

N° d'ordre :...../ Faculté / UMBB / 2016

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

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Domaine : Science et Technologie.

Filière : Hydrocarbures.

Spécialité : Génie mécanique : Mécanique des Chantiers Pétroliers.

Thème

Etude de l'outil de forage d'ALDIM du point de vue :

Technologie et Performance

Réalisé par :

- **BEN KHELIFA Abdelghafour**
- **HAMMICHE Sief Mohamed**

Devant le jury :

AISSANI	Slimane	Professeur	UMBB	Président
GACEB	Mohamed	Professeur	UMBB	Encadreur
BOUDAHRI	Riad	Attaché de recherche	ALDIM	Co-Encadreur
GUEBLI	Abdelhamid	Maitre de conférences	UMBB	Examineur
HATRAF		Maitre assistant	UMBB	Examineur

Année universitaire 2015 / 2016

REMERCIEMENTS

*Toute la gratitude et le merci à Dieu notre créateur qui nous a donné
la force pour effectuer et achever ce travail.*

Ainsi nos parents qui nous aident.

*Nous tenons à remercier en premier lieu et très chaleureusement
notre promoteur **Mr : Pr. GACEB Mohammed.***

*Pour avoir accepté de diriger notre travail, pour ses précieux conseils,
pour son esprit d'ouverture et sa disponibilité. Grâce à lui,
notre travail s'est déroulé.*

*Mes remerciements chaleureux s'adressent aussi à **Ms : Khoudi** directeur d'ALDIM,
Mr : R. BOUDEHRI cadre administrative à ALDIM ;*

Mdme: N. BOUNABI

*Nous remercions toutes personnes qui nous ont aidés de près ou de loin à la
finalisation de ce travail, nous tenons à leur
exprimer notre vive gratitude.*

*Enfin nos remerciements s'adressent aux membres de jury qui nous feront
l'honneur de juger notre travail.*

HAMMICHE Mohammed Sief

BEN KHELIFA Abdelghafour

Dédicace :

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents

A mon frère et ma petite sœur

A toute ma famille

A mes amis et mes collègues

A toute personne qui fait

Partie de ma vie

*Mon binôme sief pour sa patience et son esprit de
collaboration*

Abdelghafour

Sommaire

Introduction générale.....	2
-----------------------------------	----------

Chapitre 1 : le forage

1. Introduction.....	5
2. Description d'un processus de forage	5
2.1. Installation de forage.....	6
2.2. Garniture	8
2.3. Assemblage de fonds.....	8
3. Les types de forage	9
a- Le forage d'exploration.....	9
b- Le forage d'expertise.....	9
c- Le forage de développement.....	9
4. Paramètres de forage	10
4.1. Les facteurs mécaniques.....	10
4.2. Les facteurs hydrauliques	10
5. Défauts possibles dans le forage.....	11
5.1. l'encrassement de trépan.....	11
5.2. Défaut d'obturation de circuit hydraulique.....	12
6. Conclusions.....	13

Chapitre 2 : les outils de forage

1. Introduction.....	15
2. Les différents types des outils de forage.....	16
2.1. Les outils à molettes.....	16
2.2. Les outils à éléments de coupe fixes.....	18
2.2.1. Propriétés du diamant.....	18
2.2.2. Différents types de diamants utilisés.....	18
A. Les diamants naturels.....	18

B. Les diamants synthétiques.....	18
a. Les PDC	18
b. Les TSP.....	20
3. Mode de travail des outils.....	21
A. Mode de travail d'un outil Tricône.....	21
B. Mode de travail d'un outil PDC.....	22
4. Désignation par le corps d'un outil PDC	23
a. Corps en acier.....	23
b. Corps en carbure de tungstène.....	24
5. Etude comparative entre les outils de forage.....	26
6. Usure des outils de forage.....	27
• Usure par échauffement	27
• Usure par chocs	27
7. Conclusion	28

Chapitre 3 : procédés de soudage et contrôle des fissures

A. Introduction.....	29
B. Procédés de soudage	30
I- Soudage à l'arc avec électrodes enrobées.....	30
1. Description du procédé.....	30
2. Caractéristiques de l'électrode.....	31
3. Domaines d'applications.....	32
II- Soudage sous flux en poudre	33
1. Description du procédé.....	33
2. Paramètres de soudage	35
3. Domaines d'applications.....	36
III- Soudage semi-automatique MIG et MAG.....	37
1. Description du procédé.....	37
2. Caractéristiques du couple fil/protection gazeuse.....	38
3. Fusion d'un fil.....	40

4. Domaines d'applications.....	41
IV- Soudage à l'électrode réfractaire (TIG).....	42
1. Description du procédé.....	42
2. Caractéristiques du couple électrode / protection gazeuse.....	43
2.1. Électrode.....	43
2.2. Protection gazeuse.....	44
2.3.Métal d'apport.....	45
3. Domaines d'applications.....	46
C. Contrôles non destructifs.....	47
1. Le contrôle par ressuage coloré ou fluorescent	47
a. Méthode simple de mise en œuvre du contrôle par ressuage.....	48
b. Domaines d'application du contrôle par ressuage.....	49
c. Avantages du contrôle par ressuage	49
2. Le contrôle non destructif des défauts par magnétoscopie.....	49
• Principe	49
• Différentes méthodes d'aimantation.....	50
1. Par circuit magnétique fermé	50
2. Par circuit magnétique ouvert	50
• Mode d'examen	51
• Avantages du contrôle par magnétoscopie	51
• Inconvénients du contrôle par magnétoscopie	51

Chapitre 4 : Etapes de fabrication d'un outil de PDC

1. Introduction.....	53
2. Procédé de mise en forme et composition des taillants PDC.....	53
3. Etapes de fabrication d'un outil de PDC.....	54

A. Conception.....	54
B. L'usinage.....	56
- Propriété de l'acier utilisé (la tête).....	57
C. Profilage des lames et ajustage des alvéoles	57
D. Sablage et graphitage	58
- Les effets de sablage.....	58
- Application de sablage.....	59
E. Projection thermique	60
- Caractéristiques de la poudre de projection (MB 40).....	60
F. Le rechargement dur (hardfacing).....	61
- Composition chimique de baguette de rechargement dur	61
G. Soudage du raccord et rectification du cordon	62
- Les caractéristiques de X70.....	62
H. Dégraphitge et alvéolage	63
I. Brasage des PDC au corps de l'acier	64
- Caractérisation de flux de brasage.....	64
- Utilité de flux de brasage.....	64
- Caractéristiques de la brasure.....	65
J. Contrôle par ressuage.....	66
- Les étapes de contrôle non destructif par ressuage	66
<u>1.</u> Nettoyage de l'outil par sablage	66
<u>2.</u> Pénétrants.....	66
<u>3.</u> Révélateurs des défauts	67
<u>4.</u> Examen de l'outil aux ultraviolets.....	67
K. Finition.....	68
1. Rectification.....	68
2. L'installation de buses	68
3. La peinture, codage et emballage.....	69
4. Présentation de cycle thermique.....	69
5. codification des outils de forage	70
- fiche technique de SP619A	71

Chapitre 5 : comparaison par méthode de break EVEN

1. Introduction	73
2. Méthode de break EVEN.....	74
2.1.Marche de calcule pour tracer la courbe de rentabilité.....	74
3. Calcul de rentabilité dans la zone OMG (HMD).....	78
3.1.Le Prix De Mètre foré.....	79
3.2.Méthode de Break EVEN.....	79
3.3.Analyse des résultats.....	80
Conclusion.....	81
Conclusion générale.....	83
Bibliographie	86

Liste des tableaux

Chapitre 3 :

Tableau 1 : Protections gazeuses utilisées en soudages MIG et MAG.....40

Tableau 2 : Emploi des électrode en tungstène en soudage TIG.....45

Tableau 3 : Emploi des gaz en soudage TIG.....46

Chapitre 4 :

Tableau 1 : composition élémentaire de l'acier.....57

Tableau 2 : Propriétés de la poudre MB4060

Tableau 3 : Composition chimique de baguette de rechargement.....61

Tableau 4 : Composition chimique de file de soudage X70.....62

Tableau 5 : Caractéristiques mécaniques de fil de soudage X70.....62

Tableau 6 : Analyse du flux pour brasage.....64

Tableau 7 : la fiche technique de brasure « Brase-tec 4900 ».....65

Chapitre 5 :

Tableau 1 : Paramètre de forage dans la zone OMG-323.....78

Tableau 2 : Paramètre de forage dans la zone OMG-402.....78

Tableau 3 : calcule de Prix De Mètre foré.....79

Liste des figures

Chapitre 1 :

Figure 1.1 : Processus de forage.....	6
Figure 1.2 : Moteur embarqué dans une garniture de Forage.....	7
Figure 1.3 : Trépan en présence de l'encrassement.....	12
Figure 1.4 : circuit hydraulique de processus de forage.....	13

Chapitre 2:

Figure 2.1 : Les outils à molettes (tricône).....	16
Figure 2.2 : Principe de construction des molettes des tricônes.....	16
Figure 2.3 : Nomenclature des tricônes.....	17
Figure 2.4 : Structure d'un PDC.....	19
Figure 2.5 : l'outil de TSP.....	20
Figure 2.6 : Mécanisme d'action d'un outil à molettes sur la roche.....	21
Figure 2.7: Action d'un PDC.....	22
Figure 2.8: corps en acier.....	23
Figure 2.9 : corps en matrice.....	24
Figure 2.10 : Usure d'un outil de forage par effet thermique.....	28
Figure 2.11 : Usure d'un outil de forage par cassure.....	28

Chapitre 3 :

Figure 3.1 : Soudage à l'électrode enrobée (principe).....	30
Figure 3.2 : Soudage à l'électrode enrobée dans l'industrie.....	31
Figure 3.3 : Électrode enrobée (caractéristiques).....	32
Figure 3.4 : Soudage sous flux en poudre (principe).....	34
Figure 3.5 : Soudage semi-automatique (principe).....	37

Figure 3.6 : Soudage semi-automatique dans l'industrie.....	38
Figure 3.7 : L'équipement d'opération (MIG/MAG).....	38
Figure 3.8 : Soudage à l'électrode réfractaire (principe).....	43
Figure 3.9 : Soudage à l'électrode réfractaire dans l'industrie.....	44
Figure 3.10 : Effet de la longueur d'arc sur la tension.....	46
Figure 3.11 : les pénétrants utiliser dans l'essai de ressuage.....	47
Figure 3.12 : les lignes de flux.....	49
Figure 3.15 : contrôle magnétoscopie par circuit ferme.....	50
Figure 3.15 : contrôle magnétoscopie par circuit ouvert.....	50
 <u>Chapitre 4 :</u>	
Figure 4.1 : presse cubique de l'entreprise USSynthetic.....	53
Figure 4.2 : Structure d'un PDC.....	54
Figure 4.3 : Génération de programme et simulation d'usinage.....	55
Figure 4.4 : Modélisation et simulation de la contrainte.....	55
Figure 4.5 : Machine à 5 axes.....	56
Figure 4.6 : opération de profilage des lames.....	57
Figure 4.7 : les outils utilisés pour l'opération de profilage.....	58
Figure 4.8 : Cabine de sablage pour le traitement de petites pièces.....	59
Figure 4.9 : Etapes de préparation effectuées sur les outils de forage avant les opérations couche d'accrochage, le rechargement dur, le brasage : (a) sablage ; (b) graphitage.....	59
Figure 4.10 : la poudre MB40.....	60
Figure 4.11 : Etapes de projection thermique la poudre (MB 40) sur le corps d'acier :(a) Pistolet de projection ; (b) dépôt de la poudre sur la partie frontale ; (c) dépôt de la poudre sur la partie latérale.....	60
Figure 4.12 : présentation des baguettes de rechargement dur.....	61
Figure 4.13 : les étapes de rechargement dur.....	61
Figure 4.14 : Illustration des différentes étapes de soudage du raccord.....	63
Figure 4.15 : Dégraphitage et alvéolage à la micro-meule diamantée.....	63

Figure 4.16 : flux de brasage utilisé.....	64
Figure 4.17 : Les étapes de brasage : (a) classement des taillants de PDC ; (b) Outil avant le brasage ; (c) Outil après le brasage.....	65
Figure 4.18 : Présentation de l’outil dans une sableuse.....	66
Figure 4.19 : Application du pénétrant fluorescent: (a) pénétrant ; (b) Application du pénétrant fluorescent ; (c) nettoyage après 30 min.....	66
Figure 4.20 : : Révélation des défauts: (a) Le révélateur utilisé ; (b) pulvérisation de révélateur.....	67
Figure 4.21 : Outil exposé sous ultraviolet.....	67
Figure 4.22 : Illustration de l’opération de Ressuage de l’outil.....	67
Figure 4.23 : Etapes de rectification de l’outil après brasage : (a) sur la rectifieuse ; (b) a la meule diamantée.....	68
Figure 4.24 : installation des buses.....	68
Figure 4.25 : présentation de produit finie.....	69
Figure 4.26 : Présentation de cycle thermique.....	69
Figure 4.27 : Fiche technique de SP619A 12’’1/4.....	71

Chapitre 5 :

Figure 5.1 : diagramme de rentabilité de l’outil de forage.....	77
Figure 5.2 : les courbes de Brek EVEN.....	80

Nomenclature

ROP : la vitesse d'avancement de l'outil (m/h).

WOB : le poids sur l'outil (t)

RPM : la vitesse de rotation (tr/min)

Pm : prix du mètre foré (KDA/m)

Po : le prix de l'outil de forage. (KDA)

Ph : prix horaire de l'appareil de forage (KDA/h)

M : métrage effectué (m)

Tf : temps de forage (h)

Tm : temps de manœuvre (h)

H : la profondeur de forage (m)

TORQ : le moment de torsion de garniture (lb.ft)

Introduction générale

Notre époque est connue par une large utilisation d'énergie qui est devenue de plus en plus indispensable pour la vie de l'être humain, qui à son tour, n'a ménagé aucun effort pour exploiter tout type d'énergie, à savoir ; l'énergie solaire, nucléaire et celle dérivée des hydrocarbures.

Le pétrole et le gaz sont considérés aujourd'hui comme la source principale d'énergie, avec des utilisations multiples réparties en un grand nombre de secteurs énergétiques à travers le monde entier.

A l'heure actuel avant que s'effectue un forage, les géologues déterminent dans leurs grandes lignes les principales caractéristiques du terrain à travers lequel va avoir lieu le percement du puits. Ces renseignements permettent de définir le mode de forage et l'outil le mieux adapté aux formations et l'ordre de grandeur des différents paramètres nécessaires à la conduite d'un tel processus.

Notre mémoire s'articulera autour de cinq chapitres :

Le premier chapitre expose tout d'abord des généralités sur le forage, particulièrement sur le processus de forage et leurs paramètres avec une petite description sur les défauts possibles qui existent dans le forage.

Dans le deuxième chapitre, on insistera plus spécifiquement sur les outils de forage, leurs différents types et leurs modes de fonctionnement avec une exposition sur les propriétés des taillants d'outils PDC et nous allons présenter les différents types d'usure qui influe sur l'avancement de l'outil de forage.

Le troisième chapitre s'articule dans la première partie qui s'intéresse aux différents procédés de soudage qui existent dans le lieu de stage (ALDIM) et qui est intéressants dans les étapes de fabrication de l'outil d'ALDIM. La seconde partie porte sur les procédés de contrôle des fissures qui existent après la fabrication.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des étapes de fabrication et le dispositif expérimental d'élaboration des outils PDC spécifiquement l'outil de diamètre 12 ¼ avec une caractérisation mécanique de chacun des produits utilisés aux cours de déroulement de la fabrication de l'outil.

Enfin, dans le cinquième chapitre, nous avons une comparaison entre l'outil de forage d'ALDIM (société algérienne) et l'outil de forage de VAREL (société américaine) par l'application de méthode de BREAK EVEN qui nous aidons à choisir l'outil le plus rentable selon le critère économique après l'interprétions les résultats de l'étude.

Chapitre 1 : Le forage

1. Introduction :

En 1889, à [Titusville \(Pennsylvanie\)](#), le pétrole jaillissait pour la première fois sur le sol [des Etats-Unis](#), d'un puits foré à 69.5 ft. [Le colonel Drake](#) venait d'entrer dans l'histoire de l'exploitation pétrolière. Mais, même si cet événement a marqué le début de forage pétrolier, il ne faut pas oublier les très nombreux puits foré bien avant pour la production d'eau, de saumures et déjà du naphte utilisé pour le calfatage, l'éclairage ou la médecine, mais tous ces forage anciens, y compris celui de Drake, étaient foré par battage.

Un outil massif comparable au ciseau des sculpteurs, fixés au bout d'une tige lourde (mass tige), elle-même suspendue à un balancier, tombait sous son propre poids et débitait la roche en éclats. Le balancier animé par l'action humaine, ou animale dans les temps anciens, a profité au XIX^e siècle de l'avènement de la machine à vapeur. Mais quel que soit le mode d'entraînement, il fallait périodiquement débarrasser le fond du trou des déblais. Le puits était alors rempli d'eau et la boue résultant du mélange de l'eau et des débris de roche était vidée à l'aide d'un outil cylindrique muni d'un fond en forme de clapet, ouvert à la descente et fermé lors de la remontée au treuil. Le plus profond forage par battage atteignit 2250 m en 1918. Ce procédé est encore parfois utilisé de nos jours pour de forage d'eau de faible profondeur.

