

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira – Bejaia



Faculté de Technologie

Département Electrotechnique

## *Mémoire de fin d'étude*

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

Option: Electrotechnique industrielle

Thème:

### **Etude des systèmes de forage avec Top Drive**

**Cas pratique: Entreprise Nationale de Travaux aux Puits - Hassi Messaoud**

**Préparé par:**

- BAZIZI Mouloud
- YAHIA CHERIF Walid

**Dirigé par:**

- Dr. ADJATI Arezki  
Dr. HAMITOUCHE Kamel

**Année universitaire 2024/2025**

## **Remerciements**

*Nous tenons à remercier le bon dieu de nous avoir donné le courage*

*Je remercie Dieu Tout-Puissant de m'avoir accordé la santé, la patience et la force nécessaires pour mener à bien ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Dr. ADJATI Arezki et Dr. HAMITOUCHÉ Kamel, pour leur disponibilité, leurs conseils avisés, et leur accompagnement tout au long de ce mémoire.*

*Mes sincères remerciements s'adressent également à toute l'équipe pédagogique du département d'électrotechnique de l'Université Abderrahmane Mira de Béjaïa, pour la qualité de l'enseignement reçu au cours de ma formation.*

*J'adresse une pensée particulière à l'Entreprise Nationale des Travaux aux Puits (ENTP), ainsi qu'à tous les professionnels qui m'ont accueilli, guidé et partagé leur expertise lors de mon stage.*

*Je remercie enfin ma famille, mes parents, mes frères et sœurs pour leur soutien moral constant, et mes amis pour leurs encouragements tout au long de ce parcours.*

*À tous, merci.*

## **Dédicaces**

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes parents*

*Mon frère*

*Mes amis*

***Mouloud***

## **Dédicaces**

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes parents*

*Mes frères et sœurs*

*Mes amis*

***Walid***

## ***Liste des tableaux***

Tableau I.1 : Fiche technique de l'ENTP .....	16
Tableau I.2 : Les bases de l'ENTP .....	22
Tableau II.1 : Puissance au treuil et profondeur de forage.....	25
Tableau II.2 : Système de circulation de la boue .....	27
Tableau II.3 : Equipement de rotation.....	31
Tableau II.4 : Equipement de contrôle du puits .....	32
Tableau II.5 : Equipements de levage .....	35
Tableau II.6 : Équipement de manipulation des tiges et tubages .....	39
Tableau III.1 : Dispositifs de sécurité et de contrôle.....	50
Tableau III.2 : Caractéristiques de Top Drive Bentec TD-500-XT .....	51
Tableau IV.1 : Choix de la méthode d'amélioration du facteur de puissance .....	64
Tableau IV.2 : Tableau comparatif .....	68
Tableau IV.3 : Données de départ .....	70
Tableau IV.4 : Tableau comparatif – Amélioration du facteur de puissance.....	71

## *Liste des figures*

Figure I.1 : Schéma historique de l'ENTP .....	17
Figure I.2 : Démontage, Transport et Montage - Rig Move (DTM) [1]. .....	20
Figure I.3 : Base de vie de l'ENTP .....	21
Figure II.1 : Plate-forme de forage (Drilling rig poster) .....	26
Figure II.2 : Pompes à boue .....	28
Figure II.3 : Pompes centrifuges .....	29
Figure II.4 : Bacs à boue .....	29
Figure II.5 : Table rotative .....	31
Figure II.6 : Tête de puits .....	32
Figure II.7 : Accumulateur de pression .....	33
Figure II.8 : Choke Manifold .....	33
Figure II.9 : Mât de forage .....	35
Figure II.10 : Treuil de forage .....	37
Figure II.11 : Frein Elmagco .....	38
Figure III.1 : Top Drive Bentec TD-500-XT .....	43
Figure III.2 : Différents types de Top Drive selon le fabricant.....	46
Figure III.3 : Poste de Commande .....	50
Figure III.4 : Moteur Asynchrone Triphasé .....	52
Figure III.5 : Variateur de fréquence (VFD) .....	53
Figure III.6 : Système de transmission et de Rotation pour Forage .....	53
Figure III.7 : Système de sécurité mécanique et hydraulique en tête de forage.....	54
Figure III.8 : Interfaces Électrique et Hydraulique du Système Top Drive .....	55
Figure III.9 : Armoire électrique .....	56
Figure III.1 : Condensateurs pour la correction du facteur de puissance .....	61

## ***Liste des abréviations***

ENTP : Entreprise Nationale des Travaux aux Puits  
SPA : Société par Actions  
EPE : Entreprise Publique Économique  
DSP : Direction des Services Pétroliers  
ENAFOR : Entreprise National de Forage  
DTP : Direction des Travaux Pétroliers  
IADC : Association Internationale des Entrepreneurs de Forage  
GSH : Groupe Service Hydrocarbures  
SPP : Société de Participation Publique  
IWCF : Forum International sur le contrôle des Puits  
DTM : Démontage Transport et Montage  
HM : Hassi Messaoud  
HP : Cheveux Vapeur  
DOP : Dispositif de prévention des éruptions  
WOB : Poids sur L'outil de Forage  
CA : Courant Alternatif  
CC : Courant Continue  
SCR : Redresseur à Contrôle de Phase  
VFD : Variateur de Fréquence  
API : Automate Programmable Industriel  
MCC : Moteur à Courant Continue  
 $\cos(\phi)$  : Facteur de Puissance  
P : Puissance Active  
S : Puissance Apparente  
VA : Voltampère  
VSD : Variateur de Vitesse  
FP : Facteur de Puissance  
APFC : Correction Automatique du Facteur de Puissance  
SVC : Compensateur statique de puissance réactive  
MAS : Moteur Asynchrone  
U : Tension d'Alimentation  
F : Fréquence  
Q : Puissance Réactive

# **Table des matières**

Remerciements	
Dédicaces	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Table des matières	
Introduction générale.....	14
<b>Chapitre I : Description de l'organe d'accueil</b>	
I.1 Introduction.....	16
I.2 Organisation de l'Entreprise .....	16
I.2.1 Présentation de l'Entreprise Nationale des Travaux aux Puits (ENTP).....	16
I.2.2 Historique .....	16
I.2.3 Marché de l'ENTP .....	18
I.3 Les Activités Cœur du Métier de l'ENTP.....	19
I.3.1 Maintenance pétrolière à l'ENTP .....	19
I.3.2 Forage & Work-over .....	19
I.4 L'Engineering .....	20
I.5 Transport et logistique des chantiers mobiles .....	20
I.6 Hôtellerie et moyens communs.....	21
I.7 Les Infrastructures de l'ENTP .....	22
I.8 Moyens humains et évolution des effectifs.....	22
I.9 Présentation du champ de Hassi Messaoud .....	23
I.9.1 Situation géographique du champ .....	23
I.9.2 Caractéristiques géologiques.....	23
I.10 Conclusion .....	23
<b>Chapitre II : Généralités sur les systèmes et les appareils de forage</b>	
II.1 Introduction .....	25

## Table des matières

---

II.2 Classification des appareils de forage.....	25
II.3 Présentation et interprétation technique de la plate-forme de forage .....	25
II.4 Système de circulation de la boue .....	27
II.4.1 Description du circuit de circulation.....	27
II.4.2 Rôles du système de circulation.....	28
II.4.3 Equipements de traitement et de circulation de la boue de forage .....	28
II.4.3.1 Pompes à boue (Mud Pumps).....	28
II.4.3.2 Pompes centrifuges.....	28
II.4.3.3 Bacs à boue (Mud Tanks).....	29
II.4.3.4 Agitateurs (Hélico-mélangeurs) .....	30
II.4.3.5 Mixeurs.....	30
II.4.3.6 Equipements complémentaires de traitement de la boue de forage .....	30
II.5 Equipement de rotation.....	30
II.5.1 La table rotative .....	31
II.5.2 Le top drive .....	31
II.6 Equipement de contrôle du puits .....	32
II.6.1 Tête de puits .....	32
II.6.2 Accumulateur de pression.....	33
II.6.3 Collecteur de dunes (Choke Manifold).....	33
II.6.4 Vannes de sécurité dans le circuit d'injection.....	34
II.7 Système de levage .....	34
II.7.1 Mât de forage .....	35
II.7.2 Mouflage dans les appareils de forage.....	36
II.7.3 le treuil de forage .....	36
II.8 Equipement de manipulation des tiges et tubages .....	39
II.9 Actionneurs intervenant dans un dispositif de forage.....	39
II.9.1 Moteur diesel groupe électrogène .....	39

II.9.2 Production et distribution de l'électricité – Système CA/CC .....	40
II.9.3 Compresseurs dans le système de puissance .....	40
II.9.4 Appareils de forage à entraînement mécanique .....	41
II.10 Conclusion .....	41

