Généralité sur l'appareil de forage

Chapitre I : Généralité sur l'appareil de forage

I .1. Introduction

Le Choix d'un appareil adapté aux besoins de capacité et de puissance requise par le programme de forage constitue un préalable à toute opération de forage, un appareil sous-dimensionné entraîne un surcoût en termes de location journaliers, tandis qu'un appareil sous-dimensionné reste loin de satisfaire les besoins en termes de puissance adaptés pour une gamme très large de profondeur.

Aussi la classification d'un appareil de forage doit se faire en fonction de la profondeur forée. Un calcul de puissance, de résistance et de poids de garniture et de tubage doit se faire pour chaque programme de forage, il s'agit alors de définir en fonction des valeurs calculées les capacités et les puissances requises des principaux équipements en tenant compte des coefficients de sécurité et des marges de traction préalablement choisis.

L'appareil de forage est constitué d'un ensemble regroupant trois fonctions principales:

- La fonction de levage.
- La fonction de rotation.
- La fonction de pompage et de circulation.

Il y a aussi des fonctions auxiliaires qui peuvent définir comme suit:

- L'installation des traitements mécanique de la boue.
- La production d'énergie primaire (groupe de force).
- Les magasins, ateliers et les bureaux.

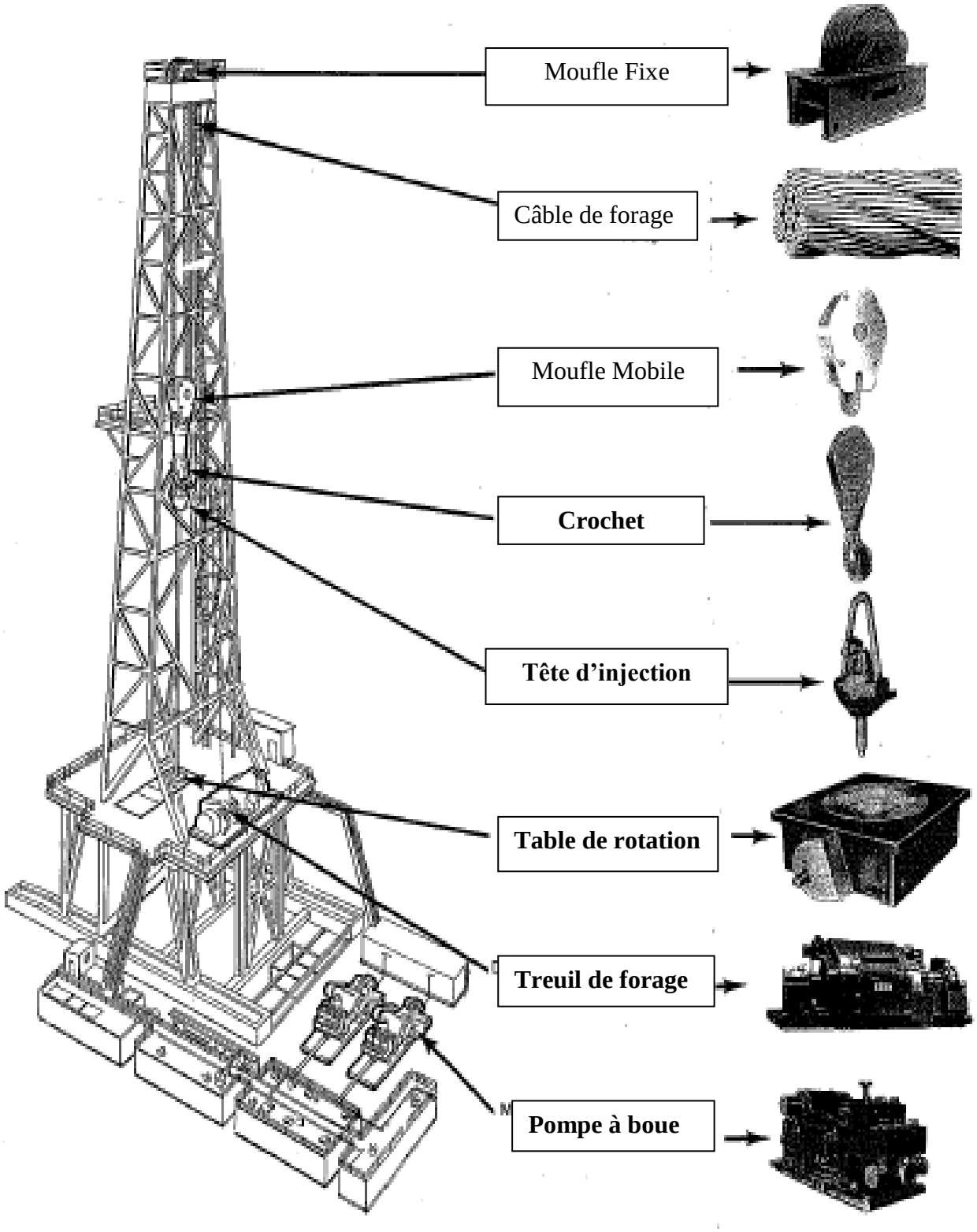

Figure I.1 Description d'un appareil de forage (source National Oil Well) [2]

I .2. Classification des appareils de forage

La classification des appareils de forage se fait en première approche par la capacité de profondeur de forage maximale (figure I.2).

Les appareils de forage peuvent être classés (pour des tiges de 4) comme suit :

- Appareil léger……1500- 2000m
- Appareil moyen……. 3500m
- Appareil lourd……..... 6000m
- Appareil ultra lourd……... 8000-10000m

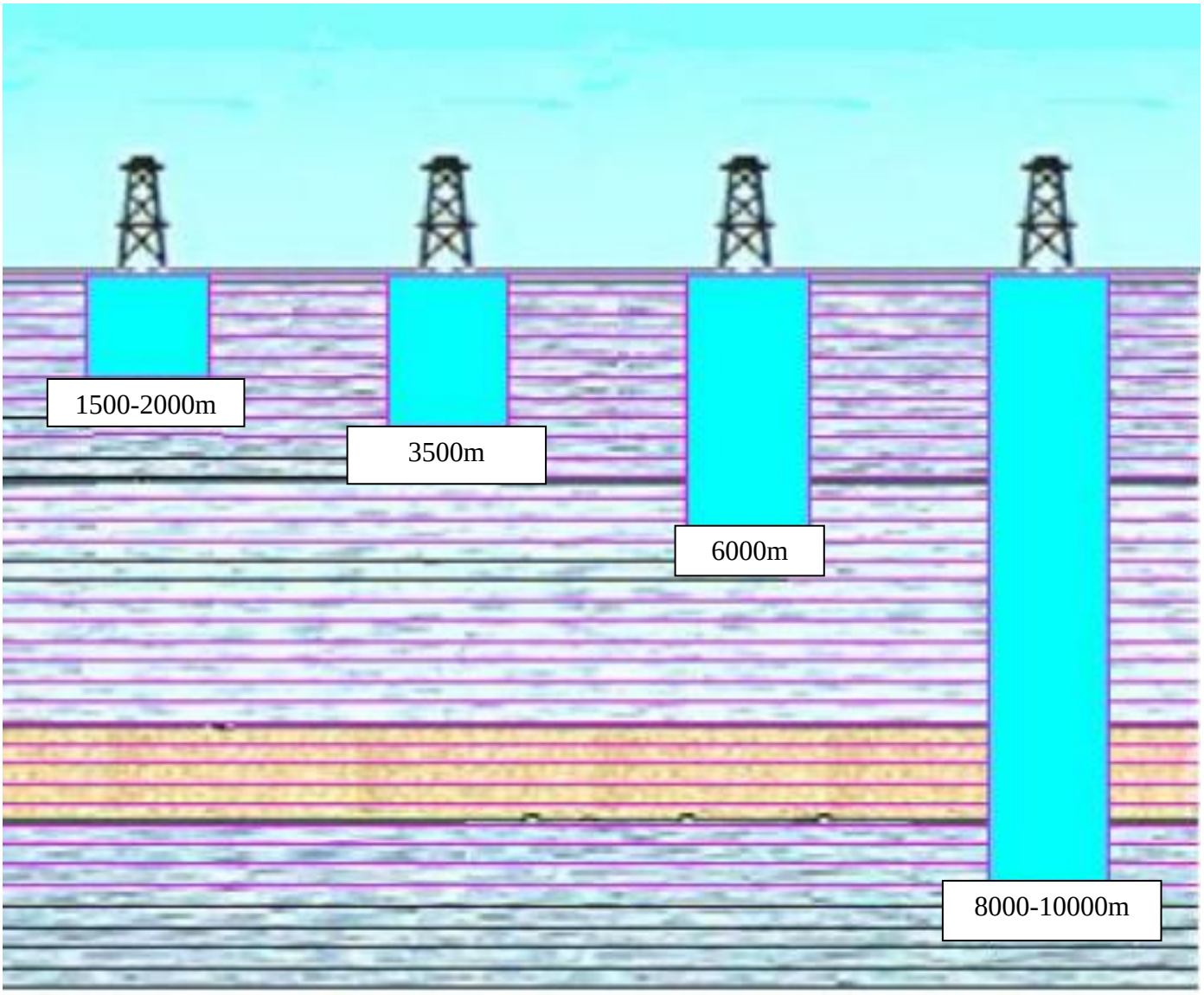

Figure I .2 Classification des appareils de forage

Ces performances de profondeur se traduisent par un poids au crochet de levage compte tenu des poids des garnitures et des casings. En prenant en compte les temps de manœuvre, on peut évaluer la puissance maximale que devra développer par le treuil de forage (Draw works).

La puissance du treuil est donc une caractéristique primordiale pour déterminer un appareil de forage (10 HP de puissance au treuil pour chaque 100 pied de forage), pour les catégories d'appareils cités précédemment, on peut les classer selon la puissance de levage (tableau 1).

Léger	Moyen	Lourd	Ultralourd
650 HP	1300 HP	2000 HP	3000 HP

Tableau I .1 Classification des appareils de forage par apport à la capacité

Les autres fonctions (pompage, rotation) sont dimensionnées par rapport au programme de forage et tubage classique d'un puits à la profondeur désignée**. [3]**

I .3. FONCTION DE LEVAGE

La fonction levage doit assurer la manœuvre de la garniture de forage jusqu'à la profondeur limite d'utilisation de la machine dans des bonnes conditions techniques et économiques.

I .3.1. Mât de forage

Il est composé de deux montants reliés par des entretoises et des croisillons qui reposent sur une substructure. Ils permettent de réaliser les mêmes fonctions que les tours. Leur avantage est le gain de temps qu'ils apportent lors du montage et démontage.

Une plate-forme installée au sommet, comportant des traverses de forte capacité, supporte le moufle fixe .Une passerelle d'accrochage est installée à une hauteur de 26 mètres environ du plancher pour permettre l'accrochage des longueurs de tiges. La longueur maximale d'une longueur de tiges à stocker dans le mât ne doit pas dépasser 30 mètres, si non les tiges risquent de se déformer de façon permanente.

A environ 9 mètres du plancher est montée une passerelle de tubages qui permet le guidage de ces derniers lors de leur vissage. La hauteur de cette passerelle est ajustable entre

6 et 12 mètres à l'aide d'un treuil à air.

Les tiges et tubages sont préparés sur des traîtresses situées de part et d'autre d'un plan horizontal appelé (walk-way). Ces tiges et tubages sont roulés sur ces traîneaux jusqu'à atteindre le (walk-way), puis ils sont remontés sur le plancher à l'aide du treuil à air.

I .3.1.1. Caractéristiques du mât

a) **Hauteur :** Mesurée entre le plancher et le bas de la passerelle du moufle fixe.
b) **Capacité API :** c'est la capacité maximale au crochet, pour un mouflage donné, en

Absence de gerbage et du vent.

La relation entre la capacité API et celle au crochet est donnée par la formule suivante:

$$\mathbf{C}mat = (f + Po + Mt) \times S \quad \text{..... (I .1)}$$

Avec :

F : Charge maximale ;

P0 : Poids du moufle et accessoire ;

Mt : Marge de sécurité ;

S : Coefficient de sécurité.