C'est au début du siècle que [Antony Lucas](#) démontra au monde entier l'efficacité du forage Rotary par la découverte du champs de [Spineltop\(Texas\)](#) en utilisant la combinaison d'un outil rotatif et l'injection continue de boue. Depuis ce jour, cette technique est universellement utilisée et a profité des améliorations apportées par le progrès technique.

2. Description d'un processus de forage :

Le processus de forage rotary se découpe en deux grands ensembles : l'installation et la garniture de forage. La figure FIG. 1.1 présente les différents constituants d'un processus de forage.

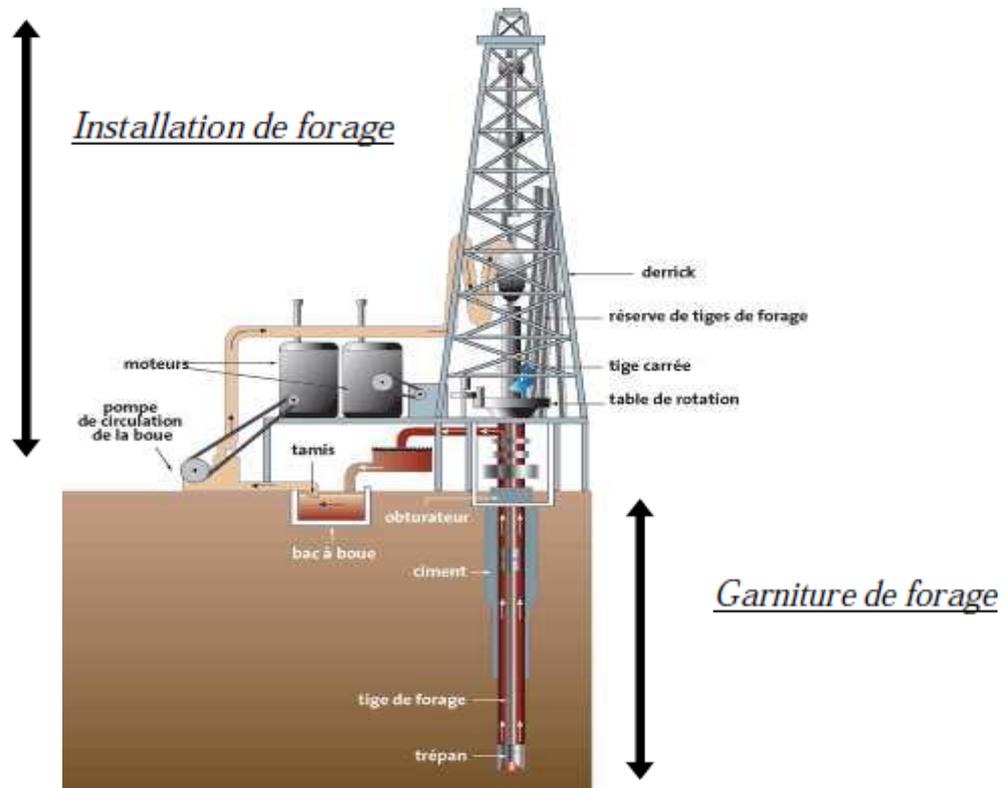


Fig.1.1 : Processus de forage

2.1. Installation de forage

L'installation de forage possède plusieurs modules (FIG. 1.1) : le système hydraulique (pompe et bac à boue), le système d'alimentation (moteurs), les obturateurs, la table de rotation, les réserve des tiges de forage ainsi que le système de suspension qui renferme le derrick.

- **Système hydraulique :**

La circulation du fluide dans le processus de forage est assurée par une pompe de circulation. La figure FIG. 1.1 présente une pompe connectée à un bac à boue et disposant d'un tamis pour le filtrage des déblais issus du forage avant la réinjection de ce fluide dans le puits. Plusieurs catégories de pompes de circulation existent dont la pompe à cavités progressives.

- **Système d'alimentation :**

Les moteurs électriques ou hydrauliques sont les sources d'alimentation les plus fréquentes dans l'industrie pétrolière. L'énergie produite est transmise sous forme électrique ou mécanique vers les différents constituants de l'installation : la pompe de circulation, le treuil et la table de rotation. La nécessité de réaliser des puits déviés incite l'utilisation des moteurs embarqués afin d'accéder aux poches latérales contenant des hydrocarbures.



FIG. 1.2 : Moteur embarqué dans une garniture de Forage

- **Système de rotation :**

Le système de rotation regroupe une table de rotation (*rotary table*), une tige d'entraînement (*Kelly*) et une tête d'injection (*top drive*).

- **Système de suspension :**

La tâche dédiée au système de suspension réside dans les déplacements du processus de forage (montée, descente) et dans le contrôle du poids appliqué sur l'outil. Il dispose d'un derrick, pouvant présenter une hauteur de plus de 80 mètres, un crochet et un treuil motorisé. Le derrick représente le point culminant de la plateforme. C'est une tour métallique qui soutient une tige au bout de laquelle se situe le trépan. La tige est rallongée au fur et à mesure que le trépan opère.

2.2. Garniture

La garniture désignée aussi par arbre de forage, en raison de la mécanique de liaison qu'elle établit entre la motorisation rotative en surface (*table de forage*) et le trépan, correspond à la partie opérative dans le puits. Elle effectue plusieurs tâches dont la transmission de l'énergie nécessaire à la désagrégation de la roche, le guidage et le contrôle de la trajectoire du puits, la transmission de la force de poussée (**W**) ainsi que la circulation du fluide. Elle est constituée essentiellement des masses tiges (*Drill Collars*) et des trains de tiges (*Drill pipes*). A cela se greffent des accessoires tels que les stabilisateurs des masses tiges, les amortisseurs de choc, les systèmes de mesures etc.

- **Trains de tiges (Drill pipes)**

Ils sont constitués de tubes en acier enchevêtrés les uns aux autres et pouvant s'étaler à des milliers de mètres. Ils transmettent le couple au trépan et servent de support aux masses tiges.

- **Masses tiges (Drill Collars)**

Les masses tiges sont des tubes en acier se situant au-dessous des trains de tiges. Elles contribuent à la création du poids agissant sur le trépan et sont soumises à plusieurs contraintes engendrées par le diamètre du trépan, la production des pertes de charge minimales, la résistance au flambage et la rigidité.

2.3. Assemblage de fonds (Bottom Hole Assembly) :

L'assemblage de fond, *Bottom Hole Assembly (BHA)*, correspond à la partie inférieure de la garniture de forage et renferme les trains de tiges, les stabilisateurs ainsi que le trépan. Sa longueur fluctue entre 100 et 300 mètres et dépend de la pression envisagée.

- **Stabilisateurs**

Ils se situent dans la garniture de forage et plus particulièrement dans les masses tiges et facilitent le contrôle de la trajectoire du trépan.

- **Mesures pendant le forage (MWD)**

De nombreux systèmes permettant l'acquisition des mesures sont incorporés dans le processus de forage et conditionnent le bon déroulement des opérations. Ils assurent la transmission des informations, pendant le forage, vers la surface. Les systèmes de mesures *MWD* sont transportés dans les puits en étant soit intégrés dans l'assemblage de fond soit embarqués dans les masses tiges. Ils délivrent les mesures relatives aux natures des roches, aux pressions dans le puits, aux températures, aux vibrations, aux chocs, aux couples etc.

Les mesures suivantes sont transmises par les systèmes :

- la vitesse de rotation des trains de tiges et donc du trépan ;
- les types et sévérités des vibrations ;
- la température dans le puits ;
- le couple et le poids agissant sur le trépan (*T* et *W*) ;
- le débit du fluide de forage.

3. Les types de forage :

a) Le forage d'exploration :

Le premier forage à effectuer pour confirmer l'existence des fluides dans la roche réservoir, puis définir la nature de ces derniers.

b) Le forage d'expertise : (d'appréciation)

L'objectif de ce dernier est de préciser ou de compléter les informations fournies par le forage précédent, en obtenant des renseignements sur le gisement et déterminant ses caractéristiques lointaines, ses limites, sa rentabilité, afin de prendre la décision sur son développement.

c) Le forage de développement :

L'objectif principal de ce type de forage est d'effectuer des puits en service ou en production.

4. Paramètres de forage :

Les variables de forage désignent les grandeurs physiques agissant sur les performances du processus et donc sur sa vitesse de pénétration, désignée par (V). Elles se matérialisent par des facteurs mécaniques et hydrauliques.

4.1. Les facteurs mécaniques

❖ *Poids agissant sur le trépan (Weight On Bit, W) :*

Le poids agissant sur le trépan représente un effort longitudinal de compression suivant l'axe de révolution du trépan. Cet effort permet aux taillants de s'incruster dans la roche et il est souvent utilisé de façon à tirer profit du poids des masses tiges. La valeur du poids dépend de la dimension et du type de trépan, de sa vitesse de rotation et du type de formation à forer. Une partie de ce poids provient de l'hydraulique créée par l'injection du fluide qui transite par les trains de tiges.

❖ *Le couple agissant sur le trépan (Torque On Bit, T) :*

Le moment transmis par la garniture de forage au trépan suivant son axe de révolution représente le couple agissant sur le trépan.

❖ *La vitesse de rotation :*

C'est la vitesse du trépan par rapport à son axe de révolution et sa valeur dépend du système de forage utilisé. Elle peut varier entre 50 et 1000 tr/min.

4.2. Les facteurs hydrauliques

❖ *Type de boue :*

Le type de boue est choisi en fonction des performances recherchées et désigne les propriétés physico-chimiques du fluide de forage. Trois types de boues sont souvent employés : la boue à base d'eau (*Water Based Mud, WBM*), la boue à base d'huile (*Oil Based Mud, OBM*) et la boue synthétique (*Synthetic Based Mud, SBM*). Une boue synthétique est constituée d'un mélange d'eau et d'additifs chimiques.

❖ *Débit et pression hydraulique :*

Le débit et la pression hydraulique représentent les variables physiques qui doivent favoriser une bonne évacuation des déblais et éviter des problèmes d'encrassement du trépan ou du puits.

❖ *Densité de la boue :*

L'obtention des informations relatives au puits et particulièrement le contrôle de la pression dans le puits s'effectue à travers la densité de la boue. La boue de forage ramène à la surface les déblais, mais aussi du gaz contenu dans les roches. Cela fournit des indications sur la nature des fluides se situant dans le réservoir et représente un élément important dans le pilotage de la garniture.

5. Défauts possibles dans le forage

Les fonctions du trépan et du système hydraulique sont fondamentales pour l'extraction et l'évacuation des déblais. Il est certain qu'un dysfonctionnement dans un organe a des répercussions sur le procédé de forage. Particulièrement, lorsqu'il provient du trépan ou du système hydraulique. Lorsque le défaut se distingue par un agrégat de matière composé de la boue de forage et des déblais issus de l'opération de forage et se rapporte aux arrêtes de coupe du trépan, il s'agit de l'encrassement. Lorsqu'il se rapporte au trou d'évacuation du trépan ou du système hydraulique, il s'agit des obturations. Les obturations des circuits hydrauliques des processus de forage n'ont pas, à l'instar de l'encrassement, fait l'objet de nombreuses études en raison de leurs instrumentations limitées. On peut néanmoins citer des travaux (Wang et al., 2000), (Wang et al., 2001), (Wang and Hu, 2006) qui utilisent l'analyse vibratoire.

5.1. **l'encrassement de trépan :**

La détection de l'encrassement d'un trépan s'inscrit dans le cadre de l'optimisation des performances des processus de forage. Plusieurs travaux ont été effectués pour comprendre l'origine, la nature et l'évolution de l'encrassement, (Zijsling and Illerhauss, 1993), (Smith, 1998), (Cooper and Sanjit, 1994).



Fig.1.3 : trépan en présence de l'encrassement

Les pressions importantes par rapport aux valeurs usuelles, les formations argileuses, l'utilisation de l'eau comme fluide de forage ainsi que les variables de forage non compatibles avec la roche à forer sont autant de facteurs induisant l'encrassement du trépan et dégradant les performances des processus de forage. Les principales conséquences de l'encrassement sont liées à la perte de contact entre le trépan et la roche, à la réduction de la vitesse de pénétration du trépan, à l'augmentation du couple agissant sur le trépan et aux difficultés d'évacuation des déblais.

5.2. Défaut d'obturation de circuit hydraulique

Le circuit hydraulique est composé de quatre organes : un moteur électrique, une boîte de vitesse, une pompe et un tuyau. A cela s'ajoutent plusieurs capteurs : le resolver qui est un système de transmission de position, le Quartzdyne qui représente un capteur de pression ainsi que les capteurs de courant. Différents types de défauts peuvent se produire sur le circuit hydraulique. L'obturation du circuit hydraulique en amont et en aval de la pompe ainsi que la présence des déblais dans la pompe sont les défauts potentiels.

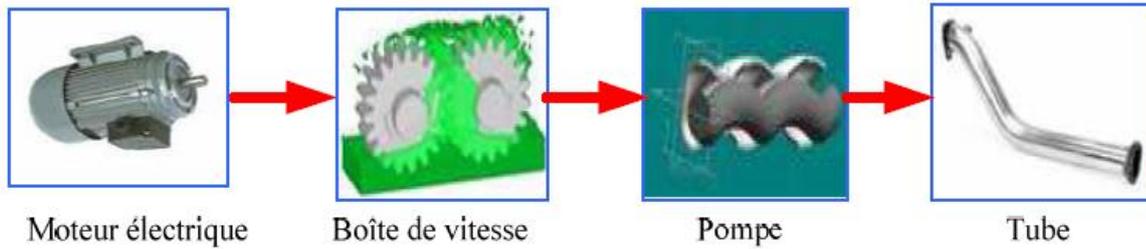


Fig.1.4 : circuit hydraulique de processus de forage

6. Conclusions

Dans ce chapitre nous allons faire la description du processus de forage, des différents organes qui le composent, telle que la présentation des différents constituants de l'installation et de la garniture de forage ainsi que leurs interactions et leurs paramètres avec une description sur les problématiques qui se posent pendant le forage d'un puits.

Chapitre 2 : Les outils de forage

1. Introduction

Le but d'un forage est de parvenir à réaliser un puits dans les meilleures conditions technique et de sécurité, et de la manière la plus économique possible.

Le cout de forage proprement dit (cout environné), c'est-à-dire le cout total de l'opération lorsque l'outil au fond est en train de détruire la roche, représente environ 30 % du cout globale du puits. Il est important d'optimiser le moyen utilisé pour détruire la roche afin de réduire les couts du puits.

Pour arriver à cet objectif les outils de forage ont connu une évolution au cours du temps, pour répondre aux problèmes techniques du forage qui s'avèrent de plus en plus complexes.

Quelques dates importantes sont à retenir dans évolution technologique des outils :

1909 : Introduction des outils à molettes (bicones), sur tout utilisés dans les formations mi-dure.

1930 : Introduction de la première couronne diamantée pour le carottage pétrolier.

1933 : Introduction des premières outils tricônes à dents fraisées offrant une meilleur adaptation au type de formation (offset et dent longue pour les formations tendre, dents courtes et molette sans offset pour les terrains durs).

1948 : Apparition des outils à duses.

1951 : Introduction du premier outil tricônes à picots de carbure tungstène.

1953 : Introduction des outils diamant à pierres naturelles serties : leur durée de vie et leur performances à la turbine compensent leur cout élevé dans les terrains moyen à dur situés à grand profondeur. Ils sont concurrencés par les outils à pastille de carbure tungstène dans les années 70. Ces derniers sont bien adaptés aux terrains moyennement durs et abrasifs pour des profondeurs intermédiaires.

1959 : Introduction de joint d'étanchéité et de système de lubrification interne des roulements.

1976 : Introduction des outils à diamant synthétique poly-cristallins(Stratapax).

1979 : Introduction des outils à paliers lisses.

1981 : Introduction des outils à diamants synthétique poly-cristallins thermostable(TPS).

Toutes ces évolutions ont eu pour but d'augmenter la vitesse d'avancement et la durée vie des outils, et donc de réduire le cout du forage.

