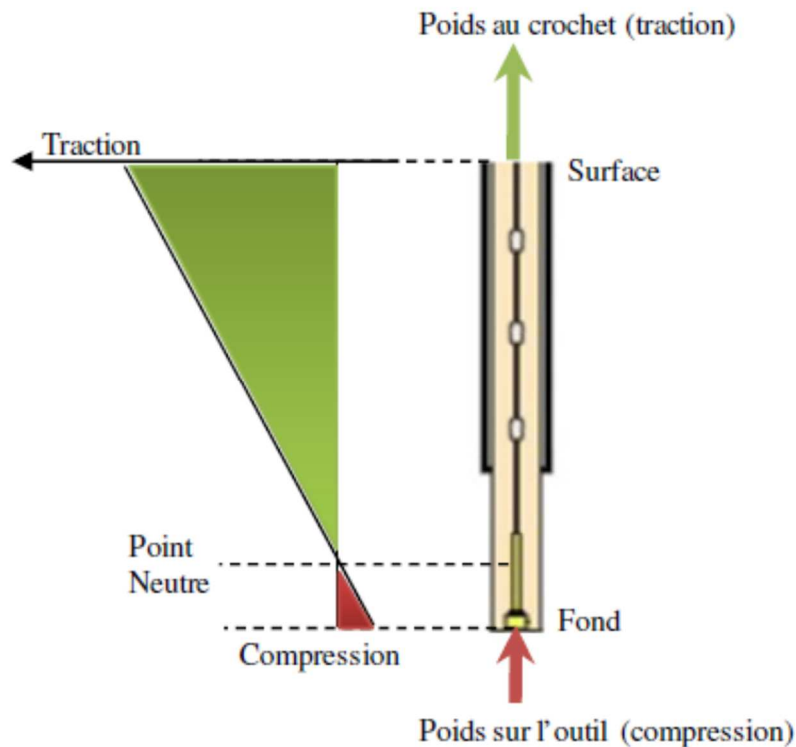


Figure II.1 : La BHA en compression et en traction de la garniture [10]

II.3. Paramètres de forage

On appelle paramètres de forage l'ensemble des facteurs mécaniques et hydrauliques qui conditionnent l'avancement des opérations de forage.

II.3.1. Paramètres mécaniques

- **Poids sur l'outil**

Afin de pouvoir creuser la formation souterraines, l'outil de forage fixé à l'extrémité de la garniture doit tourner simultanément en exerçant un poids sur la roche à forer, c'est en lâchant partiellement le train de tige à l'aide du frein que l'on peut mettre la partie basse de la garniture (BHA = 20%) en compression ce qui provoquera un poids appelé WOB (Weight On Bit) ou le poids sur l'outil.

- **Vitesse d'avancement**

C'est la longueur forée par unité de temps, ce paramètre dépend de la vitesse exercée par le chef de poste permettant la descente de la garniture de forage à l'intérieur du puits.

- **Vitesse de rotation**

C'est le nombre de tours par minute RPM (Rotation Par Minute) réalisé par l'outil de forage, elle varie en fonction de la dureté de la formation et type de l'outil, cette rotation est transmise à la garniture par la table de rotation munie d'un arbre qui tourne auquel est fixé un capteur pour identifier d'éventuelles disfonctionnement.

II.3.2. Paramètres Hydrauliques

- **Pression de boue de forage**

Des jauges de pression à contrainte sont placées sur la colonne montante pour la lecture de pression d'injection et sur le manifold de duses pour la lecture de la pression annulaire, cette lecture est nécessaire pour surveiller d'éventuels montées de gaz ou d'eau dans le puits de forage, ainsi la sécurité du personnel sur chantier.

- **Débit des pompes**

Le débit de boue est un paramètres fixé pour assurer un bon nettoyage du trou et de l'outil ainsi que son refroidissement, mesuré en sortie de pompes et facilement obtenu par le nombre de coups de pompe à boue par unité de volume.

II.4. Stabilisation d'une garniture de forage

On appelle forage vertical, par opposition au forage dirigé, tout forage implanté à la verticale de son objectif, la déviation maximale admissible étant limitée pour atteindre la cible, c'est le cas de la plupart de forage d'exploration.

Un outil de forage n'a pas normalement la tendance à forer verticalement, afin de limiter et de contrôler la déviation d'un puits on intègre dans la garniture de forage des stabilisateurs, dont on choisit le nombre, le dimensionnement et la position pour répondre au mieux au problème posé.

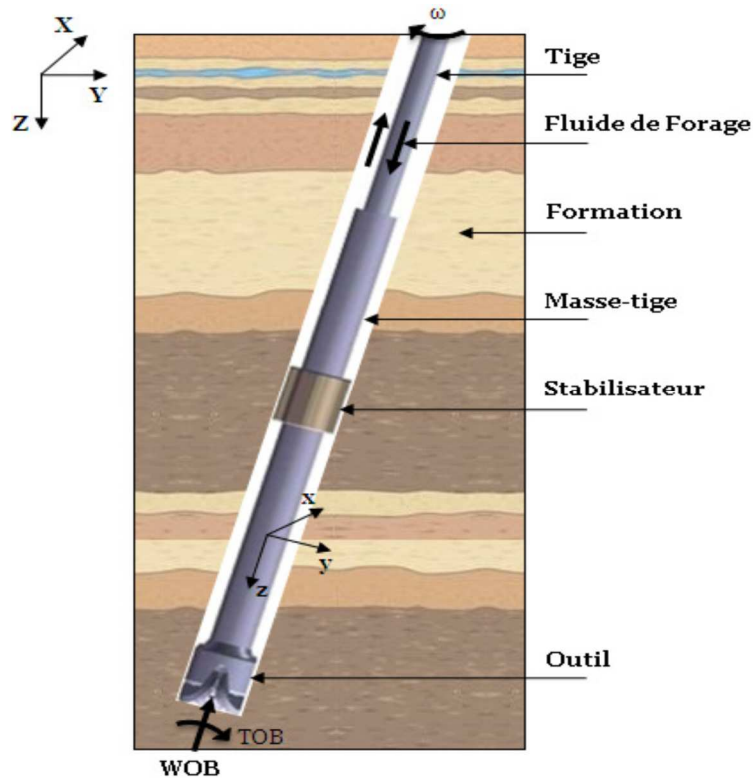


Figure II.2 : La BHA d'une garniture de forage stabilisée [9]

II.4.1. Objectif d'un forage vertical

L'objectif d'un forage vertical est d'atteindre une cible donnée avec une certaine tolérance. Pour rester dans des limites admissibles (distance maximum par rapport à la verticale à respecter), il est nécessaire de contrôler et parfois de corriger l'inclinaison. Les programmes de forage imposent souvent une limite maximum d'inclinaison.

Si, par exemple, le programme prévoit un puits à 3 000 m avec une déviation maximum de 5 degrés, la déviation maximum peut être obtenue dès la surface et être conservée jusqu'à la profondeur finale auquel cas l'écartement par rapport à la verticale sera maximum (260 m dans notre exemple).

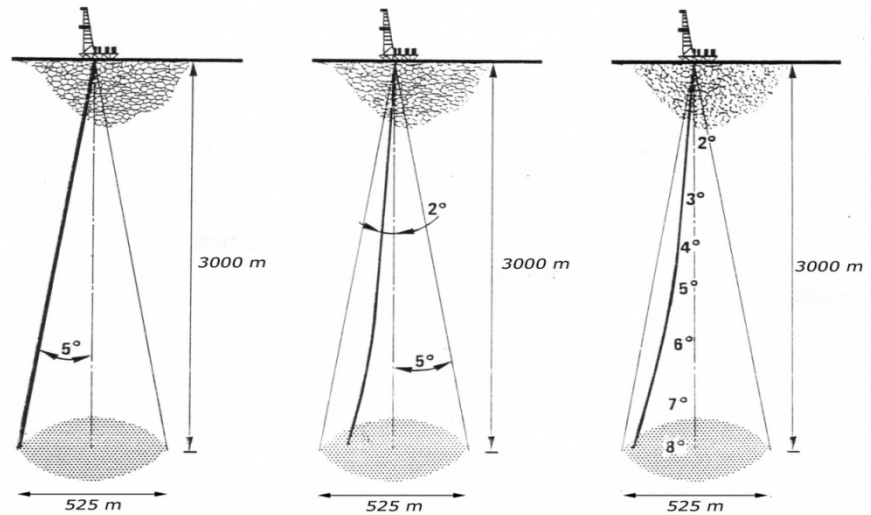


Figure II.3 : Contrôle de l'inclinaison en forage vertical [3]

II.4.2. Rôle des alternances des terrains

Lors du passage d'une formation tendre à une formation dure, l'inclinaison de la frontière entre les deux formations et l'usure de l'outil jouent un rôle important dans l'apparition de phénomènes de déviation.

Tant que l'inclinaison de la frontière entre formations dure et tendre restait inférieure à 45° , l'outil a tendance à forer perpendiculairement à cette frontière, provoquant une déviation du trou foré par rapport à la verticale.

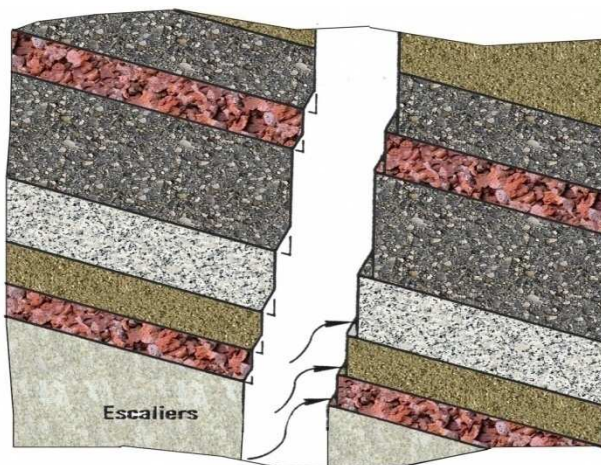


Figure II.4 : Pendage des terrains et tendance à dévier [11]

❖ Théorie du WHIPSTOCK

- Passage de terrain tendre à un terrain dur : répartition uniforme du poids sur l'outil
- Apparition d'un Moment à l'outil
- Transmission de ce moment aux masse-tiges
- Augmentation du « TILT ANGLE » (angle entre axe de l'outil et axe du puits)
- Création d'escaliers
- Tendance à remonter la pente
- Tendance à forer perpendiculairement aux couches
- ROP < dans le terrain dur
- Tendance de l'outil à partir sur le terrain dur
- L'outil se trouve ramené à la perpendiculaire du terrain dur d'où il ya une tendance à dévier.

II.4.3. Relation entre force de déviation et pendage

Les problèmes que rencontre une garniture durant le forage sont :

- Variations de la forme du trou causées par l'érosion et les défauts de la formation,
- Variations de la courbure du trou sous l'effet de la garniture elle-même ou de la formation (pendages, failles, changements de formations ou autres), Comportement mécanique de la formation change (rigidité, élasticité, plasticité),
- Changements des efforts internes à la formation et sa réponse à l'attaque latérale ou frontale de l'outil,
- Apparition des vibrations et des chocs sur les parois du trou avec des amplitudes et des fréquences diverses.

Toutes ces influences sont difficiles à quantifier par manque de données précises ou de lois physiques applicables. La meilleure méthode est de comparer deux garnitures différentes descendues dans le même type de puits pour en déterminer la plus convenable. On peut dire alors que

- ❖ la force de déviation F_d s'exerce
 - Vers le haut : pour un pendage $< 45^\circ$
 - Vers le bas : pour un pendage $> 45^\circ$

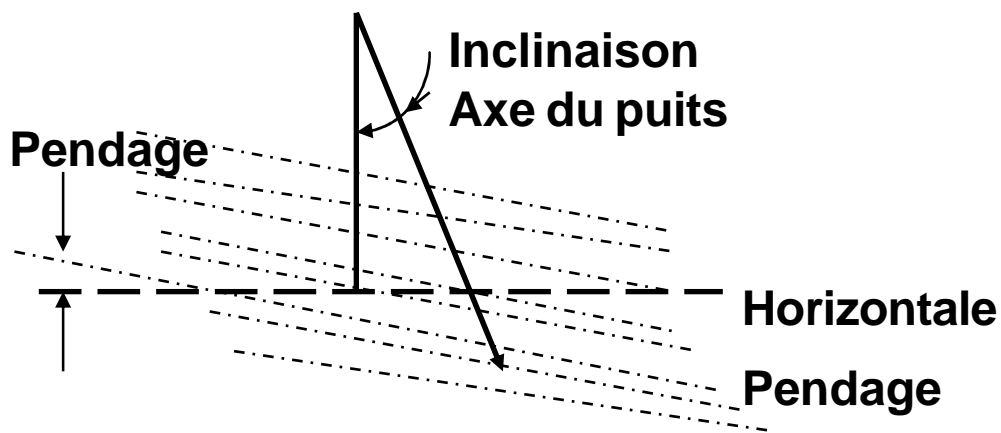


Figure II.5 : Pendage des terrains et angle de déviation [8]

II.4.4. Comportement des garnitures de forage

La combinaison des attaques frontale et latérale détermine la tendance à la déviation d'une garniture donnée. Lorsque l'angle entre l'axe de l'outil et celui du puits (tilt angle) est non nul, il existe une composante du poids sur l'outil qui agit comme un effort latéral. Cette composante peut être de sens opposé à la side-force (effort latéral appliqué à l'outil résultant de la déformation de la garniture) et modérer son effet.