### **Chapitre III : Etude technologique d'un Top Drive**

III.1 Introduction .....	43
III.2 Définition Top drive.....	43
III.3 Historique du Top Drive .....	44
III.3.1 Début des solutions de remplacement .....	44
III.3.2 Les premières expérimentations .....	44
III.3.3 Développement et perfectionnement.....	45
III.3.4 L'ère moderne.....	45
III.4 – Les différents types de Top Drive .....	45
III.4.1 – Classification selon le fabricant.....	45
III.4.2 – Classification selon le type de moteur d'entraînement.....	46
III.5 – Rôle du Top Drive.....	47
III.6 Avantages et les inconvénients du Top drive .....	47
III.6.1 Avantages .....	47
III.6.2 Inconvénients.....	48
III.7 Principe de fonctionnement du Top Drive .....	49
III.7.1 Fonction de pompage.....	49
III.7.2 Fonction de rotation.....	49
III.7.3 Fonction de levage et d'abaissement .....	49
III.7.4 Fonction de manutention des tiges .....	49
III.8 Présentation générale du Top Drive Bentec TD-500-XT.....	51
III.8.1 Moteur à induction AC .....	51
III.8.2 Variateur de fréquence (VFD) .....	52

III.8.3 Ensemble de Transmission et de Circulation du Fluide de Forage .....	53
III.8.4 Systèmes de Sécurité et de Stabilisation pour Opérations de Forage.....	54
III.9 Environnement de Commande et d'Alimentation du Top Drive .....	54
III.9.1 Système électrique et hydraulique du Top Drive Bentec TD-500-XT .....	55
III.9.2 Armoire électrique .....	55
III.9.3 Automate programmable industriel (API).....	56
III.10 Conclusion.....	57

## **Chapitre IV : Optimisation énergétique du Top Drive**

IV.1 Introduction .....	59
IV.2 Notions fondamentales du Facteur de puissance .....	59
IV.2.1 Définition du facteur de puissance ( $\cos \varphi$ ).....	59
IV.2.3 Impacts d'un mauvais facteur de puissance .....	60
IV.3 Méthodes d'amélioration du facteur de puissance .....	61
IV.3.1 Compensation statique par batteries de condensateurs .....	61
IV.3.2 Compensation dynamique par variateurs à correction intégrée .....	62
IV.3.3 Utilisation de filtres actifs en présence d'harmoniques.....	63
IV.3.4 Compensation automatique avec régulateur de puissance réactive.....	63
IV.3.5 Choix technologique : avantages et limites de chaque méthode .....	64
IV.3.6 Simulation d'un cas d'amélioration sur le Top Drive Bentec TD-500-XT .....	64
IV.4 Comparaison des moteurs utilisés dans les Top Drive .....	65
IV.4 .1 Moteur à courant continu (DC) .....	65
IV.4.2 Moteur asynchrone triphasé (AC) .....	66
IV.4.3 Comparaison entre le MCC et le MAS triphasé.....	67
IV.5 Remplacement par un moteur asynchrone à double étoile.....	68
IV.5.1 Proposition d'un moteur asynchrone à double étoile .....	68
IV.5.2 Justification technique du remplacement .....	69
IV.5.3 Comparaison des performances.....	69

---

## Table des matières

---

IV.5.4 Impact sur le rendement global du système .....	69
IV.5.5 Faisabilité technique et économique .....	70
IV.6 Amélioration du facteur de puissance : Cas du Top Drive Bentec TD-500-XT .....	70
IV.6.1 Analyse énergétique du moteur actuel utilisé dans le Top Drive.....	70
IV.6.3 Impact de l'amélioration proposée .....	71
IV.6.4 Résumé technique de l'amélioration du facteur de puissance .....	72
IV.7 Conclusion .....	73
Conclusion générale.....	75
Bibliographie.....	77
Résumé	

# **Introduction générale**

### Introduction générale

L'Algérie est un pays riche en ressources énergétiques, où le pétrole et le gaz naturel jouent un rôle vital dans l'économie nationale. Représentant plus de 90 % des recettes d'exportation et une part majeure du produit intérieur brut, ces ressources constituent un pilier fondamental du développement économique du pays. Dans ce cadre, l'activité de forage pétrolier revêt une importance stratégique, car elle permet l'exploitation et la valorisation des réserves souterraines d'hydrocarbures.

L'Entreprise Nationale des Travaux aux Puits (ENTP), filiale du groupe Sonatrach, est l'un des principaux acteurs dans ce domaine. Depuis sa création en 1981, elle s'est spécialisée dans les travaux de forage, de compléction et de maintenance des puits, et elle joue aujourd'hui un rôle central dans la mise en œuvre de la politique énergétique nationale.

Parmi les évolutions majeures dans le domaine du forage pétrolier, l'introduction du Top Drive représente une avancée technologique de premier plan. Ce système, installé sur le mât de forage, assure la rotation de la colonne de tiges de manière verticale et continue, contrairement aux systèmes traditionnels tels que la table de rotation, la tige carrée (ou Kelly), la tête d'injection ou encore la clé automatique. Son rôle principal est de transmettre le couple et la rotation nécessaires à l'entraînement de l'outil de fond, tout en permettant le forage en continu sans interruption à chaque ajout de tige. Le Top Drive facilite également les opérations de vissage et de dévissage des tiges, améliore la sécurité, réduit le temps de forage et optimise ainsi la performance globale des opérations de forage.

Ce mémoire est articulé autour de quatre chapitres : une description de l'Entreprise Nationale des Travaux aux Puits (ENTP) est abordée au chapitre I ; au chapitre II, des généralités sur les systèmes et les appareils de forage sont détaillées ; le chapitre III est consacré à l'étude technologique d'un Top Drive ; enfin, des améliorations par compensation d'énergie et par un éventuel remplacement du moteur d'entraînement feront l'objet du quatrième chapitre, avant d'être couronné par une conclusion générale.

# **Chapitre I : Description de l'organe d'accueil**

## I.1 Introduction

Ce chapitre présente une vue d'ensemble de l'organe d'accueil, en mettant en évidence ses principales caractéristiques institutionnelles, organisationnelles et fonctionnelles. Il vise à fournir une compréhension claire de sa nature, de ses missions, de sa structure interne ainsi que des activités qu'il mène. Cette description permet de situer le rôle de l'organisme dans son environnement sectoriel et d'appréhender son fonctionnement général. Une attention particulière est accordée à son historique, à sa place dans le paysage institutionnel ou économique, ainsi qu'aux différents services ou départements qui le composent.

## I.2 Organisation de l'Entreprise

### I.2.1 Présentation de l'Entreprise Nationale des Travaux aux Puits (ENTP)

L'ENTP est une entreprise publique économique sous la forme légale d'une Société par actions « spa » au capital Social de 67 000 000 000 DA, dont la totalité de ses actions est détenue par le Holding Services Para Pétroliers. [1]

**Tableau I.1 : Fiche technique de l'ENTP**

	<b>Raison sociale</b>	Entreprise Nationale des Travaux Aux Puits				
	<b>Dénomination</b>	E.N.T.P	<b>Date de création</b>	01 Août 1981		
	<b>Forme juridique</b>		EPE/SPA en date du 21 Juin 1989			
	<b>Adresse du siège social</b>	Base industrielle du 20 août 1955, Hassi Messaoud, wilaya d'Ouargla <a href="#">Algérie</a>				
	<b>Base Birkhadem</b>	Les Vergers-BP 12- ALGER				
	<b>Capital Social</b>	67 000 000 000 DA	<b>Effectif</b>	9230 agents		
	<a href="http://www.entp.dz">www.entp.dz</a>	<b>Société sœur</b>	ENAFOR	<b>Actionnaires</b>		

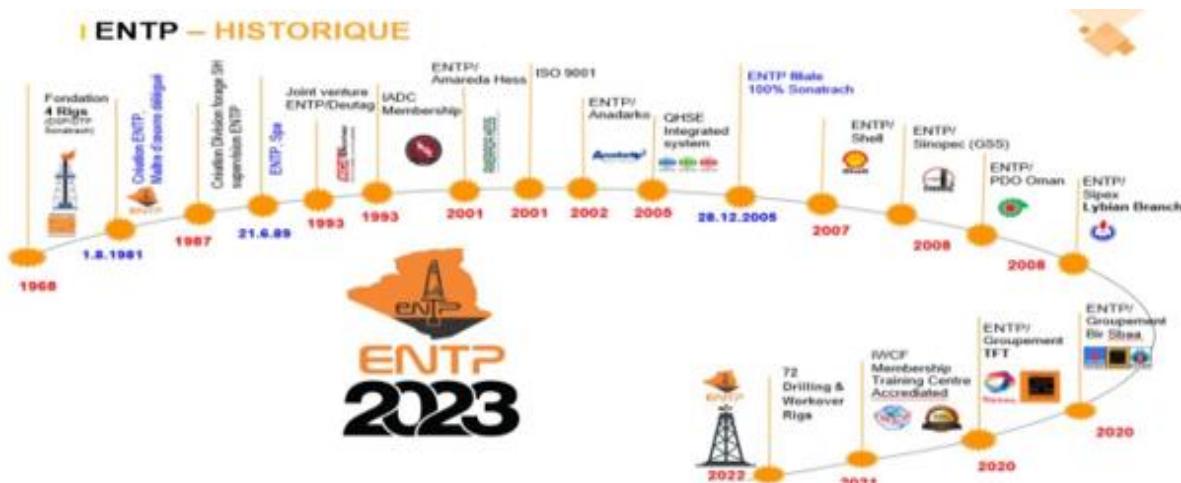
### I.2.2 Historique

Le forage en Algérie est une activité développée par Sonatrach depuis 1968, année au cours de laquelle le premier puits, dénommé Keskassa 1, a été foré. À cette époque, la structure opérationnelle chargée des travaux de forage portait le nom de Direction des Services Pétroliers (DSP) et disposait d'un parc initial de quatre (04) appareils de forage.