2. Les différents types d'outils de forage

2.1. Les outils à molettes :

Le tricône (outil à trois molettes) est le plus utilisé. Les éléments de coupe font partie de la molette ce sont :

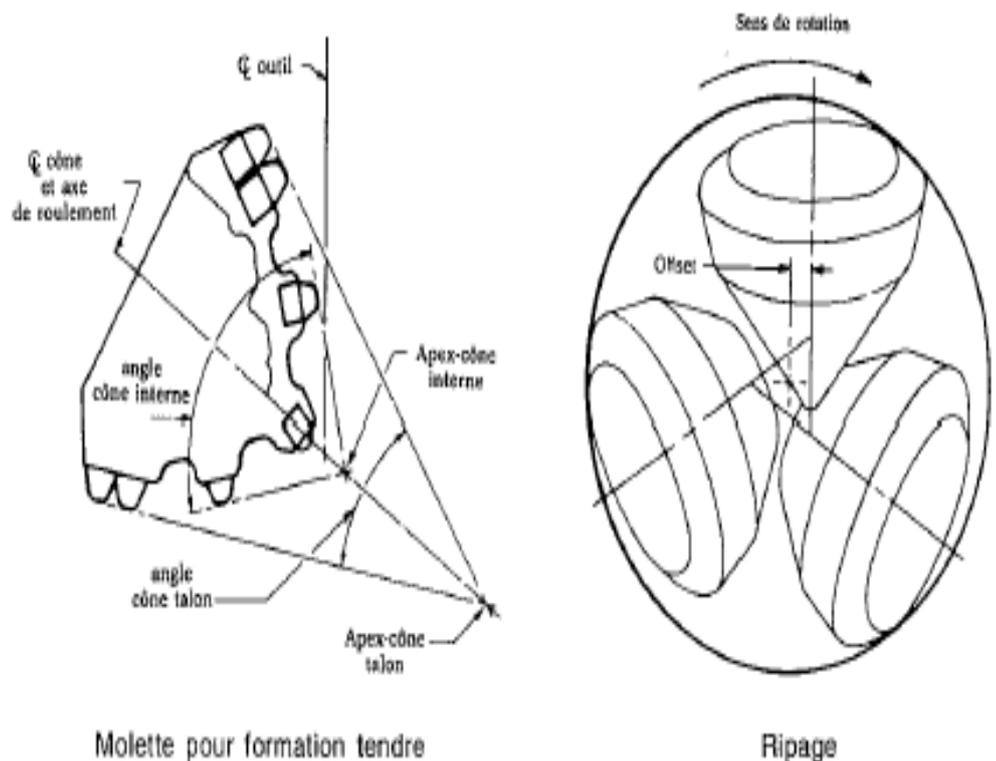
- Des dents usinées dans le cône ;
- Des picots de carbure de tungstène emmanchés en force dans des perçages à la surface du cône.

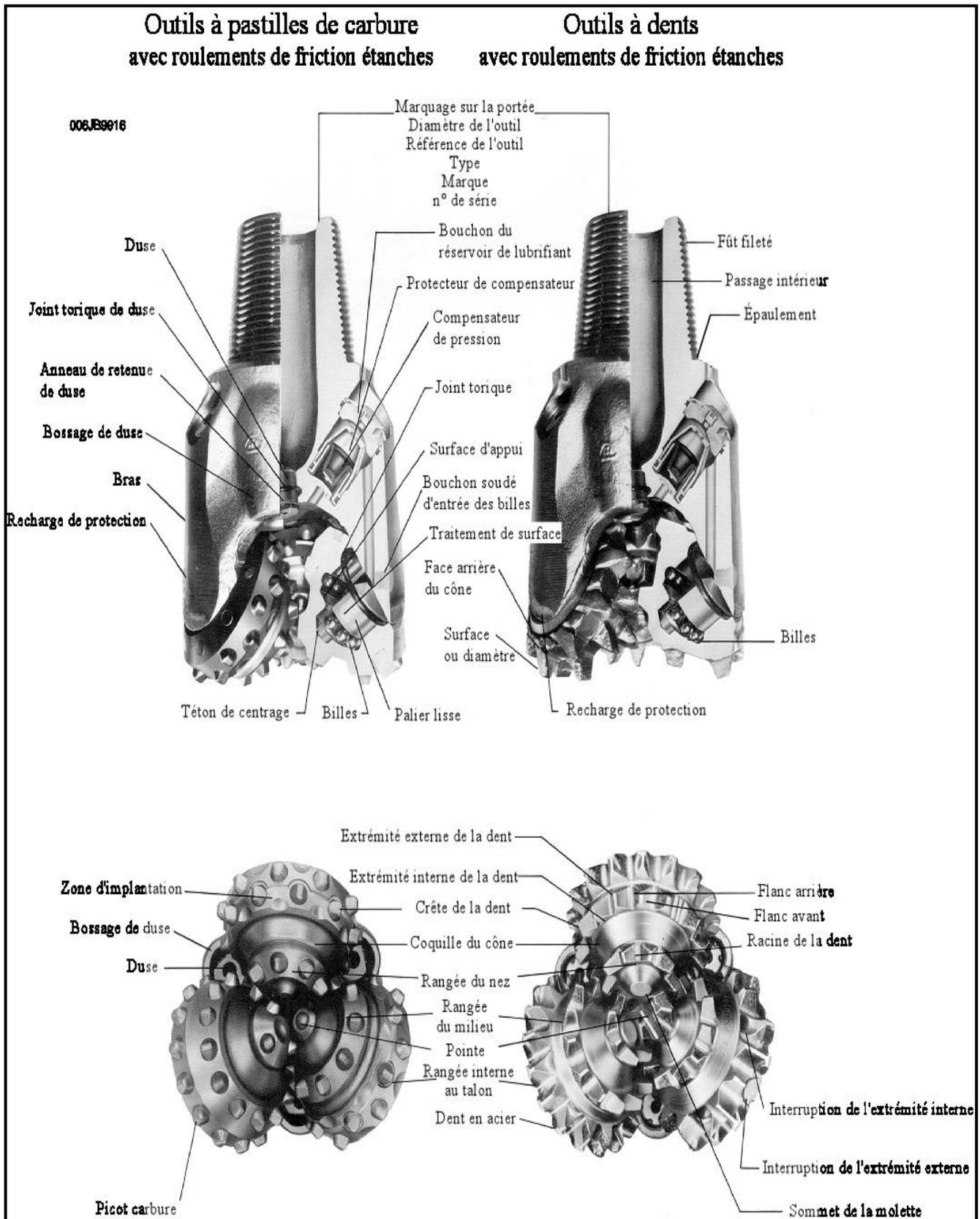
Les outils à picots ont permis d'améliorer les performances de forage dans les formations dures. Là où les outils à dents pouvaient ne forer que quelques mètres avec une vitesse d'avancement faible. Les picots de carbure et les paliers de friction ont permis d'appliquer des poids de plus en plus importants sur l'outil et d'augmenter la durée de vie des outils dans les formations dures (la durée de vie de ces outils est pratiquement trois fois plus longue que celle des outils à dents et à roulement à rouleaux).

(Fig.2.1) Les outils à molettes
(tricône)



(Fig.2.2) Principe de construction des molettes des tricônes





(Fig.2.3) Nomenclature des tricônes

2.2. Les outils à éléments de coupe fixes :

2.2.1 Propriétés du diamant :

Le diamant est une substance ayant des propriétés physiques remarquables :

- C'est la substance la plus dure (résistance à l'écrasement la plus élevée) que l'on connaisse. Le diamant est environ 10 fois plus dur que l'acier et 2 fois plus que le carbure de tungstène.
- C'est la substance la plus résistante à l'usure (environ 10 fois plus résistant que le carbure de tungstène).
- C'est la substance qui a le plus faible coefficient de friction ; le diamant est plus glissant que le Téflon.
- C'est le meilleur conducteur de chaleur.
- Son coefficient de dilatation est très faible ce qui pose problème lorsqu'il est associé à d'autres matériaux.
- Son point de fusion est élevé (3650°C), mais il se transforme superficiellement en graphite à partir de 1300°C et perd sa résistance mécanique.

2.2.2 Différents types de diamants utilisés

Les fabricants d'outils utilisent deux catégories de diamants : les diamants naturels et les diamants synthétiques.

A. Les diamants naturels

Ils proviennent de mines et les pierres employées pour la fabrication des outils de forage sont des diamants industriels de très bonne qualité. Des pierres de différentes structure et forme sont utilisées.

La taille des pierres utilisées pour les outils de forage varie entre 1 à 15 pierres par carat.

B. Les diamants synthétiques

1. Les PDC (Polycristalline Diamond Compact) :

En 1971, General Electric a réussi à faire la synthèse du diamant en laboratoire à partir d'un mélange de graphite, de nickel et de cobalt soumis à des conditions de pression et de température très élevées (100 000 bars et 1500°C). La fine couche de diamant, grâce à la

présence de cobalt, peut être fixée sur un support en carbure de tungstène. Le produit obtenu est appelé (Stratapax) ou compact.

Les diamants obtenus par synthèse sont poly-cristallins (d'où le nom de PDC : Poly-cristalline Diamond Compact) : la couche de diamant ainsi formée est constituée de petits cristaux qui se sont développés dans des directions aléatoires. Le cobalt, utilisé pour catalyser la synthèse, sert également de liant entre les cristaux. Cette structure poly cristalline confère au diamant synthétique une résistance à la compression et à l'usure plus élevée que celle du diamant naturel.

La couche de diamant s'use par micro-écaillage, ce qui entraîne un auto-affûtage du PDC qui maintient l'efficacité de l'arête de coupe. Les performances du taillant seront donc peu ou pas diminuées au cours de la vie de l'outil.

Cependant, les coefficients de dilatation thermique du liant et du diamant sont très différents (coefficient du liant beaucoup plus élevé). A partir de 400°C, la dilatation différentielle des différents constituants produit la rupture des liaisons entre cristaux et le PDC perd progressivement sa résistance, la structure n'est plus stable aux environs de 750°C. Il est donc essentiel de maintenir le PDC à une température la plus faible possible.

Les compacts peuvent être brasés sur le corps de l'outil ou peuvent être fixés sur des supports cylindriques de carbure de tungstène emmanchés en force à chaud dans le corps de l'outil.

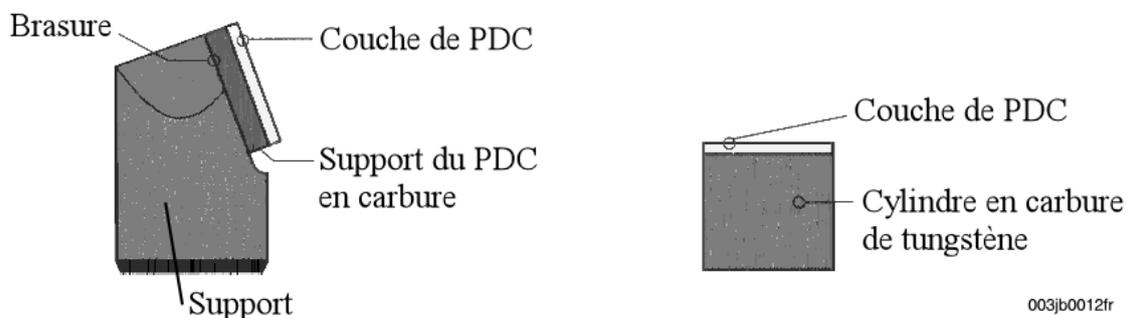


Fig.2.4 : Structure d'un PDC



2. Les TSP (Thermally Stable Polycrystalline)

Pour pallier à l'instabilité thermique des PDC, General Electric a mis au point un diamant synthétique où le catalyseur est éliminé par acidification. Le produit obtenu est stable jusqu'à des températures de l'ordre de 1 200 °C. Cependant l'élimination du cobalt fait qu'il n'est pas possible de fixer le diamant obtenu sur un support quelconque. Le TSP devra être maintenu en place mécaniquement comme le diamant naturel.

Il existe un autre procédé de fabrication où le cobalt et le nickel sont remplacés par du silicium. Le produit obtenu est encore plus stable du point de vue thermique, mais comme dans le cas précédent, il ne peut pas être fixé sur un support.

Les TSP peuvent être regroupés pour former des structures en mosaïque de la dimension des PDC. Cette structure a permis d'augmenter la vitesse d'avancement et d'allonger la durée de vie de l'outil dans des formations tendres, abrasives et dans les intercalations d'argiles et de roche plus dures, là où les PDC n'étaient pas rentables.

Le TSP présente de nombreux avantages sur les autres types de diamant :

- Il résiste mieux à la température que le PDC.
- Grâce à sa structure poly cristalline, il résiste mieux au choc que le diamant naturel (à l'exception du carbonado qui est également poly cristallin) ;
- Son usure irrégulière produit des faces tranchantes alors que le diamant naturel s'émousse.

De ce fait, les performances des TSP diminuent peu ou pas au cours de la vie de l'outil. En définitive, le TSP a l'efficacité du PDC et la résistance à la température du diamant naturel.



Fig.2.5 : l'outil de TSP

- **Avantages de diamant synthétique par rapport au diamant naturel :**

- Les deux produits (PDC, TSD) sont plus résistants à l'abrasion que les diamants naturels mais ils sont moins durs.
- La raison de l'énorme succès des pierres synthétiques et que le scientifique a la possibilité de fabriquer des diamants qui répondent exactement aux exigences des industriels.

3. Mode de travail des outils :

A. Mode de travail d'un outil Tricône :

L'efficacité d'un outil à molettes dépend de sa capacité à broyer et évacuer les morceaux de roche. Ces outils travaillent par :

- Compression produisant la pénétration de la dent ou du picot dans la formation et l'éclatement de la roche. Plus le terrain est tendre, plus la dent devra être longue pour produire le meilleur avancement. L'outil produit une série de petits cratères résultant de la pression exercée par chaque dent sur le front de taille. La contrainte de compression appliquée sur la formation induit une fracture.
- Arrachage du copeau de terrain par ripage de la molette sur elle-même.

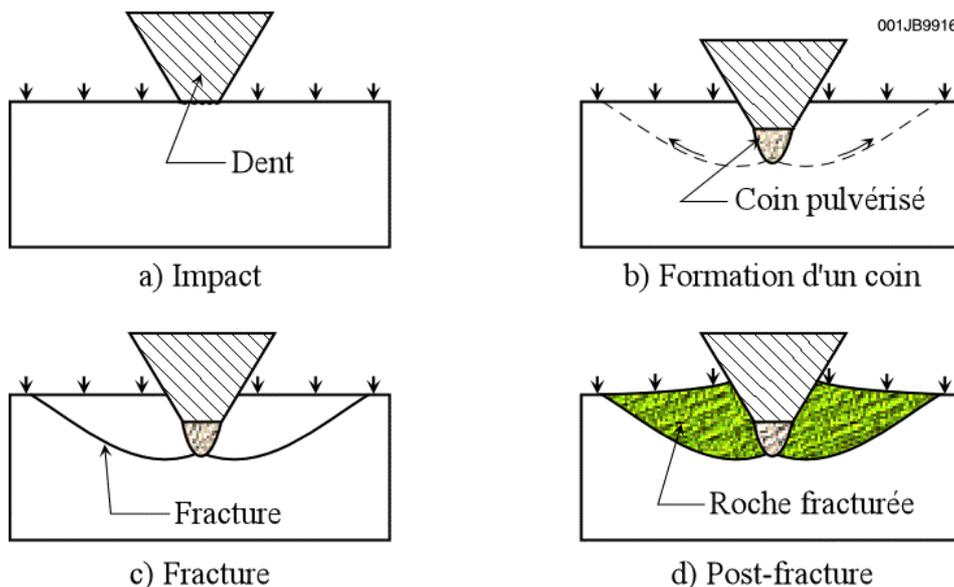


Fig.2.6 : Mécanisme d'action d'un outil à molettes sur la roche

Ces deux effets sont complémentaires. Ils sont privilégiés l'un par rapport à l'autre suivant la dureté de la roche à broyer. Pour un terrain tendre, l'effet de ripage sera prépondérant.

Ces deux effets sont gouvernés par la géométrie des cônes. Pour privilégier l'effet de ripage, la rotation du cône doit s'éloigner de façon significative d'une rotation vraie.

Il faut un décalage des rangées de dents sur chaque molette.

Pour obtenir l'effet de glissement ou "ripage" qui permet d'arracher les copeaux de terrain, l'axe de chaque molette est décalé et ne passe pas par l'axe de rotation de l'outil.

C'est ce qu'on appelle "l'offset". Il est d'autant plus grand que l'outil destiné aux terrains tendres, pour devenir nul pour les outils destinés aux terrains durs. Dans les terrains durs, l'arrachage de copeaux n'est plus possible et l'effet de glissement serait nuisible aux dents de l'outil.

B. Mode de travail d'un outil PDC :

Ils travaillent à la façon de l'outil d'une machine outil en cisillant la roche. La mise en action de l'élément de coupe nécessite en premier un effort d'écrasement entraînant la pénétration dans la formation.

Les taillants soulèvent les copeaux de roche formés ce qui contribue à un meilleur nettoyage du front de taille, donc évite le bourrage de l'outil et permet d'obtenir une vitesse d'avancement maximale (dans les formations plastiques, l'avancement est plus limité par le nettoyage du front de taille que par la destruction de la roche).

Dans les formations tendres, c'est le mécanisme qui demande le moins d'énergie pour détruire la roche mais qui produit le plus de couple. Des vitesses d'avancement élevées sont obtenues avec des poids sur l'outil beaucoup plus faibles qu'avec les autres types d'outils.