La capacité réduite au crochet, elle tient compte du gerbage et du vent et s'exprime en pourcentage de la capacité API.

L'effort sous lequel s'effondrerait le mât est égal au double de sa capacité maximale au crochet.

Le calcul du croisillonnement tient compte de la vitesse du vent et de la composante horizontale de la garniture de forage stockée dans le gerbier.

I .3.1.2. Différents types de mât

Selon la capacité de charge et le constructeur, on distingue :

- Les mâts libres
- Les mâts haubanés

A) Mâts libres

Les différents types de mâts libres sont :

A-1) Type Lee C. Moore

Ces mâts comportent une chèvre pour le levage et participe à la résistance de l'ensemble. Ils sont constitués de 2 poutres réunies par des traverses sur la face arrière, la face avant reste ouverte. (Figure I.3)

L'extrémité inférieure des poutres est montée sur un axe, situé sur la substructure, autour duquel elles peuvent pivoter.

La partie inférieure arrière des poutres est clavetée et repose sur la chèvre.

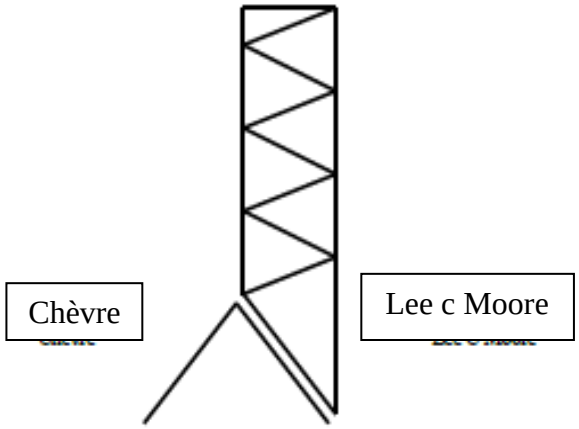

Figure I.3 Type Lee C. Moore

A -2) Type EMSCO

Ces mâts comportent une chèvre utilisée pour le levage mais elle ne participe pas à la résistance de l'ensemble. Ils sont constitués de 2 poutres réunies par des traverses sur la face arrière et parfois sur la face avant pour les mâts de grande capacité (Figure I.4). Le pied arrière de la poutre est monté sur un axe duquel elle peut pivoter.

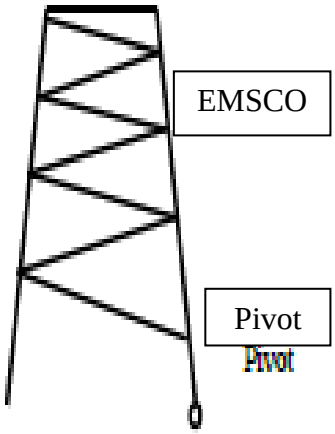

Figure I.4 Type EMSCO

A -3) Type IDECO

Ces mâts comportent des jambes de force qui participent à la résistance de l'ensemble.

Ils sont constitués de deux poutres métalliques qui reposent sur des axes autour desquels elles peuvent pivoté (Figure I.5).

DECO

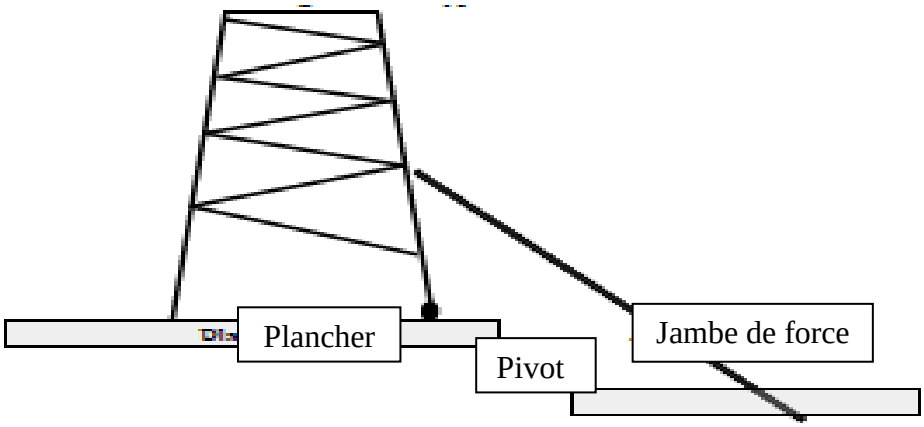

Figure I.5 Type IDECO

Le mât est maintenu verticale par les jambes de force (longueur 12m). Les points d'appui sont:

- Sur le mât, à une dizaine de mètres du plancher ;
- Des axes placés à l'avant de la substructure à un niveau plus bas que plancher.

B) Mâts haubanés

Les mâts haubanés sont utilisés pour les forages de faible et moyenne profondeur.

Ils ne se démontent pas, mais se rabattent sur des camions ou des remorques.

On distingue :

B.1) Les mâts télescopiques

Constitués de deux poutres minces en treillis ou tubulaires.

B.2) Les mâts non télescopiques

Ces mâts sont haubanés pour résister aux vents, les haubans au nombre de 8 ou 12 sont inclinés de 45° et sont placés dans les plans diagonaux du mât, Ils sont reliés au mât par des goussets et au sol à des points fixes situés à une distance du puits égale à la hauteur du mât. Leur tension est de l'ordre de 0.5 à 1 tonne. Les tensions des haubans opposés doivent être identiques.

I .3.2. Substructures

Le mât repose sur une substructure afin de disposer sous le plancher de travail d'une hauteur suffisante des obturateurs. La substructure est constituée de deux poutres horizontales en treillis de fers en (I) soudés placées suivant le sens de la longueur et réunies par des traverses assemblées par des broches goupillées.

En plus du mât, la substructure supporte la table de rotation, le treuil et la garniture de forage. Pendant la descente de tubage, elle supporte le poids du tubage posé sur la table et celui de la garniture de forage stockée dans le gerbier. Pour la substructure, le constructeur donne la capacité de stockage des gerbiers en fonction de la vitesse du vent et la capacité de l'assise de la table de rotation**. [4]**

I .3.3. Mouflage

Le mouflage est un moyen de démultiplication des efforts afin de soulever de lourdes charges. Le mouflage comprend un câble, moufle fixe, moufle mobile, réa et le treuil de forage.

Le nombre de brins du mouflage peut varier de 4 à 14. Le brin actif est la partie du câble comprise entre le tambour du treuil et le moufle fixe, Le brin mort est la portion de câble sortant du moufle fixe et allant directement au point fixe (réa), c'est sur ce brin mort que sont effectuées les mesures de tension du câble qui permettent de connaître le poids suspendu au crochet.

Le mouflage permet de :

- démultiplier l'effort de traction exercé sur le brin actif de façon à soulever de lourdes charges.
- répartir sur plusieurs brins de câble les charges considérables soulevées,
- démultiplier la vitesse du moufle mobile.

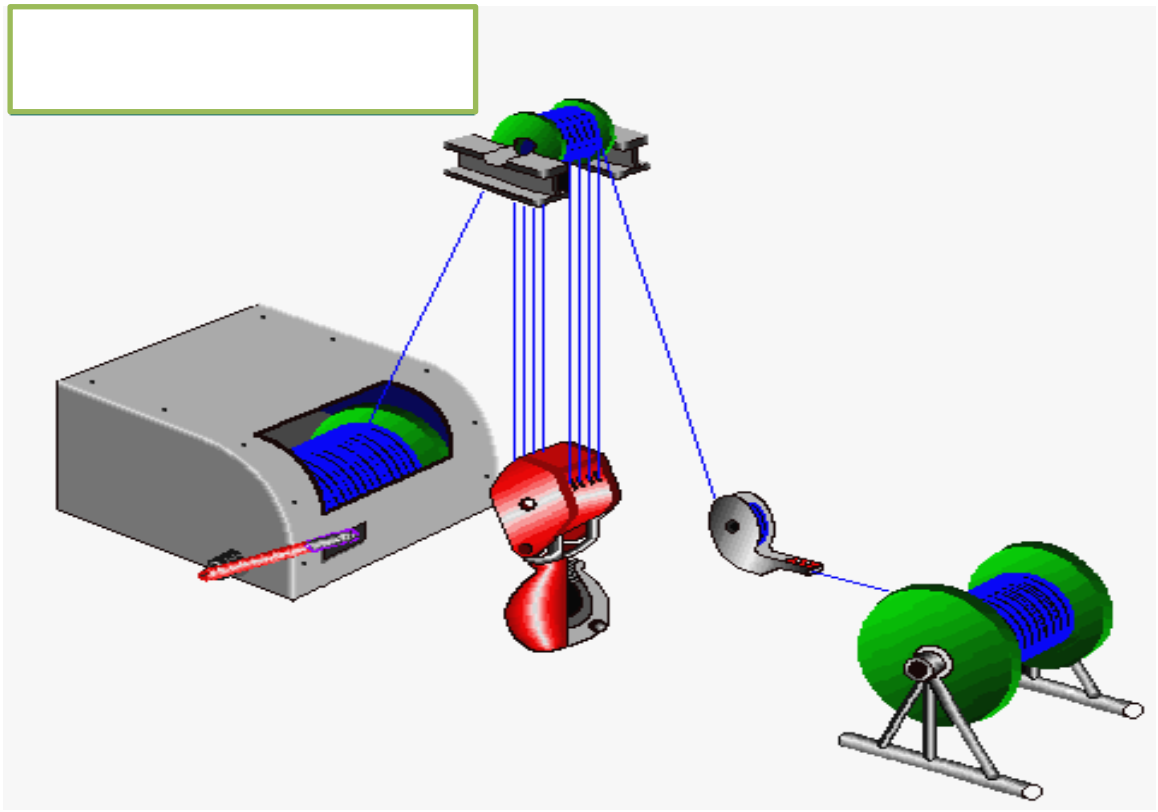

Figure I.6 Equipement de mouflage.

Rendement d'un mouflage

Le rendement d'un mouflage est le rapport entre la puissance qui parvient au moufle mobile (**c P**) et celle fournie par le treuil. Il peut être exprimé aussi en fonction du rendement des poulies **K** et du nombre de brin (**n**) par la formule suivante :

$$\eta m = \frac{k^n - 1}{n*(K-1)*k^n} \quad \text{..... (I.2)}$$

I .3.4. Moufle fixe

Le moufle fixe a des poulies alignées sur le même axe. Cet axe est supporté à cette extrémité par deux paliers montés sur des poutrelles fixées au sommet du mât. L'axe du moufle fixe est perforé pour permettre le graissage des différents roulements des poulies.

I .3.5 .Moufle mobile et crochet

Le moufle mobile comporte une poulie de moins que le moufle fixe correspondant. Les poulies sont montées sur le même axe par l'intermédiaire de roulements à rouleaux coniques Cet axe est monté sur des paliers situés sur des flasques, en tôle très épaisse, qui reçoivent à leur partie inférieure le crochet ou l'attache du crochet. L'axe est percé pour permettre le graissage des roulements.

Un carter entoure complètement les poulies, laissant seulement passer les brins du mouflage.