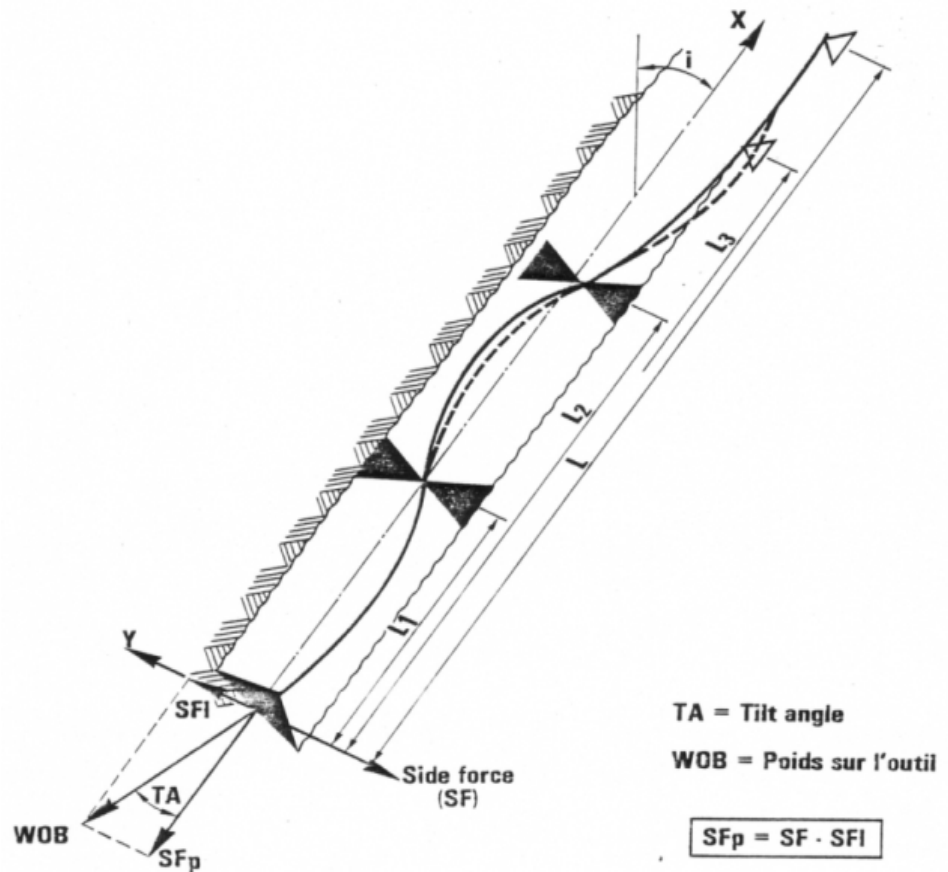


Figure II.6 : Combinaison d'effort latéral et frontal dans l'angle de déviation [7]

Il est à retenir que :

- Le diamètre extérieur des masse-tiges a une grande influence sur les résultats ; le diamètre intérieur en a peu d'influence.
- L'inclinaison du puits donc le poids propre de la garniture est le paramètre essentiel en ce qui concerne la déformée.
- L'effet du poids sur l'outil est négligeable par rapport à celui de l'inclinaison ; ces deux paramètres influent à la fois sur la valeur du tilt angle et sur la side-force.
- L'utilisation d'un near-bit stabilisateur rend négligeable la valeur du tilt-angle ; l'utilisation de deux near bit en tandem sur l'outil est encore meilleure.
- Les variations de la side-force sont plus importantes avec des masse-tiges de diamètre élevé quand l'inclinaison varie ; il est donc recommandé d'utiliser des masse-tiges de diamètre maximal pour conserver la verticalité du puits.

II.4.5. Optimisation des garnitures stabilisées (Packed-Hole)

Une garniture packed-hole optimale devrait remplir les conditions suivantes :

- Le tilt angle minimum à l'outil
- Le minimum de matière dans la BHA
- La déformée minimum des masse-tiges

Avec une garniture packed-hole la side-force varie considérablement avec le surdimensionnement et la courbure du trou, et les limites de variation du tilt-angle sont très étroites, pourvu que le near-bit soit plein trou et assez proche de l'outil.

Les garnitures packed-hole qui tiennent bien en angle oscillent avec une période et une amplitude qui dépendent de la garniture elle-même, la formabilité de la formation, le type d'outil et la vitesse d'avancement. La garniture et le trou peuvent être considérés comme un système tendant à atteindre l'équilibre (lock-up), c'est-à-dire que :

- Dès que le trou tend à monter, la garniture réagira avec une tendance à tomber en angle.
- Dès que le trou tend à tomber en angle, la garniture réagira avec une tendance à monter.

Dans un trou vertical, une bonne garniture lock-up doit avoir les qualités suivantes :

- Etre très peu sensible au poids sur l'outil,
- Réagir très violemment à toute tendance du terrain à donner de l'angle au puits,
- Etre très peu sensible aux variations de diamètre du trou quelle que soit leur origine.

Il faut donc chercher la garniture la plus rigide possible.

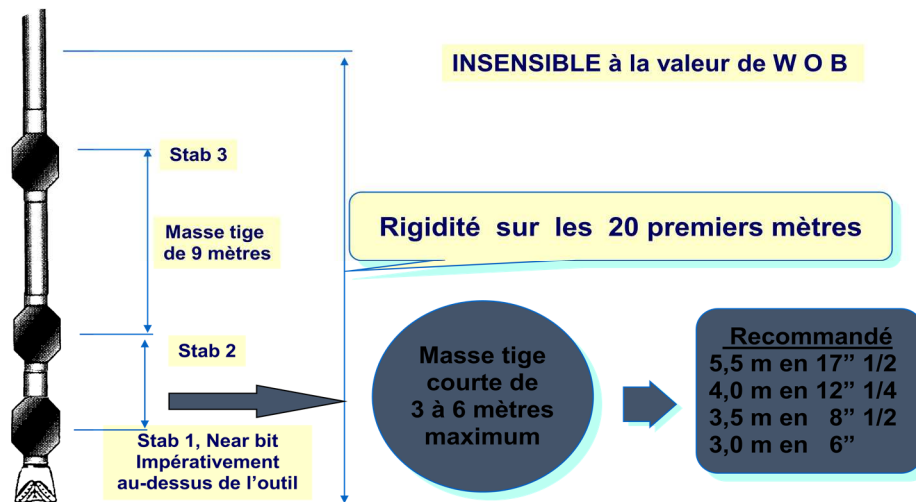


Figure II.7 : Optimisation des garnitures stabilisées (Packed-Hole) [5]

II.5. Types de stabilisateurs

Un stabilisateur est une pièce comportant un corps cylindrique équipé de trois lames à sa périphérie. Dans le puits les lames prennent appuis sur les parois et permettent ainsi d'assurer un meilleur guidage et un meilleur centrage de la garniture.

Ils sont incorporés au niveau des masses-tiges afin de garder et contrôler la trajectoire de l'outil, qu'elle soit verticale ou inclinée. Leurs formes et constructions sont multiples en fonction des terrains, de leur abrasivité, des appuis plus ou moins longs que l'on désire. Suivant la trajectoire désirée, les stabilisateurs seront placés en différents points de la garniture de fond. Leur diamètre est également un facteur important dans le contrôle de la trajectoire.

L'utilisation de trois stabilisateurs par BHA paraît être un maximum compte tenu des frottements importants qu'ils induisent dans le puits.

II.5.1. Stabilisateurs à lames soudées (Welded-Blade-stabilisers)

Les stabilisateurs à lames soudées ne perturbent pas la circulation de la boue dans l'annulaire et en raison de la forme des lames, permettent un alésage efficace. Ces stabilisateurs sont utilisés dans les formations de dureté moyenne car ils procurent une petite surface de contact avec la paroi du puits et ont tendance à élargir le puits dans les formations tendres. Ils ne coûtent pas cher et les lames peuvent être remplacées ou rechargées quand elles sont usées.

II.5.2. Stabilisateurs à lames intégrées (Integral-Blade-stabilisers)

Dans les stabilisateurs à lames intégrées, les lames sont tournées et usinées dans le corps du stabilisateur. Le stabilisateur étant d'une seule pièce, les lames ne peuvent pas être remplacées lorsqu'elles sont usées. Ces stabilisateurs ont un coût plus élevé que les stabilisateurs à lames soudées.

Ces stabilisateurs peuvent avoir l'arête de la lame arrondie pour réduire l'endommagement des parois et procurer une plus grande surface de contact dans les formations tendres. Les lames peuvent être également équipées d'inserts de carbure de tungstène pour augmenter la durée de vie du stabilisateur. Les lames, ayant une grande surface de contact avec les parois du puits, assurent ainsi une bonne stabilisation dans les formations tendres facilement endommagées et procurent une résistance aux formations abrasives grâce aux inserts de carbure de tungstène.

II.5.3. Stabilisateurs à chemise interchangeable

(Sleeve-Type-stabilisers)

Il existe deux modèles. Sur l'un des modèles, la chemise est vissée sur le corps du stabilisateur tandis que sur l'autre le corps est constitué de deux parties, la chemise se vissant sur la partie supérieure. Dans les deux modèles, les chemises peuvent être facilement changées et différents diamètres s'adaptent sur le même corps. Cela représente un avantage sur les autres types de stabilisateurs.

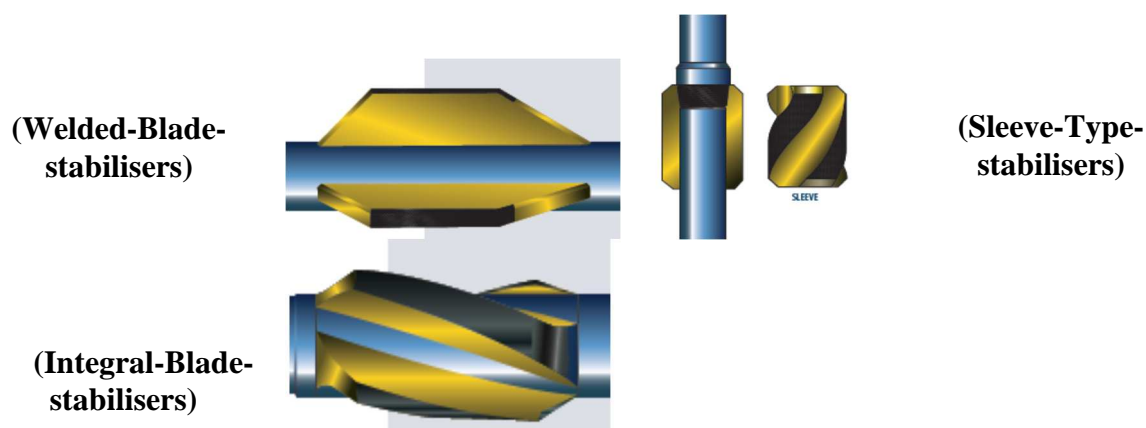


Figure II.8 : Les types de stabilisateurs [1]

Chapitre III

Métallurgie des Poudres et infiltration

III.1. La métallurgie des poudres

La métallurgie des poudres est le procédé phare dans l'industrie de mise en forme des matériaux métalliques ou céramiques, en raison des innombrables avantages qu'elle présente.

III.1.1. Définition de la métallurgie des poudres

Elle englobe les procédés technologiques qui permettent d'élaborer des composants de formes prédéterminées en utilisant des poudres (métalliques, céramiques...etc.) ayant une granulométrie et une constitution maîtrisées.

Les procédés spécifiques de la MDP sont développés depuis quelques décennies. Ils se sont positionnés comme des solutions techniques conventionnelles ou innovantes dans divers secteurs industriels. Par comparaison aux autres procédés de mise en forme, les techniques de la MDP se sont ainsi imposées pour certaines applications.

L'un des principaux procédés qui font de la métallurgie des poudres une prérogative dans le secteur industriel est le frittage.

III.1.2. Avantages de la métallurgie des poudres

La métallurgie des poudres offre d'innombrables avantages comparée aux autres procédés technologiques de mise en forme des matériaux, dont on peut citer :

- ✓ La capacité intrinsèque à produire une large gamme d'alliages, notamment les composites, avec des propriétés uniques.
- ✓ Le contrôle de la taille, la forme et l'emplacement de la porosité dans la pièce.
- ✓ L'adaptation des microstructures pour proposer une gamme de propriétés physiques et mécaniques.
- ✓ La production des pièces de volume modéré à volume élevé.
- ✓ La fabrication d'une gamme étendue de formes.
- ✓ La capacité d'optimiser le processus complet, allant de la sélection des matériaux en passant par la fabrication jusqu'aux propriétés du produit fini.
- ✓ Le coût-efficacité plus compétitif vis-à-vis des procédés tels que le moulage, le forgeage et l'usinage.

III.2. L'infiltration

Le procédé d'infiltration a une grande importance, car il permet la production de pièces très denses en notifiant un changement de dimension minimale.

L'infiltration peut s'effectuer sous pression ou sous vide. Dans le premier cas, une pression est appliquée sur le métal liquide qui est forcé à infiltrer une préforme. La pression externe fournie par un gaz ou un dispositif mécanique utilisé pour obtenir la densité totale du composite.

Dans l'infiltration spontanée (sous vide), l'écoulement du liquide entre les particules est favorisé par la gravité et le phénomène de capillarité.

III.2.1. Infiltration conventionnelle

Afin de développer la technologie d'infiltration plusieurs techniques ont été utilisées dont ;

A) Infiltration par immersion partielle

Dans un creuset qui contient un bain de métal en fusion, on immerge partiellement un corps squelettique. Le matériau aspire le liquide, ce dernier s'élève sous l'action des forces capillaires. Ce qui tend à expulser les gaz contenus dans les pores.

B) Infiltration par immersion totale

Dans le métal liquide on immerge complètement le corps squelettique. Le liquide pénètre le matériau de tous les côtés jusqu'au cœur.

L'immersion doit être effectuée lentement ou bien par étapes pour éviter qu'il y ait des gaz dans le corps infiltré, ainsi pour faciliter le dégazage l'infiltration peut être réalisée sous vide.

C) Infiltration par contact

On place l'infiltrant en contact avec le matériau à infiltrer. Après la fusion de l'infiltrant, le liquide se forme et pénètre dans les pores. Lorsqu'on place l'infiltrant au-dessus du corps squelettique, le liquide se répand sur toutes les faces du squelette avant qu'il pénètre à l'intérieur du corps.

Pour évacuer les gaz contenus dans le corps, l'infiltrant doit être placé sous le squelette ou sous un vide. La quantité du liquide qui doit infiltrer les pores peut être calculée, en utilisant

un réservoir qui contient le métal liquide. C'est une méthode semblable au frittage en phase liquide.

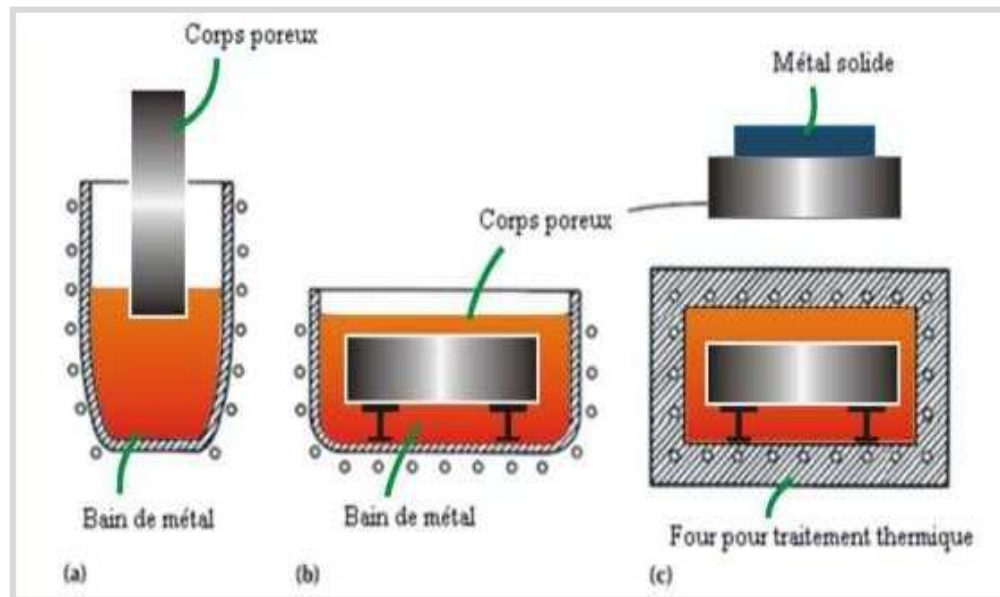


Figure.III.1.Différentes méthodes d'infiltration [29]

III.2.2. Infiltration de poudres libres

Contrairement à l'infiltration conventionnelle, les poudres ne forment pas initialement un squelette, leur comportement diffère au contact de l'infiltrant. Le chauffage de l'ensemble des poudres et de l'infiltrant s'effectue en même temps.