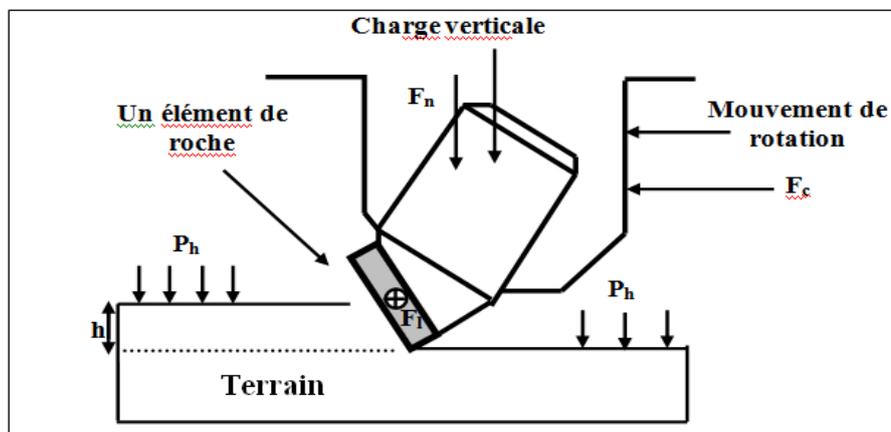


Fig.2.7 : Action d'un PDC

4. Désignation par le corps d'un outil PDC :

- Le corps de l'outil :

Le corps de l'outil (bit body) fournit les fonctions suivantes pendant la durée de vie de l'outil:

- 1- servir de support pour les dents et les buses et la fixation de ceux-ci ;
- 2- accepter les contraintes mécaniques sous les conditions d'opérations de fond ;
- 3- diriger et contrôler le courant de boue pour le nettoyage et le refroidissement des dents ;
- 4- Permettre la connexion à la garniture de forage.

Actuellement, il existe deux types de corps d'outils.

- Corps en acier (steel body);
- Corps en carbure de tungstène (Matrix body).

a) Corps en acier (Steel body) :

Les outils sont équipés de cutters cylindriques qui sont directement brasés dans un évidage qui a été aménagé dans le corps d'outil.

La protection du diamètre de l'outil se fait en sortant des studs en carbure de tungstène sur toute la hauteur du gage extérieur.

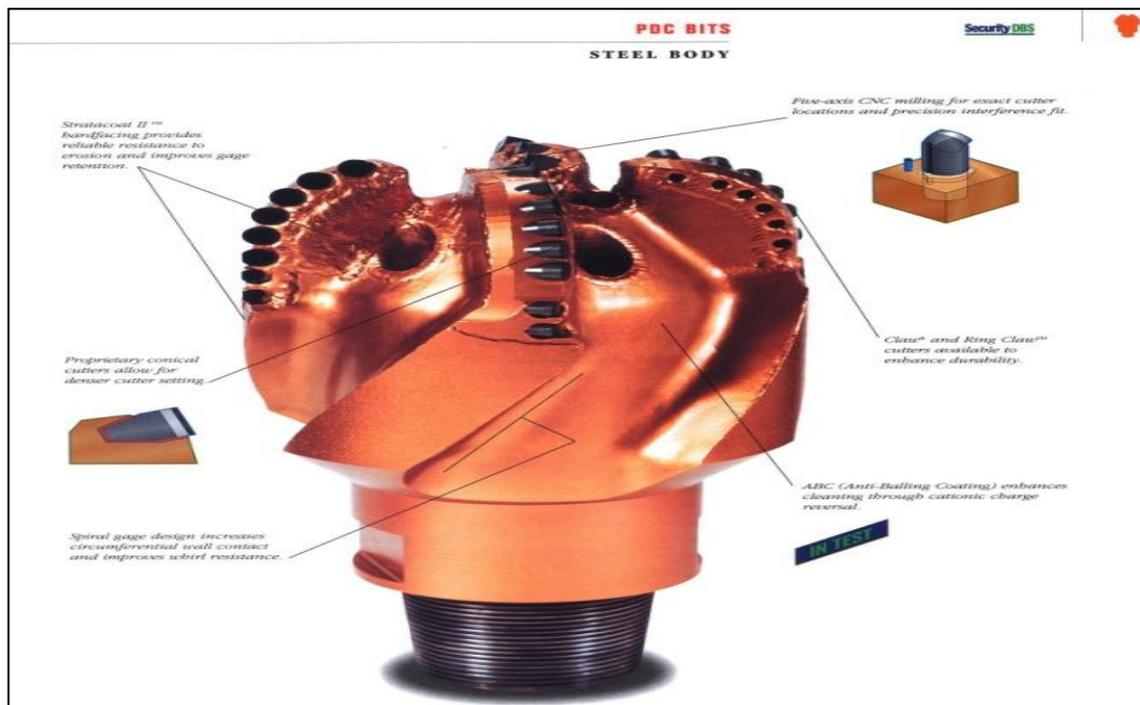


Fig.2.8: Corps en acier.

a-1) Les avantages de corps en acier:

- possibilité de remplacer les cutters périscope après utilisation de l'outil si toute fois il n'y a pas érosion du corps ;
- possibilité de pouvoir utiliser toute la surface du cutter étant donné que ce type de cutter est entièrement exposé.

a-2) Les inconvénients du corps en acier:

- Une usure par "Wash out" très rapide du corps acier ce qui limite considérablement sa durée de vie. Cette durée de vie est directement proportionnelle à la quantité de solides contenus dans la boue, toute fois cette usure par "Wash out" peut être réduite en apportant une métallisation dure sur la surface d'attaque de l'outil ;
- Le type de cutter périscope se casse parfois à la base du corps sous l'effet d'un impact trop important.

b) Corps en matrice:

Les outils utilisent des cutters PDC type périscope qui est sertis directement dans le corps en acier sans aucun brassage.

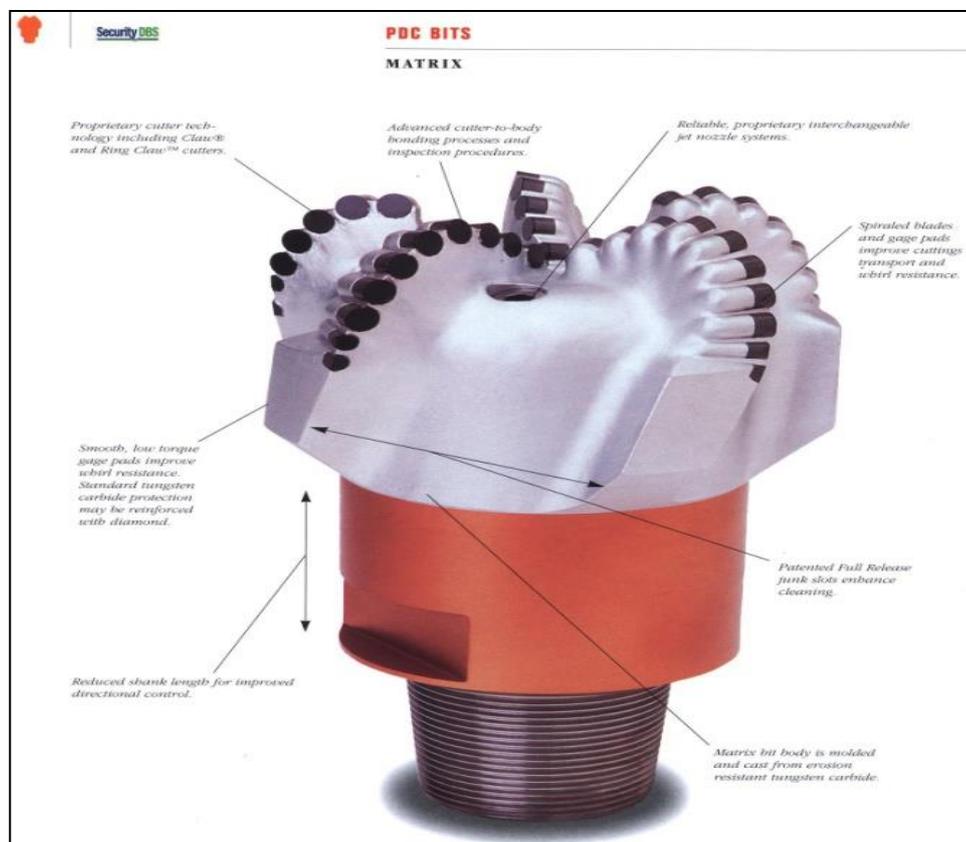


Fig.2.9 : Corps en matrice

b-1) Les avantages du corps en matrice:

- La très haute résistance à l'abrasion du corps qui est en carbure de tungstène, ce qui donne une durée de vie toujours supérieure à la durée de vie de cutter lui-même ;
- L'évidement aménagé dans le corps de l'outil pour recevoir le cutter donne une protection contre les chocs que l'outil neuf peut avoir (c'est-à-dire qui peut travailler avec des torques très importants sans endommager le cutter).

b-2) Les inconvénients du corps en matrice :

- son prix qui est sensiblement plus élevé que le steel body ;
- une fois utilisé, cet outil ne peut pas être réparé (réutilisé) ;
- toute la surface de cutter ne peut pas être utilisée du fait de sa position dans la matrice.

5. Etude comparative entre les outils de forage :

Caractéristique des outils tricônes	Caractéristique des fixes cutters
<ul style="list-style-type: none">- Il est utilisé pour des profils short radius.- Les tricônes sont limités par leur durée de vie.- Les tricônes offrent performance et un bon contrôle directionnel.- La facilité de contrôle de tool face.- Choix des tricônes avec des dents courtes pour limiter le torque, car les tricônes ne fonctionnent pas avec des high torque- Ne résistent pas à des formations très abrasives comme le sable ou les grés.- En cas d'abrasivité, les tricônes doivent avoir le pourtour des molettes protégées (inserts éventuellement recouvert de diamant) et les bras renforcés de pads d'usure spéciaux.- Ils sont préférés si on veut un bon contrôle de trajectoire.	<ul style="list-style-type: none">- Il convient au forage de longue section.- La durée de vie des PDC est plus grande que les tricônes, sont mieux adaptés aux paramètres de forage utilisés.- Choix des shorts gauge pour améliorer le contrôle de tool face.- L'utilisation des outils PDC de court shank afin d'améliorer le contrôle de trous.- Limitation de largeur des cutters pour contrebalancer le high torque.- Ils sont adaptés pour des formations très dures (PDC) et très abrasives (Imprégné),- Les outils à tête fixe peuvent avoir des jupes calibrées plus longues, une densité de diamant ou TSP accrue, davantage de cutters PDC à la périphérie.- Ils sont préférés si on veut avoir un meilleur avancement dans le drain horizontal.

6. Usure des outils de forage

La détermination de l'usure des outils est une opération difficile, elle peut varier d'une personne à l'autre. Cependant, une détermination précise et objective est très importante car elle servira à :

- sélectionner l'outil le mieux adapté au type de formation à forer,
- optimiser les conditions de forage (paramètres de forage, garniture, reprise du fond, temps de rotation, etc.),
- obtenir le prix de revient du mètre foré le plus faible,
- améliorer la conception des outils

L'usure de l'outil de forage est la cause directe de la chute d'avancement du à :

- l'usure des dents.
- L'usure des roulements (outil tricône).
- Fissuration de corps de l'outil

- **Usure par échauffement :** (fig.2.10)

Le PDC perd progressivement sa résistance, et sa structure n'est plus stable aux environ 750 °C. Il est donc essentiel de maintenir le PDC à la température la plus basse possible pour éviter leur détérioration. Le débit de forage doit être suffisant pour refroidir correctement les taillants. Si à cause de problèmes de pompe, le débit ne peut pas être maintenu à une valeur correcte, il faut arrêter le forage ou diminuer les paramètres (vitesse de rotation et le poids).

- **Usure par chocs :** (fig.2.11)

Le diamant étant le matériau le plus dure, il est aussi fragile pour cela il est important de maintenir le poids le plus constant possible sur l'outil, cela afin d'éviter les chocs sur les taillants. Donc, il est préférable d'utiliser « le forage automatique » si le chef de post a du mal à suivre le poids. Ce point est particulièrement important pour les outils diamant et permet d'obtenir des vitesses d'avancement plus élevées car le poids est appliqué plus régulièrement.



Fig.2.10 : Usure d'un outil de forage par effet thermique.

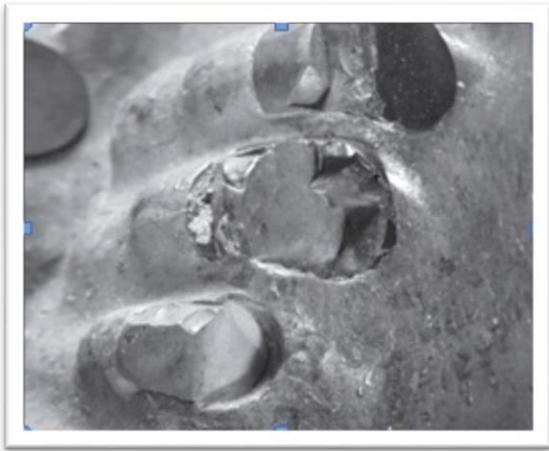


Fig.2.11 : Usure d'un outil de forage par cassure

Conclusion :

En définitive, les outils sont parmi les équipements les plus importants dans un appareil de forage, puisqu'ils nous permettent d'exploiter le maximum d'énergie donnée par l'équipement de surface.

Donc, il faudra choisir l'outil qui permet de forer pour un prix de revient minimum. L'outil le plus économique n'est pas nécessairement celui qui permet l'avancement le plus rapide. Il faut prendre en considération sa dure de vie, les temps de manœuvre ainsi que la qualité du puits réalisé.

Chapitre 3 : Procédés du soudage et contrôle des fissures

A. Introduction

Dans leur majorité, les procédés de soudage consistent à assembler des pièces métalliques en les portant localement à une température de soudage au niveau de leur joint (température de fusion la plupart du temps), constituant ainsi une liaison continue de la matière. Cette mise en température s'effectue selon divers phénomènes physiques exothermiques dont l'ionisation qui constitue la base essentielle des procédés de soudage à l'arc. Dans ce but, deux électrodes constituées de l'outil et des pièces à souder sont placées dans un milieu gazeux et reliées aux pôles d'un générateur afin de provoquer un arc électrique. Cet arc agit comme un flux de chaleur au niveau des électrodes. Lorsque l'électrode est fusible, il se forme un dépôt continu qui se dilue avec les bords à souder pour constituer la liaison métallique.

Dans le cas où l'électrode est réfractaire, il n'y a pas de transfert de métal électrode-pièce.

Les différents procédés de soudage à l'arc se caractérisent chacun par deux éléments essentiels:

- **la nature de l'électrode** : baguette, fil fusible ou tige réfractaire ;
- **la nature du milieu, gaz ou vapeurs**, dans lequel s'établit la décharge électrique et qui doit avoir des propriétés protectrices vis-à-vis de l'atmosphère ambiante.

On distingue ainsi :

- **le soudage à l'électrode enrobée** (ou baguette), se conduisant à la main et appelé également soudage manuel ;
- **le soudage sous flux en poudre**, utilisant comme électrode un fil métallique fusible se déroulant de façon continue. Le flux assure la protection du bain ;
- **le soudage semi-automatique** où l'électrode est également un fil fusible, et la protection réalisée par un gaz inerte (soudage MIG *Metal Inert Gas*) ou actif (soudage MAG *Metal Active Gas*) ;
- **le soudage à électrode de tungstène non fusible** (soudage TIG). La protection est réalisée par un gaz nécessairement inerte. L'apport de métal, facultatif, s'effectue indépendamment.
- **Le soudage avec fil fourré** (flux cored arc welding) s'apparente au soudage MAG dont il se distingue par la nature de l'électrode qu'il met en œuvre.

B. Procédés de soudage :

I- Soudage à l'arc avec électrodes enrobées

1- Description du procédé

Le soudage à l'arc à l'électrode enrobée (SAEE), appelé soudage manuel à l'arc, s'exécute d'une façon très simple, schématisée sur la figure 3.1.

L'appareillage comporte une source de courant continu ou alternatif, une pince porte-électrode et l'électrode proprement dite, un câble de liaison et un câble de masse. L'opérateur tient, en outre, un masque de protection contre le rayonnement lumineux intense de l'arc éblouissant et dangereux pour la vue. La source étant sous tension, l'arc s'amorce par contact électrode-pièce et produit instantanément la fusion de l'électrode, la production de vapeurs et la formation du cordon qui, après refroidissement, se présente comme indiqué sur la figure 2, recouvert du laitier vitrifié dû à l'enrobage fondu et que l'on évacue ultérieurement.

La fusion de l'électrode et la formation progressive du cordon entraînent un réflexe d'approche de la main de l'opération conditionné par le maintien d'un arc stable.

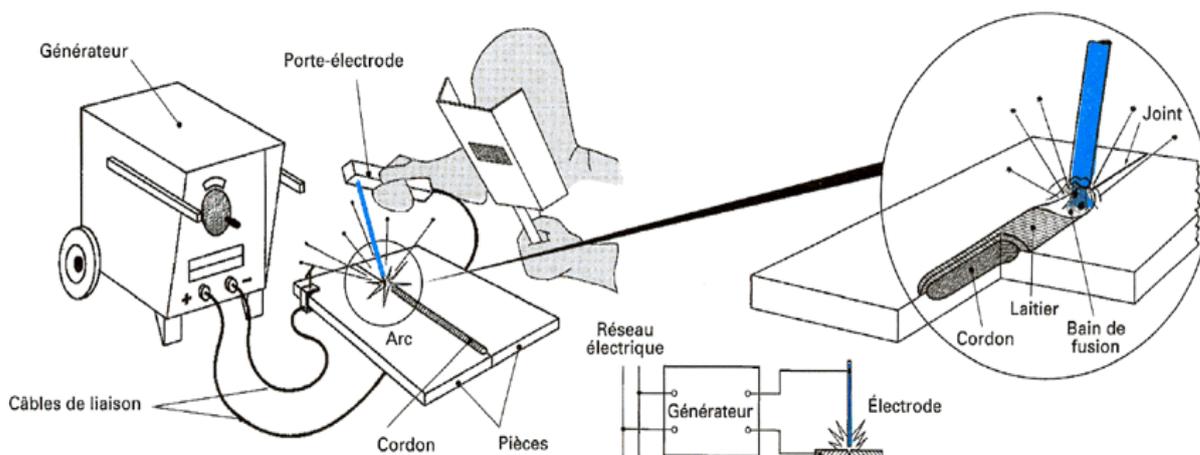


Fig. 3.1 - Soudage à l'électrode enrobée : principe

Toutes les caractéristiques du procédé, à savoir son fonctionnement, sa mise en œuvre et les caractéristiques des soudures obtenues, reposent sur deux éléments fondamentaux :

- la technologie des électrodes ;
- l'habileté de l'opérateur.