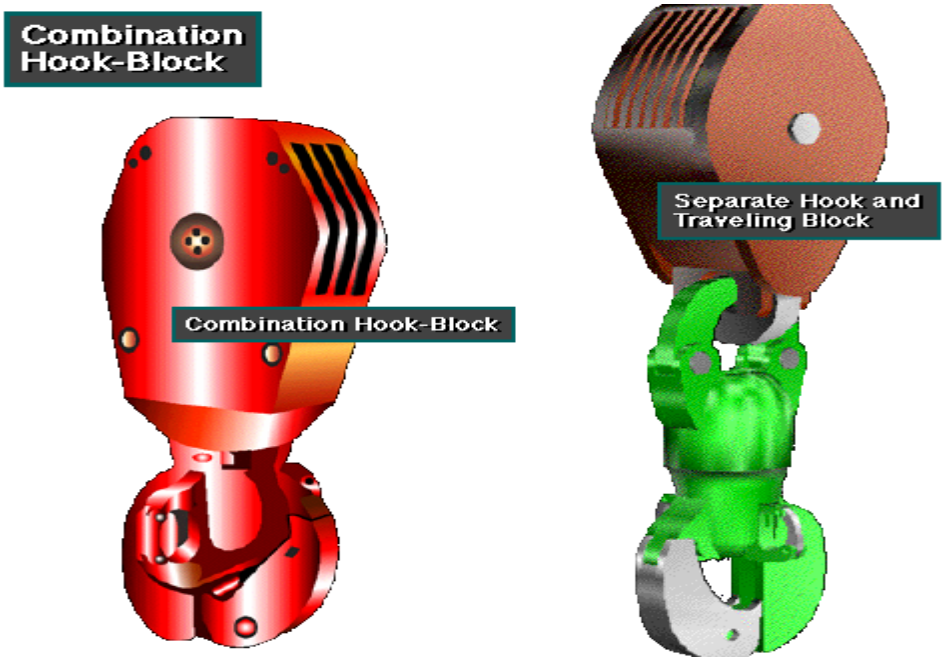

Figure I.7 Moufle mobile et crochet

- **La charge soulevée au crochet**

La charge qui peut être soulevée au crochet peut être calculée :

- ✓ En fonction de l'effort de traction exercé sur le brin actif :

$$P = T_a * n * \eta\, m \text{.....} \quad \textbf{(I .3)}$$

Avec :

P : Poids total au crochet (en tonnes) ;

T_a : Effort de traction sur le brin actif (en tonnes) ;

n : Nombre de brin de mouflage ;

η_m **:** Rendement du mouflage.

- ✓ En fonction de la puissance dépensée au moufle mobile et au crochet :

$$\mathbf{P} = \frac{\mathbf{75 * P\,c}}{\mathbf{1000 * V\,c}} \text{.....} \quad \textbf{(I.4)}$$

Avec :

P : Poids total au crochet (en tonnes) ;

P_c **:** Puissance au crochet (en chevaux) ;

V_c : Vitesse de remontée au crochet (en m/s).

I .3.6 .Treuil de forage

C'est le cœur d'un appareil de forage. Sa capacité caractérise un ring et indique la classe de profondeur des forages que l'on pourra effectuer. Il doit assurer :

- Le levage de la garniture de forage et du tubage.
- Sur certains appareils, il assure l'entraînement de la table de rotation par l'intermédiaire de cardans ou de chaînes de pignons.
- L'entraînement d'un arbre secondaire permettant de dévisser et visser les tiges et les tubages (cabestan) [cathead].
- Le déplacement de lourdes charges à de grandes vitesses.

Un treuil de forage est caractérisé par sa puissance maximale de levage **[3].**

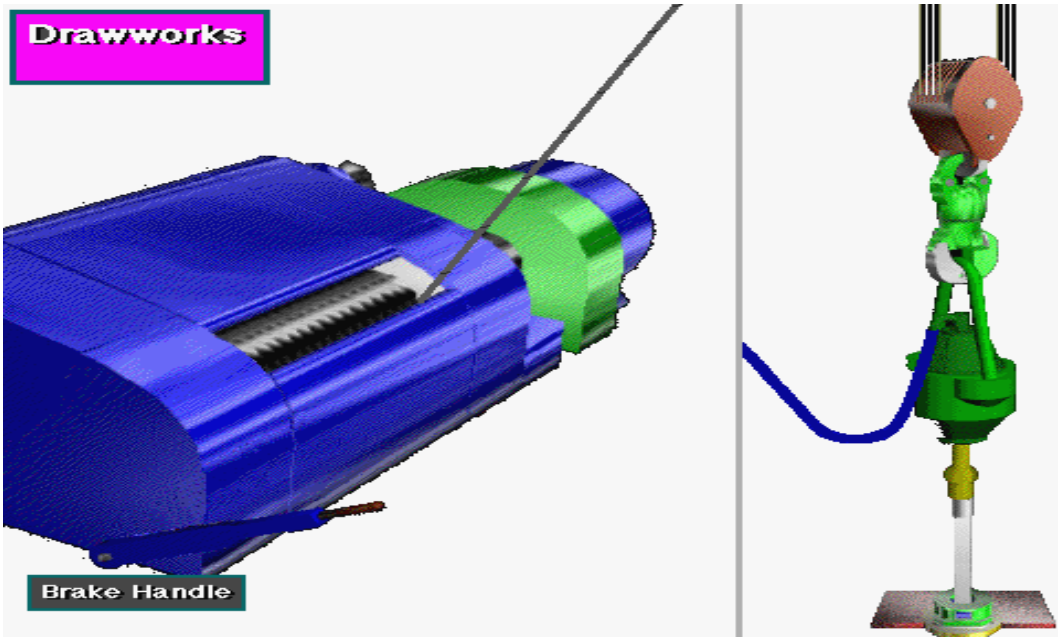

Figure I.8 Treuil de forage

a) Tambour de manœuvre

Le tambour de manœuvre peut être lisse ou cannelé (Figure I.9 à gauche). Les tambours cannelés permettent un enroulement correct, ce qui réduit le risque d'écrasement du câble si la charge est trop importante le diamètre d'un tambour doit être égal au moins à 20 fois le diamètre du câble la longueur minimale du fût d'un tambour ne doit pas permettre au brin actif un angle de déflexion supérieur à 1°30'la (Figure I.9 à droite).

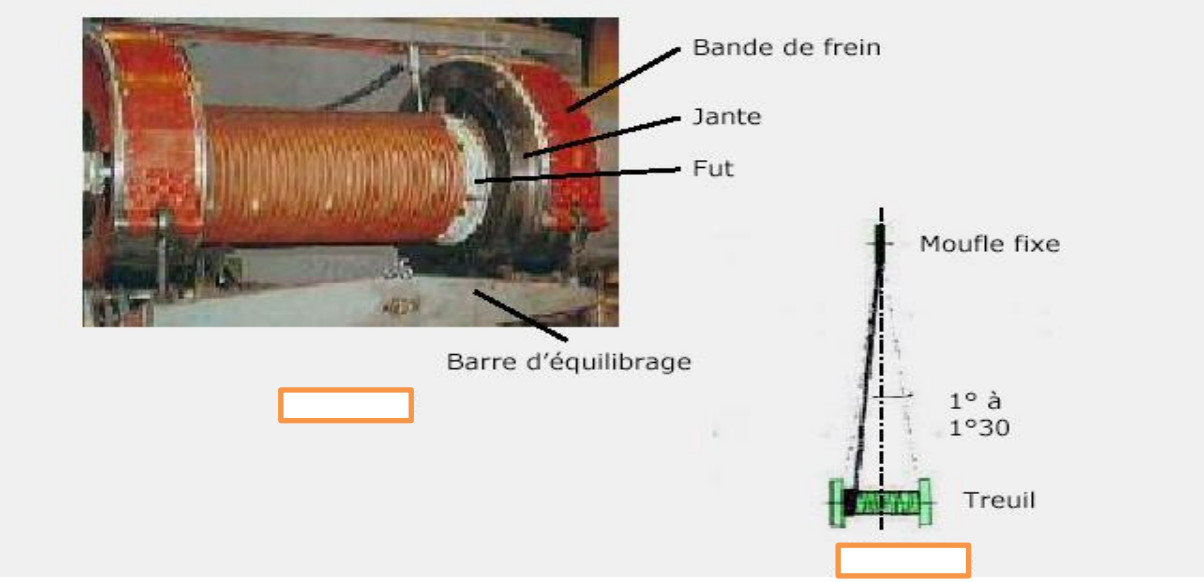

Figure I.9 Tambour

b) Frein mécanique à bandes

Le frein mécanique à bandes monté dans la (figure I.9) contrôle l'avancement de l'outil pendant le forage et stoppe complètement le treuil pendant la descente de la garniture.

Il est constitué de deux bandes métalliques (2) équipées de garnitures intérieures fixées par des boulons en cuivre ou en aluminium à tête noyée.

Ces bandes sont reliées par une barre d'équilibrage qui répartit également la force de freinage entre les deux bandes et réduit ainsi l'usure des patins.

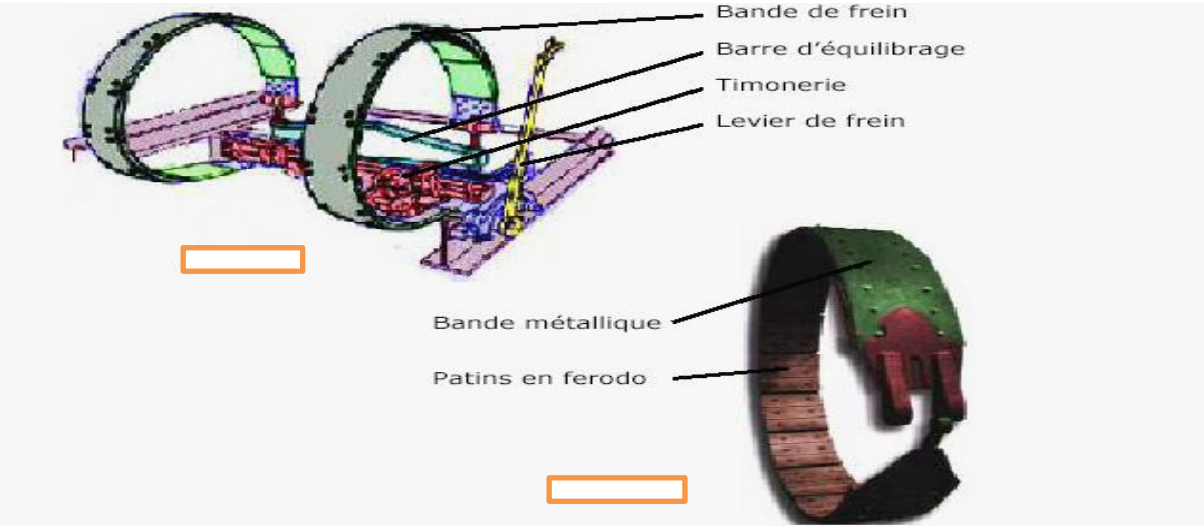

Figure I.10 Les bandes de frein mécanique

c) Freins auxiliaires

Même si le frein mécanique à bandes peut supporter seul le poids de la garniture. Il ne peut le faire en continu, car l'échauffement excessif des garnitures entraînerait un freinage inefficace qui provoquerait une usure rapide des garnitures et même des jantes.

Pour pallier à ces inconvénients, on installe en bout de l'arbre tambour un frein auxiliaire qui absorbe la plus grande partie de l'énergie engendrée par la descente de la garniture.

d) Cabestans

Situés de part et d'autre du tambour de curage, les cabestans servent au blocage, déblocage, vissage et dévissage de la garniture de forage, et à la manutention des charges sur le plancher.

e) Boite à vitesses treuil de forage

Elle peut être indépendante sur certains appareils de grande puissance, mais en général, elle est intégrée au treuil et est constituée de deux arbres dont les paliers de roulement sont fixés sur le châssis même du treuil.