❖ Processus

Le métal ou alliage possédant un bas point de fusion remplit les pores interconnectés des poudres libres. La force motrice de l'infiltration est l'attraction capillaire qui réduit l'énergie surfacique inter faciale. Ainsi, les poudres de la matrice sont recouvertes par le liquide.

La quantité de l'infiltrant et le volume des pores interconnectés sont importants. L'excès de porosité peut freiner l'infiltration, engendrer des imperfections et réduire l'angle de contact et la viscosité de l'infiltrant.

Le processus d'infiltration s'installe exclusivement par le phénomène de capillarité si les granulés de l'infiltrant (liant) fusionnent doucement.

A des taux de fusion élevés, les granulés de l'infiltrant deviennent liquide rapidement, ceci est traduit par un écoulement rapide où apparaît des forces dynamiques pouvant déplacer les particules des poudres entre elles. Ce phénomène est mis en évidence dans l'infiltration de mélange de poudres libres en WC-W-Ni par un alliage en Cu-Sn- Ni avec un taux de chauffage élevé ($\approx 100^\circ\text{C}/\text{min}$).

II.2.3. Conditions et paramètres d'infiltration

L'obtention d'un matériau ayant une grande voire une complète densification implique un bon déroulement du procédé d'infiltration. Les conditions pour avoir un bon flux capillaire sont :

○ La porosité

Ce procédé requiert la plus faible porosité du mélange de poudres. Pour cela, il faut une distribution granulométrique appropriée, qui nécessite des vibrations lors du remplissage du moule.

○ Durée d'infiltration

Cette dernière doit être courte. Elle est définie par la forme des particules ainsi que par leur surface spécifique. Bien que les particules sphérique 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.

○ Mouillabilité

Plus la mouillabilité du solide par l'infiltrant est grande, mieux c'est. Elle prend place lorsque l'énergie surfacique de la nouvelle interface qui se forme (solide-liquide et liquide-vapeur) est plus faible que celle d'origine (solide-vapeur).

Elle est déterminée par la nature des particules solides du mélange des poudres, des caractéristiques physico-chimiques du liant et de l'atmosphère du traitement. Une infiltration réussie implique une mouillabilité complète. Comme dans le cas de l'infiltration conventionnelle de corps poreux, elle est en générale favorable si le solide et le liquide sont chimiquement compatibles. Cette compatibilité existe lorsque le liquide est capable de fournir une solution avec le mélange solide où des composés sont formés à l'interface.

III.2.4. Domaines d'application de l'infiltration

L'utilisation du procédé d'infiltration dans l'industrie s'est accentuée.

Même si des conditions essentielles d'infiltration sont strictement remplies, les systèmes binaires possibles dans lesquels un métal de base de point de fusion élevé ou un composé peut être infiltré par un autre métal de point de fusion inférieur sont considérables.

III.3. Le frittage

Bien qu'il n'est pas facile de donner une définition simple et complète du frittage, il peut être défini comme le processus de traitement thermique qui permet à un système pulvérulent d'évoluer vers un état de compacité maximale, c'est-à-dire vers un état de porosité presque nulle et de conférer ainsi au compact des propriétés mécaniques convenables. Au cours du frittage, la forme de la pièce est conservée contrairement à son volume qui diminue en général (phénomène du retrait)

III.3.1. Différents types de frittage

Le frittage peut se dérouler de deux (2) façons distinctes : le premier à l'état solide, et le second met en jeu la formation du liquide, qui résulte de la fusion de l'un des constituants.

III.3.1.1. Frittage en phase solide

Au cours de ce type de frittage tous les constituants restent à l'état solide. La température de frittage dans ce cas est inférieure à celle de fusion des deux constituants.

Les premiers travaux sur le frittage ont été développés à l'échelle de grain par Frenkel (1945), Coble (1961). Leurs travaux ont permis de le décomposer d'une manière phénoménologique en trois (3) étapes :

- Formation des ponts entre les particules, la densité relative atteint une valeur de 0,65.
- Elimination de la porosité ouverte, la densification se poursuit et les valeurs de la densité relative se situent entre 0,65 et 0,92.
- L'étape qui s'avère la plus lente et la plus difficile, au cours de laquelle la porosité

fermée est éliminée.

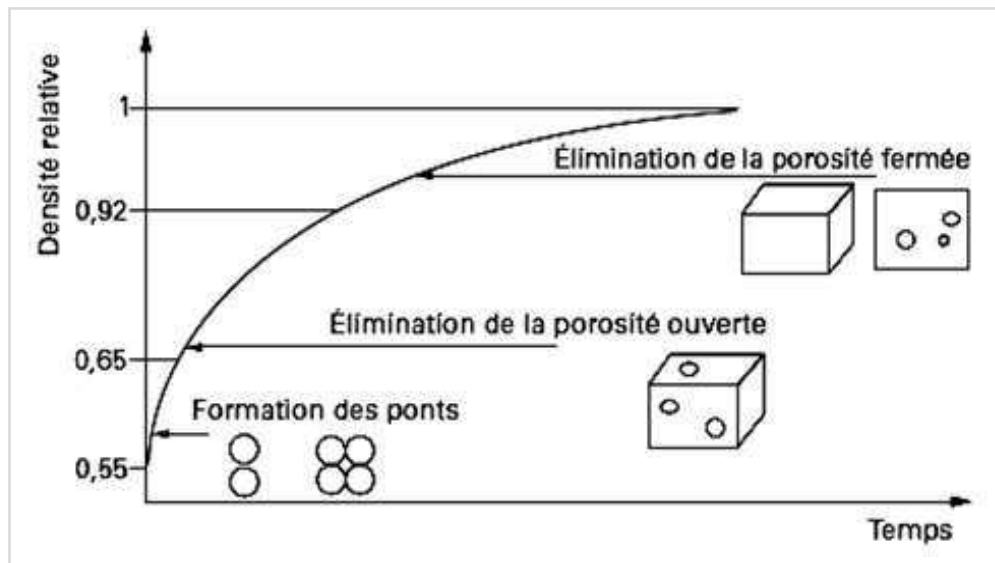


Figure .III.2. Stade de densification [33]

III.3.1.2. Frittage en phase liquide

Dans ce cas, l'un des constituants est susceptible de fondre à la température de frittage, ce qui permet la présence d'une phase liquide qui assure la densification du matériau.

Les avancées techniques importantes de ce procédé, ont commencé dans les années 1930, avec le développement de plusieurs matériaux, tels que les carbures cémentés (WC-Co), les bronzes poreux (Cu-Sn), les alliages lourds au tungstène (W-Ni-Cu), acier cuivreux (Fe-Cu-C), et les cermets au carbure de titane (TiC-Fe).

On distingue trois (3) étapes de frittage en phase liquide :

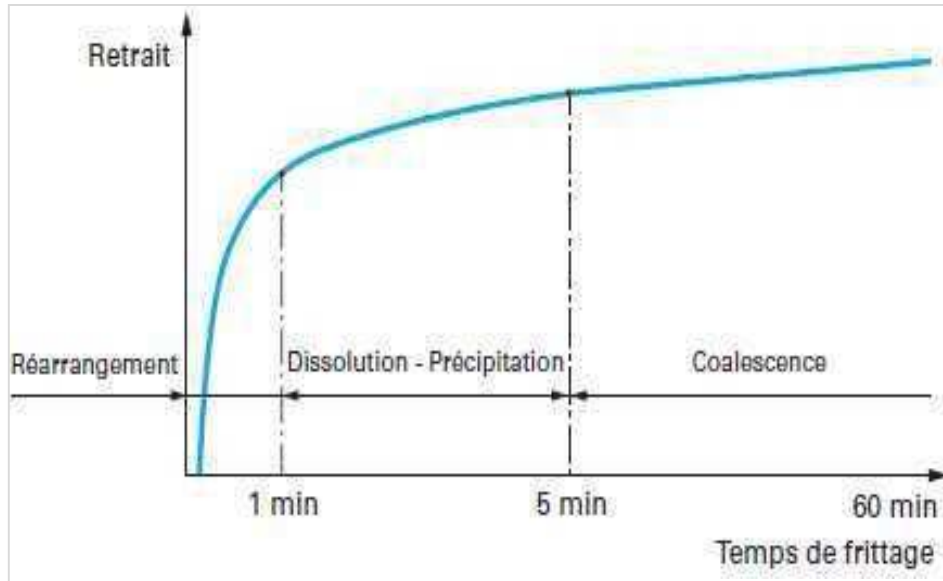


Figure.III.3.Etapes du frittage en phase liquide [33]

❖ Réarrangement

Lors de cette étape, appelée aussi « stade de retrait rapide », la densité apparente du matériau augmente rapidement à l'apparition de la phase liquide.

Le liant liquide qui joue le rôle de lubrifiant permet le glissement des particules les unes sur les autres sous l'effet des différentes contraintes qui existent au sein de l'empilement.

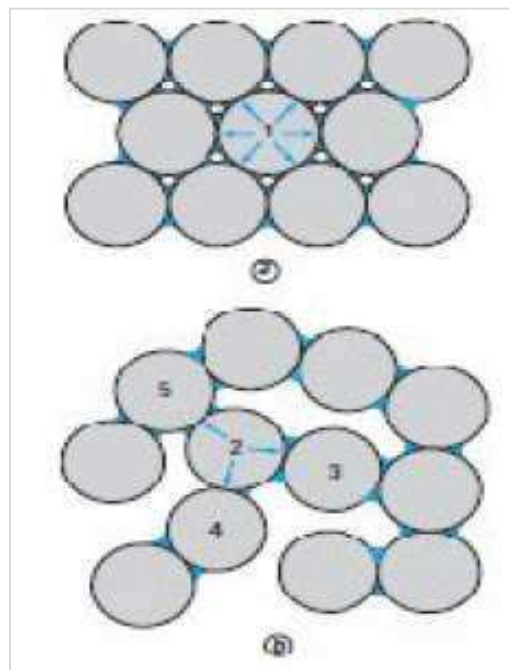


Figure.III.4. Réarrangement des particules [34]

Cette étape est activée par deux (2) principaux facteurs :

- **Mouillabilité** : cette dernière est définie comme l'aptitude d'un liquide à mouiller la surface d'un matériau solide. Les liaisons chimiques fortes qui se forment à l'interface liquide-solide favorisent ce phénomène.

Si on considère une goutte de liquide déposée sur une surface solide plane ;

Les tensions inter faciales γ_{sl} et γ_{sg} correspondent aux interfaces entre le liquide et le solide d'une part, et le gaz d'autre part.

Aux points de contact entre le solide, le liquide et le gaz, l'équilibre entre les forces de tension inter faciale et la tension superficielle du solide (γ_{sg}) est réalisé lorsque cette égalité est respectée :

$$\text{III.1) } \gamma_{sg} = \gamma_{sl} + \gamma_{lg} * \cos\theta$$

θ : Angle de raccordement, il caractérise la mouillabilité.

$\gamma_{sg} < \gamma_{sl}$: θ est supérieur à 90° , le liquide ne mouille pas le solide.

$\gamma_{sg} > \gamma_{sl}$: θ est inférieur à 90° , le liquide est dit mouillant.

Lorsque θ avoisine 0° , le mouillage est dit parfait.

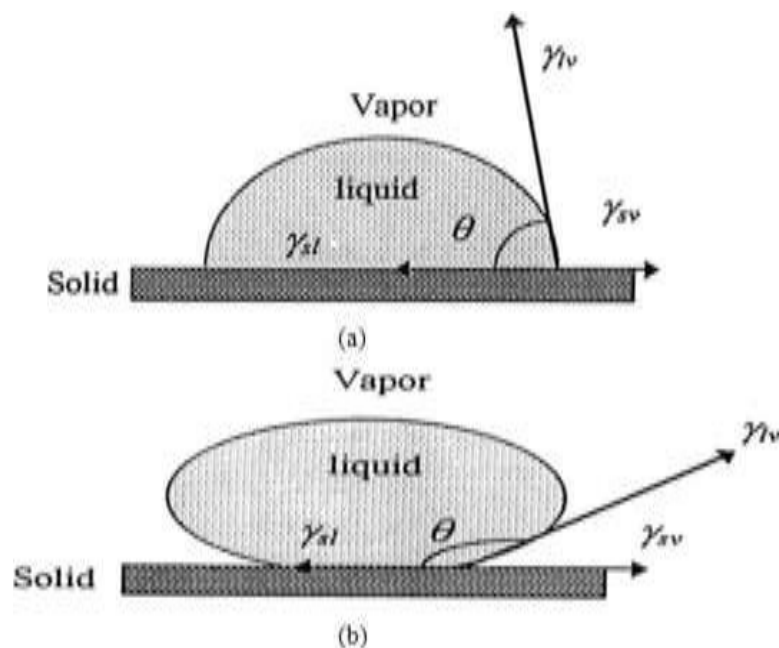


Figure.III.5. Angle de contact (Raccordement) [35]

- **Forces capillaires** : Elles constituent la force motrice locale de cette étape du frittage en phase liquide. Lors de l'apparition du liquide et de son écoulement entre les particules solides, il y a aussi formation de ménisques. Ces derniers créent une différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur du liquide, et cela est dû aux forces capillaires qui maintiennent les grains au contact du liquide.

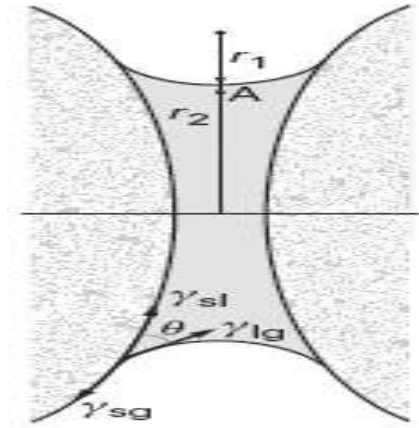


Figure.III.6. Ménisque liquide formé au contact entre deux grains [36]

❖ Dissolution-précipitation

Le réarrangement n'est nullement suffisant pour la densification du matériau. La solubilité de la phase solide dans la phase liquide engendre l'apparition des phénomènes de dissolution et de précipitation qui permettent à la densification de se poursuivre.

Aux points de contact entre les particules, les forces capillaires mettent le solide en compression, de sorte que la solubilité du solide dans le liquide y est plus élevée que dans les parties éloignées des contacts. On observe donc une dissolution du solide aux contacts, une diffusion dans le liquide, et enfin une précipitation sur les surfaces libres.

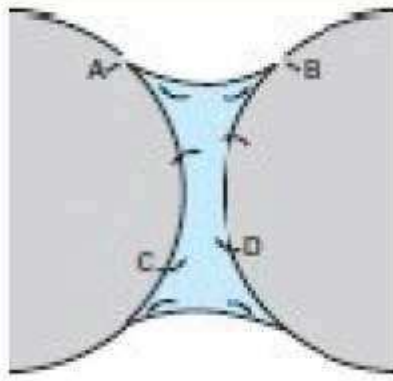


Figure.III.7. Ménisque liquide formé au contact entre deux grains [36]

❖ Coalescence

Cette étape regroupe des processus plus lents que ceux qui ont été décrits précédemment, et n'apporte presque pas de retrait, elle apporte un retrait minime grâce à l'élimination des pores résiduels par diffusion vers la surface.