L'évolution de la structure chargée des activités de forage et de maintenance des puits a connu plusieurs étapes marquantes depuis sa création. En juillet 1972, la Direction des Services Pétroliers (DSP) est rebaptisée Direction des Travaux Pétroliers (DTP).

À la suite de la restructuration de Sonatrach au début des années 1980, l'Entreprise Nationale des Travaux aux Puits (ENTP) voit le jour le 1er août 1981, en héritant des missions de la DTP, notamment celles liées au forage et aux opérations de maintenance des puits (*work-over*). L'ENTP est officiellement créée par le décret n° 81-171 et devient opérationnelle le 1er janvier 1983.

Le 21 juin 1989, l'ENTP adopte un nouveau statut juridique en se transformant en société par actions. En juin 1993, elle devient membre de l'IADC (*International Association of Drilling Contractors*), renforçant ainsi sa reconnaissance à l'échelle internationale.



**Figure I.1 : Schéma historique de l'ENTP**

Le 30 mars 1998, l'ENTP est intégrée au Groupe Services Hydrocarbures (GSH) Sonatrach, suite à la cession de 51 % de son capital social par le holding RGT au profit de Sonatrach. Par la suite, le 4 avril 2003, elle obtient la certification ISO 9001:2000 couvrant l'ensemble de ses activités.

Le 1er janvier 2005, les actions précédemment détenues par la Société de Gestion des Participations TRAVEN (dissoute) sont transférées à une nouvelle entité, la SGP INDJAB. Puis, le 28 décembre 2005, la totalité des actions encore détenues par INDJAB (49 %) est cédée à titre gratuit au holding Sonatrach SPP Spa, faisant de l'ENTP une filiale à 100 % du groupe Sonatrach. Le siège social de l'entreprise est établi à Hassi Messaoud, dans la wilaya d'Ouargla, à environ 900 km au sud-est d'Alger.

Enfin, le 25 mars 2006, le holding SPP Spa devient l'unique actionnaire de l'ENTP. Plus récemment, en juillet 2020, l'ENTP a obtenu son accréditation IWCF (International Well Control Forum) et a été agréée pour délivrer le Brevet Professionnel de Transport de Personnes et de Marchandises, confirmant ainsi l'élargissement de ses compétences au-delà des travaux aux puits.

Forte de plus d'un demi-siècle d'existence, l'Entreprise Nationale des Travaux aux Puits (ENTP) s'est imposée comme un acteur majeur dans le domaine des travaux pétroliers, jouissant aujourd'hui d'une renommée internationale.

Depuis sa création, l'ENTP a accompli un parcours remarquable, avec plus de 2 900 forages pétroliers et plus de 4 800 opérations de maintenance des puits (Work-Over) réalisés sur le territoire national.

À l'international, l'entreprise a également démontré son savoir-faire, en totalisant 30 puits forés à l'étranger, répartis comme suit : 3 en Tanzanie, 16 au Sultanat d'Oman et 11 en Libye.[1]

### I.2.3 Marché de l'ENTP

L'Entreprise Nationale des Travaux aux Puits (ENTP) occupe une position dominante sur le marché du forage en Algérie, avec une part de marché estimée à 44,3 %, ce qui en fait le premier entrepreneur national dans ce secteur stratégique.

Forte de son expertise et de ses capacités techniques, l'ENTP intervient principalement dans les opérations de forage pétrolier et gazier, aussi bien en on shore qu'en offshore. Ses principaux clients sont des acteurs majeurs de l'industrie énergétique, à commencer par SONATRACH, la compagnie nationale algérienne des hydrocarbures.

Elle collabore également avec plusieurs groupements internationaux tels que le Groupement Bir Seba (GBRS), le Groupement Tin Fouyé Tabankort (GTFT – Projet II), et le Groupement Berkine (SONATRACH/ANADARKO). L'ENTP travaille en outre avec le Groupement SONATRACH/AGIP, l'Association SONATRACH/REPSOL, Shell Exploration and Production, Petro-Vietnam Exploration Production (PVEP-Algeria), ainsi que des partenaires internationaux opérant en Libye.

Cette diversité de clients témoigne de la solidité de son positionnement sur le marché régional et de sa capacité à répondre aux exigences techniques et opérationnelles des grands groupes pétroliers.

### I.3 Les Activités Cœur du Métier de l'ENTP

#### I.3.1 Maintenance pétrolière à l'ENTP

La maintenance pétrolière constitue une activité stratégique au cœur des métiers de l'ENTP. Les appareils de forage, véritables colosses technologiques, sont équipés de composants majeurs appelés « organes nobles », en raison de leur robustesse et de leur longévité. Ces éléments critiques nécessitent des révisions périodiques rigoureuses pour garantir un fonctionnement optimal et sécurisé.

Pour répondre aux exigences croissantes de cette activité, l'ENTP s'appuie sur une infrastructure technique solide, comprenant 10 ateliers spécialisés répartis sur une surface de 9 750 m<sup>2</sup> en zone couverte et 49 800 m<sup>2</sup> en espace non couvert. À cela s'ajoutent 4 aires de montage, totalisant environ 40 000 m<sup>2</sup>, dédiées aux opérations de revamping (renouvellement) des appareils de forage et de work-over.

Parmi les principaux ateliers, on distingue notamment :

- L'atelier De Maintenance Des Equipements De Forage,
- L'atelier Des Moteurs Industriels,
- Celui Des Equipements Electriques Et De Bobinage,
- L'atelier Des Equipements Spéciaux Et Des Habillages De Sonde.

D'autres unités sont dédiées à la maintenance des équipements de mesure et de régulation, à la fabrication d'équipements de forage, ainsi qu'à la chaudronnerie et à la soudure. L'ensemble de ces installations contribue activement à la performance, à la fiabilité et à la disponibilité du parc matériel de l'entreprise.

#### I.3.2 Forage & Work-over

Les travaux aux puits représentent une composante essentielle des activités de l'ENTP, englobant l'ensemble des opérations de forage de recherche, d'exploration et de développement sur les gisements d'hydrocarbures, qu'ils soient liquides ou gazeux. Ces activités comprennent également l'entretien et la réhabilitation des puits producteurs (work-over), ainsi que la réalisation complémentaire de forages hydrauliques profonds.

Pour mener à bien ces missions, l'ENTP s'appuie sur un parc d'appareils de forage et de work-over moderne et performant. Une partie de ces équipements est dotée de technologies de pointe telles que le système Top Drive, les régulateurs d'énergie SCR (Silicon Controlled Rectifier), ainsi que des dispositifs de communication par satellite (V.SAT), assurant une

connectivité continue sur l'ensemble des sites d'intervention. Grâce à ces moyens techniques avancés, l'ENTP est en mesure de répondre efficacement aux exigences opérationnelles du terrain tout en respectant les standards internationaux de l'industrie pétrolière.

#### **I.4 L'Engineering**

La Direction Engineering joue un rôle clé dans le soutien technique aux différentes directions opérationnelles de l'ENTP. Elle intervient sur plusieurs axes stratégiques, notamment l'élaboration des spécifications techniques des équipements de forage, la définition et le suivi des procédures de revamping, ainsi que la conduite d'études techniques en vue de l'acquisition de nouveaux appareils et matériels de forage.

En parallèle, cette direction assure la mise à disposition des documentations techniques et des normes de référence nécessaires au bon déroulement des opérations. Elle contribue également à la conception et à l'ingénierie de projets techniques, veillant à ce que toutes les activités soient alignées sur les standards de qualité, de sécurité et de performance de l'entreprise. Grâce à son expertise, la direction Engineering renforce la capacité de l'ENTP à innover et à répondre aux exigences techniques du secteur pétrolier.