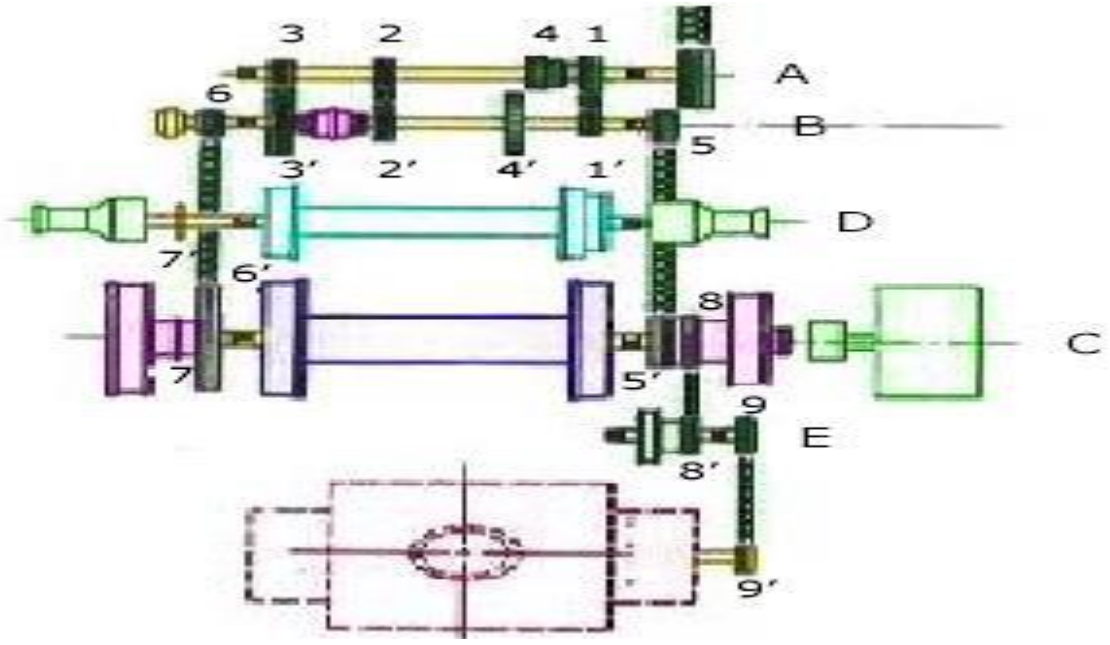

Figure I.11 Boite à vitesse treuil de forage

Principe de fonction de boite vitesses

La boîte à vitesse comprend, comme la plupart des boîtes de vitesse de moyenne et grande puissance :

- Un arbre d'attaque (A) situé à l'arrière du châssis du treuil qui reçoit la puissance des moteurs par l'intermédiaire de pignons à chaîne, d'une chaîne et d'un embrayage principal.

Sur cet arbre sont montés trois pignons à chaîne (1) (2) et (3) et un engrenage (4). La vitesse de l'arbre d'attaque dépend de la vitesse à la sortie du compound et est fonction du rapport du nombre de dents des pignons de la transmission .Un arbre intermédiaire (B) situé entre l'arbre d'attaque et l'arbre tambour portant d'une part trois pignons à chaîne (1') (2') et (3') et un engrenage (4') correspondant aux pignons et engrenage montés sur l'arbre d'attaque, d'autre part deux pignons à chaîne (5) et (6).

Chacun des pignons (1), (2) et (3) de l'arbre d'attaque est relié par chaîne respectivement à l'un des pignons (1'), (2') et (3') de l'arbre intermédiaire. Dans chacun des couples de pignons (1,1'), (2,2') et (3,3') un pignon est claveté sur un arbre, le deuxième est fou sur l'autre arbre, mais peut être embrayé ou débrayé à volonté au moyen d'un embrayage à cannelures à crabot ou à friction.

De même, des deux engrenages (4) et (4') l'un est claveté et l'autre est fou, mais peut être embrayé ou débrayé à volonté avec le premier. Des dispositifs mécaniques ou pneumatiques empêchent l'embrayage simultané de deux vitesses, ce qui risquerait d'endommager gravement la boîte de vitesses. Pour une vitesse donnée de l'arbre d'attaque et par le jeu des transmissions et embrayages entre l'arbre d'attaque et l'arbre intermédiaire, ce dernier pourra tourner à trois vitesses en marche avant et à une vitesse en marche arrière (l'inversion de la rotation de l'arbre intermédiaire étant obtenue par le couple d'engrenages).

Chacun des pignons (5) et (6) de l'arbre intermédiaire est relié par chaîne respectivement à l'un des pignons (5') et (6') de l'arbre tambour (C). Le pignon (6) peut être embrayé ou débrayé au moyen d'un embrayage à cannelures tandis que le pignon (5) est claveté sur l'arbre. Les pignons (5') et (6') peuvent être embrayés ou débrayés alternativement sur l'arbre tambour au moyen d'embrayages pneumatiques. L'arbre tambour pourra donc tourner à six vitesses en marche avant et deux vitesses en marche arrière.

Le pignon (7) claveté sur l'arbre tambour entraîne directement par chaîne le pignon (7') claveté sur l'arbre des cabestans (D) qui pourra ainsi tourner à trois vitesses en marche avant et une vitesse en marche arrière. L'embrayage du pignon (6) permet, pendant le forage, de débrayer l'arbre du cabestan mais, dans ce cas, seules trois vitesses de levage en marche seront possibles sur six. Ce dispositif particulier n'est pas généralisé sur tous les types de treuils.

Le pignon (8) claveté sur l'arbre tambour est relié par chaîne au pignon (8') qui peut être embrayé ou débrayé sur l'arbre intermédiaire de rotation (E) au moyen d'un embrayage pneumatique. Cet arbre intermédiaire peut tourner à trois vitesses en marche avant et une vitesse en marche arrière. Le pignon (9) claveté sur l'arbre intermédiaire de rotation est relié directement par chaîne au pignon (9') d'entraînement de la table de rotation.

En résumé, avec une telle installation, il y aura, pour une vitesse déterminée à la sortie du compound :

- pour le levage : six vitesses en marche avant et deux en marche arrière,
- pour les cabestans et le curage : trois vitesses en marche avant et une en marche arrière,
- pour la rotation : trois vitesses en marche avant et une en marche arrière **[5]**

I .3.7. Câble de forage

- **Constitution :**

Un câble est constitué de plusieurs torons disposés en spirale autour d'une âme. Chaque toron est lui-même constitué de plusieurs fils calibrés également disposés en hélice sur plusieurs couches**. [3]**

I .4. FONCTION DE ROTATION

I .4.1 .Table de rotation

En cours de forage, la table de rotation transmet le mouvement de rotation à la garniture de forage, par l'intermédiaire de fourrures et de la tige d'entraînement, et, en cours de manœuvre, supporte le poids de la garniture de forage, par l'intermédiaire de coins de retenue.

La dimension nominale est caractérisée par le diamètre de passage dans lequel est installé le (master bushing) dont les rôles sont la suspension de la garniture par l'intermédiaire des

cales (slips) et l'entraînement du carré d'entraînement (Kelly drive bushing) en forage. Ces dimensions peuvent être 17″1/2 , 20″1/2 , 27″1/2 , 37″1/2 et 49″1/2 .

La motorisation de la table de rotation se fait par l'intermédiaire d'une roue d'entrée et chaîne soit à partir du treuil, soit, sur les appareils lourds, par moteur électrique indépendant de la transmission du treuil.

Principe de fonctionnement

La table de rotation se compose de 3 parties (figure I.12) :

- le bâti,
- la partie tournante,
- l'arbre d'entraînement.

Le corps repose sur la substructure à laquelle il est solidement fixé. La partie tournante repose sur le bâti par l'intermédiaire d'un roulement à billes ou à rouleaux qui assure en même temps sa rotation.

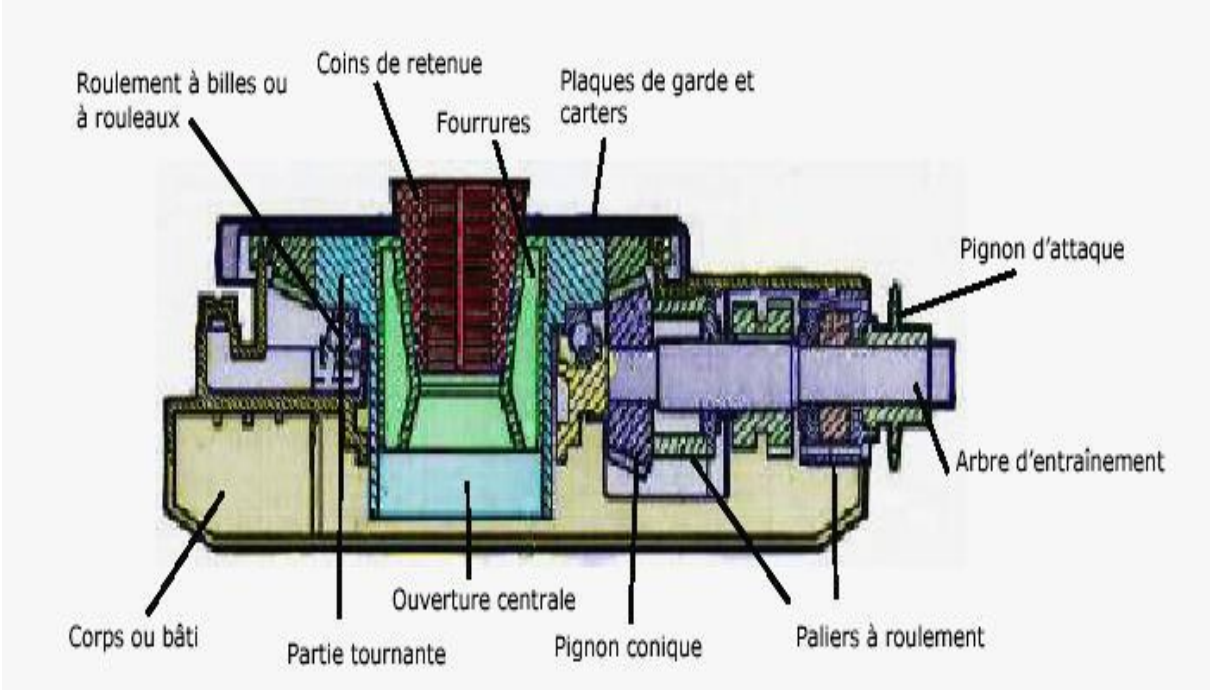

Figure I.12 Table de rotation

I .4.2. Top drive

Le top drive est une tête d'injection motorisée qui, en plus de l'injection, assure la rotation de la garniture de forage.

Ainsi, on n'a besoin ni de la tige d'entraînement ni de la table de rotation pour faire tourner la garniture, c'est le top drive qui s'en charge. En plus, pendant le forage, au lieu de faire les ajouts simples par simple, on peut les faire longueur par longueur.

Plusieurs autres options existent dans cet équipement : les bras de l'élévateur sont articulés hydrauliquement pour faciliter le travail de l'accrocheur et il possède une clé automatique et même une coulisse intégrées.

Des rails placés tout le long du mât le guident dans ses déplacements.

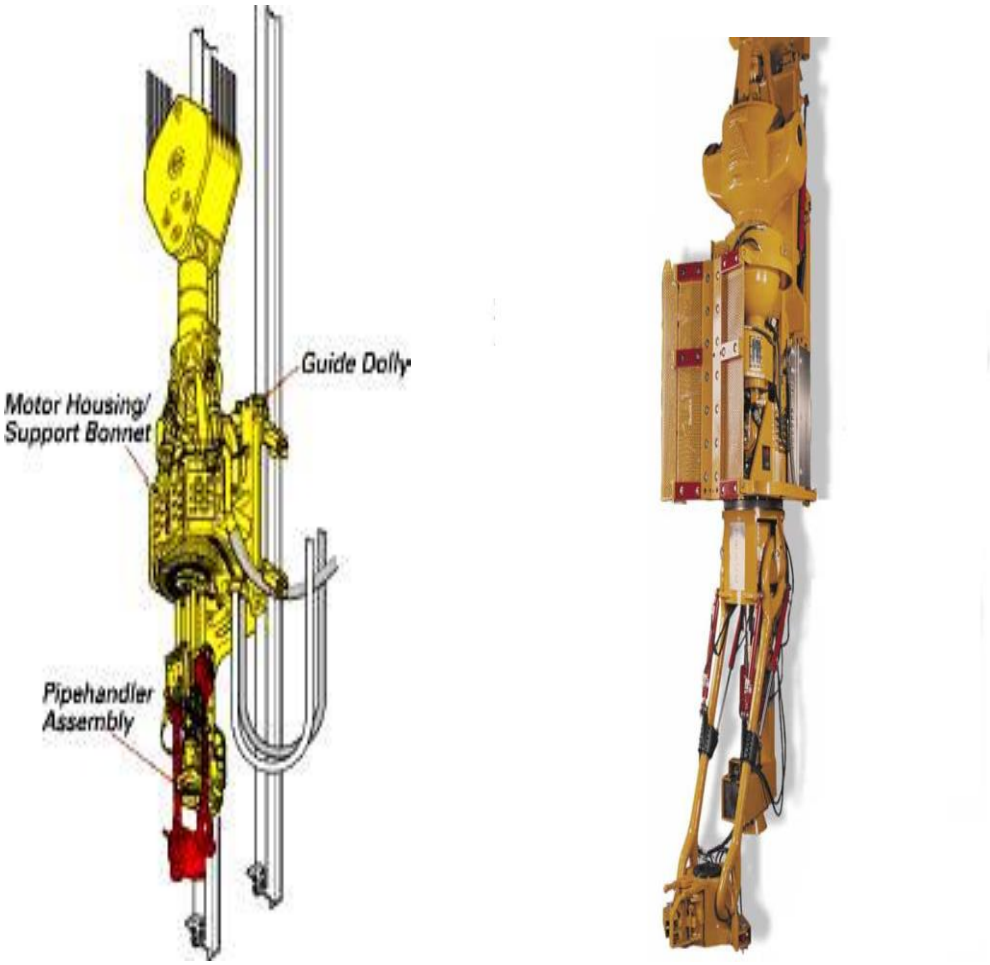

Figure I.13 Top drive

I .4.3. Tige d'entraînement

De section carrée, hexagonale ou triangulaire, elle est entraînée en rotation par la table et par l'intermédiaire du carré (Kelly drive bushing) monté autour de sa longueur courante.