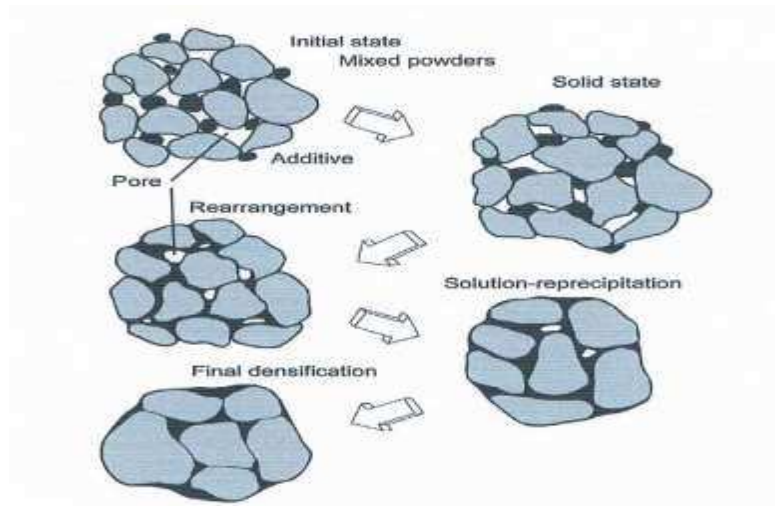


Figure.III.8. Changements de microstructures au cours du Frittage en phase liquide sous l'action des forces capillaires exercées par les ponts de liquide entre particules [37]

III.3.2. Energies motrices du frittage

L'évolution de tout mécanisme nécessite un apport d'énergie, le transport d'atomes par diffusion est assuré par cette dernière.

A) **Energie de surface**

Lors de la formation des ponts entre les granulés de poudre, l'énergie de surface diminue par réduction de la surface globale.

B) **Energie liée à l'existence d'un gradient de défauts structuraux**

Notamment les lacunes qui existent dans les grains de poudres, leurs excès dus à l'existence de courbure de surface.

C) **Energie liée aux équilibres entre les phases**

Les poudres de base présentent des parties saillantes où les contraintes mécaniques donnent naissance à des dislocations.

III.3.3. Paramètres de frittage

➤ Densité à cru

Une grande densité à cru favorise la formation d'une structure rigide et diminue ainsi l'effet de réarrangement du premier stade.

➤ Durée du frittage

C'est le temps indispensable pour qu'une densification complète soit atteinte. Elle est liée à la température de frittage, lorsque cette dernière augmente la durée du frittage diminue.

Quoique, un long frittage grossit le grain et augmente la taille du pore.

➤ Température de frittage

La température de frittage est 0.7 fois la température de fusion du matériau. L'augmentation de la température fait augmenter rapidement la vitesse de frittage.

✓ Atmosphère de frittage

Au cours du frittage, l'ennemi redoutable est l'oxydation. Afin de prévenir cela, il serait indispensable de travailler sous atmosphère neutre, réductrice ou sous vide.

- ✓ Atmosphère neutre : Généralement, on utilise l'Argon pour protéger la pièce à fritter contre l'oxydation.
- ✓ Atmosphère réductrice : On utilise généralement l'Hydrogène ou le monoxyde de Carbone pour éliminer les oxydes susceptibles de se former par réduction, ainsi empêcher toute réaction d'oxydation sous vide dans le but d'éliminer les gaz emprisonnés dans la poudre.

Chapitre IV

Cermet

IV.1. Introduction

L'Homme a toujours eu recours à ce qu'on nomme aujourd'hui « Composites ». L'utilisation de ces derniers est indispensable et remonte à une ère bien lointaine (2000 ans avant J-C dans la fabrication des arcs mongols).

Ils continuent de révolutionner le secteur industriel du fait que leur utilisation s'impose dans divers domaines, tels que le transport, l'aérospatiale et l'aéronautique.

Ce chapitre porte sur les composites ayant comme renforts des particules de Carbure de Tungstène WC, et une matrice qui comporte un alliage métallique, Ces derniers sont appelés CERMETS. Leur utilisation dans l'industrie pétrolière et minière a pris un grand élan, car ces équipements aux performances inouïes travaillent dans des conditions ardues.

IV.2. Les matériaux composites

C'est un matériau qui est formé par deux éléments distincts : une matrice qui peut être organique, céramique ou métallique, et un renfort qui peut se présenter sous différentes formes (longues, courtes, particules fines...), on en compte les fibres de verre, les fibres de Carbone, les particules de Carbone,...etc.

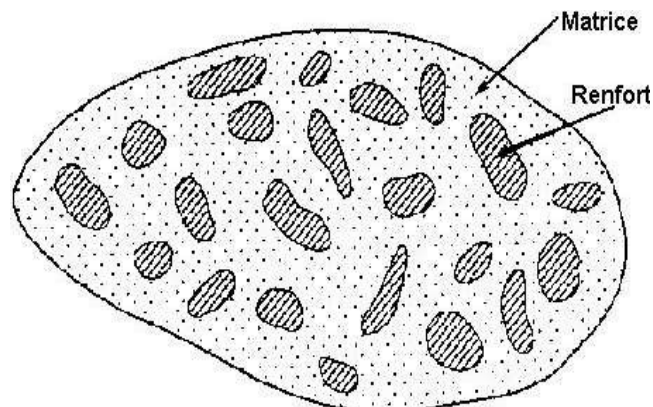


Figure IV.1. Schéma illustratif d'un matériau composite [13]

Cette association (matrice-renfort) conduit à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément, la matrice maintient les renforts et assure les transferts de charge, tandis que les renforts apportent principalement leurs caractéristiques mécaniques élevées (modules et limites d'élasticité, résistance mécanique...)

IV.3. Les cermets

IV.3.1. Définition d'un cermet

Comme leur nom le suggère, les cermets sont des composites à matrice métallique et renforts en céramique, souvent sous forme de particules. Leur intérêt réside essentiellement dans la combinaison des propriétés d'une matrice ductile, souvent légère, et celles des renforts rigides et réfractaires (carbures, nitrures, borures et oxydes). Les cermets sont dédiés à un large domaine d'applications. Citons les applications sous contraintes mécaniques élevées et à température telles que les outils de coupe, les pièces travaillant à l'usure, les outils de forage, pièces pour moteurs (industries du transport : automobile, aéronautique et ferroviaire) et pour le nucléaire.

Tableau IV.1. Quelques Céramiques qui constituent les Cermets [14]

Oxydes	Al_2O_3 , $Cr_2 O_3$, $Zr O_2$
Nitrures	TiN, ZrN, BN, AlN, Si_3N_4
Borures	TiB₂, CrB₂
carbures	WC, TiC, TaC, Cr_3C_2

IV.3.2. Les Carbures

Les cermets à base de carbures constituent la majorité des cermets produits industriellement et se subdivisent en quatre (4) groupes :

- WC-Co, WC-Ti-Co, WC-TaC-Co, WC-TiC-TaC-Co, WC-Fe, WC-Ni...etc.
- TiC-Ni, TiC-Ni/Cr, TiC-Ni/Mo, TiC-Mo, TiC-Mo₂C-Ni/Mo, Ti(C, N)-Ni/Mo,...etc.
- TiC-Fe, TiC-acier,...etc.
- Cr₃C₂-Ni, Cr₃C₂-Ni/Cr,...etc.

IV.4. Les composants des cermets

IV.4.1. Le tungstène

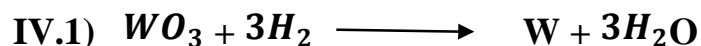
Le tungstène est un élément naturel qui, dans la plupart des milieux est un solide. Dans la nature il se produit dans la roche et le sol comme minerai. Les sels minéraux exploitables dont la scheelite CaWO₄ (Tungstate de Calcium) et la Wolframite (Fe, Mn) WO₄ : Tungstate de Fer et de Manganèse. Le Tungstène peut être employé comme un métal pur ou mélangé à d'autres métaux pour faire des alliages.



Figure IV.2. Minerai de wolframite [17]

IV.4.1.1. Production de la poudre de Tungstène

Cette poudre s'obtient par réduction de l'Oxyde WO₃ par l'hydrogène, la réaction de réduction est :



La granulométrie de la poudre de Tungstène obtenue dépend des facteurs qui sont :

- La température de réduction.
- Granulométrie de l'Oxyde de départ.
- Débit d'Hydrogène.

IV.4.1.2. Propriétés du Tungstène

Les propriétés physiques du tungstène sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau IV.2. Propriétés physiques du Tungstène [16]

Température de fusion	$3410 \pm 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Température d'ébullition	$5700 \pm 20^{\circ}\text{C}$
Pression de vapeur	$4.27 \text{ pa à } 3680 \text{ }^{\circ}\text{K}$
Conductivité thermique	$174 \text{ w.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$

IV.4.2. Carbure de tungstène

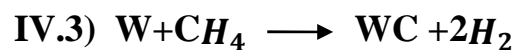
IV.4.2.1. Production des carbures de tungstène

Afin d'obtenir les carbures de tungstène, la poudre de tungstène de granulométrie déterminée et du noir de carbone sont mélangés dans un broyeur à billes d'acier suivant les proportions Stœchiométriques. Soigneusement contrôlées. Le mélange obtenu est disposé dans des nacelles en graphite qui passe dans un four tubulaire de graphite sous courant d'Hydrogène circulant à contre-courant.

Le Carbure se forme par diffusion directe à l'état solide.



Ou par intermédiaire de la phase gazeuse.



IV.4.2.2. Propriétés de la poudre de Carbure de Tungstène

Le tableau suivant représente les propriétés de la poudre de Carbure de Tungstène (WC).

Tableau IV.4. Propriétés de la poudre WC [17]

Masse molaire (g/mol)	195,86
Densité en vrac	15,63
Point de fusion (°C)	2870
Point d'ébullition (°C)	6000
Densité nominale	15,6

Le WC n'est pas soluble dans l'eau, sa forme peut être sphérique ou irrégulière.

Le WC possède une structure hexagonale. Son utilisation s'élargit dans le domaine mécanique notamment dans la fabrication des outils de forage et de coupe. Il possède une rigidité plus remarquable que celle de l'acier, son module de Young dépasse les 500 GPa.

Les formes de la poudre WC sont représentées sur la figure.

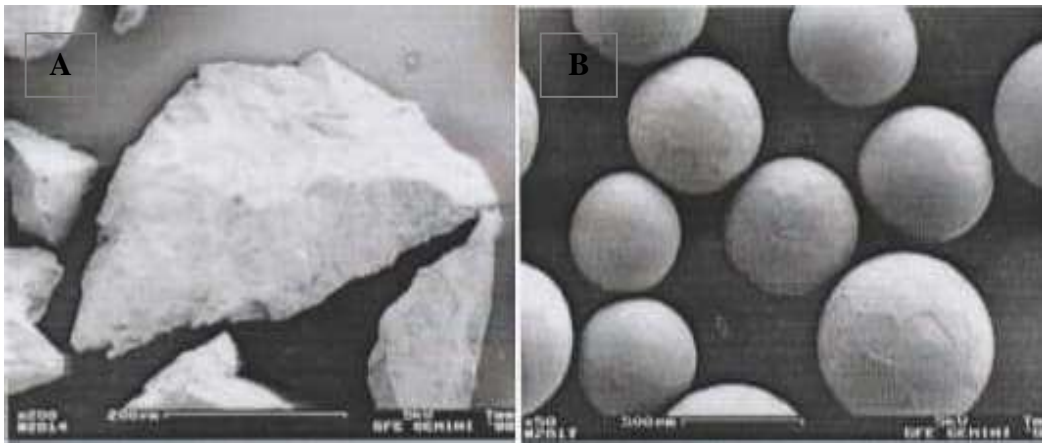


Figure IV.3. Poudre WC (A : forme irrégulière ; B : forme sphérique.) [19]

IV.4.2.3. Structures cristallines du W-C

Le phénomène de carburation du Tungstène implique un contrôle rigoureux de la teneur en Carbone, car une formation de l'hemi-carbure s'impose au moindre déficit en carbone. Le W_2C possède une structure hexagonale compacte.

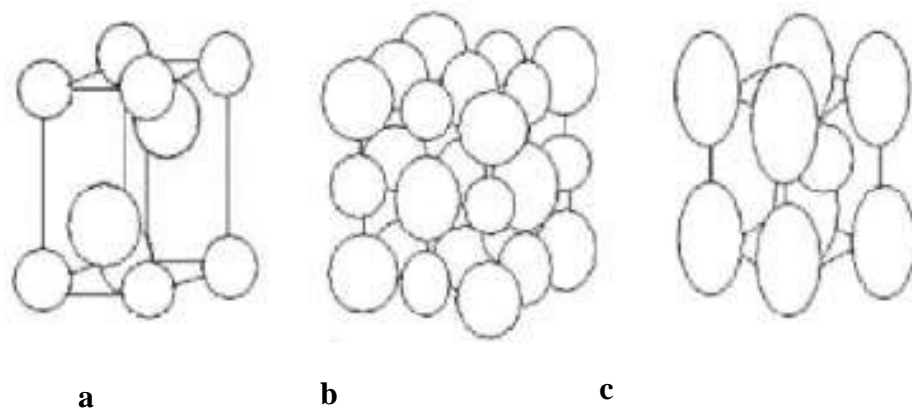


Figure IV.5. Les structures cristallines des carbures de tungstène [20]

a) W_2C ; b) WC_{1-x} ; c) WC

Ces deux carbures possèdent une grande dureté et une bonne tenue à l'usure, sauf qu'ils ne sont jamais utilisés comme matériaux de structures à cause de leur grande fragilité. Quoique, leur association à certains métaux ou alliages, leur apportent une ductilité nécessaire. Ainsi, ces mélanges donnent naissance à des cermets. Ces derniers combinent les propriétés de la céramique (WC) et du métal. La métallurgie des poudres reste incontestablement la technique adéquate pour l'obtention de tels matériaux.

IV.4.2.4. Domaine d'application

Le domaine d'application du Tungstène et ses alliages sont très développés dans l'industrie. Il est utilisé généralement comme alliages de Tungstène et composites :

- Les alliages lourds W-Ni-Cu sont principalement utilisés comme contacts électriques.
- Les composites infiltrés W-Cu sont utilisés comme contacts électriques.
- Les carbures cémentés sont utilisés principalement pour les matériaux de coupe, mais aussi pour la fabrication des outils de forage.

IV.4.3. Le cuivre

Ayant une bonne résistance à la corrosion et une excellente conductibilité thermique (électrique). Le Cuivre est le deuxième métal non-ferreux utilisé dans l'industrie, après l'Aluminium. Sa ductilité et sa malléabilité sont dues au fait que le Cuivre à une structure cubique à faces centrées (CFC).



Figure IV.6. Minerai de Cuivre [14]

IV.4.3.1. Propriétés du Cuivre

Les alliages de Cuivre possèdent des propriétés mécaniques intéressantes, car ils résistent bien à l'usure et à la corrosion. Les propriétés du Cuivre sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau IV.5. Propriétés du Cuivre [14]

T° de Fusion (°C)	1083
Point d'ébullition (°C)	2562
Masse volumique (g/cm³)	8,96

Il existe une solubilité négligeable entre le Cuivre et Tungstène. Ces éléments ne sont guère miscibles à l'état solide. Les poudres qui contiennent uniquement le tungstène et le cuivre montrent une filtrabilité très médiocre, même par frittage en phase liquide au-dessus du point de fusion du cuivre.