L'électrode enrobée (au sens générique du terme) constitue en effet le paramètre essentiel de ce procédé. Déterminée et construite en fonction du matériau à souder, elle impose, entre autres, la nature et l'intensité du courant que devra délivrer le générateur et est à

l'origine des taux de dépôt, de la qualité des soudures, etc. Quant au soudeur, il contrôle la fusion du métal et la régularité du cordon, et doit avoir pour cela une formation professionnelle appropriée.

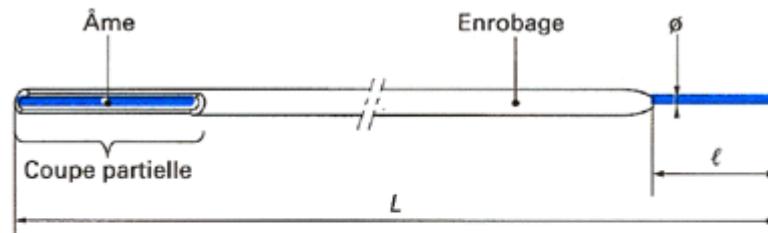
Le soudage à l'électrode enrobée s'applique particulièrement bien à toutes les formes d'assemblages en **aciers au carbone**, peu ou fortement alliés, et sous certaines conditions aux alliages d'aluminium et de cuivre.



Fig.3.2 : Soudage à l'électrode enrobée dans l'industrie

2- Caractéristiques de l'électrode

Une électrode enrobée se présente sous la forme d'une baguette (d'où les expressions courantes de baguette de soudage et de soudage à la baguette) comportant une âme métallique conductrice et un enrobage composite généralement non conducteur (figure 3). L'électrode doit correspondre aux matériaux et aux épaisseurs à souder, mais également aux caractéristiques métallurgiques et mécaniques que l'on désire pour les soudures. C'est pourquoi il **en existe un grand nombre de types différents finement répertoriés et normalisés.**



Dimensions standards :
 $\phi = 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,15; 4; 5$ ou $6,3$ mm
Par tranche de 50 en 50 mm, $L = 150$ à 350 mm
puis de 100 en 100 jusqu'à 700 mm
(en relation avec le diamètre)

Fig. 3.3 - Électrode enrobée : caractéristiques

- **L'âme métallique :**

L'âme métallique conduit le courant, apporte le métal, forme le cordon et comporte des éléments d'alliages devant assurer une grande part des caractéristiques désirées de la soudure. Le métal de l'âme est en général très proche du métal de base à souder. La section est choisie en fonction du taux de dépôt désiré, lui-même fonction des épaisseurs en présence et de l'assemblage à réaliser. Elle détermine par suite le courant de soudage à utiliser. La longueur n'excède pas 400 à 500 mm, pour des raisons évidentes de fabrication et d'emploi.

- **Enrobage :**

L'enrobage est constitué par un mélange de corps très divers agglomérés autour de l'âme par un liant. Compte tenu des effets nombreux et variés que ces différents corps peuvent produire grâce à leurs comportements physico-chimiques pendant le soudage et dans les soudures elles-mêmes, il existe une grande diversité d'enrobages dont l'élaboration relève souvent de secrets de fabrication. Les éléments les plus employés sont des minerais, silicates, carbonates, matières organiques, métaux en poudre, graphite, etc.

Différentes épaisseurs d'enrobage existent dans les normes : minces, semi-épais et épais, respectivement $< 140\%$, 140 à 180% et $> 180\%$ du diamètre de l'âme.

3- Domaines d'applications

Hormis quelques tentatives de mécanisation ou d'automatisation, le soudage à l'électrode enrobée est un **procédé exclusivement manuel qui se rencontre en pratique dans tous les domaines industriels** dont il satisfait les besoins à quelques réserves près. Il revêt en effet une simplicité et une flexibilité inégalées grâce à :

- un équipement on ne peut plus simple ;
- une électrode enrobée qui, sous une forme pratique et d'acquisition facile, véhicule le métal d'apport et la protection, et rassemble les paramètres métallurgiques,

unique adaptation de ce procédé à la nature des travaux et des matériaux mis en œuvre, principalement les métaux ferreux.

Ces avantages sont à opposer aux inconvénients :

- d'un fonctionnement cadencé ;
- d'une capacité et d'une productivité limitée.

C'est ainsi qu'il s'impose :

- dans les travaux de soudage surtout lorsqu'ils sont très diversifiés : chaudronnerie générale, serrurerie, mécano soudure ;
- sur les chantiers : ponts, navires, pipelines, charpentes, etc., dans des travaux de nature hautement technique.

Mieux que le chalumeau ou tout autre procédé (il n'a pas le problème des bouteilles de gaz sous pression), il est le moyen typique des petits travaux d'entretien ou d'amateur pour lesquels se sont développés des générateurs, ou postes, légers à faible facteur d'utilisation (30 à 40 %). On trouve des électrodes travaux courants chez tous les quincailliers.

II- Soudage sous flux en poudre

1- Description du procédé

Le soudage à l'arc sous flux en poudre (SAFP) constitue l'automatisation du soudage à l'électrode enrobée. Il associe en effet un **fil électrode fusible**, dévidé d'une bobine, avec une protection obtenue par des vapeurs provenant d'une **poudre composite** comparable à l'enrobage et apportée directement dans la zone d'arc, mais indépendamment de l'électrode. Cette disposition permet de réaliser des soudures ininterrompues multi horaires. Ce procédé est aussi appelé **soudage à l'arc submergé** (submerged arc welding process ou SAW).

Le soudage sous flux se conduit d'une manière presque exclusivement automatique avec des installations dont le principe est représenté sur la figure 3.4 et qui comportent essentiellement :

- une tête de soudage regroupant la torche proprement dite, l'entraîneur de fil, le dévidoir recevant la bobine de fil, la trémie de poudre et son conduit à la torche ;
- une source de courant continu ou, dans certains cas, alternatif ;
- un coffret d'automatisme et des accessoires.

Comme dans toute automatisation, la tête de soudage sous flux est fixée sur un mécanisme selon les deux variantes essentielles : tête fixe, pièce mobile ou inversement. Ainsi que l'indique la **figure 3.4**, le courant est amené à l'électrode fusible par le tube-contact, ou guide-fil, sur les parois duquel elle frotte en permanence.

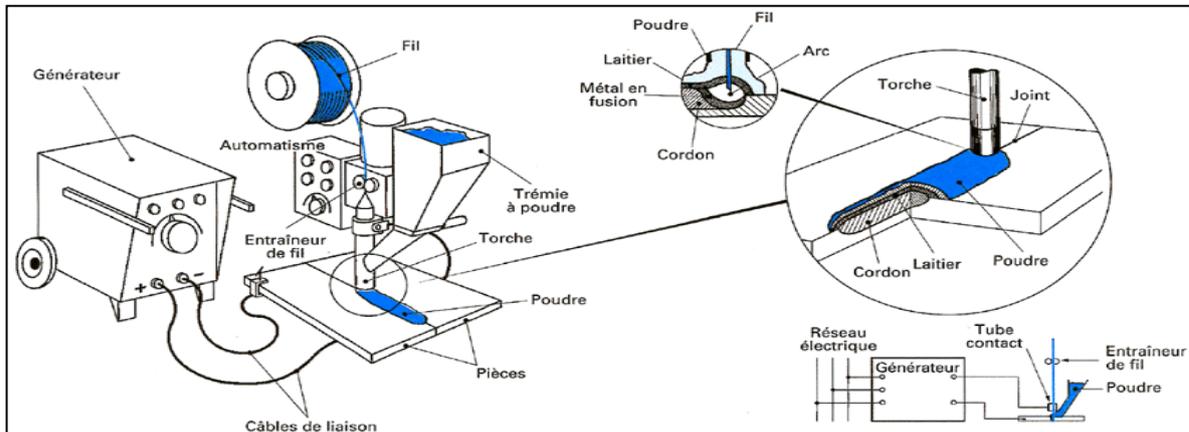


Figure. 3.4 - Soudage sous flux en poudre : principe

L'opération de soudage comprend les différentes phases :

- mise en place des pièces et maintien de celles-ci dans leur position relative ;
- mise en position de la tête sur le point de départ de la soudure, l'électrode émergeant du tube contact ;
- appui sur le bouton de commande, ce qui déclenche le cycle proprement dit, à savoir :
 - ouverture de la trappe de la trémie de flux, lequel se répand dans la zone d'arc,
 - mise sous tension du générateur en apparition de la tension à vide,
 - avance du fil par mise et marche de l'entraîneur ; l'arc s'amorce au contact électrode-pièce et la fusion ainsi que le dépôt de métal s'installent instantanément ;
- commande du déplacement relatif tête-pièce pour former le cordon de soudure.

Le flux en poudre et le fil continuent à être alimenté d'une façon régulière et l'arc s'établit sous la poudre, dans les vapeurs et sous le laitier liquide qu'il y crée, qui constituent ainsi la protection du métal en fusion. Le comportement particulier du flux, qui le distingue de l'enrobage, réalise un certain confinement de l'arc et par suite :

- le rend invisible ;
- accroît son rendement ;
- élimine les projections.

L'amenée du courant à l'extrémité de l'électrode permet également de travailler à des densités de courant plus élevées que ne l'autorisent les électrodes enrobées et permet par suite d'obtenir des pénétrations, des taux de dépôts et des dilutions plus importantes (jusqu'à 70 %). Le transfert de métal s'effectue essentiellement par pulvérisation.

Après soudure, le cordon est recouvert du laitier solide refroidi (**figure 3.4**), qu'il est nécessaire d'enlever par piquage (au moyen d'un marteau) et qui est lui-même recouvert du surplus de poudre non fondue dans l'opération et récupérable, après traitement éventuel, pour un nouvel emploi. La consommation en poids de poudre est en pratique du même ordre que celle du fil lui-même. L'emploi de poudre limite l'application du soudage sous flux à la **seule position à plat, éventuellement** (mais moyennant des artifices de retenue) **en corniche**.

2- Paramètres de soudage :

- **Courant**

Selon ce qui a été précédemment exposé, l'accroissement du courant augmente la puissance dans l'arc et par suite la pénétration et le taux de dépôt. L'expérience prouve que, par ailleurs, le courant n'a qu'une faible influence sur la largeur du cordon et la surépaisseur. Cela provient essentiellement du confinement très important de l'énergie que réalise la protection, ce qui en contrepartie accroît la dilution.

- **Longueur d'arc**

En augmentant la longueur d'arc :

- on augmente évidemment sa tension et la largeur du cordon ;
- on diminue la pénétration et la dilution ;
- on augmente la consommation du flux.

Le paramètre longueur est intéressant en pratique pour ajuster dans certaines situations l'efficacité du soudage :

- accroissement de la pénétration dans les premières passes ;
- étalement du cordon dans les dernières passes ;
- action sur les morsures et la fissuration.

La longueur d'arc ayant un effet sur la quantité fondue de flux, elle a donc une influence sur la composition métallurgique et par suite sur les propriétés de la soudure.

Les tensions d'arc sont comprises entre 20 et 45 V.

- **Vitesse de soudage**

En augmentant la vitesse de soudage, on diminue la largeur du cordon, la surépaisseur, la pénétration et la dilution.

Les vitesses de soudage sont réglables sur une très grande gamme, de quelques dizaines de centimètres à plusieurs mètres par minute.

3- Domaines d'applications

Le soudage sous flux se place, par rapport au soudage à électrode enrobée, avec pratiquement les mêmes avantages quant à son adaptativité métallurgique, mais il résout le problème de la productivité par :

- son fonctionnement continu grâce au fil-électrode ;
- son taux de dépôt supérieur.

Cela le cantonne dans le domaine de la **chaudronnerie moyenne et lourde** et, de façon générale, dans les **applications dans lesquelles** :

- **les épaisseurs sont élevées** (> 30 à 50 mm) et, par suite, les chanfreins importants ;
- **les soudures sont longues** (plusieurs mètres) **et uniformes** (absence d'angle).

Ce procédé n'est **pratiquement pas utilisé manuellement** à cause des amenées de flux et de fil qui forment, au niveau de la torche, un appareillage lourd et difficilement manœuvrable. Il se prête, par contre et naturellement, car c'est pour cela qu'il a été développé, à la **mécanisation du soudage** pour laquelle la position à plat, nécessaire à la retenue du flux, est facile à observer. C'est ainsi que se sont développés des moyens appropriés tels que les vireurs, les positionneurs, les potences et autres chariots automoteurs, appropriés à la manipulation de la tête ou de pièces lourdes. Il n'est pas utilisé en extérieur sur chantiers.

III- Soudage semi-automatique MIG et MAG

1- Description du procédé

La **figure 3.5** représente une installation de soudage semi-automatique, procédé que l'on désigne également par les expressions MIG et MAG selon que le gaz est respectivement inerte ou actif (Metal Inert Gas et Metal Active Gas). Dans les pays anglo-saxons, on utilise aujourd'hui de préférence et indifféremment les expressions suivantes : semi-automatique welding, gas metal arc welding ou GMA, gas shielded arc welding process

Le soudage semi-automatique s'apparente par le fil électrode au soudage sous flux. Bien que parfois actif, le gaz de protection joue un rôle métallurgiquement beaucoup plus restreint que le flux mais simplifie la mise en œuvre du procédé. L'appareillage comporte : une source de courant continu, un ensemble de dévidage d'une bobine de fil constitué par un dévidoir et un entraîneur, une bouteille de gaz avec détendeur et débitmètre, une torche spécifique du procédé et divers accessoires.

L'arc étant visible, les accessoires de protection sont identiques à ceux du soudage à l'électrode enrobée. La torche a pour rôle de guider le fil sur la soudure et d'amener le courant à son extrémité par un tube-contact de la même façon qu'en soudage sous flux. Lors du soudage, l'appui sur la gâchette commande l'ouverture automatique de la vanne de gaz, la fermeture du contacteur qui met le générateur sous tension faisant apparaître la tension à vide, et également le moteur de l'entraîneur qui dévide le fil. L'arc s'amorce au contact électrode-pièce et la fusion s'installe instantanément pour former le cordon.

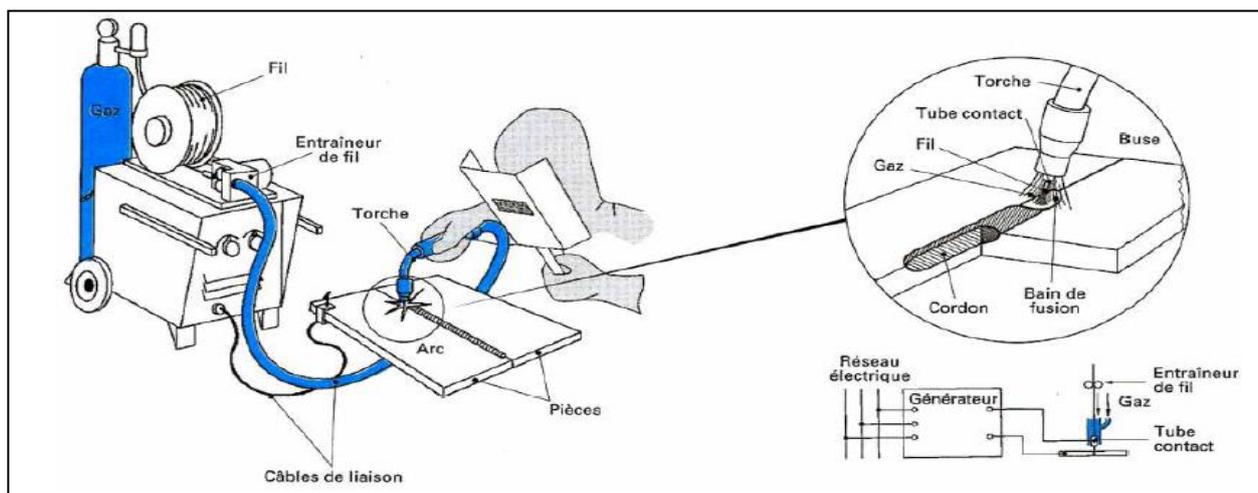


Figure. 3.5 – Soudage semi-automatique : principe

L'avance du fil-électrode à vitesse constante, conjuguée avec la caractéristique horizontale du générateur, rend le fonctionnement de l'arc et le processus de fusion indépendants de l'opérateur dont le seul rôle ne réside plus que dans le guidage du cordon sur le joint, d'où le caractère semi-automatique du soudage manuel.