Ce carré est constitué de quatre rouleaux à axe horizontal de forme approprié pour transmettre le couple à la tige et par conséquent à la garniture de forage vissée sous le raccord inférieur.

L'ensemble peut coulisser longitudinalement de longueur totale 40 ou 54 ft, elle dispose respectivement d'une longueur utile de 37 ou 51 ft. Pour des raisons de sécurité vis-à-vis d'éruption possible par l'intérieur de la garniture, on monte des vannes à chaque extrémité de la tige d'entraînement.

Ces deux vannes sont opérées par rotation d'un quart de tour au moyen d'une clé que l'on conserve sur le plancher de forage. La vanne inférieure doit être de diamètre tel qu'elle puisse être descendue dans le forage en cours.

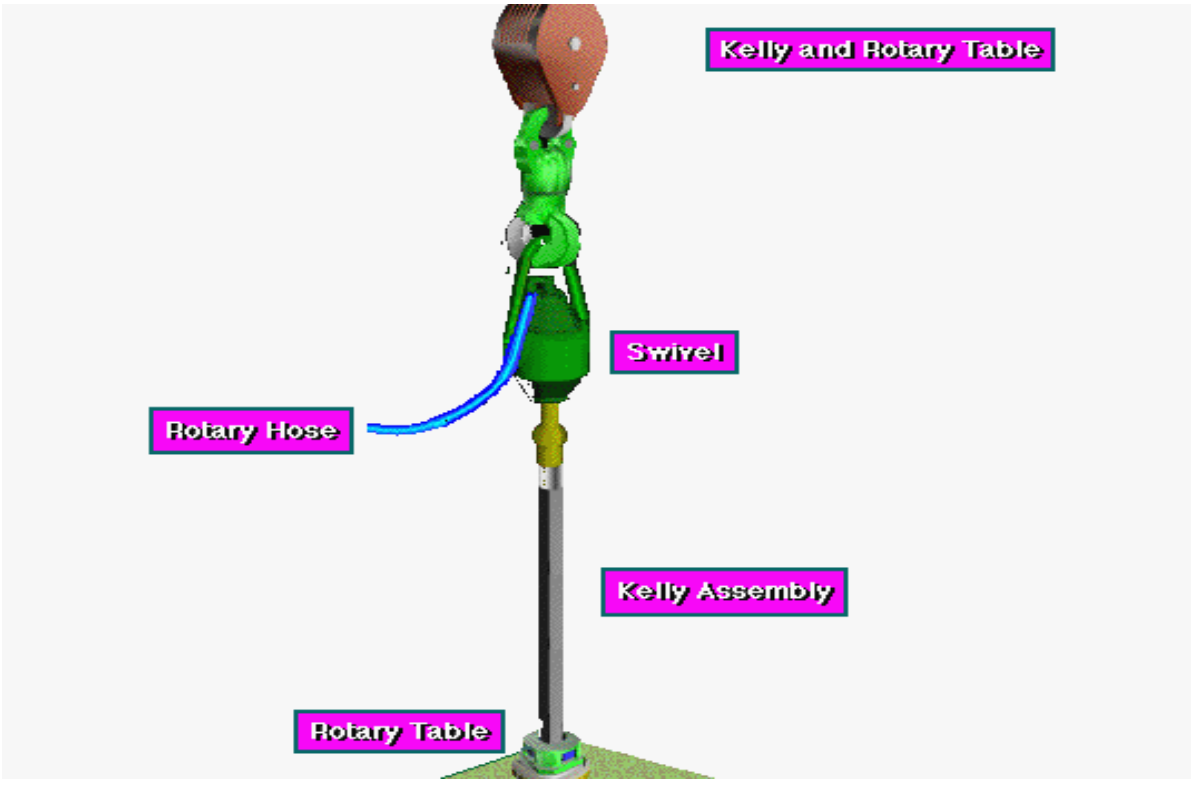

Figure I.14 Tige d'entraînement

I .4.4 .Raccord d'usure

A chaque ajout de tige, donc après avoir foré la longueur utile de la tige d'entraînement, il faut donc dévisser la kelly puis la revisser sur la garniture. Cette fréquence de vissage étant grande, il est nécessaire de les faire au niveau de la connexion d'un raccord peu coûteux plutôt qu'à celui du raccord de la tige d'entraînement.

I .4.5. Tête d'injection

C'est le composant qui est suspendu par sans anse au crochet de levage. Il doit être conçu à la foi pour la charge maximale de garniture et pour la vitesse de rotation maximale.

D'autre part, un joint d'étanchéité rotatif permet l'injection sous pression du fluide de forage par le flexible de forage relié au câble de cygne de la tête d'injection. Il faut noter que toutes les connexions au-dessus de la section utile de la tige d'entraînement doivent être à filetage à gauche afin de ne pas être débloqués par la rotation à droite de la table de rotation.

I .4.6 .Tête d'injection motorisée

Comme son nom l'indique, il s'agit d'une tête d'injection qui remplit les mêmes rôles que les têtes d'injection conventionnelles mais en plus, sert de transmission mécanique sur l'arbre rotatif la (Figure I.15). La motorisation peut être à celle des tables de rotation indépendante, c'est-à-dire par moteur électrique à courant continu, ou bien par moteur hydraulique.

Les avantages de cet équipement sont très intéressants **:**

- Pas de manipulation de Kelly ;

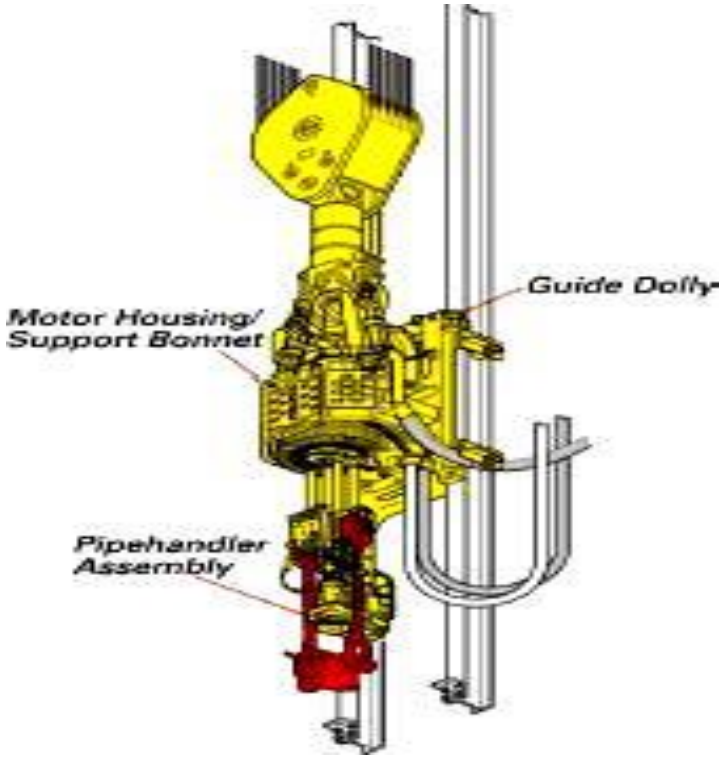

Figure I.15 Tête d'injection motorisée

Reconnexion sur la garniture en manœuvre à n'importe quelle hauteur ;

- Forage par triple possible ;
- Remontée en rotation et circulation (back reaming) ;
- Carottage en grande longueur.

I .5. FONCTION DE POMPAGE

I .5.1. Circulation de boue

La circulation de la boue dans un forage nécessite l'utilisation de pompes puissantes, une bonne installation de pompage doit assurer :

- une vitesse de remontée des déblais suffisante pour éviter leur décantation,
- une pression de refoulement suffisante pour vaincre les pertes de charges dans le circuit.

Les pompes de forage peuvent être de type duplex à double effet ou triplex à simple effet **[6]**.

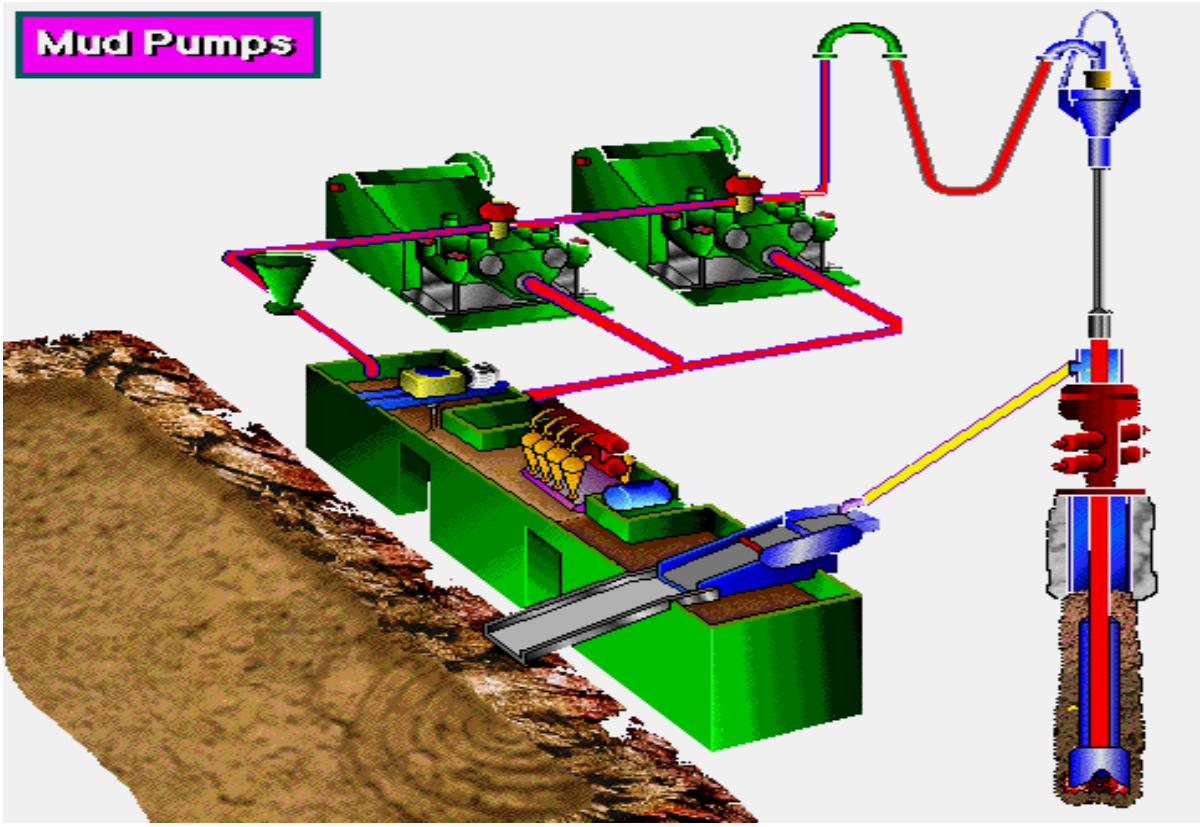

Figure I.16 Circulation de boue

I .5.2. Partie mécanique des pompes de forage

C'est la partie qui assure la transmission de la puissance du moteur d'entraînement au piston de la pompe.