La taille fine et l'état bien mélangé de la poudre de composant améliorent la filtrabilité de la poudre compacte, en particulier dans le système de frittage en phase liquide tel que le Système W – Cu, dans lequel le mécanisme de frittage dominant est le réarrangement de particules.

IV.4.3.2. Infiltration des WC par un alliage de Cuivre

La température de fusion élevée du WC fait que la densification des carbures de Tungstène est souvent effectuée par frittage en phase liquide ou par infiltration.

Cependant, il a été démontré que la technique d'infiltration permet la fabrication de cermets à des densités plus élevées que par frittage en phase liquide de poudres mélangées.

IV.5. Les liants métalliques

Pour améliorer les performances des outils, l'utilisation des liants métalliques est primordiale. Les infiltrants utilisés sont des alliages à base de Cuivre, associés aux éléments tels que le Manganèse, le Nickel, le Fer, l'Étain, le Zinc, l'Argent, pour ainsi former des Bronzes et des Laitons spéciaux. Les liants répondent souvent à d'innombrables critères, d'où la nécessité de leur utilisation :

- Leur température de fusion doit être plus basse que celle des poudres de base, c'est ce qui lui permet de pénétrer au cœur du mélange des poudres libres.
- Il possède des propriétés telles que la dureté, la ténacité, l'anticorrosion, la conductivité thermique...etc.
- Les particules de poudre doivent être parfaitement mouillées pour éviter les phénomènes de ségrégation liant-poudre qui pourraient faire apparaître des hétérogénéités de densité dans les crus.

Nous énumérons les liants utilisés dans l'industrie comme :

❖ **Alliage Cu-Sn (Bronze)**

Les Bronzes sont employés en mécanique pour leur bonne qualité de frottement notamment pour la réalisation des coussinets (ils contiennent 10 à 12% d'étain), ainsi que leur résistance à la corrosion.

Dans l'industrie, les teneurs en Sn sont comprises entre 4 et 22%.

Le moulage des Bronzes est plus facile que celui des laitons, tandis que leur usinage s'avère plus difficile.

Chapitre V :
**Première partie pratique : Rechargement
manuel par Soudage**

V.I. Introduction

Ce chapitre présente les techniques expérimentales utilisées dans notre étude pour la caractérisation des matières premières et des produits obtenus par le procédé d'infiltration.

V.2. Matériaux utilisés

V.2.1. Matériaux de rechargement

Les matériaux de soudage sont tous des produits d'importation d'origine TECHNOGENIA société Française propriétaire d'un Brevet Européen dans le domaine depuis 1986 (voir en Annexe Fait et procédures (TCHNOGENIA)

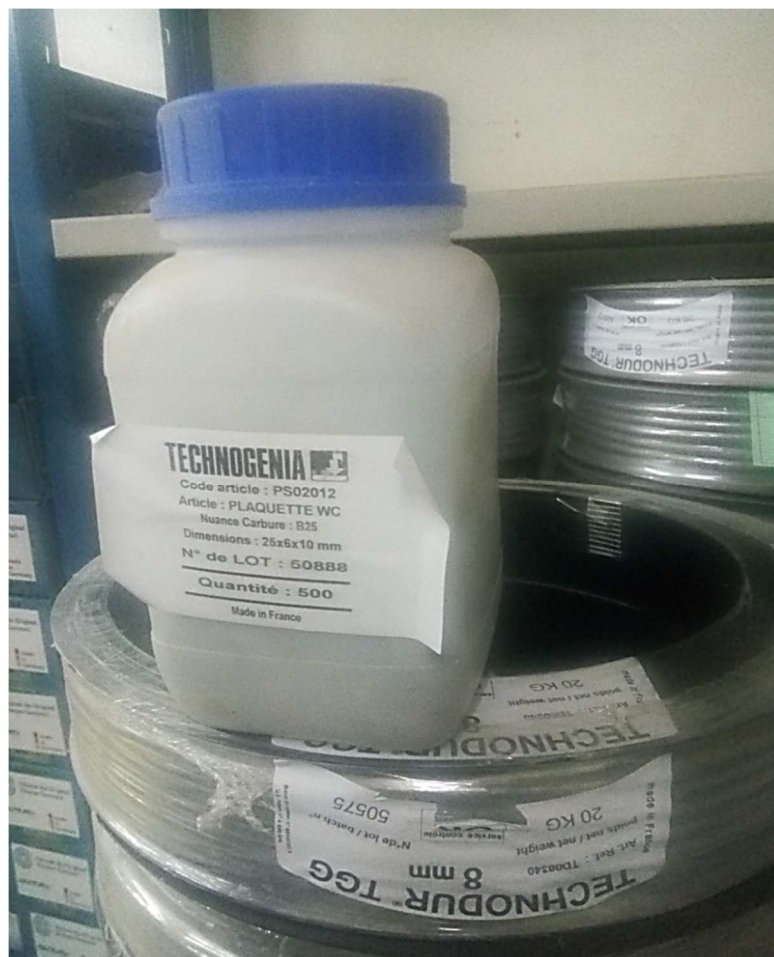


Figure V.1. Poudre en carbure de tungstène WC et Fil TGG [41]

Technogenia a développé les produits techno-powder qui consiste en un mélange de poudre de carbure de tungstène de dureté 40 à 60 HRC. Cette poudre de taille 40 à 100 microns peut être appliquée en utilisant un techno kit 2000, ou bien au laser et offre des surfaces d'épaisseur allant de 2

à 10mm, ainsi un procédé de soudage facile et économique.

Tableau V.1.Fiche technique de la poudre TECHNOPOWDER [41]

Produit	taille	Concentration en carbure	Alliage	Dureté	Point de fusion	Epaisseur de déposé recommandée
Poudre WC	40 à 100 μ	40%	NiCr	60 HRC	1038°C	0,04 à 0,08''
Poudre WC	40 à 100 μ	40%	NiCr	40 HRC	1087°C	0,04 à 0,08''

V.2.2. Matériaux de soudage

L'équipement de soudage Techno kit : TECHNO 2000 est aussi intégré d'importation, appelé QUICK TIP comme présenté sur la figure :



Figure V.2.Equipement de soudage Techno kit : TECHNO 2000 [41]

La torche Technogenia est conçue pour déposer le produit en un temps réduit en compromis avec ses propriétés élevées de résistance et protection. Le Kit consiste une torche avec des sorties de différentes taille, et d'une saisie d'arrêt de poudre durant le dépôt de poudre pré-soudure dans le but de prévenir l'oxydation du métal de base. Le jet de la torche est équilibré et bien réglée pour assurer une meilleure facilité d'utilisation et de maintenance.

Le Kit prévoit deux réservoirs d'acétylène et un seul réservoir d'oxygène, ainsi des effets de sécurité (casque, lunettes, gants, stop bruits)

V.3. Principe du Rechargement

L'usure est le résultat d'une détérioration progressive par la perte de la matière due à l'utilisation prolongée et liée à des conditions de travail sévère da la pièce ou de l'équipement.

Ce qui nous amène à protéger l'équipement par un rechargement qu'on peut définir comme un dépôt d'une couche de dureté plus grande que celle du métal de base et d'épaisseur considérable suffisante à protéger notre équipement contre les conditions sévères.

Le but du rechargement de notre équipement c'est de :

- Réduire les coûts de maintenance
- Garder l'équipement en bon état
- Garder le rendement de l'équipement
- Réduire les couts de réparation liés à l'usure
- Protéger le reste des équipements liés à l'usure
- Prolonger la durée de vie de l'équipement

L'équipement à recharger dans ce chapitre est alors le Stabilisateur :

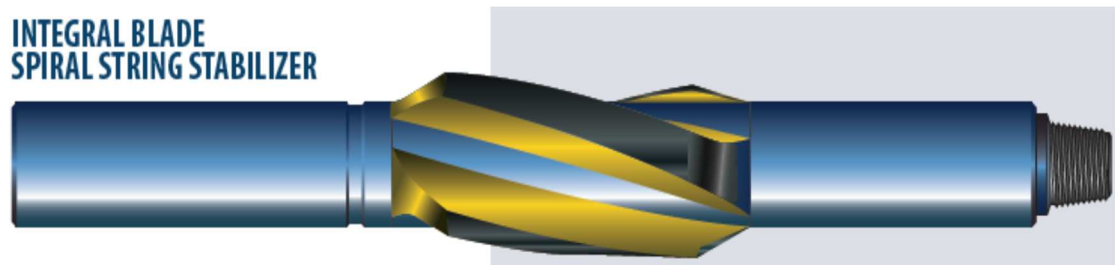
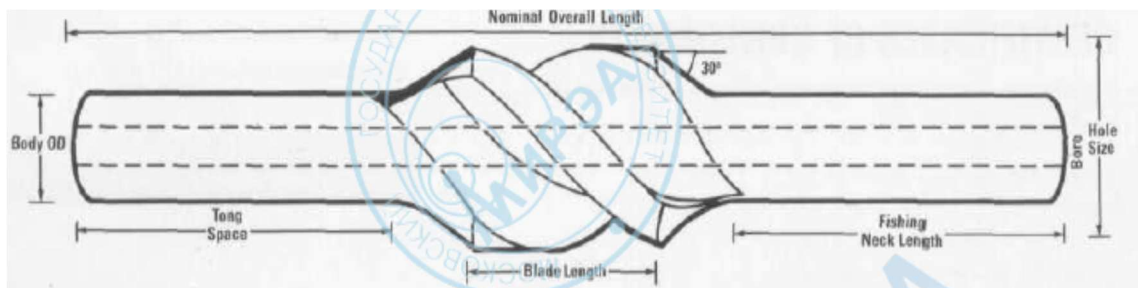


Figure V.3. : Les Stabilisateurs (Spiral Blind Stabiliser) [5]

Les stabilisateurs spiral Blind rams résistent à toutes les formations géologiques des plus tendres aux moyennement dure, aux plus durs et abrasives, selon les spécifications :

- Trois lames spirales
- Couronnes longues
- Dimensionnement selon les exigences API 7-1
- Rechargement des couronnes et bordures

V.4. Les stabilisateurs employés à l'ENAFOR

Tous les stabilisateurs existants à l'ENAFOR sont de type (SIRAL-INTEGRAL-BLADE) à lames intégrés, Tous répondent à la norme AISI 4145H des alliages d'acier à traitement thermique, désignés pour atteindre l'efficacité recherchée et les standards en qualité contrôlés et approuvés par les fabricants des équipements de forage internationaux certifiés API. Et l'on distingue alors les (NEAR BIT STABILIZER) ou stabilisateur vissé directement sur l'outil de forage et les (STRING STABILIZER) ou les stabilisateurs vissés dans la garniture de forage, et ces deux configurations représentent une large variété selon toutes les phases de forages et tous les diamètres des puits à forer, comme le montre d'ailleurs la fiche technique suivante :

Tableau V.2. Fiche technique des stabilisateurs employés à l'ENAFOR [5]

Diamètre de puits	36''	26''	24''	17''1/2	8''3/8
Type	Lame intégré	Lame intégré	Lame intégré	Lame intégré	Lame intégré
Diamètre extérieur	9''1/2	9''1/2	9''1/2	9''1/2	6''1/2
Diamètre intérieur	3''	3''	3''	3''	2''1/4
Longueur maximale	95'' à 100''	95'' à 100''	95'' à 100''	87'' à 100''	70'' à 85''
Epaisseur de lame	4''	4''	4''	4''	2,5''
Quantité de lame	3	3	3	3	3
Design	Spiral 300° à 350°	Spiral 300° à 350°	Spiral 300° à 350°	Spiral 300° à 350°	Spiral 300° à 350°

V.5. Rechargements manuel employé à l'ENAFOR

V.5.1. Rechargement HF 1000

Une forte concentration en WC est assurée par la taille des grains de 3mm, broyés dans une matrice polycristalline solide de bronze. Cette surface d'usure offre alors une très bonne résistance dans les formations dure pendant le forage.

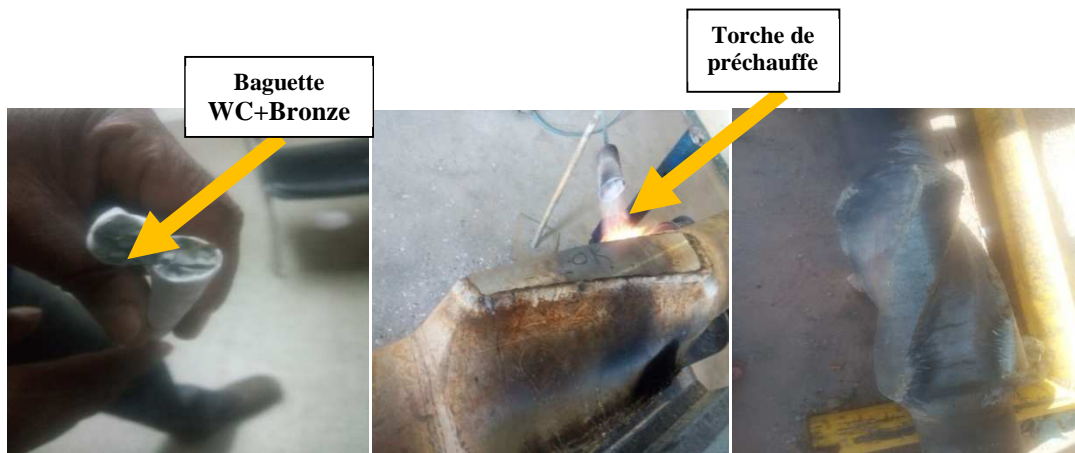


Figure V.4. : Rechargement du stabilisateur par le procédé HF 1000 [41]

➤ Etapes du rechargement HF 1000

- Décapage de l'équipement (lames du stabilisateur)
- Préchauffage du métal des faces de lames intégrées jusqu'à 350°C
- Préparer les baguettes en grain de WC imprégnés dans un alliage de bronze
- Procéder au soudage en appuyant sur le bouton d'acétylène ensuite celui d'oxygène, avec des pressions recommandées (acétylène $C_2 H_2$ de 0,8 à 1 bar, oxygène O_2 de 4 à 5 bars)
- Refroidissement sous couverture de la surface traitée pour éviter un craquage pendant 24heures
- Passage du stabilisateur à la rectifieuse pour égaliser l'état de surface
- Contrôle non destructif

V.5.2. Rechargement HF 2000

Dans ce type de rechargement des plaquettes trapézoïdales en WC sont insérées et figées dans une matrice de bronze fusionnée des grains de WC. Cette architecture en surface d'usure offre aux

stabilisateurs une grande couverture des carbures en profondeur, idéale pour le forage en déviation dans des formations abrasives



Figure V.5. : Rechargement du stabilisateur par le procédé HF 2000 [41]

Etapes du rechargement HF 2000

- Décapage de l'équipement (lames du stabilisateur)
- Etaler une fine couche de Bronze par soudage de baguettes en bronze
- Préchauffage de la couche de bronze des faces des lames intégré jusqu'à 350°C
- Préparer les baguettes en grain de WC imprégnés dans un alliage de bronze
- Procéder au soudage en appuyant sur le bouton d'acétylène ensuite celui d'oxygène, avec des pressions recommandées (acétylène $C_2 H_2$ de 0,8 à 1 bar, oxygène O_2 de 4 à 5 bar)
- Refroidissement sous couverture de la surface traitée pour éviter un craquage pendant 24heures
- Passage du stabilisateur à la rectifieuse pour égaliser l'état de surface
- Contrôle non destructif

V.5.3. Rechargement HF 3000

Un pulvérisateur de poudre métallique est utilisé pour appliquer un jet de poudre de WC à pression thermique autour des plaquettes rectangulaire en WC préalablement fixé su la surface des lames du stabilisateur, les poudres ainsi soudées aux plaquettes forment une plaque d'usure idéale dans les

formations abrasives et recommandé pour les stabilisateurs non magnétiques.