Le cordon ne se recouvre d'aucun laitier après soudage ; c'est un des avantages de ce procédé qui **peut se conduire dans toutes positions. Le soudage semi-automatique peut s'automatiser facilement.** Il peut s'appliquer sur la presque totalité des matériaux soudables sans grande difficulté pour le mettre en œuvre, de là vient son intérêt dans tous les domaines industriels.



Fig.3.6. Soudage semi-automatique dans l'industrie



fig.3.7. L'équipement d'opération

2- Caractéristiques du couple fil/protection gazeuse

- Fil

L'électrode est, comme pour le soudage sous flux, un fil, de grande longueur, enroulée sur un touret ou une bobine isolante, dont le matériau correspond au métal à souder (acier doux ou allié, acier inoxydable, alliage d'aluminium ou de cuivre). Les fils d'aciers sont protégés de l'oxydation par un cuivrage électrolytique qui a également pour rôle de faciliter

l'arrivée du courant à son passage dans la torche. Des proportions importantes de silicium (0,3 à 1,2 %) et de manganèse (0,9 à 1,3 %) jouent un rôle désoxydant pour compenser les effets des gaz de protection actifs. Les diamètres normalisés vont de 0,6 à 2,4 mm, voire 3,2 mm.

- **Caractères principaux :**

Électrode : fil métallique fusible dévidé d'une façon continue.

Protection : apport gazeux inerte ou faiblement actif.

Nature du courant : continu ou pulsé.

- **Protection gazeuse**

La protection gazeuse est, selon le cas, inerte ou active et oxydante (les protections réductrices sont peu utilisées). C'est ce qui établit la distinction d'appellation MIG (inerte) ou MAG (actif) dans l'utilisation du procédé, le matériel de soudage ne présentant pas, par ailleurs, de différences notables. Les protections gazeuses communément employées sont données dans le tableau 1. Les producteurs et distributeurs de gaz de soudage proposent des mélanges prêts à l'emploi soit à la demande des utilisateurs, soit avec des proportions et des additifs qu'ils ne divulguent pas et auxquels ils donnent une marque de fabrique. De même que pour les autres procédés, la protection gazeuse joue différents rôles.

- **Rôle électrique**

Le potentiel d'ionisation varie d'un type de protection à l'autre. Ainsi d'environ 16 V pour l'argon pur, il est de 25 V pour l'hélium et cela explique la pénétration supérieure que permet ce dernier. Ces deux gaz produisent des conditions énergétiques conduisant à des transferts par pulvérisation (spray arc), généralisés pour les métaux non ferreux surtout. L'addition, directe ou par l'intermédiaire de CO₂, d'oxygène à l'argon abaisse plus ou moins la tension et la puissance de l'arc et agit sur le mode de transfert, qui s'effectue alors par gouttes avec possibilité, par action sur les paramètres électriques, d'en modifier le volume et la fréquence. On peut, à la limite, en diminuant la tension délivrée par le générateur, obtenir un transfert globulaire avec mise en court-circuit de celui-ci. Cette situation est physiquement recherchée, car elle permet de souder des épaisseurs très faibles et d'étendre considérablement le domaine d'application du procédé MAG. On l'appelle soudage à arc court (short arc).

Procédé	Gaz	Applications
MIG	Ar	Tous métaux en principe
	He	Alliages d'aluminium
	Ar + He	Alliages d'aluminium et de nickel
MAG	Ar + 1 à 2 % O ₂	Aciers au carbone avec fils désoxydants
	Ar + 3 à 5 % O ₂	
	Ar + 20 à 30 % CO ₂	
	Ar + 5 % O ₂ + 15 % CO ₂	
	CO ₂	
	CO ₂ + 5 % O ₂	

Tableau. 1 : Protections gazeuses utilisées en soudages MIG et MAG

- Rôle métallurgique

Il s'entend pour les mélanges actifs, c'est-à-dire dans le cas du soudage MAG. L'origine des mélanges actifs vient en grande partie de la recherche d'une protection mieux appropriée que l'argon dans l'application du procédé au soudage des aciers. L'emploi du CO₂ est possible moyennant une adaptation des sources de courant ainsi que des fils d'apport. De telles qualités de fils se sont généralisées et conviennent parfaitement au soudage sous argon additionné d'oxygène, voire de CO₂, avec des effets sur le mode de transfert du métal, en particulier, et sur les caractéristiques de soudures. Dans les applications du procédé aux métaux réfractaires, aux alliages d'aluminium et de magnésium, la protection gazeuse est essentiellement inerte et constituée par de l'argon ou de l'hélium, et le procédé est le MIG.

- Rôle mécanique

Le gaz de protection est apporté au niveau de la torche par une buse annulaire. Il peut l'être dans certains cas par une arrivée latérale. L'arrivée de gaz comporte un effet de souffle qui peut être mis à profit, si besoin. Le débit et la pression du gaz sont les paramètres indépendants, qui sont à déterminer en fonction de la protection qu'il doit assurer. Des débits de 10 à 20 L/min sont couramment utilisés. La consommation et le prix du gaz sont des facteurs économiques importants de l'emploi du procédé.

3- Fusion d'un fil

Les matériaux courants sont fusibles sous gaz avec des taux de fusion variables selon le cas et par suite le procédé s'applique largement dans tous les domaines.

La gamme des intensités et l'emploi de fils de petits diamètres réservent cependant le procédé à une utilisation sur des épaisseurs faibles (quelques millimètres). Il couvre en

pratique toutes les possibilités du soudage à l'électrode enrobée, mais reste limité par rapport au soudage sous flux qu'il complète en bas de gamme

4- Domaines d'applications

Le soudage MIG/MAG est né de l'intérêt d'appliquer au soudage à l'électrode continue, à la place de la poudre minérale, une protection gazeuse. **En fonctionnement manuel**, il offre, par rapport au soudage à l'électrode enrobée, l'option **dite semi-automatique** dans laquelle l'opérateur n'a de rôle que dans le guidage de la torche et n'en a plus aucun dans la fusion de l'électrode. L'emploi de CO₂ en short arc constitue une avancée pratique très importante qui a permis au procédé de s'imposer dans le domaine des épaisseurs minces d'aciers au carbone peu ou faiblement alliés constituant la base de la **chaudronnerie légère, de la petite et moyenne mécano-soudure et de la serrurerie industrielle**. Il s'est développé dans la **construction automobile** sous forme semi-automatique mais surtout automatique à laquelle il est parfaitement adapté. Il offre toutes les possibilités du soudage manuel quant aux positions d'emploi en corniche, au plafond, etc. L'absence de laitier rend le travail plus propre et sans reprise de finition, car la fusion spray arc permet d'obtenir des surfaces de dépôt très lisses. Le soudage MIG est la solution semi-automatique et automatique des assemblages en alliages d'aluminium et en aciers inoxydables dans la chaudronnerie des réservoirs transportés, des silos propres et des conteneurs des industries agro-alimentaires. Malgré les tentatives faites dans la composition des fils et des gaz, très vite limitée en comparaison avec les flux ou les enrobages, les soudures MIG/MAG ne sont pas performantes du point de vue mécanique (manque de compacité) et métallurgique (appauvrissement des liaisons en éléments d'apport) Le procédé n'est donc pas pris en considération dans les cas critiques.

IV- Soudage à l'électrode réfractaire (TIG)

1- Description du procédé

Le soudage à l'électrode réfractaire est communément appelé soudage TIG (Tungsten Inert Gas). Dans les pays anglo-saxons, on le désigne également par GTAW ou Gas Tungsten Arc Welding. On le désigne souvent en France par soudage à l'argon.

Le principe du soudage à l'électrode réfractaire est représenté sur la figure 3.9 sous sa forme manuelle. L'appareillage comporte une source de courant alternatif ou continu, un dispositif d'amorçage, une bouteille de gaz avec détendeur et débitmètre, une torche spécifique du procédé et divers accessoires. Un arc TIG est visible et nécessite une protection.

L'opération s'exécute avec ou sans apport de métal,

- l'opérateur tient la torche d'une main et de l'autre le masque de protection.
- avec apport de métal (fil métallique), l'opérateur tient la torche d'une main, introduit de l'autre le fil d'apport dans le bain de fusion ; dans ce cas il a un casque spécial (figure 3.9). En polarité directe, l'électrode est meulée en pointe côté soudage
 - Elle se forme en boule pour le soudage des alliages d'aluminium en courant alternatif ou en polarité inverse.
 - L'opération se conduit de la façon suivante : l'opérateur place la torche en regard du point de départ en prenant soin de maintenir l'extrémité de l'électrode à quelques millimètres du métal à fondre, valeur approximative de la longueur d'arc. Il actionne ensuite l'interrupteur de torche, ce qui a pour effet d'ouvrir le circuit du gaz, de fermer le contacteur de la source, la tension à vide apparaissant alors entre pièce et électrode, puis de fermer le circuit d'amorçage.
 - Ce circuit a pour rôle de produire entre l'électrode et la pièce une étincelle de faible puissance et de haute fréquence, pendant le temps (très bref) nécessaire à l'établissement du courant de soudage dans le circuit. Le bain fondu se forme et l'opération de soudage peut alors se conduire.
 - Le soudage TIG produit une simple fusion caractérisée par sa largeur et sa pénétration. On réalise un apport de métal en introduisant directement dans le bain un fil de même nature que le métal de base. Ce fil qui fond dès son arrivée n'a aucune liaison avec le circuit de soudage. Il n'est pas une électrode et son taux de dépôt est indépendant de la puissance de l'arc. Ce fait est une des caractéristiques

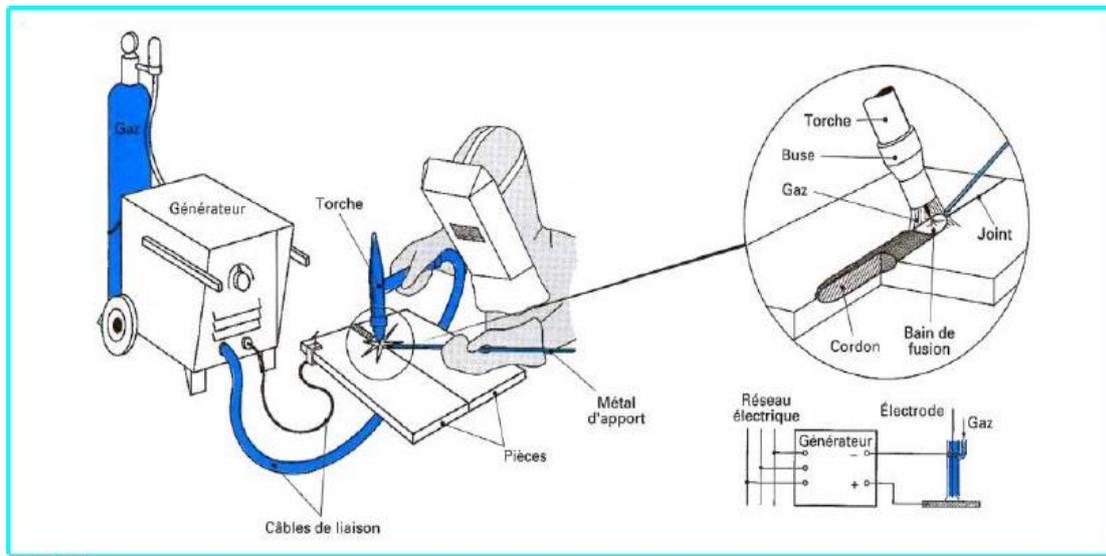


Figure 3.8 – Soudage à l'électrode réfractaire : principe

- importantes du procédé à électrode réfractaire qui le distingue des procédés à électrodes fusibles.
- De même que les procédés à fils fusibles, le procédé TIG peut s'automatiser facilement.
- Le procédé TIG s'applique à tous les métaux soudables.
- Les courants généralement employés vont de quelques ampères à 400 A environ en courant continu (pour le soudage du cuivre, les intensités nécessaires sont de l'ordre de 600 à 800 A). En courant alternatif, la gamme utile est comprise entre 5 et 525 A. Sa puissance limitée à une vingtaine de kilowatts et son apport de métal séparé le réservent à des épaisseurs généralement faibles, de quelques millimètres. Son coût élevé, relativement aux autres procédés et dû essentiellement au coût du gaz de protection, fait qu'on le réserve aux applications requérant qualité et précision.

2- Caractéristiques du couple électrode / protection gazeuse

2.1Électrode

Le tungstène pur ou additionné de thorium (1 à 2 %) et/ou de zirconium (0,5 %), est l'unique matériau susceptible de constituer l'électrode réfractaire du procédé TIG (tableau 2). Compte

tenu des densités de courant admissibles, les électrodes de tungstène ont des diamètres de quelques millimètres.

Les longueurs, de quelques décimètres, sont déterminées par les dimensions des torches. L'addition de thorium fournit à l'électrode une meilleure émissivité, une meilleure densité de courant, une meilleure résistance à la contamination et par suite une plus longue durée d'emploi. Le tableau 2 donne les intensités recommandées selon le diamètre, le type d'électrode et la nature du courant. Ces conditions permettent de maintenir chaque électrode dans le domaine thermique optimal de fonctionnement et d'obtenir une bonne stabilité et un bon amorçage. En service, l'électrode se pollue plus ou moins vite selon les impuretés existant sous forme de traces dans le gaz de protection ou du fait d'une protection défectueuse provenant d'un mauvais réglage du débit de gaz, ou de fuites dans le circuit ou à la torche. Tout contact fortuit de l'électrode avec le métal, pendant le soudage, est également une cause de pollution. La qualité et la pureté de l'électrode sont des éléments essentiels dans l'obtention et le maintien des conditions de soudage. Tout incident en encrassement doit donner lieu à un réaffûtage.



fig.3.9 : Soudage à l'électrode réfractaire dans l'industrie

2.2 Protection gazeuse

Les seuls gaz inertes utilisables du fait de leurs caractéristiques dans le procédé TIG sont l'**argon** et l'**hélium** (tableau 3). On peut également employer un mélange des deux et obtenir un compromis entre leurs effets respectifs, ou les additionner d'un réducteur.

L'argon-soudage et l'hélium-soudage ont une pureté de 99,95 %. L'hélium existant sous forme naturelle aux États-Unis, son emploi s'y trouve généralisé. Ailleurs, ces gaz sont obtenus par distillation et de ce fait l'argon, moins cher, y est préféré.

Diamètre de l'électrode (mm)	Courant continu		Courant alternatif	
	Polarité directe (1) (A)	Polarité inverse (1) (A)	Tungstène pur (A)	Tungstène thorié (A)
0,5	5 à 20	.....	10 à 20	5 à 20
1	15 à 18	.....	20 à 30	20 à 60
1,6	70 à 150	10 à 20	30 à 80	60 à 120
2,4	150 à 250	15 à 30	60 à 130	100 à 180
3,2	250 à 400	25 à 40	100 à 180	160 à 250
4	400 à 500	40 à 55	160 à 240	200 à 320
4,8	.....	.....	190 à 300	290 à 390
6,4	.....	.....	250 à 400	340 à 525

Tableau 2 : Emploi des électrode de tungstène en soudage TIG

La pression de gaz peut avoir un effet sur la pénétration en creusant davantage le bain fondu.

Dans la majorité des applications, les débits de gaz ramenés à la pression atmosphérique sont de l'ordre de 10 à 20 L/min ou 40 à 70 m³/h. Les vitesses de soudage étant généralement de 0,3 m/min, le coût en 1995 de la consommation en gaz est de 1,2 à 2,4 F/m de soudure avec de l'argon et 2,5 à 5 F/m avec de l'hélium.

Par rapport à l'hélium, l'argon a les avantages suivants : arc plus calme, meilleure action décapante du soudage alternatif des alliages d'aluminium, nécessité d'un débit moindre pour une protection identique et amorçage plus facile.

En revanche, l'hélium fournit une puissance plus élevée et donne une meilleure pénétration

2.3 Métal d'apport

Les soudures en chanfrein nécessitent un apport de métal. Celui-ci est introduit directement à l'avant du bain, soit à partir de baguettes nues, en soudage manuel, soit par un dispositif mécanisé semblable à celui du soudage MIG.

Gaz	Qualité du gaz	Applications en soudage
Argon	Inerte	Toutes applications
Hélium	Inerte	Aluminium et cuivre
Argon-hélium (20 %-80 % ou 50 %-50 %)	Inerte	Aluminium et cuivre, avec arc plus stable que cas précédent
Argon-azote (75 %-25 %)	Réducteur	Cuivre essentiellement
Argon-hydrogène (1 %)	Réducteur	Acier inoxydable

Tableau 3 : Emploi des gaz en soudage TIG

3-Domains d'applications

Le soudage par procédé TIG doit se comparer au soudage MIG/ MAG car, bien que différent dans le principe, il développe la même puissance et devrait par suite donner lieu à des résultats comparables. Mais ses avantages et ses inconvénients font qu'il trouve ses applications dans des domaines distincts. Ses avantages technologiques sont essentiellement dus au fait que *l'échauffement et l'arrivée de fil sont indépendants*. Par suite :

- une torche TIG est un chalumeau puissant et précis permettant des fusions sans métal d'apport, impossibles à traiter autrement que par plasma;
- l'apport de métal peut être réglé indépendamment de la puissance de l'arc et de l'énergie dispensée.