I .5.2.1. L'arbre à grande vitesse

C'est l'arbre d'entraînement de la pompe. Il est supporté par deux paliers à roulements et entraîne, par l'intermédiaire du pignon à denture oblique (en chevrons), la roue dentée de l'arbre petite vitesse (vilebrequin).

I .5.2.2. L'arbre à petite vitesse ou vilebrequin

Cet arbre a une forme coudée (excentrique) pour permettre le décalage des courses des pistons dans les chemises, de 120° pour les pompes triplex et de 90° pour les duplex.

Le diamètre de la roue dentée de cet arbre est égal à 5 ou 6 fois celui du pignon de l'arbre d'entrée, ce qui fait qu'elle tourne 5 à 6 fois moins vite.

I .5.2.3. Système d'entraînement

Deux moteurs sont montés sur le skid de la pompe et entraînent par l'intermédiaire de pignons et de chaînes l'arbre grand vitesse.

I .5.3. Partie hydraulique des pompes de forage

La partie hydraulique est constituée de deux (duplex) ou trois cylindres (triplex) identiques. Dans chaque cylindre se trouve une chemise dans laquelle coulisse un piston prolongé par une tige qui le relie à la rallonge de crosse.

Au bout des cylindres se trouvent les clapets : un clapet d'aspiration et un de refoulement pour chaque cylindre dans une pompe triplex, et deux clapets d'aspiration et deux de refoulement pour chaque cylindre dans une pompe duplex. Chaque clapet repose sur son siège.

Dans les pompes duplex, un presse-étoupe assure l'étanchéité sur la tige de piston et isole ainsi l'intérieur du corps de pompe de l'extérieur.

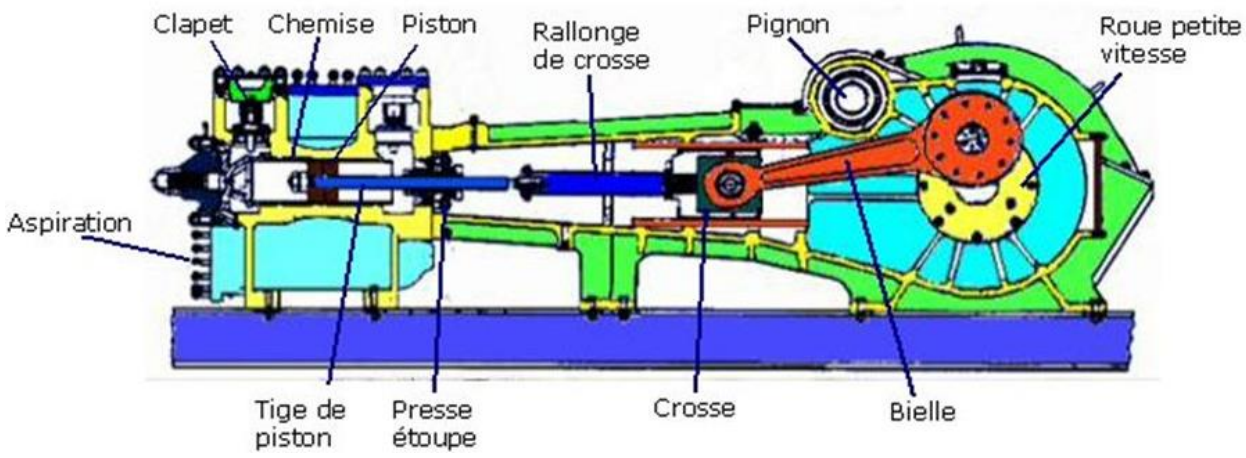

Figure I.17 Pompe à boue

I .5.4. Principe de fonctionnement des pompes

I .5.4.1. Pompes duplex à double effet

Ce sont des pompes qui comportent deux pistons à double effet, c'est-à-dire que chaque piston aspire et refoule des deux côtés.

Pendant un aller et retour du piston, c'est-à-dire un tour complet de l'arbre petite vitesse, un piston refoule deux fois le volume de la chemise correspondant à sa course. Le même cycle se produit par l'autre piston avec un décalage de 1/4 de tour.

I .5.4.2. Pompes triplex à simple effet

Ce sont des pompes qui comportent trois cylindres dans lesquels coulissent trois pistons à simple effet, c'est-à-dire que chaque piston aspire et refoule d'un seul côté Chaque cylindre comporte un clapet d'aspiration et un autre de refoulement à l'avant seulement.

Pendant un aller et retour du piston, c'est-à-dire un tour complet de l'arbre petite vitesse, un piston refoule une seule fois le volume de la chemise correspondant à sa course, le même cycle se produit par les autres pistons avec un décalage de 1/3 de tour.

I .5.5. Avantages et inconvénients des pompes

I .5.5.1. Pompes duplex

- Les pompes duplex, malgré qu'elles sont simples et robustes, sont lourdes et leur entretien est difficile. Leur domaine d'utilisation est limité puisque le chemisage minimal est limité (déséquilibre dû au cycle double effet) et la vitesse inférieure doit être suffisante pour assurer un graissage correct de la partie mécanique (35 à 40 coups/mn minimum).
- Le presse-étoupe est un organe délicat et cher.
- Les pompes duplex puissantes ne peuvent donc être utilisées ni en carottage ni pour les phases de forage à faible diamètre, opérations pour lesquelles le débit requis est limité.

I .5.5.2. Pompes triplex

Avantage

- Facilité d'entretien et de surveillance. Les chemises sont apparentes, toute fuite aux pistons est vite décelée. Les interventions sur la pompe sont faciles et rapides du fait du faible poids des pièces d'usure, de l'absence du presse-étoupe et de la simplicité du joint de chemise.
- Souplesse dans l'utilisation qui permet :
- des débits importants à des pressions non négligeables,
- des débits faibles ou moyens à des pressions élevées,

- Faible poids et encombrement.

Inconvénients

- Suralimentation nécessitée par le mauvais remplissage (sièges et clapets très petits et battements très rapides). Il est donc indispensable d'avoir une pompe centrifuge de suralimentation.
- Nécessité de refroidissement et lubrification de la chemise et de l'arrière des pistons.

I.6. SYSTEME DE SECURITE

I .6.1. Equipement d'obturation [blow-out preventers]

Rôles

L'obturateur et ses accessoires servant à:

- Assurer la fermeture du puits en cas de venue de fluides de formations;
- Permettre la circulation sous pression contrôlée pour reconditionner la boue et évacuer l'effluent ayant pénétré dans le puits;
- Tester des éléments dans le puits;
- Tester les formations;
- Faire des circulations inverses;

Un obturateur est défini par sa marque, son type, sa dimension nominale et sa série (pression de service)

Pour chaque obturateur on précise en outre les caractéristiques suivantes:

- Le diamètre maximal de passage des outils.
- Les apports d'ouvertures et de fermeture (rapport entre la pression qui règne dans le puits et la pression nécessaire pour commander l'obturateur).
- Les volumes de fluide nécessaire pour la fermeture et l'ouverture.
- L'encombrement (fluide).
- Le poids.

I .6.2. Différents types d'obturateurs

I .6.2.1) Les obturateurs à mâchoires [rams BOP]

Ces obturateurs ferment l'espace annulaire autour des tiges par le déplacement d'une paire de mâchoires (Figure I.18).

1. Garniture frontale.

2. Garniture supérieure d'étanchéité.

3. Block métallique.

Ces mâchoires rendent étanche l'espace au-dessous d'elles. Elles peuvent être :

- **A fermeture totale :** elles permettent de fermer totalement le puits en l'absence de tiges ou de les cisailler si elles sont présentes,
- **A fermeture sur tiges :** elles sont munies d'ouvertures semi-circulaires, correspondant au diamètre extérieur des tiges, pour lesquelles elles sont prévues. Il est absolument essentiel que les mâchoires d'un obturateur correspondent exactement aux dimensions des tiges, des tubages, ou des tubings qui sont en service,
- **A fermeture variable :** elles permettent de fermer sur différentes tailles de tiges et même sur la tige d'entraînement.



Figure I.18 Obturateur à mâchoires

I .6.2.2) Les obturateurs annulaires [annular BOP]

Ces obturateurs emploient une membrane en caoutchouc synthétique, qui fait étanchéité sur différents diamètres de la garniture de forage. Elle peut même permettre de petits mouvements de translation et rotation, et fermer complètement le trou s'il est vide

(Figure I.19).

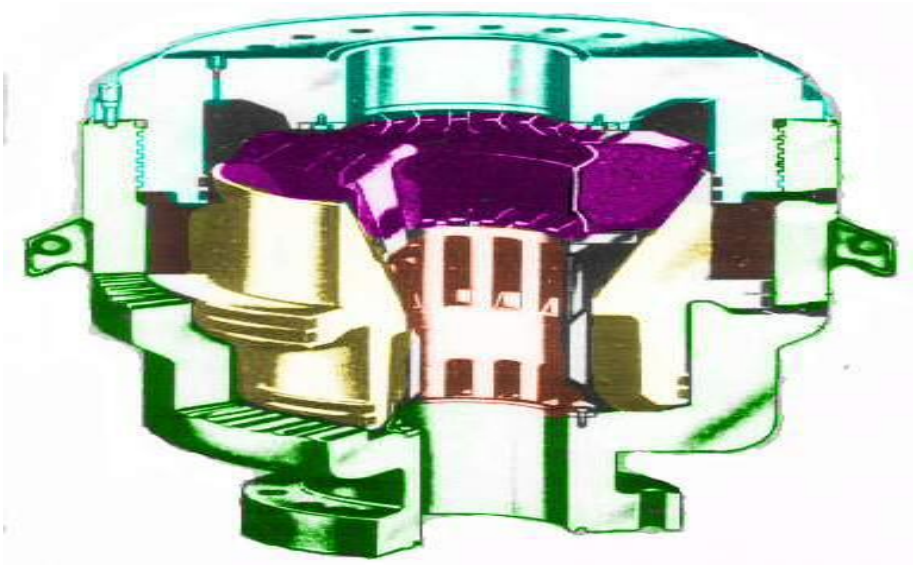

Figure I.19 Obturateur annulaire

I .6.2.3) Les Obturateurs rotatifs

Placés au-dessus des obturateurs fixes, ils permettent la rotation et la manœuvre des tiges, ils sont utilisés pour forer sous pression (comme dans le forage en Under balance).

I .7. COMMANDE DES OBTURATEURS

Les obturateurs sont à commandes hydrauliques (Figure 20). Une unité d'accumulateurs permet de stocker du fluide hydraulique sous pression de manière à assurer une fermeture rapide des obturateurs. La mise en pression s'effectue à la fois par des pompes électriques d'autres pneumatiques. Cette unité d'accumulateurs ainsi que le tableau de commande des obturateurs doivent se trouver à une distance sûre du puits de manière à pouvoir être opérés rapidement et de manière adéquate en cas d'urgence. Un tableau de commande secondaire est généralement situé sur le plancher de forage à portée de main du chef de poste.