#### **I.5 Transport et logistique des chantiers mobiles**

Le transport constitue une activité essentielle et stratégique au sein des opérations de l'ENTP, en particulier dans la gestion logistique des chantiers mobiles. Ces derniers doivent être déplacés à chaque fin de puits, dans le cadre des opérations de démontage, transport et montage (DTM), également connues sous le nom de Rig Move. Ce processus, à la fois lourd et complexe, représente environ 250 déplacements par an, soit une moyenne de 22 opérations mensuelles.



**Figure I.2 : Démontage, Transport et Montage - Rig Move (DTM).**

Pour assurer ces manœuvres avec efficacité et sécurité, l'ENTP s'appuie sur un parc roulant conséquent de 1 024 unités, regroupant l'ensemble des véhicules nécessaires aux activités de transport et de manutention. Afin de garantir la disponibilité, la performance et la durabilité de ce parc, l'entreprise dispose de cinq ateliers de maintenance spécialisés, couvrant une surface totale de 11 512 m<sup>2</sup>. Chacun de ces ateliers est dédié à un type spécifique de véhicule, soient les véhicules spéciaux, les semi-remorques, les engins de manutention, les véhicules lourds et les véhicules légers.

Un atelier complémentaire est consacré à la maintenance préventive systématique, assurant l'entretien régulier des équipements. En parallèle, trois stations mobiles d'entretien permettent des interventions rapides et efficaces directement sur les sites, renforçant ainsi la réactivité et la continuité des opérations terrain.

### I.6 Hôtellerie et moyens communs

Dans le souci de garantir le bien-être et le confort de ses employés, l'ENTP s'appuie sur sa direction Hôtellerie et Moyens Communs. Cette direction a pour mission d'assurer des services d'hébergement et de restauration de qualité, adaptés aux besoins des équipes sur le terrain. Elle intervient aussi bien au sein des bases de vie, des blocs administratifs et des camps de vie, que directement sur les chantiers de forage et de work-over répartis à travers tout le territoire national. Grâce à cette organisation, l'ENTP veille à offrir à ses collaborateurs des conditions de vie optimales, même dans les environnements les plus isolés.[1]



**Figure I.3 : Base de vie de l'ENTP**

## I.7 Les Infrastructures de l'ENTP

L'ENTP dispose d'un important dispositif infrastructurel lui permettant de soutenir efficacement ses activités sur l'ensemble du territoire. Elle possède plusieurs bases et ateliers stratégiquement implantés à Hassi Messaoud, véritable cœur opérationnel de l'industrie pétrolière en Algérie. À cela s'ajoute une base située à Birkhadem, à Alger, qui renforce la coordination administrative et logistique de l'entreprise. Ces infrastructures jouent un rôle central dans le bon fonctionnement des opérations techniques, de maintenance et de gestion des ressources.

**Tableau I.2 : Les bases de l'ENTP**

Bases	Superficies	Fonctions
Base 20/8/55	594 930 m <sup>2</sup>	-Maintenance du Parc véhicules et engins, -Maintenance des équipements de forage, -Zone de stockage à l'air libre.
Base 11/12/60	349 520 m <sup>2</sup>	- Hébergement capacité principale
Base T 32	37 000 m <sup>2</sup>	- Hébergement capacité complémentaire
Base 17/2/60	148 959 m <sup>2</sup>	- Logistique de work over.
Unité Tubulaire	2170 m <sup>2</sup>	- Réparation & Stockages matériels tubulaires
Centre de Formation	1 2000 m <sup>2</sup>	- Bloc pédagogique de 17 classes (150 places) -Laboratoire de langues, Salle de conférences (50 places)

## I.8 Moyens humains et évolution des effectifs

L'effectif de l'ENTP a connu une progression notable, passant de 6 657 employés en 2017 à 9 230 en 2023. Cette croissance est le fruit d'une politique de recrutement dynamique, particulièrement axée sur les domaines du forage et de la maintenance, avec l'intégration de nombreux ingénieurs spécialisés. Elle illustre la volonté de l'entreprise de renforcer ses compétences techniques pour accompagner l'expansion de ses activités.

L'encadrement représente près des deux tiers des effectifs permanents, témoignant d'un haut niveau de qualification et d'une organisation interne structurée. Par ailleurs, les activités de forage et de work-over mobilisent à elles seules plus de 50 % du personnel global, soulignant leur rôle central dans l'architecture opérationnelle de l'ENTP.

**I.9 Présentation du champ de Hassi Messaoud****I.9.1 Situation géographique du champ**

Le champ de Hassi Messaoud est situé à environ 850 kilomètres au sud-est d'Alger et à quelque 350 kilomètres de la frontière algéro-tunisienne. Il est délimité géographiquement par Touggourt au nord, Gassi-Touil au sud, Ouargla à l'ouest et Bourma à l'est. Ce champ pétrolier s'inscrit dans un ensemble de structures géologiques appartenant à la partie nord-orientale de la province triasique. Il s'étend sur une superficie d'environ 2 500 km<sup>2</sup>. En coordonnées Lambert, il se situe entre X = [790 000 – 840 000] Est et Y = [110 000 – 150 000] Nord, soit entre les latitudes 31°30' et 32°00' Nord, et les longitudes 5°40' à 6°20' Est.

**I.9.2 Caractéristiques géologiques**

Le champ de Hassi Messaoud (H.M) est considéré comme l'un des gisements les plus complexes au monde sur le plan géologique. Son évolution a été marquée par une activité tectonique intense, avec plusieurs phases de compression et de déformation successives.

Au fil de son enfouissement, le réservoir a également subi d'importantes transformations diagenétiques. Ces processus géologiques, en modifiant la structure du réservoir, ont eu un impact variable sur ses propriétés pétro physiques : selon les zones, ils ont pu soit les améliorer, soit les altérer. C'est cette complexité qui confère au champ de Hassi Messaoud une importance stratégique et technique majeure dans l'industrie pétrolière algérienne.[3]

**I.10 Conclusion**

Ce premier chapitre a permis de dresser un rapport de l'Entreprise Nationale des Travaux aux Puits (ENTP), à travers une analyse de son identité institutionnelle, de son organisation interne et de ses principales missions. L'ENTP occupe une place centrale dans le secteur des travaux pétroliers en Algérie, en particulier dans les domaines du forage, du work-over et de la maintenance des puits.

# **Chapitre II : Généralités sur les systèmes et les appareils de forage**

## II.1 Introduction

Le forage constitue une étape fondamentale dans l'exploitation des ressources souterraines. Il repose sur un ensemble de systèmes techniques et d'appareils spécialisés, dont la conception et le fonctionnement sont adaptés aux caractéristiques géologiques du site. La maîtrise de ces équipements est indispensable pour garantir la sécurité, l'efficacité et la rentabilité des opérations de forage.

Ce chapitre vise à présenter les principes de base des systèmes de forage, ainsi que les principaux types d'appareils utilisés. Il abordera notamment la classification des systèmes de forage, les composantes essentielles d'un appareil de forage, ainsi que les critères de choix des équipements en fonction du type de terrain et des conditions d'exploitation.

## II.2 Classification des appareils de forage

Afin de garantir une exécution efficace et sécurisée du forage, les appareils sont classifiés selon deux critères principaux à savoir la capacité de profondeur de forage maximale et la puissance au treuil.

Une règle empirique souvent utilisée par les professionnels indique qu'il faut 10 chevaux vapeur (HP) au treuil pour chaque cent pieds de forage. Cette corrélation permet de déterminer rapidement le type d'appareil adapté aux besoins d'un projet spécifique, allant de l'appareil léger aux modèles super lourds, capables d'atteindre jusqu'à 10 000 mètres de profondeur. [2],[4]

**Tableau II.1 : Puissance au treuil et profondeur de forage**

Types d'appareils	Profondeur en pied	Profondeur en mètre	Puissance requise
Appareil léger	4921' – 6561'	1500m – 2000m	0650 HP
Appareil moyen	11482'	3500m	1300 HP
Appareil lourd	19685'	6000m	2000 HP
Appareil super lourd	26246' – 32805'	8000m – 10000m	3000 HP

## II.3 Présentation et interprétation technique de la plate-forme de forage

La plate-forme de forage constitue l'élément central des opérations pétrolières sur le terrain. Elle regroupe l'ensemble des équipements, installations et infrastructures nécessaires à la réalisation des travaux de forage et de maintenance des puits. Véritable unité mobile et autonome, la plate-forme est conçue pour fonctionner dans des environnements souvent contraignants, tout en garantissant la sécurité, l'efficacité et la précision des opérations.