L'emploi de gaz onéreux, comme l'argon ou l'hélium, fait que ses applications sont **réservées aux métaux et assemblages nobles** : aciers inoxydables et réfractaires, alliages de nickel, alliages d'aluminium et de magnésium, de titane, de cuivre, etc.

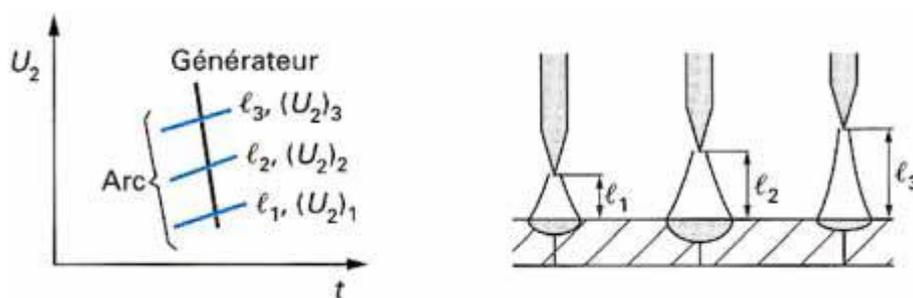


Figure 3.10 – Effet de la longueur d'arc sur la tension

D'exécution lente à des vitesses ne dépassant pas quelques dizaines de centimètres par minute, il autorise, par un excellent dosage thermique, les **travaux de haute qualité** et, par un contrôle facile des paramètres, les travaux **de grande précision**. C'est le procédé de soudage à l'arc de la **construction aéronautique**.

À l'inverse, la productivité est médiocre et n'est pas un facteur qui puisse intervenir.

C. Contrôles non destructifs

En dehors de l'examen visuel ou d'une recherche des défauts à l'aide d'une loupe, nous disposons d'autres méthodes simples et efficaces, comme celle des liquides pénétrants (essai de ressuage) ou le contrôle magnétique (magnétoscopie).

1. Le contrôle par ressuage coloré ou fluorescent :

Le contrôle par ressuage permet de détecter des défauts de compacité, parfois très fins, débouchant en surface et non obstrués (fissures, porosités, tapures, replis, manque de liaison) sur des matériaux métalliques non poreux et non absorbants. Après un nettoyage soigné de la surface à contrôler, le contrôle est réalisé à l'aide de produits (les pénétrants) à très faible tension superficielle qui pénétrant par capillarité dans les défauts débouchant en surface.

Après élimination de l'excès de pénétrant sur la surface des pièces par lavage et séchage, l'apparition visuelle des défauts est réalisée par l'application d'un révélateur en une fine couche de poudre constituée de microscopiques tubes capillaires qui pompent le pénétrant retenu dans les discontinuités des défauts.

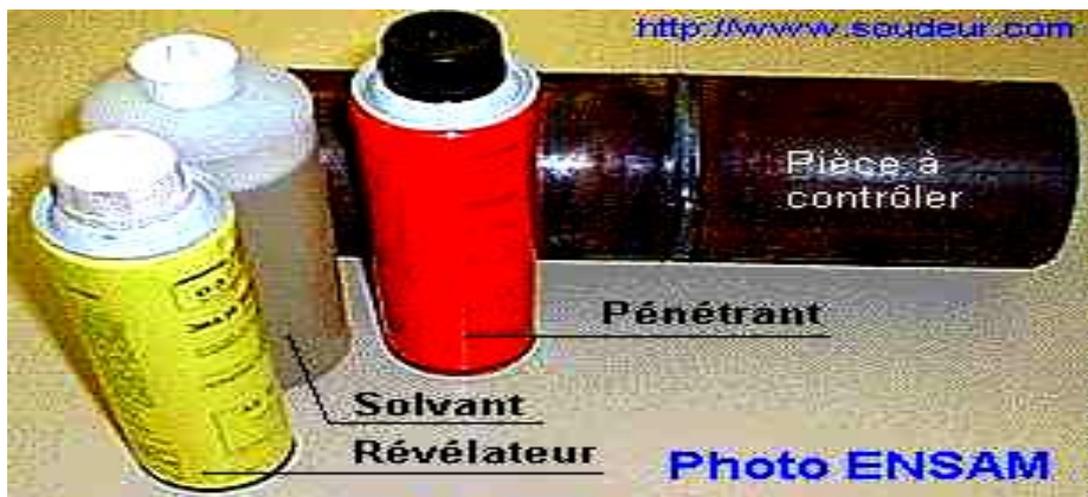
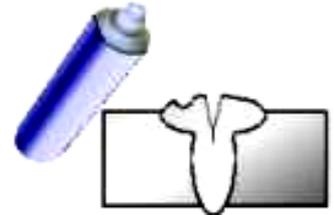


Fig.3.11. les pénétrants utiliser dans l'essai de ressuage

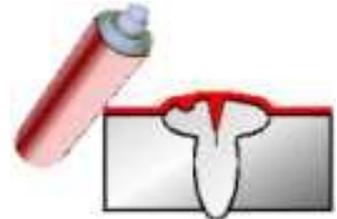
a. Méthode simple de mise en œuvre du contrôle par ressuage :

▪ Nettoyage rigoureux et efficace avec brosse métallique pour éliminer toute trace de rouille ou calamine puis dégraissage soigné avec solvant volatil non chloré de la surface de la pièce à contrôler. Vérification du séchage complet de la pièce à contrôler. La pièce doit avoir une température supérieure à 10° Celsius.

▪ Dégraissage soigné avec solvant volatil non chloré de la surface de la pièce à contrôler



▪ Application par pulvérisation (ou application au pinceau de soie) du liquide pénétrant (pré ou post émulsionné) coloré, fluorescent ou mixte sur toute la surface à examiner.



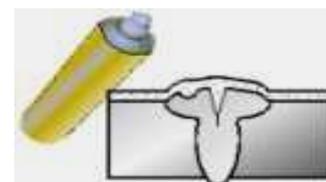
▪ Temps d'imprégnation (de 15 à 40 minutes selon la température et la procédure applicable) du pénétrant par capillarité dans les défauts débouchant.



▪ Élimination de l'excès de pénétrant sur la surface de la pièce à contrôler par rinçage à l'eau sous une pression inférieure à 2 bar ou par solvant spécial imbibé sur un chiffon non pelucheux. Vérification de l'élimination complète de l'excès de pénétrant et vérification du séchage complet de la pièce à contrôler.



▪ Immédiatement après l'élimination de l'excès de pénétrant, application par pulvérisation du révélateur à sec ou en suspension dans un solvant volatil en une couche mince et uniforme. Le révélateur pompe le pénétrant resté dans les discontinuités des défauts débouchant. Des taches colorées apparaissent à l'endroit des défauts.



b. Domaines d'application du contrôle par ressuage :

- Avant soudage : préparation des chanfreins
- Pendant le soudage : contrôle entre passes, gougeage d'une reprise envers.
- Après soudage : défauts débouchant superficiels, étanchéité.

c. Avantages du contrôle par ressuage :

- Facilité de mise en œuvre avec les produits pré émulsionnés.
- Facilité de mise en œuvre sur les chantiers avec les produits pré-émulsionnés.
- Bonne sensibilité de détection des défauts débouchant.
- Contrôle relativement économique et rapide.
- Contrôle complémentaire aux autres techniques de contrôles.

2. Le contrôle non destructif des défauts par magnétoscopie :

• **Principe :**

Le contrôle magnétoscopique permet de détecter des défauts débouchant (obstrués ou non) et sous-jacents (de 1 à 2 mm environ) sous la surface des matériaux métalliques ferromagnétiques (les aciers inoxydables, les alliages de cuivre et les alliages d'aluminium sont exclus de cette application). Un champ magnétique important ($> 2400 \text{ A / m}$) traverse la pièce à contrôler jusqu'à saturation magnétique avec l'application simultanée en surface d'une liqueur magnétique colorée ou fluorescente constituée de traceurs comme produit indicateur.

En présence d'un défaut plan ou volumique, les lignes de force du champ sont déviées et accumulent la poudre magnétique au droit du défaut pour le rendre visible à l'œil nu. La perpendicularité du défaut par rapport aux lignes du champ magnétique accentue la sensibilité de détection du contrôle.



Fig.3.12 : les lignes de flux

• Différentes méthodes d'aimantation

1. Par circuit magnétique fermé :

Un électro-aimant fixe ou portatif à pièces polaires fixes ou articulées est utilisé au contact de la pièce à contrôler. L'aimantation est longitudinale et l'induction B est parallèle à l'axe Nord-sud des pôles et à la direction de l'examen. Des défauts transversaux sont détectés.

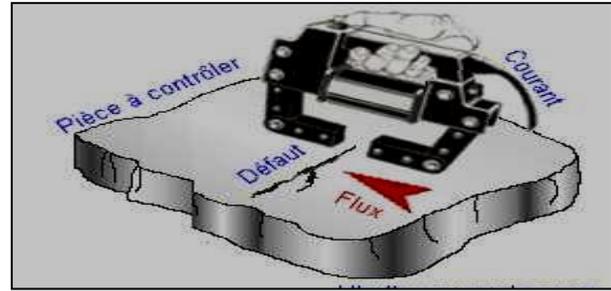
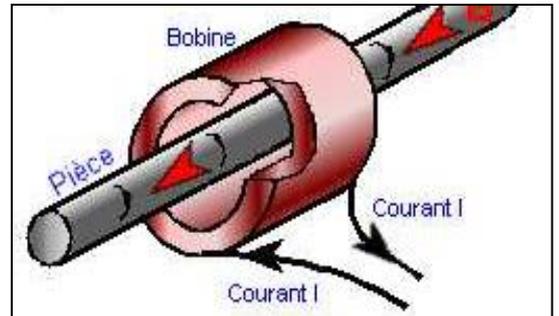


Fig.3.13 : contrôle magnétoscopie par Circuit ferme.

2. Par circuit magnétique ouvert :

Une bobine fixe ou mobile est utilisée. La pièce à contrôler est placée au centre de cette bobine et forme le noyau. L'aimantation est longitudinale et l'induction B est parallèle à la direction de l'examen. Des défauts transversaux sont détectés.



Un solénoïde est utilisé et traversé par un courant électrique. La pièce à contrôler est placée à l'intérieur du solénoïde et elle constitue le noyau. L'aimantation est longitudinale et l'induction B est parallèle à la direction de l'examen. Des défauts transversaux sont détectés.

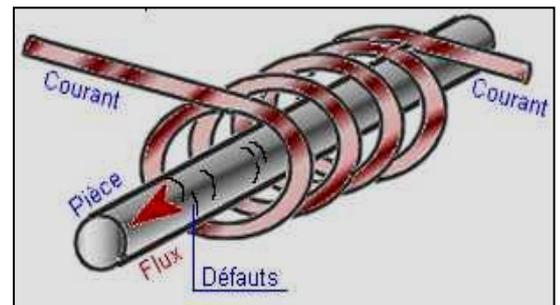


Fig.3.14 : contrôle magnétoscopie par circuit ouvert

- **Mode d'examen :**

Le contrôle par magnétoscopie est réalisé :

- soit en lumière blanche (500 lux minimum à la surface de la pièce) en utilisant des traceurs colorés et des fonds blancs contrastants (en bombe aérosol).
- soit en lumière ultraviolette avec lampe de Wood (100 à 150 Watts) en utilisant des traceurs fluorescents (l'intensité lumineuse U.V. doit être supérieure à 8 W/ m²).

- **Avantages du contrôle par magnétoscopie :**

- Méthode de mise en œuvre plus rapide que le contrôle par ressuage
- Facilité de détection des défauts débouchant et sous-jacents (à 2 mm maxi).
- Les défauts peuvent être matés ou obstrués.
- Rapidité relative d'obtention des résultats.
- Bonne sensibilité de détection des défauts perpendiculaires au champ.

- **Inconvénients du contrôle par magnétoscopie :**

- Méthode de contrôle exclusivement réservée aux matériaux ferromagnétiques.
- Impossibilité de détecter des défauts en profondeur (> 2 mm de profondeur).
- Les opérateurs doivent être formés et expérimentés
- Risque d'interprétation d'images fallacieuses (sur filetage de vis par exemple)
- Risque électrique par passage direct de courant.
- Risque de micro fissuration sur certains aciers sensibles.
- Démagnétisation obligatoire après contrôle.
- Limitation du contrôle pour les grandes dimensions de pièces.
- Méthode de contrôle très salissante pour les opérateurs (produit pétrolier à base d'huile légère)

Chapitre 5 : Etude comparative par application de la méthode du Break EVEN

1. Introduction

Le but d'un forage est d'atteindre un objectif avec un prix de revient le plus bas possible.

Pour ce but, il faut choisir l'outil le mieux adapté au type de la formation à forer afin d'aboutir à une vitesse maximale d'avancement de l'outil. Ceci est conditionné par une bonne architecture du puits pour éviter les différents problèmes au cours de la remontée de la garniture et la descente du tubage.

Le prix de revient déterminé pour l'outil PDC est inférieur aux prix obtenus par l'outil tricône dans les phases dures et mi-dures, mais le problème est l'apparition de vibrations qui influent sur l'avancement et causent ainsi l'usure des dents de l'outil par cassure.

Une mauvaise architecture du puits peut poser aussi le problème de coincement. Les vibrations des outils PDC sont dues à leur mode de fonctionnement. Le degré de vibration est fonction de l'enfoncement des dents dans la formation. Si l'enfoncement est petit la vibration est moindre et si l'enfoncement est grand la vibration est grande. Donc la vibration limite la vitesse d'avancement de l'outil et engendre un prix du mètre foré plus élevé. Une bonne précision de l'utilisation de l'outil peut aider dans ce sens.

Le coût total de l'opération de forage lorsque l'outil au fond est en train de détruire la roche, représente environ 30 % du coût global du puits. Il est donc important d'optimiser le moyen utilisé pour détruire la roche. Ceci est lié directement au choix de l'outil le mieux adapté aux formations à forer, sans occulter le volet économique dans un tel choix. Notre étude s'inscrit dans cette optique.

2. Méthode De Break EVEN

La BREAK EVEN est une méthode qui permet d'évaluer la rentabilité d'un ou plusieurs outils par rapport à un ou plusieurs outils dont les performances sont connues.

Elle est particulièrement intéressante sur site en cours de forage où L'on peut avoir une idée instantanée de la rentabilité de l'outil qui fore.

2.1. - Démarche du calcul pour tracer la courbe de rentabilité

Le prix de mètre foré est données par :

$$P_m = \frac{P_0 + P_h \times (T_m + T_f)}{M}$$

- P_m : est le prix de mètre foré.
- P_0 : est le prix de l'outil.
- P_h : est le prix de l'heure de l'appareil de forage.
- T_m : est le temps de manœuvre nécessaire pour descendre et remonter l'outil.
- T_f : est le temps de rotation de l'outil pour effectuer le métrage M.

- Calcul de l'abscisse et de l'ordonné des courbes de break even :

On sait pour comparer deux outils A et B que :

A : étant l'outil de référence

B : étant l'outil dont l'on veut comparer la rentabilité.