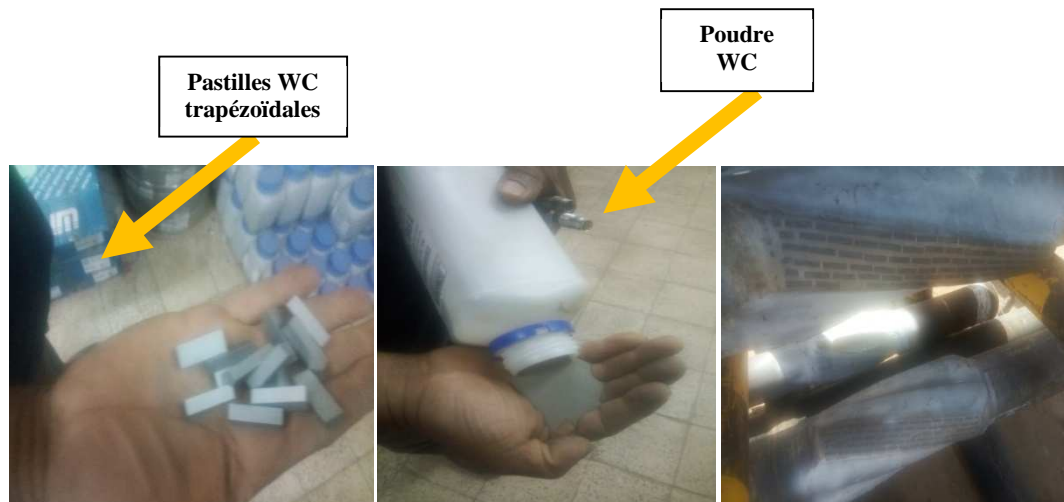


Figure V.6. : Rechargement du stabilisateur par le procédé HF 3000 [41]

➤ **Etapes du rechargement HF 3000**

- Décapage de l'équipement (lames du stabilisateur)
- Utiliser une colle spéciale pour fixer les plaquettes en WC sur le métal
- Préchauffage du métal des faces des lames intégré jusqu'à 150°C
- Utiliser un pulvérisateur à pression pour souder la poudre en WC autour des plaquettes en respectant une distance de 10 cm entre la surface et la source du jet de poudres
- Procéder au soudage en appuyant sur le bouton d'acétylène ensuite celui d'oxygène, avec des pressions recommandées (acétylène $C_2 H_2$ de 1 bar, oxygène O_2 de 5 à 6 bars)
- Refroidissement sous couverture de la surface traitée pour éviter un craquage pendant 24heures
- Passage du stabilisateur à la rectifieuse pour égaliser l'état de la surface
- Contrôle non destructif

V.5.4. Rechargement par procédé TECHNODUR TGG

Les fabricant des équipements de forage trouvent dans le TGG le procédé qui répond le mieux aux exigences qui assurent la fiabilité des équipements, notamment ; une résistance exceptionnelle aux milieux abrasifs, une résistance aux chocs, une meilleure protection contre le phénomène de cracking, et surtout une grande facilité de soudage et

réparation après usure de la plaque en WC.

➤ Description du TGG

C'est un cordon en longueur embobiné composé d'un alliage d'une matrice en alliage de nickel contenant blindé de poudre en carbure de tungstène, ce fil de diamètre de 8mm est destiné au soudage par une torche oxy-acétylène afin de former des plaques d'usure de protection d'épaisseur allant de 6 à 14 mm sur les lames intégrés des stabilisateurs de forage pétrolier.

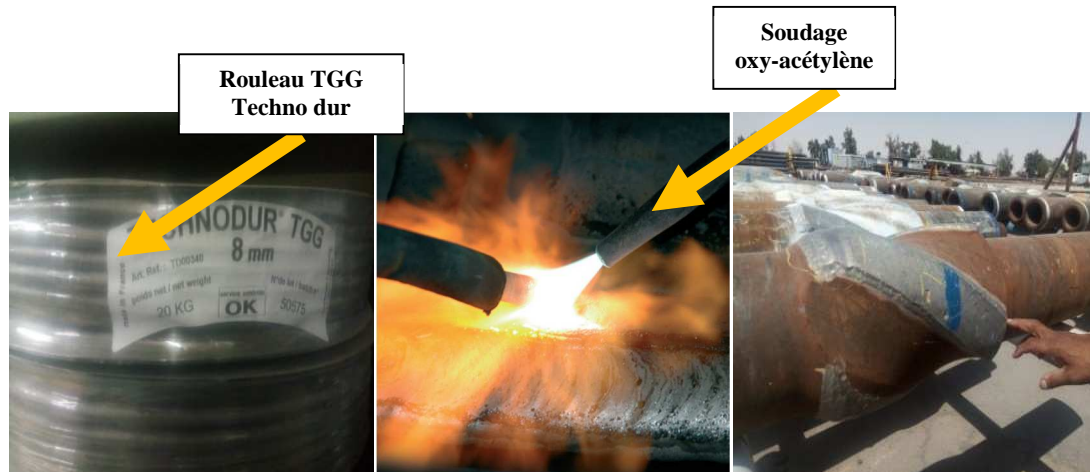


Figure V.7. Rechargement du stabilisateur par le procédé TGG [41]

➤ Propriétés du TGG

Composé d'une mixture de particules en carbure de tungstène de différentes dimensions allant de 1,2 à 2,4 mm de dureté 40 à 44 HRC qui forme un arrangement compacte dans l'alliage de nickel qui offre une protection contre la corrosion. La concentration en WC est calculée depuis la relation :

$$\text{V.1) } 68 \% = \frac{\text{poids du WC}}{\text{poids du WC} + \text{poids de l'alliage de nickel}} \times 100$$

➤ Etapes du procédé par TGG

- Décapage de l'équipement (lames du stabilisateur)
- Préchauffage du métal des faces de lames jusqu'à 350°C
- Mettre le fil TGG dans un détenteur approprié à son diamètre

- Procéder au soudage en appuyant sur le bouton d'acétylène, ensuite celui de l'oxygène, avec des pressions recommandées (acétylène $C_2 H_2$ de 0,8 à 1 bar, oxygène O_2 de 4 à 5 bars)
- Couverture de la surface traitée pour éviter un craquage pendant 24heures
- Passage du stabilisateur à la rectifieuse pour égaliser l'état de surface
- Contrôle non destructif



Figure V.8. Couverture anti-craque et passage du stabilisateur à la centrifugeuse [41]

V.6. Présentation de la machine (welding-system)

Ce chapitre explique la configuration basique de la machine et décrit rapidement la fonction de chaque composant.

La machine est composée de cinq éléments : une commande numérique FANUC, une partie mécanique (trois axes linéaires appelés Axe X, Y, Z et axe Rotatif appelé Axe A), un générateur de soudage MIG/MAG/OA, un dévidoir de fil et une torche OA dont l'intensité est de 800 ampères.

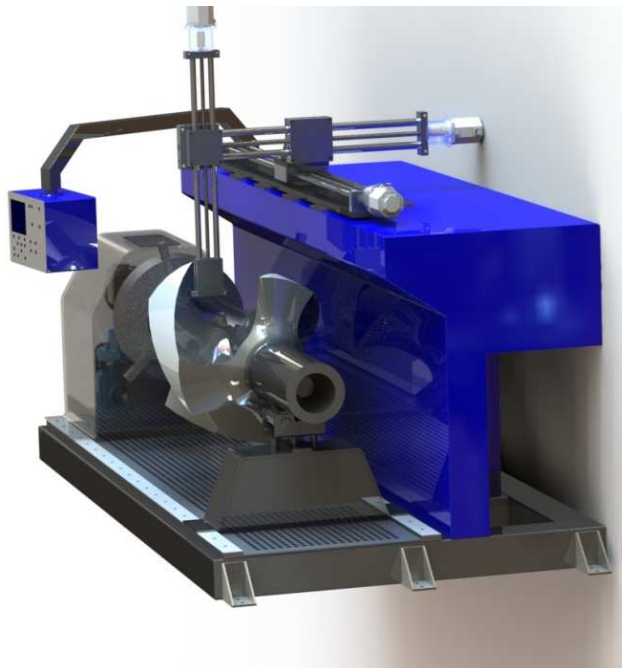


Figure V.9. Welding-System DURUM [41]

V.6.1. Logiciel FANUC PICTURE

Le logiciel FANUC PICTURE a été spécialement développé pour le contrôle d'une machine à quatre axes asservis dédiés au rechargement dur des lames de STABILIZER ainsi qu'à la gestion du procédé de soudage OA. Ce logiciel permet :

- Le paramétrage du procédé de soudage
- La supervision du procédé de soudage
- Le paramétrage des trajectoires

Chapitre V : Deuxième partie pratique : Rechargement par soudage automatique (welding-system)

- Affichage des messages d'erreurs
- Visualisation des états de la machine

L'interface Homme/Machine permettant la correction "in flight" des paramètres de soudage et déplacement. D'autres fonctions peuvent être développées sur mesure, fonctions développées sur demande.

Le logiciel est installé dans un Automate à écran Tactile référence DU/IMO/i3E14Z/20B05-SEBHF. Cette interface peut être remplacée par une version équivalente ou supérieure. Cette interface ne peut être remplacée qu'après le paramétrage du matériel. La liaison IHM/Variateur se fait via le protocole TCP/IP.

V.6.2. Partie mécanique

La machine est constituée de quatre axes : trois axes linéaires et un axe rotatif respectivement X, Y, Z et A. Les axes linéaires ont pour fonction le déplacement et la manipulation de la torche. Toute charge supplémentaire pourrait entraîner la détérioration des axes et plus globalement de la machine. L'axe rotatif, de construction robuste est prévu pour embarquer les pièces de types STABILIZER. La charge de ces pièces doit être reprise par la poupée mobile à rouleaux. La non-utilisation de Cette poupée mobile de soutien peut entraîner la casse de matériel ou le risque de chute de pièces pouvant présenter un danger pour l'utilisateur et son entourage. Tous les axes sont asservis numériquement par la technologie Brushless FANUC garantissant un parfait contrôle et répétitivité des mouvements. La masse électrique nécessaire au soudage est reliée au plateau de la machine.

V.6.3. Générateur de courant

Le générateur de soudage de marque Miller référence DELTAWELD 852 est intégré dans la machine. Ce générateur surdimensionné garantit un soudage d'excellente qualité et une maintenance très réduite.

V.6.4. Dévidoir

Afin d'assurer le dévidage du fil de rechargement, un dévidoir de fil a été installé. Ce dévidoir de marque Miller référence SubArc Drive 400 est parfaitement adapté à l'utilisation de la machine.

Chapitre V : Deuxième partie pratique : Rechargement par soudage automatique (welding-system)

V.6.5. Torche Open Arc

La torche OA-600M installée sur la machine permet l'utilisation des fils de rechargement DURUM de diamètres 1.6mm à diamètre 3.2 mm. Cette torche permet un soudage jusqu'à 600Amp à 100%. Le refroidissement à air de cette torche assure une simplicité de son utilisation et une maintenance réduite.

V.6.6. Alimentation électrique

La machine doit être reliée au réseau électrique général. La machine doit être alimentée en tripolaire 50A (400VAC, 50Hz, 28kW). Le câble d'alimentation électrique doit être connecté sur le sectionneur général de la machine. Le câble à utiliser est du 5G10. La connexion électrique doit être réalisée par un professionnel. La Terre électrique doit être correctement reliée à la machine.

V.6.7. Fils de rechargement

La machine a été spécialement développée pour déposer des produits de rechargement de très haute qualité développés par DURUM. Ces fils sont le fruit de nombreuses années d'expériences et résultent d'un travail de développement et une maîtrise des procédés d'élaboration de nos équipes. Ces fils sont brevetés et homologués pour les dépôts OA de type Hardbanding. La qualité des dépôts et la résistance aux contraintes sévères d'utilisation n'est pas garantie dans le cas d'une utilisation de fils autres que ceux recommandés ci dessous :

- DURMAT FD653
- DURMAT FD665
- DURMAT AS760
- DURMAT AS751
- DURMAT TJ SPECIAL
- DURMAT FD677
- DURMAT NI-2-PLUS

V.7. Procédures de démarrage et arrêt de la machine

Dans cette partie, nous allons traiter des différentes procédures de démarrage à froid, acquittement d'erreurs, redémarrage à chaud et arrêt de la machine.

V.7.1. Démarrage de la machine

Seules les personnes autorisées peuvent démarrer la machine et l'utiliser. Avant de mettre la machine sous tension, plusieurs vérifications sont recommandées.

- Vérification du branchement électrique de la machine. La machine doit être correctement reliée au réseau électrique.
- L'aspiration doit être correctement branchée et mise en service.
- La machine doit être calée, sur un sol plat et lisse, et liée solidement au sol.
- Pas de trace d'eau ou d'humidité dans la machine.
- Valider que le bouton d'arrêt d'urgence ne soit pas actionné.
- Vérifier qu'il n'y ait aucun objet ou personne dans la zone de travail.
- Vérifier que la mise en route de la machine ne puisse pas occasionner de danger.
- Mettre le potentiomètre des avances à 0%.

Une fois ces vérifications effectuées, on peut alors commencer la mise en route de la machine :

- Mettre la machine sous tension en mettant l'interrupteur général (face arrière) sur la position I.
- Appuyer sur le bouton mise sous tension 1
- Attendre quelques instants, la commande numérique s'initialise. L'écran suivant doit apparaître.
- La CN termine son initialisation (durée deux secondes environs).
- L'écran "d'accueil" apparaît.

V.7.2. Redémarrage après un Arrêt d'Urgence (ARU)

Dans le cas d'un arrêt de la machine suite à un ARU (Arrêt d'Urgence). Il faut tout d'abord traiter la raison de l'arrêt d'urgence et veiller à ce que le redémarrage se fasse dans de bonnes conditions (sécurité biens et personnes).

- Retirer le bouton d'arrêt d'urgence 2.
- Mettre le potentiomètre des avances à 0%.
- Appuyer sur le bouton Marche 1 afin de remettre la puissance sur la machine.
- Dégager lentement la machine de la zone, voir déplacement de la machine.

En cas de problème, prendre contact avec le technicien maintenance ou les équipes DURUM.