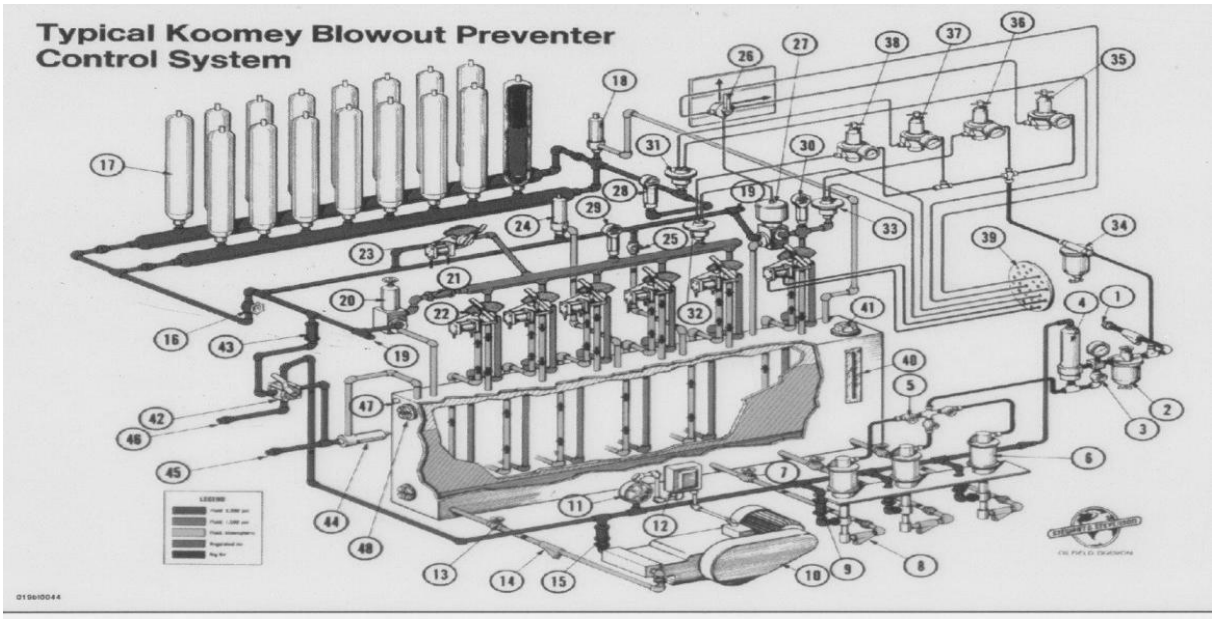

Figure I.20 Unité hydraulique de commande

Le forage rotary exige l'utilisation d'un arbre de forage creux appelé garniture, qui a pour principales fonctions :

- d'entraîner l'outil en rotation,
- d'y appliquer un certain effort,
- d'y apporter l'énergie hydraulique nécessaire à l'évacuation des déblais.

I .8. UNE GARNITURE DE FORAGE EST CONSTITUEE DES PRINCIPAUX ELEMENTS SUIVANTS

- les tiges,
- les tiges lourdes,
- les masses tiges.

I .8.1. Les tiges

a)Rôles

Les tiges de forage permettent la transmission de la rotation de la table à l'outil et le passage du fluide de forage jusqu'à ce dernier.

Elles doivent travailler en tension pour éviter leur frottement contre les parois du puits, qui peuvent causer leur usure et les éboulements des parois, et la déviation.

b) Caractéristiques

Le diamètre nominal

C'est le diamètre extérieur du corps de la tige, exprimé en pouces.

Le grade

Détermine la qualité de l'acier et donne la résistance de la tige à la traction et à la torsion Lorsqu'une tige subit un effort de traction, elle s'allonge ; si on ne dépasse pas une certaine valeur et si on relâche la force, la tige revient à sa position initiale : on dit que l'acier a travaillé dans le domaine élastique.

La limite élastique (contrainte maximale admissible) est le rapport de la traction maximale sur la section du corps de la tige.

Les grades d'acier normalisés sont : D55 - E75 - X95 - G105 - S135.

La gamme

Caractérise la longueur des tiges. Il existe 3 gammes de longueur de tige :

- gamme 1 : 5,50 m à 6,70 m (18' à 22'),
- gamme 2 : 8,25 m à 9,15 m (27' à 30'),
- gamme 3 : 11,60 m à 13,70 m (38' à 45').

Le poids nominal

Il indique le poids du corps de la tige sans les tool-joints.

c) Fabrication

Les tiges de forage sont des tubes d'acier au carbone étirés sans soudure. Leurs extrémités sont refoulées :



Figure I.21 Tige de forage

- soit intérieurement (internal upset ou IU)
- soit extérieurement (external upset ou EU)
- soit de manière mixte (internal - external upset ou IEU).

d) Classification

La classe d'une tige définit son degré d'usure après utilisation, donc la diminution de sa section qui entraîne celle de ses caractéristiques mécaniques.

L'API a défini les classes de tiges comme suit

Classe 1

Marquée d'une bande blanche.

Les tiges de cette classe sont neuves (aucune trace d'usure).

- **Classe supérieure (premium)**

  Marquée de deux bandes blanches.

- **L'usure est caractérisée par**

- réduction uniforme de l'épaisseur de 20%,
- réduction excentrique de l'épaisseur de 20%,

Classe 2

Marquée d'une bande jaune.

- **L'usure est caractérisée par**
- réduction uniforme de l'épaisseur de 20%,
- réduction excentrique de l'épaisseur de 35%,

Classe 3

Marquée d'une bande orange.

- **L'usure est caractérisée par**
- réduction uniforme de l'épaisseur de 37.5%,
- réduction excentrique de l'épaisseur de 45%,

Classe 4

Marquée d'une bande verte.

Plus usée que la classe 3.

Remarque: une tige rebute est marque d'une bande rouge

I .8.2. Les tool-joints

Ce sont des joints qui assurent la liaison entre les tiges. Ils sont soudés et/ou vissés au corps de tiges.

Ils peuvent être rechargés extérieurement pour être protégés contre l'usure excessive.



Figure I.22 Tool-joints

Remarque: c'est sur les tool-joints que sont placées les clés de forage pour les opérations de vissage et de dévissage.

I .8.3. Recommandations relatives à l'utilisation des tiges

Un certain nombre de ruptures des tiges pourrait être évité par l'application de certains contrôles et précautions **:**

- utiliser un poids de masse-tiges suffisant pour éviter que les tiges ne travaillent en compression ;
- utiliser des tiges droites, surtout au-dessus des masse-tiges ;
- établir une rotation périodique des tiges situées au-dessus des masse-tiges ;
- éviter de débloquer les tiges à la table de rotation (surtout si le poids de la garniture de forage est faible) ;
- placer les tool-joints à débloquer à une hauteur correcte au-dessus de la table de rotation pour éviter de tordre la tige au-dessus des cales ;
- examiner les tiges périodiquement ou après une instrumentation au sono scope ;
- utiliser un raccord d'usure de tige d'entraînement en bon état ;
- nettoyer et graisser soigneusement les filetages et les portées.
- éliminer les bavures sur les portées des tool-joints avec un outil adapté ;
- bloquer les filetages au couple recommandé ;
- au cours des manœuvres, éviter le choc du bas du filetage mâle contre la portée du tool-joint femelle ;
- rompre régulièrement les longueurs formées (sinon, risque d'ennuis pour débloquer les joints qui n'ont pas été débloqués depuis longtemps) ;
- ne pas déplacer une tige stockée dans le mât en tapant sur la portée du tool-joint mâle éviter, lors du rangement d'une longueur dans le gerbier, de cogner le filetage du tool-joint de la longueur à stocker contre la portée d'une autre déjà stockée ;
- mettre systématiquement des protecteurs de filetage pour le transport et le stockage ;
- les tiges à joints stellitées au droit du tubage doivent être munies de protecteurs de tubage en caoutchouc
- ne pas tirer sur les tiges au-delà de la limite élastique en utilisant un coefficient de sécurité qui tient compte de l'état des tiges ;

- les filetages des tool-joints doivent être nettoyés intérieurement et extérieurement au moyen du jet d'eau ;
- le filetage femelle doit être nettoyé et graissé au moment de la remontée pendant la descente de l'élévateur à vide, le filetage mâle est nettoyé avec le jet d'eau une fois la tige gerbée.

Remarque

Tous les membres de l'équipe doivent inspecter les tiges durant la remontée, pour détecter une éventuelle anomalie Cette opération exige que les tiges soient propres, ce qui nécessite leur nettoyage durant la remontée.

La graisse pour filetages de tool-joints est un matériau d'entretien et de protection essentiel.



Figure I. 23 Type de protecteurs

I .8.4. Les tiges lourdes

Les tiges lourdes ont une flexibilité plus grande que celle des masses tiges et plus petite que celle des tiges normales. Dans les forages verticaux, les tiges lourdes sont fréquemment utilisées comme intermédiaires entre les masses tiges et les tiges.

On utilise donc avantageusement une, deux ou trois longueurs de tiges lourdes, entre les masses tiges et les tiges, chaque fois que les conditions de forage sont difficiles. Dans les forages dirigés, les tiges lourdes sont utilisées soit au sommet des masses tiges, soit parfois en le remplaçant totalement.

Dans ce dernier cas la flexibilité sera suffisante pour que l'outil continue dans la direction donnée par l'amorce de déviation.

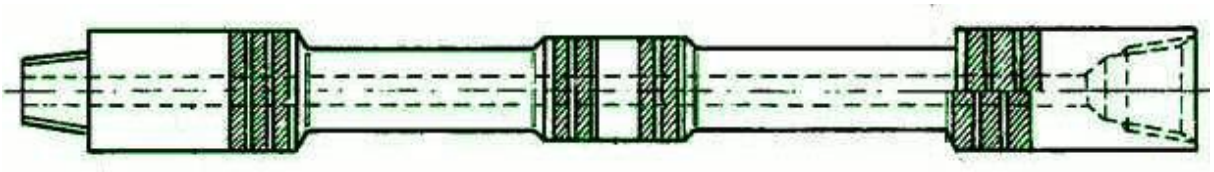

Figure I.24 Tige lourde

I . 8.4.1. Formes

Les diamètres extérieurs des tool-joints sont surdimensionnés par rapport à ceux des tool joints des tiges, Elles comportent en plus un renflement central dont le diamètre est généralement égal à celui des tool-joints diminué de **3/4 à 1".** Comme pour les tiges, Le diamètre intérieur est généralement intermédiaire entre le diamètre des tool-joints et celui des masses tiges.

I .8.5. Les masse – tiges

I .8.5.1. Rôles

Les masse tiges permettent de

- mettre du poids sur l'outil pour éviter de faire travailler les tiges de forage en compression. Le poids utilisable des masse tiges ne devra pas excéder 80% de leur poids total dans la boue ;
- jouer le rôle du plomb du fil à plomb pour forer un trou aussi droit et vertical que possible.
- Elles ne rempliront pleinement ces conditions que si elles sont aussi rigides que possible donc aussi largement dimensionnées que possible.

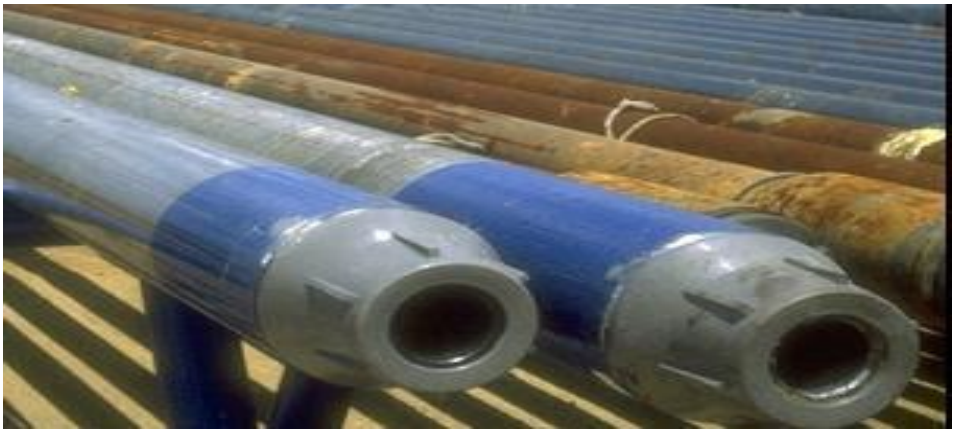

Figure I.25 Masse Tiges

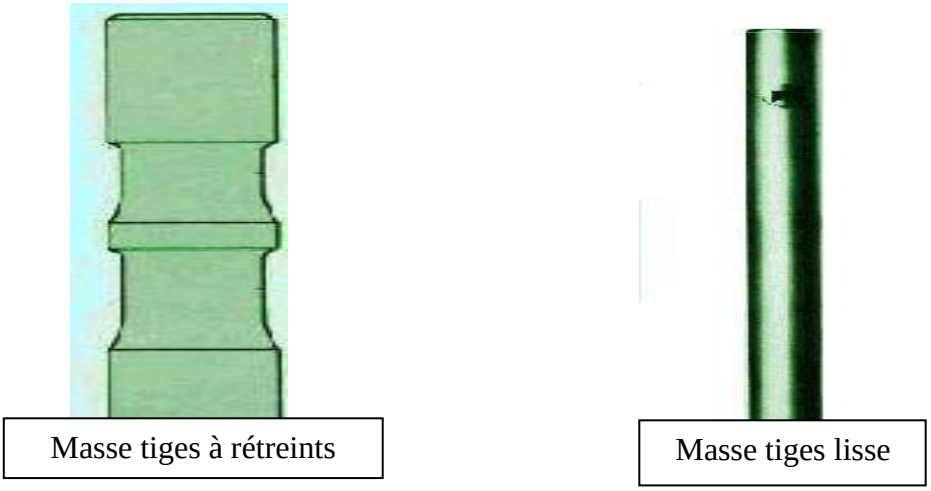

Figure I.26 Type de Masse Tige

I .8.5.2. Caractéristiques

- ses' diamètres extérieur et intérieur.
- Le diamètre intérieur est normalisé par l'API en fonction du diamètre extérieur.
- Lorsquil y a un choix possible, il est avantageux de choisir le plus petit diamètre intérieur de façon à augmenter la résistance de la connexion filetée ;
- son type et son diamètre de connexion filetée (Reg - FH - IF - NC) ;
- son profil : lisse, spiralé ou carré.