Pour que l'outil B soit rentable, il faut que son prix de revient du mètre foré soit inférieur ou égal à celui de l'outil de référence soit :

$$P_{mA} = \frac{P_{0A} + P_h \times (T_{mA} + T_{fA})}{M_A}$$

$$P_{mB} = \frac{P_{0B} + P_h \times (T_{mB} + T_{fB})}{M_B}$$

$$P_{mA} = P_{mB} = \frac{P_{0B} + P_h \times (T_{mB} + T_{fB})}{M_B}$$

On remplace P_{mB} par P_{mA} :

$$P_{mA} = \frac{P_{0B} + P_h \times (T_{mB} + T_{fB})}{M_B}$$

On tire M_B de l'équation :

$$M_B = \frac{P_{0B} + P_h \times (T_{mB} + T_{fB})}{P_{mA}}$$

$$M_B = \frac{P_h}{P_{mA}} T_{fB} + \frac{P_{0B} + P_h \times T_{mB}}{P_{mA}}$$

C'est une équation de forme $y=ax+b$, que représente une droite qui ne passe par l'origine tel que $y = MB$ pour $x=0$ (fig.5.1)

$$a = \frac{P_h}{P_{mA}} \quad x = T_{fB}$$

$$b = \frac{P_{OB} + P_h \times T_{mB}}{P_{mA}}$$

On cherche l'abscisse et l'ordonnée de cette droite :

A- l'abscisse :

Si $y = 0 \implies x = -b/a$ d'où $x = -T_{mB} - P_{OB}/P_h$ (heures)

T_{mB} : temps de manœuvre de nouvel outil

P_{OB} : prix de nouvel outil

P_h : prix de location de l'appareil

B- l'ordonnée :

Si $x=0 \implies y = b$

$$y = \frac{P_{OB} + P_h \times T_{mB}}{P_{mA}}$$

T_{mB} : temps de manœuvre de nouvel outil

P_{OB} : prix de nouvel outil

P_h : prix de location de l'appareil

P_{mA} : prix de mètre foré de l'outil de référence

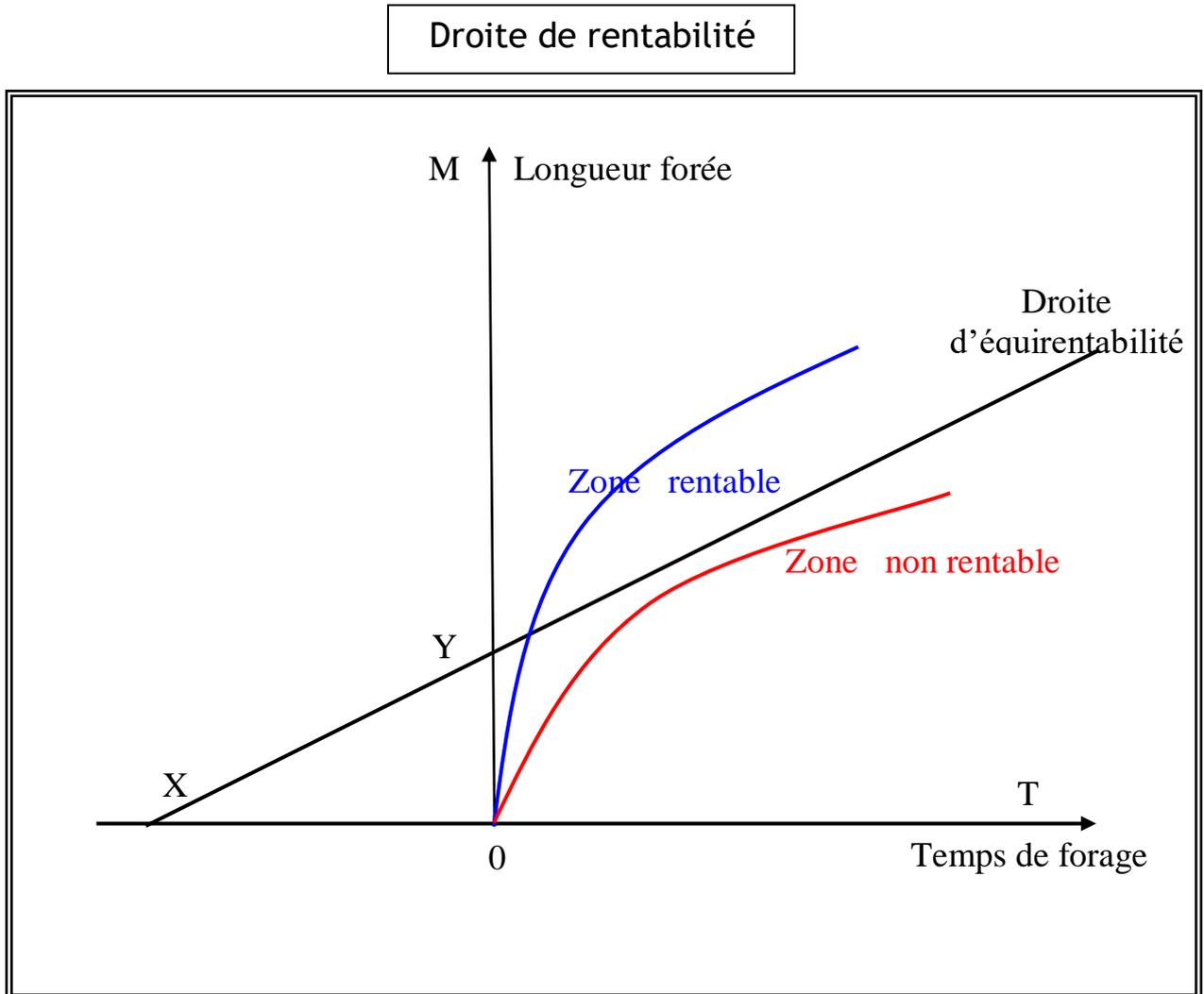


Fig.5.1 : Diagramme de rentabilité de l'outil de forage

3. Calcul de rentabilité dans la zone OMG (HMD)

Les données de ces tableaux servent à calculer la rentabilité dans la zone OMG :

➤ Puits OMG-323 (Outil R813DGX) VAREL:

<i>Formation</i>	<i>METRAGE</i>	<i>TORQ (lb.ft)</i>	<i>WOB (t)</i>	<i>ROP (m/h)</i>	<i>RPM (tr/min)</i>
Lias Dolo .L.D.1	80,0	2800-11500	13-19	6,73	120-135
Lias Salifère .L.S.1	76,0	3500-6500	15-20	9,57	120-150
Horizon "B" .L.D.2	52,0	4520-9600	17-19	6,88	130-155
Lias Salifère .L.S.2	64,0	4000-8900	15-18	22,30	135-160
Lias Argileux L.D.3	34,0	3560-9800	18-20	10,46	140-155
Trias Salifère .S.1	42,0	500-900	19-21	5,07	150-155
Trias Salifère .S.2	179,0	4500-9960	14-18	14,55	150-160
Trias Salifère .S.3	203,0	2500-8800	17-19	25,57	145-160
Trias Argileux .G10	62,0	2400-9200	14-19	19,87	150-160
Trias Argileux .G20	18,0	3100-4510	15-20	14,75	155-158
Trias Argileux .G30	5,0	3530-8420	15-18	7,35	160

Tableau 1 : Paramètre de forage dans la zone OMG-323

➤ Puits OMG-402 (SGL1789/4) ALDIM :

<i>Formation</i>	<i>METRAGE</i>	<i>TORQ (lb/ft)</i>	<i>WOB (t)</i>	<i>ROP (m/h)</i>	<i>RPM (tr/min)</i>
Dogger lagunaire	114	4950-14093	11-20	6.05	78-139
Lias Dolomitique .L.D.1	72	8713-12767	17-20	6.46	111-147
Lias Salifère .L.S.1	85	6430-14840	13-21	7.10	93-154
Lias Salifère .L.S.2	52	6370-12230	11-20	5.00	120-140
Lias Salifère .L.S.2	65	5800-15300	7-19	21.67	120-180
Lias Argileux L.D.3	34	7018-10436	10-18	9.63	123-164
Trias Salifère .S.1	57	6600-14000	11-19	3.41	115-148
Trias Salifère .S.2	149	5160-14610	6-20	58.18	116-180
Trias Salifère .S.3	245	5640-12775	6-15	27.28	134-177
Trias Argileux .G10	25	5510-14940	6-16	35.21	133-165
Trias Argileux .G20	33	4670-10250	10-11	3.38	123-147
Trias Argileux .G30	14	4670-10250	10-11	1.65	123-147

Tableau 2 : Paramètre de forage dans la zone OMG-402

3.1. Le Prix du mètre foré

$$P_m = \frac{P_0 + P_h \times (T_m + T_f)}{M}$$

- L'outil **SGL1789/4 ALDIM** 12 ‘’1/4 PDC conventionnel dans la zone OMG-402 (HMD).
- L'outil **R813DGX VAREL** 12 ‘’1/4 PDC conventionnel dans la zone OMG-323 (HDM).

Dans cette étude on a pris en considération juste la partie ou le diamètre du puits égal à 12’’1/4 (selon notre étude des outils PDC a 12’’ ¼)

L'outil	P _h (KDA)	P _o (KDA)	T _f (h)	T _m (h)	M(m)	ROP _{moy} (m/h)	P _m (KDA)
SGL1789/4	58.33	4500	111.67	21.33	945	8.46	12.9713
R813DGX	58.33	7452	67.05	25	815	12.16	15.7316

Tableau 3 : Calcul de prix du mètre foré

3.2. Méthode de Break EVEN :

- ✓ L'outil de référence c'est l'outil **R813DGX** noté **A**.
- ✓ L'outil **SGL1789/4** noté **B**

3.3. Application numérique :

$$X = -21.33 - (4500/58.33) = -98.477.$$

$$Y = (4500 + 58.33 \times 21.33) / 15.731 = 365.15.$$

Traçage de la courbe d'avancement d'outil **SGL1789/4** à partir des donner des tableaux :

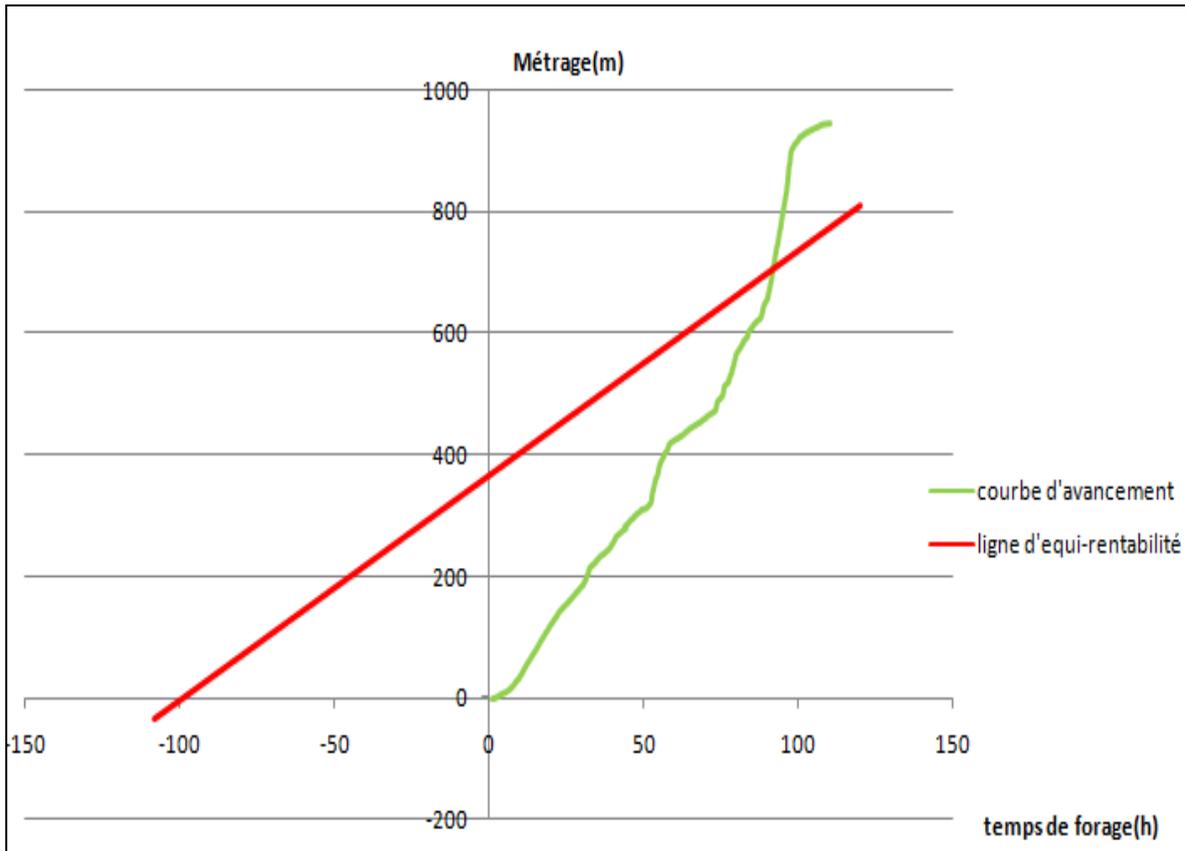


Fig.5.2 : les courbes de Break EVEN

❖ Le tableau de métrage foré :

Analyse et interprétation des résultats :

On trouve que la vitesse d'avancement moyenne de l'outil de **R813DGX** VAREL est plus grande de celle de l'outil **SGL1789/4** de ALDIM par contre le prix de mètre foré de l'outil **SGL1789/4** de ALDIM est plus bas par rapport à l'outil **R813DGX** de VAREL.

Donc si on veut avoir un compromis entre la vitesse d'avancement et le cout de forage, il vaut mieux choisir l'outil **SGL1789/4** d'ALDIM car il peut réaliser le forage de la section 12 ¼ avec le prix du mètre foré le plus bas.

l'outil de **R813DGX** VAREL est plus approprié dans le cas ou le forage est conditionné par le respect du délai de réalisation.

❖ **Les courbes de Break Even :**

Analyse des résultats

On voit que :

- la courbe d'avancement de l'outil **SGL1789/4** de ALDIM est au-dessous de la ligne d'équi-rentabilité quand le temps de forage est compris entre [0(h) – 90(h)] et le métrage compris entre [0 – 698 m].
- La courbe d'avancement de l'outil **SGL1789/4** de ALDIM est au-dessus de la ligne d'équi-rentabilité quand le temps de forage est supérieur à 90(h) et le métrage foré est supérieur à 698 (m).
- Une intersection entre la courbe d'équi-rentabilité et la courbe d'avancement de l'outil l'outil **SGL1789/4** d'ALDIM est constatée quand le temps de forage $T_f = 90$ h et Métrage = 698.17(m).

Interprétations des résultats :

- Dans le cas où la courbe d'avancement est inférieure à la ligne d'équi-rentabilité ($T_f < 90(h)$) on peut dire que l'outil **R813DGX** de VAREL est plus rentable que l'outil **SGL1789/4** d'ALDIM.
- Dans le cas où la courbe d'avancement est supérieure à la ligne d'équi-rentabilité ($T_f > 90(h)$) on peut dire que l'outil **SGL1789/4** d'ALDIM est plus rentable que l'outil **R813DGX** de VAREL.
- Dans le cas d'intersection entre la courbe d'avancement et la ligne d'équi-rentabilité ($T_f=90$) on peut dire que les deux outils ont la même rentabilité.

❖ **Conclusion**

D'après les résultats obtenus on peut conclure que selon le critère du prix du mètre foré, la méthode de break even est très efficace pour choisir l'outil le plus rentable pour la réalisation d'un forage d'une section donnée.

Conclusion

Les outils monoblocs de forme géométrique complexe en PDC (diamant poly cristallin) sont les plus adaptés au forage pétrolier des profils géologiques tendres à mi-durs.

Dans la première partie de cette étude, nous nous sommes intéressés à l'élaboration d'un outil PDC et la procédure que nous allons présenter dans l'industrie au niveau de l'usine d'ALDIM pour fabriquer ce type d'outil est une combinaison des plusieurs opérations : usinage du corps de l'outil en acier, la projection thermique, le rechargement dur sur les lames de l'outil, le brasage ...etc.

On a présenté toutes les étapes de fabrication avec une description sur le 'capitale expérience' de toutes les techniques d'ALDIM appliquée dans la conception, la fabrication et la maintenance des outils PDC (corps en acier).

Dans la deuxième partie nous avons abordé le problème du choix de l'outil pour le forage dans la zone OMG. Choisir l'outil le mieux adapté pour forer une formation donnée s'avère très difficile pour de nombreuses raisons :

- Les paramètres de forage peuvent varier considérablement d'un puits à un autre.
- la technologie et les possibilités offertes par certains types d'outils évoluent très rapidement. Tel type d'outil qui aujourd'hui n'est pas adapté pour tel type de roche peut l'être demain (évolution des modèles et des matériaux).
- Des roches de même connotation peuvent avoir des caractéristiques très différentes; Des termes très utilisés comme les "shales" désignent des roches aussi différentes que argile, schistes, argilites et marnes feuilletées.

La meilleure façon de procéder pour sélectionner l'outil le mieux adapté à une formation ou à une phase de forage est encore d'établir des corrélations entre les outils utilisés, les paramètres appliqués, l'usure des outils et les caractéristiques des roches à forer.

Conclusion générale

La méthode BREAK EVEN a été utilisée avec succès en tant qu'outil d'aide au choix de l'outil le mieux adapté pour le forage d'une formation à la base d'une comparaison entre les performances de deux outils dans la même région selon les critères : couts de forage, le métrage à foré, le temps de forage. Suite aux résultats ont montré d'une part que l'outil d'ALDIM est plus efficace du point de vue cout de forage et d'autre part c'est l'outil de VAREL est mieux adapté pour de meilleurs délais de forage (vitesse d'avancement).

A l'issue de cette étude les recommandations suivantes sont formulées :

- Faire des efforts supplémentaire afin d'améliorer la vitesse d'avancement de l'outil.
- Création d un laboratoire d'essai au niveau de l'usine
- Travailler avec un partenaire étranger pour avoir un transfert technologique

Bibliographie

1. Amadou-Abdoulaye BA, Contribution à la surveillance d'un processus de forage pétrolier, thèse de doctorat, 2010, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris France.
2. Cours de forage - Paramètres et contrôle du forage -
 - A .CHOQUIN Publication IFP Edition Octobre 1975
3. Document de Dr : S.MENAD Procédés de Soudage 2014.
4. Mr. SATTAR Necereddine et Mr. MAZOUZI Azzeddine, Expertise sur l'usure d'un outil de forage pétrolier à tête d'acier, mémoire de master, 2015, université des sciences et des technologies Houari Boumediene.
5. Les outils de forage ENSPM Formation Industrie
 - Forage –Production -Gisement Edition 1999
6. Formulaire du foreur Editions TECHNIP 1974,1989
7. Document <<SONATRACH>> -Module M1 Formation JDF
 - A.SLIMANI
8. Les outils de forage ENSPM Formation Industrie, IFP training, 2006
9. Society of petroleum Engineer (SPE) web site : www.spe.org
10. <http://www.souduer.com>
11. <http://fr.wikipedia.org>

Bibliographie