V.7.3. Arrêt de la machine

Afin de protéger la machine et de redémarrer dans de bonnes conditions, il est important de respecter la procédure d'arrêt suivante :

- Dégager la torche de la pièce et des outillages. L'idéal étant de mettre la machine au milieu de ses courses.
- Couper la puissance de la machine en appuyant sur le bouton « Arrêt »&.
- Mettre la machine hors tension en mettant l'interrupteur sectionneur sur la position 0. Le voyant de face avant 1 doit s'éteindre.
- Arrêter l'aspiration.

V.8. Le pupitre de commande

Le pupitre de commande se décompose en deux parties, une partie concerne tous les boutons poussoirs et interrupteurs mécaniques du pupitre, une seconde partie concerne l'écran tactile et ses différentes fonctionnalités et options. Ces deux parties seront traitées dans les paragraphes suivants

V.8.1. Interface Homme Machine – Boutonnerie

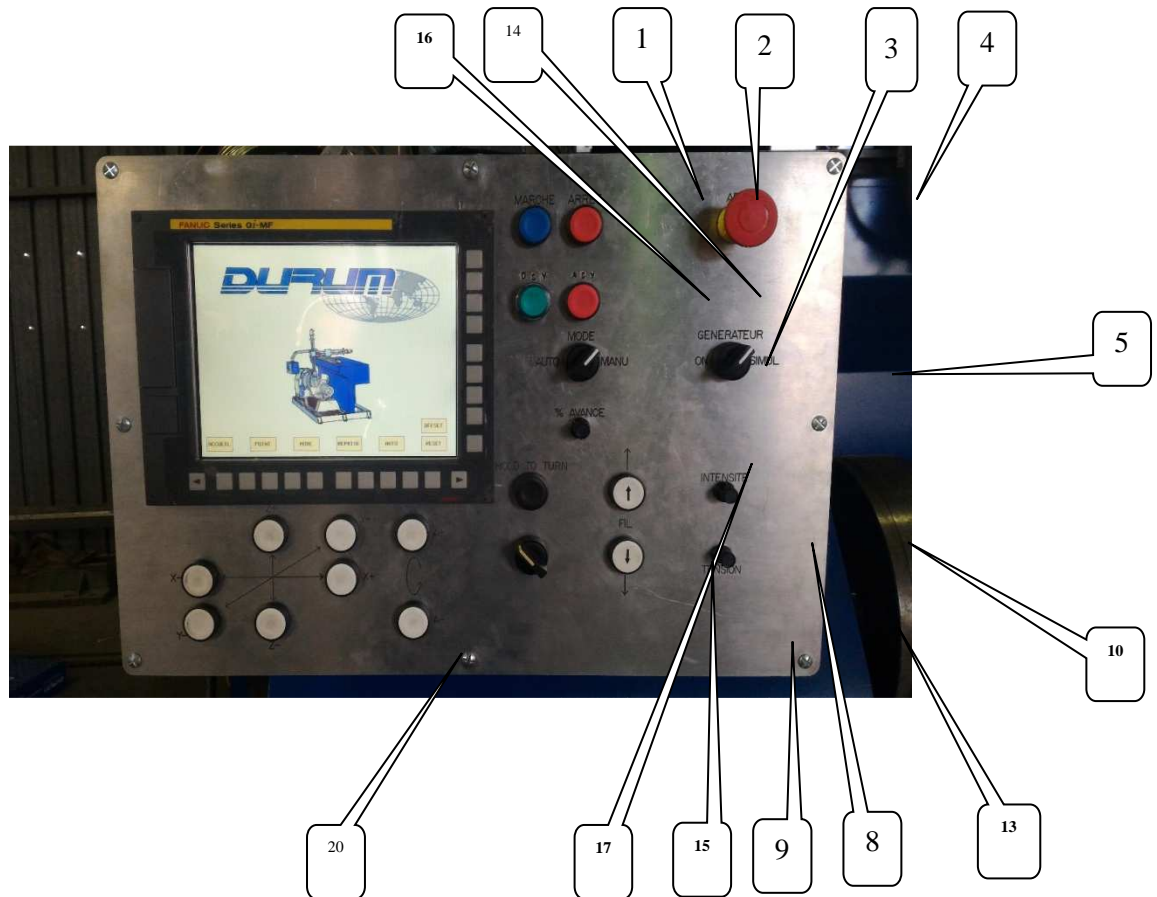


Figure V.10. Interface Welding-System DURUM [41]

1. Bouton et Voyant de mise sous tension.

Ce bouton permet de ré allumer la machine au démarrage et après un Arrêt d'urgence. Le voyant s'allume lorsque la machine est opérationnelle.

2. Bouton d'arrêt.

Ce bouton permet de couper les déplacements et la puissance de la machine

3. Mode Auto / Mixe / Manu.

Cet interrupteur permet de sélectionner le mode de fonctionnement de la machine. Le mode AUTO : la Commande Numérique gère le départ/arrêt du soudage et les paramètres

Chapitre V : Deuxième partie pratique : Rechargement par soudage automatique (welding-system)

(Intensité et tension) de soudage. Le mode MIXTE : la Commande Numérique gère le départ/arrêt du soudage, les potentiomètres 10 et 13 gèrent les paramètres (intensité et tension) de soudage. Le mode MANU : Le départ/arrêt du soudage est géré par l'interrupteur 12, les potentiomètres 10 et 13 gèrent les paramètres (intensité et tension) de soudage.

4. Bouton ARU (Arrêt Urgence).

Comme son nom l'indique, il permet, en cas d'urgence de provoquer un arrêt rapide de la machine afin d'assurer la sécurité de l'opérateur et du matériel. Il est à utiliser qu'en cas d'urgence.

5. Interrupteur Générateur ON/Simulation.

Cet interrupteur permet de sélectionner trois états concernant le générateur de soudage. Le premier état est le mode (OFF); il permet d'éteindre le générateur (mise hors tension de celui-ci). Le mode (ON) correspond à l'état normal de fonctionnement, c'est à dire soudage lorsque demandé. Le mode SIMULATION, permet, comme son nom l'indique de simuler l'opération de soudage. Il permet de contrôler les trajectoires d'un programme tout en bloquant le soudage. Lorsque le soudage est demandé, le voyant 12 s'allume. Le mode simulation est conseillé pour tester les programmes.

8. Retour Fil.

Il s'agit d'un bouton permettant, en mode Manu de faire remonter le Fil de soudage (rotation du dévidoir en sens inverse). Le soudage n'est pas possible avec ce bouton.

9. Dévidage Fil.

Il s'agit d'un bouton permettant, en mode Manu de faire descendre le Fil de soudage. Le soudage n'est pas possible avec ce bouton. Ce bouton est très utile lors de l'installation d'une nouvelle bobine de fil. La vitesse de rotation du dévidoir est gérée par le potentiomètre 10.

Chapitre V : Deuxième partie pratique : Rechargement par soudage automatique (welding-system)

10. Potentiomètre Intensité.

Il s'agit du potentiomètre gérant la vitesse d'avance du fil et donc par conséquent l'intensité du soudage. Il est utile lors de l'utilisation des boutons 8 et 9 ainsi que du soudage en mode Manu et mode Mixte (Interrupteur 3)

13. Potentiomètre Tension.

Il s'agit d'un potentiomètre permettant de régler la tension de soudage (Hauteur d'arc). Ce potentiomètre est utilisable en mode Manu et mode Mixte.

14. Bouton poussoir ARRET Cycle.

Comme son nom l'indique, ce bouton permet de stopper tout programme.

15. Boutons poussoir pour déplacement manuel des Axe.

Comme leurs noms l'indiquent, ces boutons permettent de déplacer en manuel les axes.

16. Bouton poussoir Départ Cycle DCY.

Comme son nom l'indique, il permet, en mode automatique, de lancer un programme.

17. Potentiomètre des avances.

Ce potentiomètre permet d'ajuster les avances réelles par rapport aux avances programmées sur une plage de 0 à 100% par pas de 5%. La valeur de ce potentiomètre est affichée sur la commande numérique.

18. OFFSET. Il s'agit d'une commande uniquement dédiée à la maintenance.

20. Déplacement des axes.

Ces boutons poussoir sont dédiés à la manipulation des axes de déplacement, les trois axes linéaire X, Y, Z ainsi que l'axe rotatif A.

V.8.2. Ecran d'accueil et Bandeau



FigureV.11. Ecran d'accueil Welding-System DURUM [41]

F.1 – Ecran d'accueil. Ce bouton permet à tout moment de revenir sur cet écran d'accueil.

F.2 – POINT. Ce bouton renvoi à l'écran de saisie des Points de programme A et B

F.3 – MODE. Ce bouton renvoi à l'écran de saisie des modes de soudage, CORDON ou OSCILLATION

F.4 – REPRISE. Bouton qui renvoi à l'écran de reprise de point en cas d'erreur.

F.5 - AUTO. Bouton qui renvoi à l'écran de suivi une fois le programme lancé

F.6 - RESET. Bouton qui permet d'effacer un code erreur.

F.7 - OFFSET. Ce bouton n'est disponible que quand l'OFFSET est en mode ON
Seule la personne chargée de la maintenance ne peut modifier les paramètres inscrits dans l'OFFSET.

V.8.3. Paramétrage des POINTS A et B

Cette page permet le paramétrage des points A et B qui seront les repères de pièce de la machine pendant le cycle de blindage

F.1 – POINT A. Point de départ du programme.

F.2 – POINT B. Point d'arrêt de la passe.

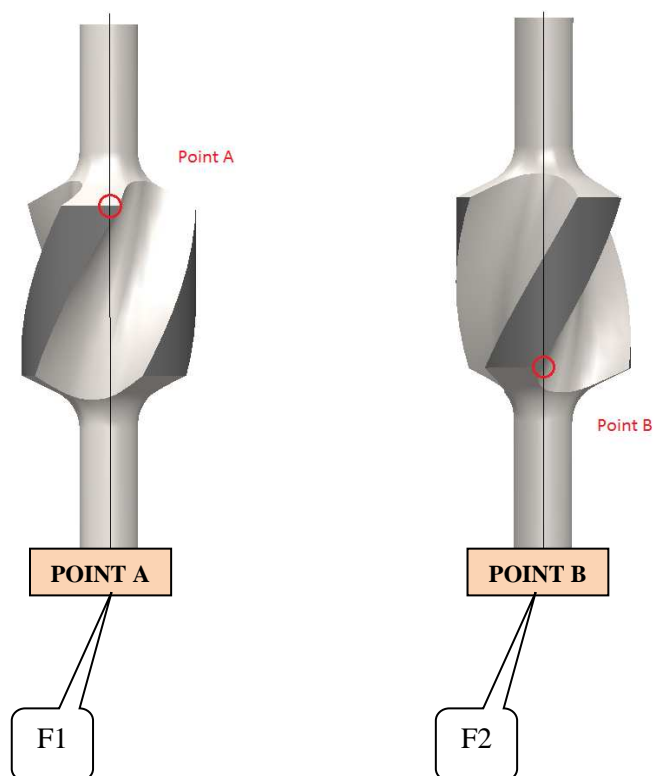


Figure V.12. Paramètres du stabilisateur [41]

L'opération de saisie des points est nécessaire au déroulement du programme. Le point A définit le point de départ du Programme et le point B la fin de la passe (Cordon ou oscillation). Afin d'enregistrer ces points, il est essentiel que la machine soit en mode MANUEL pour pouvoir en déplacer les axes à l'aide des boutons du pupitre repérés (20). Nous conseillons une vitesse de déplacement réduite afin de limiter le risque de collision avec la pièce (30% maxi). Comme présenté sur le schéma ci-dessus, il est important que les points A et B soient enregistrer sur l'axe du STABILIZER. De cette façon, le bain de soudage restera sur la partie supérieure de la pièce et de ce fait, le risque de coulée du bain est

Chapitre V : Deuxième partie pratique : Rechargement par soudage automatique (welding-system)

limité (Schéma présenté ci-dessous).

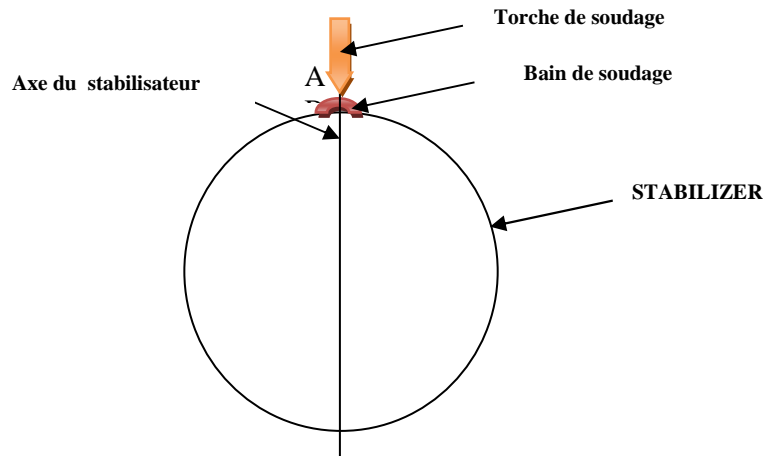


Figure V.13. Risque de coulée de bain de soudage limité [41]

V.8.4. Choix du mode : CORDON ou OSCILLATION

F.1 - OSCILLATION. L'oscillation permet un balayage de la torche afin de recharger en une passe une surface plus large que le cordon tiré.

F.2 - CORDON. Le cordon est comme son nom l'indique, une passe de soudage droite sans oscillation.

Lors du choix du MODE (CORDON ou OSCILLATION), la CN renvoie directement sur les pages concernées. Le choix du mode CORDON renverra sur la page avec les paramètres de cordons et le choix du mode OSCILLATION renverra sur la page avec les paramètres de soudage pour l'oscillation.