**Figure II.1 : Plate-forme de forage (Drilling rig poster) [13]**

Cette section vise à présenter en détail la plate-forme de forage utilisée dans le cadre de l'activité de l'ENTP, en mettant en évidence sa configuration technique, ses principaux composants, ainsi que son mode de fonctionnement. Une attention particulière sera accordée aux systèmes de levage, de rotation, de circulation des fluides et de sécurité, afin de mieux comprendre le rôle fondamental de chaque sous-ensemble dans le déroulement du processus de forage.

Une plate-forme de forage est composée de plusieurs systèmes interconnectés, chacun ayant une fonction bien définie dans le processus de forage d'un puits de pétrole ou de gaz. [6]

## II.4 Système de circulation de la boue

Ce système permet la circulation de la boue de forage, un fluide essentiel pour refroidir le trépan, stabiliser les parois du puits, transporter les débris vers la surface, et maintenir la pression dans le trou.

**Tableau II.2 : Système de circulation de la boue**

N°	Désignation	Rôles
01	Fosses de boue	Réservoirs pour stocker, mélanger et conditionner la boue de forage.
02	Pompes à boue	Injectent la boue sous pression dans le puits.
03	Stand pipe	Conduit vertical en acier reliant la pompe à la tête de forage.
04	Tuyau flexible	Flexible haute pression reliant le stand pipe au pivot.
05	Stockage des composants de la tête de puits	Contient les équipements de sécurité et d'étanchéité du puits.
06	Ligne de retour de boue	Canalise la boue remontant du puits vers les équipements de traitement.
07	Tamis vibrant	Sépare les déblais de la boue pour la recycler.
08	Dessableur	Élimine les particules de sable.
09	Dégazeur	Retire les gaz dissous dans la boue.
10	Dégazeur secondaire	Affine le dégazage si nécessaire.
11	Fosses de réserve	Stockage supplémentaire pour la boue usée ou propre.

Le système de circulation de la boue constitue une composante essentielle de tout chantier de forage. Ce système en circuit fermé permet la mise en mouvement continue d'un fluide de forage (généralement de la boue) à travers l'ensemble du puits et de l'installation en surface. Sa conception et son fonctionnement visent à assurer plusieurs fonctions critiques durant le forage.

### II.4.1 Description du circuit de circulation

Le circuit de circulation est un circuit fermé, qui débute et se termine dans les bacs à boue. La boue est d'abord aspirée à partir du bassin d'aspiration, par les pompes à boue. Elle est ensuite refoulée sous haute pression dans les conduites de refoulement, passe par un flexible d'injection, traverse la tête d'injection et pénètre à l'intérieur des tiges de forage jusqu'au trépan.

Après avoir atteint le fond du puits, la boue remonte en surface à travers l'espace annulaire (l'espace entre les tiges et les parois du puits), emportant les déblais avec elle. En

surface, elle passe par une série d'équipements de traitement pour être nettoyée, décantée, éventuellement dégazée, puis elle retourne dans les bacs pour un nouveau cycle.

#### **II.4.2 Rôles du système de circulation**

La circulation de la boue remplit plusieurs fonctions fondamentales. Elle permet d'abord la lubrification et le refroidissement du trépan, ce qui réduit l'usure des outils de coupe et prolonge leur durée de vie. En même temps, elle évacue les déblais générés par le forage en les ramenant à la surface. Ces déblais sont ainsi maintenus en suspension dans la colonne de boue, même lors des arrêts de forage, évitant leur accumulation au fond du puits.

La boue joue également un rôle de barrière hydrostatique, empêchant les venues de gaz, d'eau ou d'huile en contrebalançant la pression des formations géologiques traversées. Enfin, grâce à la poussée d'Archimède, elle participe partiellement au support du train de tiges, contribuant à alléger la charge portée par le treuil.

#### **II.4.3 Equipements de traitement et de circulation de la boue de forage**

##### **II.4.3.1 Pompes à boue (Mud Pumps)**

Les pompes à boue sont le cœur du circuit hydraulique. Ce sont des pompes triplex à piston simple effet, capables de générer des pressions élevées pour permettre à la boue de parcourir tout le circuit jusqu'au fond du puits.



**Figure II.2 : Pompes à boue**

En général, deux pompes de même capacité sont installées, permettant une continuité de service lors de l'entretien de l'une d'elles. Elles comportent une partie mécanique (moteurs, bielles, vilebrequins) et une partie hydraulique (chambres de pompage, soupapes). [12] [2]

##### **II.4.3.2 Pompes centrifuges**

Dans les systèmes Top Drive utilisés pour le forage pétrolier, les pompes centrifuges jouent un rôle crucial dans la circulation des fluides de forage. Elles sont généralement utilisées pour transférer le fluide de forage entre les différents équipements de traitement des boues, comme les bacs, les dessableurs et les centrifugeuses. Grâce à leur capacité à fournir un débit élevé sous une faible pression, elles assurent une circulation continue et efficace du fluide, ce qui contribue à maintenir la stabilité du puits et à optimiser les opérations de forage. Leur conception robuste et compacte les rend particulièrement adaptées aux environnements exigeants des plateformes de forage. [2]



Figure II.3 : Pompes centrifugées

#### II.4.3.3 Bacs à boue (Mud Tanks)

Les bacs à boue servent de réservoirs pour stocker, décanter et recycler la boue. On y distingue plusieurs compartiments, chacun dédié à une phase du traitement : décantation, aspiration, traitement mécanique ou mélange. [2]



Figure II.4 : Bacs à boue

#### II.4.3.4 Agitateurs (Hélico-mélangeurs)

Installés dans les bacs à boue, les agitateurs de type hélico-mélangeur ont pour fonction d'empêcher la décantation des solides en assurant un brassage continu du fluide. Ce mouvement homogène permet de maintenir la densité et la composition de la boue de forage de manière constante, garantissant ainsi l'efficacité du processus de forage et la stabilité du puits.[2]

#### II.4.3.5 Mixeurs

Les mixeurs sont utilisés pour incorporer des additifs tels que la bentonite, les polymères ou la barite dans la boue de forage, afin d'en ajuster les propriétés physico-chimiques telles que la viscosité, la densité et la capacité de suspension des solides. Ils fonctionnent généralement selon le principe de l'effet Venturi, combiné à l'action d'une pompe centrifuge, permettant une dispersion rapide et homogène des additifs dans le fluide.[2]

#### II.4.3.6 Equipements complémentaires de traitement de la boue de forage

Le traitement de la boue de forage repose sur une série d'équipements complémentaires assurant la séparation des solides, la régulation des propriétés du fluide et la sécurité du système. Les agitateurs hydrauliques, ou mitrailleuses de fond et de surface, maintiennent les particules en suspension à l'aide de jets puissants, en complément des agitateurs mécaniques.

En première ligne du processus de séparation, les tamis vibrants (shale shakers) éliminent les plus gros déblais. Cette action est affinée par les dessableurs et déssilteurs, utilisant la force centrifuge pour retirer respectivement le sable et le limon. Le mud cleaner combine tamis fins et hydrocyclones pour éliminer les particules fines tout en conservant les additifs essentiels. Les centrifugeuses assurent une séparation encore plus fine par décantation sous haute vitesse, permettant une boue plus propre et réduisant les pertes.

Le dégazeur élimine les gaz dissous ou libres (comme le méthane ou le H<sub>2</sub>S), qui peuvent compromettre la stabilité du fluide et la sécurité du forage.

Des équipements spécifiques comme les clay ejectors empêchent l'accumulation d'argile dans les bacs, tandis que les goulottes facilitent le transfert gravitaire de la boue entre les différents dispositifs. Les amortisseurs de pulsations, les soupapes de décharge, les conduites d'aspiration, les vannes et les flexibles d'injection jouent un rôle essentiel dans le contrôle du débit et la prévention des surpressions.[4]

### II.5 Equipement de rotation

Le forage pétrolier repose principalement sur deux technologies de transmission de la rotation aux tiges de forage à savoir la table rotative et le top drive qui est un système moderne.

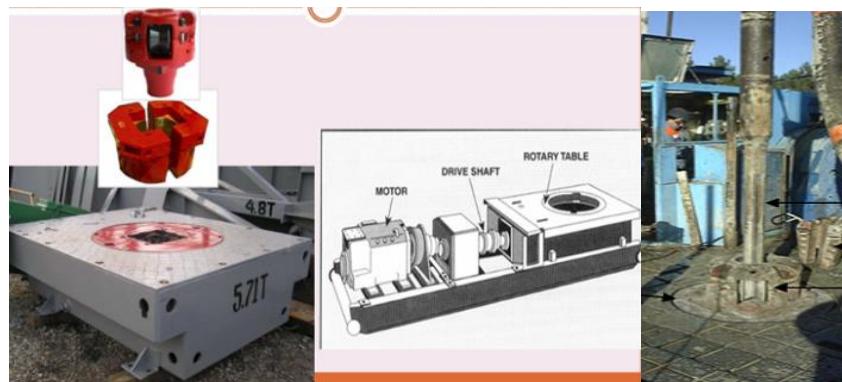
**Tableau II.3 : Equipement de rotation**

N°	Désignation	Rôles
12	Pivot	Elément rotatif suspendu, assure la rotation et la circulation de la boue.
13	Kelly	Barre carrée ou hexagonale transmettant la rotation à la tige de forage.
14	Douille de Kelly	Relie la Kelly à la table tournante.
15	Table tournante	Plateau rotatif à la base du derrick qui fait tourner l'ensemble du train de forage.