I .8.5.3. Différents types de masse-tiges

- **Masse tiges classiques**

L'utilisation du collier de sécurité pour leur manœuvre dans le puits est obligatoire.

- **Masse tiges à rétreints**

Deux retreints sont usinés dans la partie supérieure pour permettre l'utilisation de la cale et l'élévateur sans collier de sécurité.

- **Masse tiges lisses**

Elles sont lisses sur toute leur longueur.

- **Masse tiges à partie centrale surdimensionnée**

La partie supérieure est réduite pour permettre le repêchage par l'extérieur avec un over hot standard

- **Masse tiges carrées**

Elles sont utilisées pour supprimer les dog legs et diminuer la déviation. Les angles sont rechargés par un composite **carbure-diamant** pour éviter leur usure dans les terrains abrasifs.

- **Masse tiges spiralées**

Elles réduisent le risque de coincement par pression différentielle en diminuant la surface de contact masse tige/trou.

- **Masse tiges amagnétiques**

Elles sont utilisées lorsqu'on veut faire des mesures de déviation avec une référence par rapport au nord magnétique.

On n'en utilise qu'une seule, placée directement au-dessus de l'outil et centrée par un stabilisateur à sa partie supérieure

I .8.5.4. Entretien des masses – tiges

Les précautions suivantes permettent de limiter les risques de rupture :

- les filetages et les épaulements doivent être nettoyés, graissés puis équipés de protecteurs avant manutention, stockage ou transport,
- appliquer les couples de serrage corrects,

- utiliser une graisse
- mesurer régulièrement le diamètre des masses tiges pour choisir, en cas de rupture, les coins de repêchage,
- réaliser périodiquement un **magna fluxage** : première inspection après **2000 heures** de service ensuite à **3000 heures** et après toutes les **500** heures pour déceler les éventuelles fêlures de fatigue au droit des filetages mâles et femelles où se produisent les ruptures,
- il est conseillé de rebloquer tous les joints aux deux premières remontées.

Si au blocage :

- la rotation est importante avec expulsion de boue ou d'eau : dévisser, nettoyer, graisser et **rebloquer** au couple,
- la rotation est faible avec ou sans expulsion de graisse : **rebloquer** au couple sans dévisser.

I .8.6. Les stabilisateurs

On appelle forage vertical, par opposition au forage dirigé, tout forage implanté à la verticale de son objectif, la déviation maximale admissible étant limitée pour atteindre la cible.

Afin de limiter et de contrôler la déviation d'un puits, on intègre dans la garniture de forage des stabilisateurs dont on choisit le nombre, le dimensionnement et la position pour répondre au mieux aux problèmes posés.

Il existe également

- des stabilisateurs à chemise en caoutchouc non rotative utilisés dans les terrains durs,
- des stabilisateurs à surfaces de contact importantes utilisés en stabilisateur d'outil (**near bit**),
- des stabilisateurs sous dimensionnés utilisés en forage dirigé, présentant un recouvrement maximal des lames.

I .8.6.1. Stabilisation en trou vertical

Le but d'une bonne stabilisation en trou vertical est de :

- maintenir un angle de déviation le plus faible possible,

- permettre un certain poids sur l'outil,
- garantir un diamètre correct du trou,
- éviter le collage par pression différentielle des masses tiges.

Trois types de garnitures sont utilisés

La garniture packed hole

Comporte un stabilisateur sur l'outil, un deuxième à environ 3 m au-dessus (masse tige courte) et deux ou trois autres intégrés dans le train de masse tiges.

C'est une garniture très rigide permettant de forer avec des poids élevés et des inclinaisons ou des risques d'augmentation de la déviation réduits.

- **La garniture pendulaire**

Comporte un seul stabilisateur situé à deux ou trois masse-tiges au-dessus de l'outil.

Cette garniture est plus souple et permet, en choisissant judicieusement la position du stabilisateur au-dessus de l'outil, de combattre la tendance à la déviation ou même de diminuer l'inclinaison. Des modèles de simulation de comportement de la garniture permettent d'optimiser le positionnement des stabilisateurs et d'améliorer l'efficacité du contrôle de la déviation.

- **La garniture lisse** (**sans stabilisateur**)

Elle n'est utilisée que dans le cas de reforage à l'intérieur des tubages, car son emploi dans des puits avec tendance de déviation nécessite un poids sur l'outil limité, au détriment de l'avancement, et crée un trou en hélice mal calibré, donc des risques de reforage et de coincement.

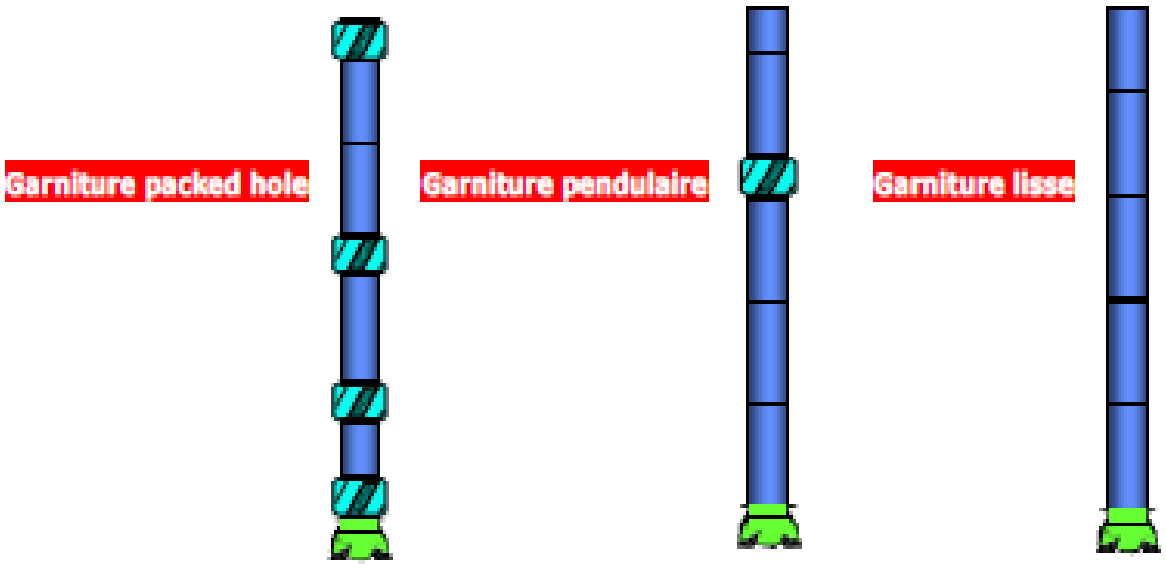

Figure I.27 Trois types de garnitures sont utilisez

I .8.6.2. Stabilisation en forage dirigé

Dans le cas du forage dirigé, les stabilisateurs en plus de leur rôle de centrage et de guidage supportent le poids de la garniture. Puisqu'on ne dispose pas de stabilisateurs non rotatifs mécaniquement satisfaisants, on choisira en forage dirigé des stabilisateurs qui soient aussi peu agressifs que possible, afin d'éviter l'érosion des parois.

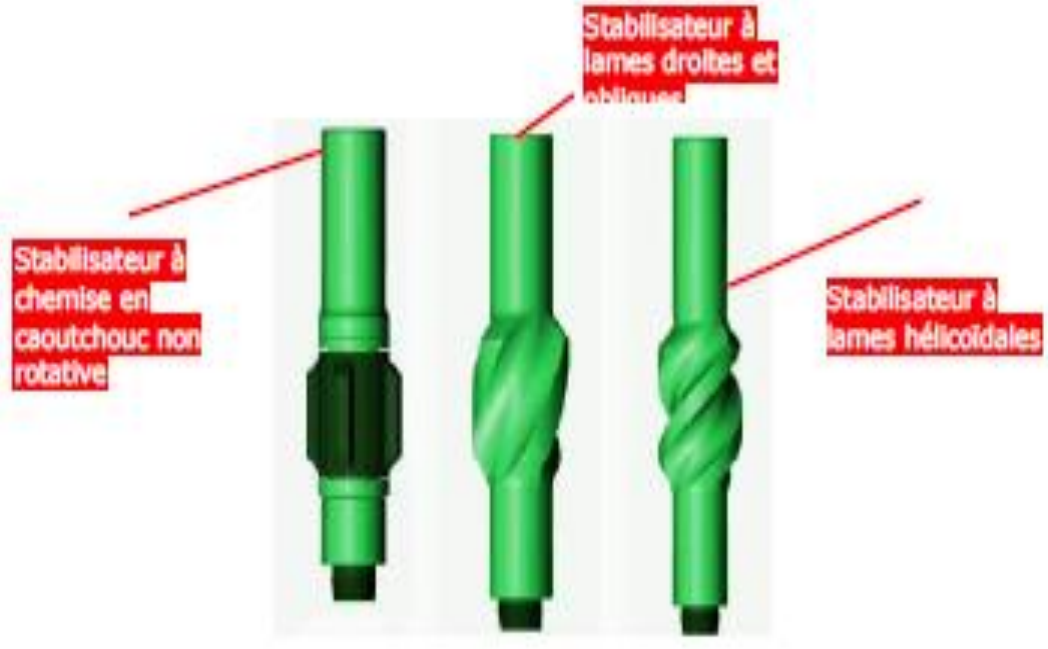

Figure I.28 Stabilisateurs

Les stabilisateurs utilisés présentent donc en général de grandes surfaces de contact (recouvrement ou élargissement des lames).

Il existe toute une série d'assemblages de fond choisis en fonction du résultat que l'on veut obtenir, c'est à dire

- soit augmenter l'angle de déviation (build up),
- soit le maintenir (lock up),
- soit le diminuer (drop off).

I .8.7. Le Trépan

• Le trépan de sonde; est l'outil qu'on ajuste à la dernière allonge d'une sonde et qui, par percussion vertical, s'enfonce dans le sol.

• Ce le seul élément dans la sonde qui fait un trou, et il est on contact avec le fond, cela ne veut pas dire que l'outil est le seul qui peut creuse les trous, le trépan ne creuse un trou- et ne rapporte de l'argent, que l'ors qu'il est adapté à la formation de milieu à forer, et qu'il soit on bon état. L'outil ne peut pas forer si on n'exerce pas un poids qu'il le dirige vers le fond, ce poids est appelé masse tige, et il faut faire tourner, sans oublier la circulation de la boue de forage (qui nettoyé et refroidit le trépan).

• Le premier outil de forage est apparu sur les champs de pétrole a l'aire en 1859 l'heure de forage par battage est l'outil à lames, par révolution et développement des outils comme les autres équipements de forage. Le premier outil à mouette en 1909. On fonction de région et la dureté des roche à forer on a fabriqué l'outil à diamant. **[8]**



Figure I.29 Le Trépan