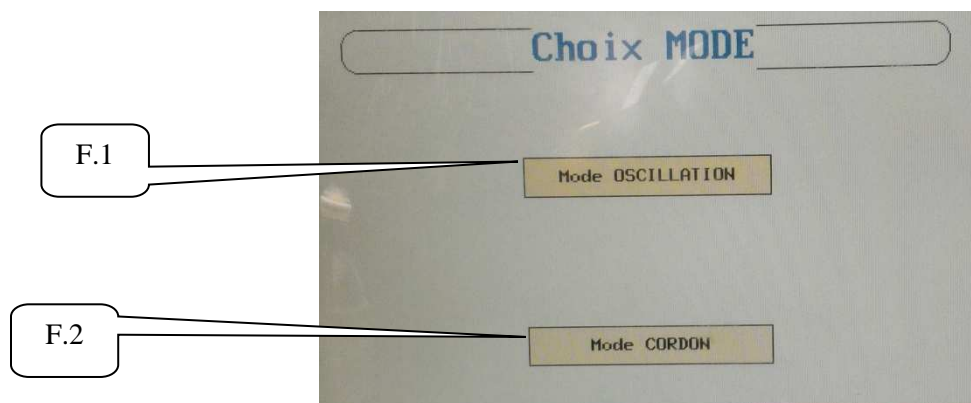


Figure V.14. Paramètres de soudage (CORDON ou OSCILLATION) [41]

V.8.4.1. Paramètres d'oscillation

- **Largeur de LAME.** La largeur de LAME caractérise la largeur de LAME du Stabilisateur (ex : 2.5 Inch). Cette caractéristique est essentielle puisqu'elle détermine, en fonction de la largeur de passe, le recouvrement de la lame. Si ce paramètre est mal renseigné, le rechargement pourrait ne pas recouvrir entièrement la lame ou au contraire, déborder de celle-ci.
- **Largeur d'OSCILLATION.** La largeur d'oscillation est le paramètre qui définit la largeur du codon d'OSCILLATION. Ce paramètre ne doit pas dépasser 1 pouce de large au risque de dégrader la soudure.
- **Vitesse OSCILLATION.** La vitesse d'oscillation est la vitesse à laquelle la torche balaie la largeur d'oscillation. Elle est exprimée en Inch/min. Ce paramètre joue particulièrement sur l'uniformité du soudage.
- **Vitesse d'AVANCE.** La vitesse d'avance est la vitesse à laquelle la torche se déplace pour aller du point A au point B. Elle est exprimée en Inch/min. Ce paramètre joue sur l'épaisseur du cordon de soudage (ou de l'oscillation)
- **Diamètre STABILIZER.** Le diamètre du STABILISER est un standard. Il est compris entre 8 et 26 pouces. Ce diamètre doit être renseigné correctement afin que les largeurs d'oscillation correspondent avec la réalité du stabilisateur. Si ce paramètre est mal renseigné, cela peut avoir comme conséquences une erreur de décalage entre les cordons ou une erreur de recouvrement entre les cordons.
- **Recouvrement.** Le recouvrement est le paramètre qui permet à deux OSCILLATIONS ou deux CORDONS de se chevaucher. De cette manière, l'opérateur est certain que les deux cordons d'OSCILLATION sont correctement liés.
- **INTENSITE.** L'intensité de soudage est définie par la vitesse de sortie de fil de la torche. Elle peut être exprimée en m/min ou comme dans notre cas, en ampérage (A). L'intensité définit la pénétration du produit d'apport (fil) dans la matière.
- **TENSION.** La tension de soudage est l'image de la hauteur de torche (le STICK OUT). Si on fait varier la hauteur de la torche par rapport à la pièce, on observe que la tension varie. En effet, plus la torche est loin de la pièce, plus la résistance augmente. Le soudage est, sur cette machine, réalisé en tension continue. Donc $U=RI$. Donc, plus la torche est loin, plus la résistance (R) augmente, et donc plus la tension (U) augmente.

Chapitre V : Deuxième partie pratique : Rechargement par soudage automatique (welding-system)

On fait varier cette tension pour rendre le bain de soudage plus ou moins liquide. Plus la tension est élevée et plus le bain sera liquide.

V.8.4.2. Paramètres de CORDON

- **Largeur de LAME.** (idem OSCILLATION) La largeur de LAME caractérise la largeur de LAME du Stabilisateur (ex : 2.5 Inch). Cette caractéristique est essentielle puisqu'elle détermine, en fonction de la largeur de passe, le recouvrement de la lame. Si ce paramètre est mal renseigné, le rechargement pourrait ne pas recouvrir entièrement la lame ou au contraire, déborder de celle-ci.
- **Largeur de Cordon.** La largeur de cordon est le paramètre qui définit l'entraxe entre deux cordons. Il est très régulièrement réglé à la largeur du cordon lui-même afin de bien les lier entre eux.

V.8.5. Mode de reprise

La page de reprise permet à l'utilisateur de reprendre le programme à un point donné après une erreur de soudage (ex : Blocage du fil dans la gaine)

- **POINT R.** Le point R permet de réenregistrer le point de départ du programme lorsque la machine s'est arrêtée suite à un défaut de soudage.

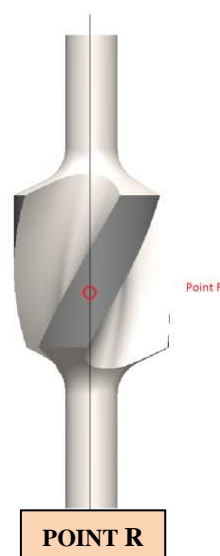


Figure V.15.Mode reprise de soudage sur le stabilisateur [41]

V.9. Discussion et interprétation

V.9.1. Discussion

Les résultats pratiques récoltés au niveau des chantiers de forage sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

V.3. Tableau : Discussion et Interprétation des Composites [?]

Procédé	Matériaux	Etat de surface	Dureté	Formation
HF 1000	(Composite-Rod) grain de WC- alliage Nickel- Bronze		30 à 40 HRC	Tendre
HF 2000	(WC-Inserts- Matrix) Insert : pastilles WC Matrix : grain de WC-alliage Nickel- Bronze		50 à 55 HRC	Dure
HF 3000	Spray-Powder- Insert Insert : Pastilles WC Matrix : Nickel- Bronze Spray WC		50 à 60 HRC	Très Dure
Techno dur TGG	(Flexyloy-TGG) Mélange : Poudre WC fusionné dans du Nickel-chrome		40 à 44 HRC	Tout Type
Welding- System	Nickel-Chrom- Powder WC Technogenia		40 à 50 HRC	Tout Type

V.9.2. Interprétation

Depuis le tableau précédant on en déduit que le choix de type de rechargement du stabilisateur est fonction de la phase de forage et du terrain qui la constitue. Et pour améliorer l'état des surfaces rechargées au carbure de tungstène un test de résistance est obligatoire afin d'évaluer la probabilité d'usure des pièces en milieux abrasifs.

V.9.3. Mesure de la résistance

Tout dépend de la complexité et type d'usure, mais dans le cas d'une usure abrasive, ou au moins le mécanisme d'usure le plus dominant. On se réfère alors à une garniture en sable à sec selon la norme ASTM G65. L'essentiel dans ce test est de peser l'échantillon avant et après le test, et le résultat est couramment exprimé

Chapitre V : Deuxième partie pratique : Rechargement par soudage automatique (welding-system)

en gramme de poids perdu ou de volume perdu.

L'échantillon est retenu contre une membrane à roulement tournante avec un nombre de force déterminée auquel est associé un nombre de tours fixé.

Un sable spécifique, de taille soigneusement mesurée, coule entre l'échantillon et la membrane, c'est une simulation d'une vraie abrasion en une demi-heure de temps au lieu de milliers d'heures voir jours dans le cas réel.

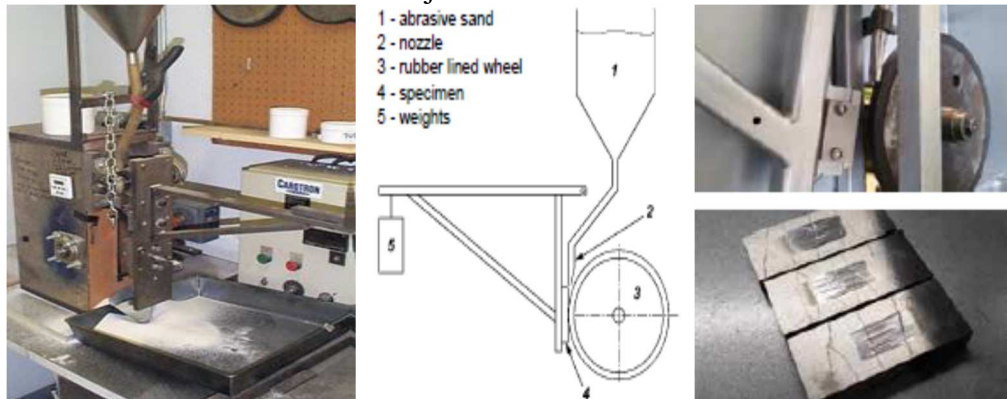


Figure V.16. Dispositif de test ASTM-G65

Conclusion générale

L'objectif de notre travail était l'élaboration des composites à base de carbures de tungstène densifiés par un liant métallique constitué par un alliage de cuivre. Ces composites réalisés par soudage sur les lames des stabilisateurs sont destinés à résister à des milieux abrasifs en même temps soumis à des contraintes multiples à l'intérieur d'un puits de forage.

Les matériaux composites élaborés par infiltration présentent de très bonnes propriétés mécaniques. Les duretés des matériaux infiltrés sont intermédiaires entre celles du carbure de tungstène qui est très dur et le liant métallique qui est au contraire plus ductile.

Les observations du faciès de la lame du stabilisateur nous ont permis de mettre en évidence plusieurs morphologies des composites dépendant du type et de la taille du carbure de tungstène ainsi l'alliage infiltré accompagné, ces faciès sont déterminés en fonction des conditions de forage et du type de terrain dans lequel est réalisé le forage allant du plus tendre vers les terrains les plus durs et abrasifs

Ainsi, on peut donc conclure que le matériau infiltré doit répondre aux exigences des sociétés pétrolières les plus rigoureuses. Pour cela on propose un nouveau matériau composite réalisé par le même procédé d'infiltration mais en remplaçant les carbures de tungstène par des pastilles en diamant synthétique, reste à faire une étude technico-commerciale au niveau de l'entreprise ENAFOR.

Références bibliographiques :

- [1] MEHDI METAICHE. Forage techniques et procédés. Université Bouira, Octobre 2013, P1
- [2] Energies fossiles ; Formation du pétrole :
<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/formation-du-petrole>
- [3] NGUYEN, J.P., Le forage, Editions TECHNIP, 1993.
- [4] ABDOULAYE, A. Contribution à la surveillance d'un processus de forage pétrolier, Thèse de doctorat, Paris Tech-Institut de sciences et technologies,2010.
- [5] Documentation de l'EAFOR.
- [6] ENSP formation industrie-IFP training, 2006.
- [7] NACEF.A. Modélisation de la vitesse d'avancement d'un outil de forage, Mémoire magister, Université Hmed Bougera Boumerdes, faculté d'hydrocarbure et de la chimie,2015
- [8] F.GRONDIN ; Les outils de forage, SONATRACH Division Forage, Janvier2004.
- [9] ENSPM, Les outils de forage, Formation Industrie,1999.
- [10] R. M. GERMAN, "Liquid Phase Sintering", Plenum press,1985.
- [11] R. M. GERMAN, PAVAN SURI, SEONG JIN PARK, "Review: liquid phase sintering", J Mater Sci44, 2009, pp.31–39.
- [12] D. BERNACHE-ASSOLANT, "Chimie physique du frittage", HERMES, 1993.
- [13] GAY.D : Matériaux composites. 3e édition. Paris. Hermès.1991.
- [14] A. EVANS, C. SAN MARCHI, A. MORTENSEN, Metal Matrix Composites in Industry: An Introduction and a Survey, Kluwer Academic Publishers,2003.
- [15] PHILIP BOCH, Propriétés et applications des céramique, matériaux pour la coupe le forage et la tribologie, p76. Mécanique et ingénierie desmatériaux.
- [16] H.PASTOR : Propriétés du tungstène et de ses alliages. M570. Technique del'ingénieur

- [17] H.PASTOR ; métallurgie des poudres, fabrication et propriétés des cermets carbure de tungstène-cobalt. Prospective dans le domaine de la coupe. Matériaux et techniques. 433-443. Décembre(1984).
- [18] HENRIPASTORA, propriétés dutungstèneetdesesalliages,Techniquedel'ingénieur, M570
- [19] Propriétés du tungstène et de ses alliages, ibid, M570, ibid, 1985.
- [20] H. OKAMOTO, "C-W (Carbon-Tungsten)," *J. Phase EquilibriaDiffus.*, vol. 29, no. 6, pp. 1-2,2008.
- [21] HENRIPASTORA,propriétésdutungstèneetdesesalliages,Techniquedel'ingénieur, M 570
- [22] R. SUBRAMANIAN, J.H. SCHNEIBEL :FeAl-TiC and FeAl-WC composites-melt infiltration processing, microstructure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering A244*, pp.103-112 :1998.
- [23] P. R. SUBRAMANIAN AND D. E. LAUGHLIN, "Copper-Tungsten," *Phase Diagrams of Binary Tungsten Alloys*. pp. 76-79,1991
- [24] CAIN-AN QUI, ZHAN-PENG J, PEI-YUN HUANG, *Metallkunde Z*, Bd. 79 H. 11, p708-711, 1988; et Bd. 79 H.12, p767-769, 1988.
- [25] PHILIPPE POUPEAU, Diagrammes d'équilibre d'alliages binaires, techniques de l'ingénieur, M 70p1,2005.
- [26] CH. BOUCHY, F. GOBIN, « Métallurgie, 1- Métallurgie Structurale", ARMAND COLIN 109]
- [27] Métallurgie des poudres, poudres et produits frittés, échantillonnage, NF, A95-101, édition AFNOR (tome 1), 1990.Pp63.
- [28] S.AZEM, M.NECHICHE, M.HAKKOUM : élaboration et caractérisation d'un composite céramique-métal (WC-Bronze) par la méthode d'infiltration. Laboratoire d'Elaboration, caractérisation et modélisation des matériaux (LEC2M). Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou,Algérie.
- [29] C.G. GOETZEL, Infiltration, ASTM Handbook, VOL. 3, p266-280,1996.

- [30] V. CONSTANTINESCU, R. ORBAN, H. COLAN, Journal de Physique IV, vol. 3, p1781-1786, 1994.
- [31] BOUTAGHOU.Z, Elaboration et caractérisation d'un matériau multi-phasé WC-W-Ni obtenu par le procédé d'infiltration spontané de poudres libres. Application : Matrice des outils de forage brasée au taillant PDC, mémoire de Magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Faculté de Génie Mécanique et de Génie des Procédés, 2011.
- [32] R. ORBAN, S. DOMSA, Metallic binder for diamond tool production using synthetic diamond, Proceedings, Euro PM 99 European conference on advances in hard materials production, Italie, 65-70, nov1999.
- [33] D. B. ASSOLLANT, M. SOUSTELLE, C. MONTY, H. PASTOR, J.M. CHAIX : Chimiephysique du frittage. Hermes, Paris 1993.
- [34] DAMIEN GENDRON : Etude numérique et expérimentale du frittage à l'échelle du grain. Thèse de doctorat de l'université de Bordeaux I, (2001)
- [35] DIDIER BERNACHE-ASSOLLANT, JEAN-PIERRE BONNET, Frittage : aspect physico-chimiques, Partie 1 : frittage en phase solide, techniques de l'ingénieur, AF6620,2005.
- [36] RANDALL M. GERMAN, PAVAN SURI, SEONG JIN PARK, Review: liquid phase sintering, J Mater Sci 44 : p31-39,2009
- [37] DIDIER BERNACHE-ASSOLLANT : Frittage en phase liquide technique de l'ingénieur AF6621
- [38] M.I. PECH-CANUL, R.N. KATZ, AND M.M. MAKHLOUF: Optimum Parameters for Wetting Silicon Carbide by Aluminum Alloys. Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 31A, 565-572, February2000.
- [39] DIDIER BERNACHE-ASSOLLANT, JEAN-PIERRE BONNET, Frittage : aspect physico-chimiques, Partie 2 : frittage en phase liquide, techniques de l'ingénieur, AF6621, 2005.
- [40] MICHEL EUDIER. Fabrication des produits frittés. M864 Techniques de l'ingénieur, traité matériaux métalliques.
- [41] Documentation de la bas tubulaire de l'ENAFOR