C'est dans ce contexte qu'a été introduit le top drive, un système motorisé suspendu au-dessus de la colonne de forage, capable de transmettre directement le couple de rotation du train de tiges et du trépan pour forer dans le sous-sol.[13]

### II.5.1 La table rotative

La table rotative est un dispositif fixe entraînant une tige carrée appelée *kelly*, a longtemps été la référence dans l'industrie. Appréciée pour sa simplicité, sa robustesse et sa fiabilité, elle a répondu efficacement aux exigences des premiers forages verticaux. Cependant, avec l'émergence de puits plus profonds, directionnels ou horizontaux, ses limites sont atteintes, notamment en termes de flexibilité, de sécurité et de rapidité d'exécution.[13],[2]

**Figure II.5 : Table rotative**

### II.5.2 Le top drive

Le top drive, suspendu dans le derrick, a profondément transformé les opérations de forage en permettant une rotation directe des tiges et un déplacement vertical automatisé. Cette technologie apporte plusieurs avantages majeurs, notamment, un gain de temps significatif grâce à la manipulation de tiges triples, un meilleur contrôle du couple de rotation pour une gestion plus précise du puits, ainsi qu'une sécurité accrue, due à la réduction des manipulations manuelles.

Cependant, ces performances ont un coût élevé, tant à l'achat qu'en maintenance, et imposent une structure de derrick plus robuste pour supporter le poids et les efforts mécaniques supplémentaires. Si le top drive s'impose aujourd'hui sur les chantiers complexes et à fort

rendement, la table rotative conserve sa pertinence dans les forages peu profonds ou à budget limité, soulignant ainsi la complémentarité entre ces deux systèmes selon les contextes d'utilisation.[13],[2]

## **II.6 Equipement de contrôle du puits**

La sécurité du puits repose sur un ensemble d'équipements critiques conçus pour maîtriser les surpressions et prévenir les venues incontrôlées de fluides (blowouts).

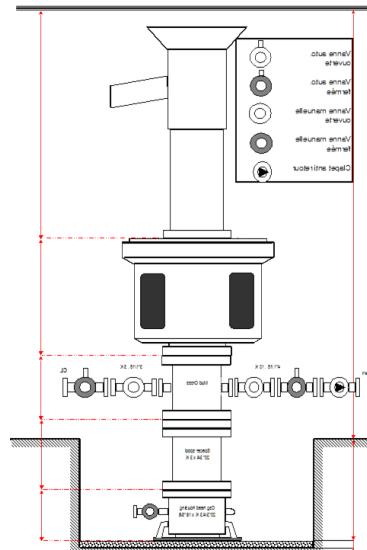
Ces dispositifs assurent une fermeture rapide et sécurisée du puits en cas d'incident, permettent de maintenir la stabilité du puits sous diverses conditions de pression et contribuent à protéger l'intégrité de l'installation de forage, du personnel et de l'environnement.[2]

**Tableau II.4 : Equipement de contrôle du puits**

N°	Désignation	Rôles
29	Preventeur de blow-out annulaire	BOP circulaire pour fermer le puits autour du train.
30	Preveneteurs de blow-out à vérin	BOPs ram qui scellent complètement le puits.
31	Équipement d'accumulation	Stocke l'énergie hydraulique pour activer les BOPs.
32	Collecteur de choc	Canalise les fluides en cas de remontée soudaine.

### II.6.1 Tête de puits

La tête de puits est un élément de surface essentiel, fixé à l'extrémité supérieure du tubage, qui assure la liaison entre le sous-sol et les équipements de contrôle et de sécurité. Elle joue un rôle clé en soutenant mécaniquement les colonnes de tiges et de tubages, tout en permettant l'installation du système de prévention des éruptions (BOP).



**Figure II.6 : Tête de puits**

C'est également à partir de la tête de puits que s'organisent les lignes de circulation, de dérivation et d'injection, nécessaires à la gestion des fluides de forage et aux opérations de contrôle de pression.

### II.6.2 Accumulateur de pression

L'accumulateur est un système composé de réservoirs contenant de l'huile hydraulique sous haute pression, destiné à alimenter le système de commande du Blowout Preventer (BOP). Il assure l'activation immédiate des dispositifs de fermeture du puits, même en cas de défaillance de l'alimentation externe.



**Figure II.7 : Accumulateur de pression**

Fonctionnant comme une source d'énergie autonome, l'accumulateur est un élément critique pour la sécurité, permettant une intervention rapide et fiable lors de situations d'urgence.[5]

### II.6.3 Collecteur de dunes (Choke Manifold)

Le collecteur de duses est un réseau de tuyauteries, de vannes et de sorties équipées de duses réglables, conçu pour réguler la pression du puits après la fermeture du Blowout Preventer (BOP).



**Figure II.8 : Choke Manifold**

Il permet l'évacuation contrôlée des fluides vers la surface tout en maintenant la circulation, ce qui est essentiel pour gérer les venues de fluides sous pression. En assurant un contrôle précis de la contre-pression, le collecteur de duses joue un rôle central dans la sécurité du forage et la stabilité du puits lors des opérations sous pression. [5]

#### **II.6.4 Vannes de sécurité dans le circuit d'injection**

##### **a) Gray Valve :**

C'est une vanne de sécurité installée sur la ligne d'injection, entre la pompe à boue et le train de tiges.

Elle permet, en cas d'urgence, de couper rapidement l'arrivée de fluide vers le puits, empêchant ainsi tout apport supplémentaire de pression ou de volume et contribuant à la maîtrise des situations à risque.[2]

##### **b) Kelly Valve inférieure (Lower Kelly Valve) :**

Placée à la base de la Kelly, cette vanne permet d'isoler le train de tiges du puits. En cas de retour incontrôlé de fluide, elle bloque la remontée vers la surface, protégeant l'équipage pendant les opérations de contrôle de venue.[2]

##### **c) Kelly Valve supérieure (Upper Kelly Valve) :**

Installée au sommet de la Kelly, cette vanne complète la fonction de la Kelly Valve inférieure. Elle permet d'isoler le haut du train de tiges du reste du circuit en cas d'arrêt d'urgence ou d'intervention temporaire, assurant ainsi un confinement total du fluide de forage.[2]

##### **d) Drop-in Check Valve :**

La drop-in check valve est une vanne anti-retour temporaire, introduite dans le train de tiges lors d'opérations critiques. Elle se ferme automatiquement en cas d'inversion de pression, empêchant tout reflux de fluide vers la surface et offrant une barrière immédiate contre les venues soudaines.[2]

#### **II.7 Système de levage**

Les équipements de levage occupent une place centrale dans les opérations de forage. Ils permettent notamment de contrôler le poids appliqué sur l'outil (WOB), garantissant ainsi une pression adéquate pour une perforation optimale.

**Tableau II.5 : Equipements de levage**

N°	Désignation	N°	Désignation
16	Poulie couronne et table de rotation.	23	Couronne
17	Plateforme de manœuvre.	24	Manivelle de frein
18	Mât.	25	Indicateur de poids du crochet
19	Poulie mobile & Crochet	26	Console du foreur
20	Élévateurs	27	Sous-structure
21	Mécanisme d'entraînement	28	Ligne de levage
22	Couronne	33	Séparateur gaz-boue

Ces dispositifs sont également essentiels lors des manœuvres de garniture, en facilitant le remplacement des outils, que ce soit en surface ou au fond du puits. Par ailleurs, ils assurent une descente sécurisée des colonnes de tubage (casing) dans le puits. Enfin, ces équipements interviennent dans les opérations de levée et de descente du mât (DTM), nécessaires pour le montage, le démontage ou le déplacement de l'appareil de forage.

### II.7.1 Mât de forage

Le mât de forage est une structure métallique en forme de « A », généralement soudée ou boulonnée, articulée à sa base. Cette articulation permet un assemblage ou démontage en position horizontale, suivi d'un redressement en position verticale à l'aide du treuil de levage et d'un câble de relevage spécifique.

Contrairement aux anciennes tours de forage, le mât offre une grande rapidité de montage et de démontage, puisqu'il est dressé déjà assemblé sur la plate-forme, ce qui simplifie considérablement les opérations logistiques.

**Figure II.9 : Mât de forage**

Le mât a pour fonction principale de supporter le système de mouflage (ensemble de poulies fixes et mobiles) et d'assurer les manœuvres de levage et de descente des équipements de forage, tels que les garnitures de forage et le tubage. Il joue donc un rôle central dans les opérations de forage, en alliant efficacité structurelle et gain de temps opérationnel.[13]

### **II.7.2 Mouflage dans les appareils de forage**

Le mouflage est un système de levage simple, robuste et efficace, utilisé sur les appareils de forage pour manipuler de très lourdes charges. Il repose sur un câble d'acier qui circule en aller-retour entre les poulies d'un moufle fixe (*crown block*, situé en haut du mât) et celles d'un moufle mobile (*travelling block*), avant de s'enrouler sur le tambour du treuil. L'extrémité libre du câble est fixée à un point fixe ou à un réa d'ancrage.

Le nombre de brins de mouflage (segments de câble tendus entre les poulies) peut varier généralement de 4 à 14, selon la capacité de levage souhaitée. Le brin actif est la portion du câble entre le tambour du treuil et le moufle fixe et le brin mort est la portion entre le moufle fixe et le point d'ancrage ; c'est sur ce brin que sont mesurées les tensions pour déterminer le poids suspendu au crochet, qui porte la charge (comme les tiges ou le tubage), peut être intégré au moufle mobile ou monté de façon indépendante.

Le mouflage présente plusieurs fonctions et avantages essentiels dans les opérations de levage sur les appareils de forage. Il permet tout d'abord de démultiplier l'effort de traction appliqué sur le brin actif, rendant possible la levée de charges très lourdes avec un effort mécanique modéré.

En outre, le système répartit la charge sur plusieurs brins de câble, ce qui autorise l'utilisation de câbles de dimensions standards, réduit la sollicitation mécanique sur le brin actif et limite l'usure, tout en renforçant la sécurité de l'ensemble. Enfin, le mouflage offre également la possibilité de contrôler la vitesse de déplacement vertical du moufle mobile, grâce au réglage du rapport de démultiplication entre le treuil et la charge.[6]

### **II.7.3 le treuil de forage**

Le treuil occupe une place centrale dans le système de levage d'un appareil de forage. Il est principalement utilisé pour hisser et descendre le train de tiges et le tubage, rendant possibles les manœuvres répétées indispensables au déroulement des opérations de forage. Véritable source de puissance du système de levage, le treuil est souvent considéré comme le cœur de l'appareil de forage, car il commande les mouvements essentiels à la progression du puits.



**Figure II.10 : Treuil de forage**

La capacité du treuil est un critère technique majeur : elle définit notamment la profondeur nominale maximale que peut atteindre le forage en fonction du poids à manipuler. Ce paramètre dépend de plusieurs facteurs, dont les exigences du chantier, le type de formation géologique traversée, ainsi que la nature de l'énergie disponible (électrique, hydraulique ou thermique) pour alimenter le treuil. [2],[11]

Les principales parties constituant le treuil de forage sont :

**a) Le tambour principal :**

Le tambour principal constitue l'élément central du treuil. Il a pour fonction de transmettre le couple nécessaire aux opérations de levage ou de descente de charge, et d'assurer également le freinage lors du déplacement du moufle. Il sert en outre de support de stockage pour la ligne de forage, c'est-à-dire le câble d'acier utilisé pour moufler le système de levage. En enroulant ou déroulant ce câble, le tambour permet le déplacement vertical contrôlé du moufle mobile, essentiel aux manœuvres de forage.

**b) Transmission :**

La transmission, constituée d'un ensemble d'engrenages, de pignons et de chaînes, permet de modifier la direction et la vitesse de déplacement dans les systèmes de forage, en particulier au niveau des treuils. Elle joue un rôle essentiel dans le contrôle précis des mouvements du treuil, en adaptant la puissance transmise selon les besoins des opérations. Les blocs (ou moufles), éléments fondamentaux du système de levage, assurent une coordination mécanique efficace entre les différentes parties du dispositif, notamment entre le treuil, la ligne de forage et la charge suspendue.

**c) Les freins :**

Les freins jouent un rôle essentiel dans le processus de forage, notamment pour assurer l'arrêt et le maintien des charges lourdes lors de la descente des équipements comme le tubage ou le train de tiges. Dans ce contexte, les freins mécaniques sont souvent utilisés comme freins de stationnement, mais peuvent également intervenir comme systèmes de freinage d'urgence. Intégrés aux treuils, ils permettent un contrôle précis du mouvement du mousqueton mobile. Leur présence est indispensable pour garantir la maîtrise des charges suspendues, particulièrement lors des manœuvres délicates.

Dans les systèmes de forage modernes, les freins sont conçus comme des dispositifs de sécurité automatiques : en cas de défaillance du système de commande ou de coupure d'alimentation électrique, ils se serrent automatiquement pour empêcher tout déplacement incontrôlé. Dans tous les cas, les freins constituent un élément clé de la sécurité opérationnelle, en garantissant l'arrêt immédiat des équipements et la stabilité du système, même en situation critique.

**d) Le frein auxiliaire (électromagnétique) :**

Le frein Elmagco, le plus couramment utilisé dans les appareils de forage, est fabriqué par la société Baylor.

Il s'agit d'un frein électromagnétique composé d'un rotor tournant à l'intérieur d'un stator dans lequel est généré un champ électromagnétique par des bobines excitatrices.



**Figure II.11 : Frein Elmagco**

Le principe de fonctionnement repose sur la création de courants de Foucault dans le rotor lorsqu'il tourne dans ce champ. L'intensité de ces courants est proportionnelle à la vitesse de rotation du rotor, et ils génèrent des forces d'amortissement opposées au mouvement, assurant ainsi un freinage progressif mais puissant. La capacité de freinage, nettement plus

rapide à croître que celle d'un frein hydraulique, est réglable en modulant le courant d'excitation. Cependant, ce processus génère une quantité importante de chaleur, due à la dissipation de l'énergie mécanique en énergie thermique par les courants de Foucault. Pour éviter une surchauffe, un refroidissement par circulation d'eau est assuré entre le rotor et le stator, maintenant ainsi la température de fonctionnement inférieure à 100 °C.

## II.8 Equipement de manipulation des tiges et tubages

Cet équipement est utilisé pour stocker, manipuler et assembler les tiges de forage, le tubage ainsi que le trépan. Il facilite les opérations de montage et démontage, assurant une manipulation sécurisée et efficace de ces éléments essentiels au forage.[5]

**Tableau II.6 : Équipement de manipulation des tiges et tubages**

N°	Désignation	N°	Désignation	N°	Désignation
34	Centrale électrique	41	Annulaire	49	Baraquement de forage
35	Réservoirs de carburant	42	Racks à tubes	50	Passerelles
36	Tubage conducteur	43	Clavette	51	Cellier
37	Casing de surface	44	Porte de puits	52	Tête de cuvelage
38	Tige de forage	45-46	Trou de souris /de rat	53	Escaliers
39	Collet de tige	47	Clés de serrage	54	Ligne de levage
40	Trépan (Foret)	48	Contrepoids de clé	55	Mât de levage

## II.9 Actionneurs intervenant dans un dispositif de forage

Les actionneurs sont des dispositifs essentiels qui convertissent l'énergie en mouvement mécanique pour assurer le fonctionnement des différents équipements de forage. Ils interviennent dans la commande des systèmes de levage, de rotation, de circulation des fluides et des dispositifs de sécurité. Parmi les principaux types d'actionneurs utilisés dans un dispositif de forage, on retrouve les moteurs électriques, les moteurs hydrauliques, les vérins pneumatiques, ainsi que les systèmes électromagnétiques. Leur choix dépend des exigences spécifiques du chantier, des conditions environnementales et des performances recherchées.[5]

### II.9.1 Moteur diesel groupe électrogène

Le moteur principal constitue la source d'énergie centrale d'une plateforme de forage. Sur les installations modernes, cette fonction est généralement assurée par un ou plusieurs moteurs diesel — parfois jusqu'à quatre ou davantage, en fonction de la taille et des besoins spécifiques de la plateforme. Ces moteurs, dont la puissance peut atteindre plusieurs milliers de chevaux, sont indispensables pour alimenter les différents systèmes à bord, notamment en

produisant l'électricité nécessaire au fonctionnement des équipements de forage, des pompes, des grues, ainsi que de l'ensemble des installations vitales de la plateforme.

L'électricité générée par ces moteurs est distribuée sous deux formes : en courant alternatif (CA) et en courant continu (CC). Les équipements de commande, d'éclairage, de ventilation, ainsi que certains systèmes auxiliaires et l'entraînement supérieur (top drive) fonctionnent majoritairement en courant alternatif. En revanche, les machines soumises à de fortes charges mécaniques, comme les treuils et les pompes à boue, requièrent une alimentation en courant continu pour bénéficier d'un contrôle plus précis de la vitesse et du couple moteur. Pour cela, une partie du courant alternatif est convertie en courant continu via des dispositifs spécialisés, tels que les redresseurs à contrôle de phase (SCR).[2]

### **II.9.2 Production et distribution de l'électricité – Système CA/CC**

L'énergie mécanique générée par les moteurs principaux est utilisée pour entraîner des alternateurs, qui produisent de l'électricité sous forme de courant alternatif (CA). Ce courant est ensuite dirigé vers un système de redresseurs à contrôle au silicium (SCR), chargé de le convertir en courant continu (CC). Ce courant continu alimente alors directement des moteurs à courant continu, qui transforment l'énergie électrique en énergie mécanique, indispensable au fonctionnement des équipements lourds de la plateforme.

Par ailleurs, une partie de ce courant continu est redirigée vers la salle du top drive, où il est reconvertis en courant alternatif à fréquence variable grâce à un onduleur VFD (Variable Frequency Drive). Ce système permet de réguler précisément la fréquence et la vitesse de rotation du moteur du top drive, offrant ainsi une grande flexibilité et un contrôle optimal des opérations de forage en fonction des conditions rencontrées dans le puits.

### **II.9.3 Compresseurs dans le système de puissance**

Sur une plateforme de forage, les compresseurs jouent un rôle essentiel dans le bon fonctionnement de plusieurs systèmes critiques. Ils fournissent l'air comprimé nécessaire au déclenchement des freins pneumatiques du treuil, à l'activation des actionneurs, ainsi qu'au nettoyage de certains circuits lorsque cela est requis.

Dans le système observé, ces compresseurs sont entraînés par des moteurs électriques à courant alternatif (CA), alimentés directement par les alternateurs des groupes électrogènes. Cette configuration supprime le besoin de conversion en courant continu, simplifiant ainsi la chaîne d'alimentation électrique.

Bien qu'ils n'interviennent pas directement dans le processus de forage, les compresseurs occupent une place stratégique au sein de la chaîne de puissance. Leur bon fonctionnement conditionne celui d'équipements majeurs tels que les treuils ou les pompes, ce qui en fait des éléments tout aussi indispensables à l'ensemble de l'installation.

#### **II.9.4 Appareils de forage à entraînement mécanique**

Il s'agit d'appareils de forage dont la source d'énergie provient d'un ou plusieurs moteurs à combustion interne. La puissance générée est transmise aux différents composants de l'appareil par des dispositifs mécaniques tels que des chaînes, des pignons, des embrayages ou des arbres de transmission. Ce type d'équipement est également désigné sous le terme générique d'appareil de forage mécanique.

Les appareils de forage terrestres de petite et moyenne taille utilisent fréquemment ce type d'entraînement. Leur principal avantage réside dans leur simplicité : ils sont relativement faciles à entretenir et à utiliser.

Cependant, cette technologie présente certaines limites, notamment une faible flexibilité en termes d'utilisation et d'implantation sur différents types de terrains ou configurations de sites.

#### **II.10 Conclusion**

Le présent chapitre a permis d'explorer les principaux composants et systèmes qui forment la structure fonctionnelle d'un appareil de forage. De la classification des appareils selon leur capacité et leur puissance au treuil, jusqu'à la description détaillée de la plate-forme, du système de circulation de la boue, des équipements de rotation, de levage, de contrôle du puits et de manipulation des tiges, chaque section a mis en évidence la complexité et l'interdépendance des sous-systèmes qui assurent le bon déroulement des opérations de forage. L'analyse des équipements mécaniques, hydrauliques et électriques, tout comme les technologies modernes telles que le top drive, a montré l'évolution continue des installations visant à améliorer la sécurité, la performance et la productivité des forages.

En outre, l'introduction des différents types d'actionneurs et systèmes d'énergie a permis de comprendre comment la puissance est générée, transformée et distribuée au sein de l'appareil.

# **Chapitre III : Etude technologique**

## **d'un Top Drive**

### III.1 Introduction

Le forage constitue une étape cruciale dans l'exploitation des ressources énergétiques souterraines, notamment le pétrole et le gaz. Les techniques de forage ont considérablement évolué au fil des décennies, passant de méthodes rudimentaires à des systèmes sophistiqués intégrant des technologies de pointe. Aujourd'hui, l'efficacité, la sécurité et la rentabilité des opérations de forage dépendent largement du choix et de la maîtrise des technologies utilisées.

Ce chapitre propose une étude technologique du Top Drive, une technologie qui a remplacé dans de nombreuses installations la table tournante conventionnelle.

### III.2 Définition Top drive

Le Top Drive est un système d'entraînement rotatif utilisé dans les opérations de forage pétrolier et gazier. Installé directement sur le derrick (tour de forage), il remplace la table tournante traditionnelle en permettant la rotation de la colonne de forage depuis le haut. Ce dispositif motorisé est suspendu au chariot de levage du mât de forage et peut se déplacer verticalement tout en faisant tourner la tige de forage.



Figure III.1 : Top Drive Bentec TD-500-XT

Le Top Drive permet non seulement de faire tourner la colonne de forage pour forer, mais aussi d'automatiser certaines opérations de vissage/dévissage des tiges, de manipuler des tiges de forage plus longues (stand de trois tiges), et de réduire le temps non productif. Il contribue à améliorer la sécurité, la performance et la flexibilité des opérations de forage.

Le Top Drive en anglais, signifiant "entraînement supérieur", est un équipement moderne fixé au mât qui assure la rotation de la garniture de forage via son arbre principal. Introduit récemment sur les appareils de forage, il remplace plusieurs équipements traditionnels comme le crochet, la tête d'injection, la table de rotation, la tige Kelly, le Kelly bushing et partiellement les clefs.

Le Top Drive assure trois fonctions essentielles à savoir, la rotation du train de tiges, la circulation du fluide de forage et les opérations de montée et descente des tiges.[2]

### **III.3 Historique du Top Drive**

Le Top Drive a vu le jour dans les années 1970, en réponse aux besoins croissants de sécurité, de rapidité et d'efficacité dans les opérations de forage. À cette époque, le système traditionnel de table tournante dominait les techniques de forage, mais il présentait plusieurs limitations en termes de flexibilité, de productivité et de sécurité.

#### **III.3.1 Début des solutions de remplacement**

Dans les années 1950-1960, la technique de forage se basait essentiellement sur une table tournante située sur la plateforme du sol, qui faisait tourner la colonne de forage à partir du bas. Cependant, cette méthode nécessitait des opérations manuelles complexes et était moins adaptée à des forages horizontaux ou directionnels. Les ingénieurs ont alors cherché des alternatives pour améliorer l'efficacité et la sécurité, notamment pour le forage en mer.

#### **III.3.2 Les premières expérimentations**

L'idée d'un système de rotation depuis le haut est apparue dans les années 1970, lorsqu'un certain nombre de compagnies de forage ont commencé à explorer la possibilité de faire tourner la colonne de forage à partir du sommet plutôt qu'à la base. Cela permettait non seulement de mieux contrôler la rotation, mais aussi de faciliter le mouvement de la colonne de forage tout en réduisant le besoin d'intervention humaine sur la plateforme.

La société Nabors Industries, un leader de l'industrie pétrolière, est l'une des premières à avoir développé un prototype de Top Drive à cette époque, bien que ces premiers modèles aient encore des limitations en termes de fiabilité et de coût. Ce système a initialement été testé sur des plateformes de forage offshore, où il a montré une nette amélioration en termes de sécurité et de performance.

### III.3.3 Développement et perfectionnement

Dans les années 1980, des versions plus robustes et plus fiables ont vu le jour, et le système a été de plus en plus adopté sur des plateformes offshore et onshore.

Les nouveaux modèles permettaient des rotations plus rapides, la gestion automatique des tiges de forage et une réduction significative des périodes d'arrêt.

Le premier modèle, le DDM650 (Derrick Drilling Machine d'une capacité de levage de 650 tonnes), équipé d'un moteur à courant continu, a été lancé en 1984.

L'évolution s'est poursuivie en 1987 avec l'introduction du Top Drive hydraulique, modèle DDM500/600 HYD. Toutefois, la demande pour un couple de rotation plus élevé a conduit à l'adoption de moteurs à courant alternatif.

Dans les années 1990, des entreprises comme Schlumberger et National Oilwell Varco (NOV) ont contribué à la commercialisation et à l'amélioration de la technologie du Top Drive, notamment en optimisant son design pour des applications plus larges et des conditions de forage plus extrêmes. Le Top Drive est alors devenu une technologie de référence dans le forage moderne.

### III.3.4 L'ère moderne

A partir des années 2000, le Top Drive est un équipement standard dans les opérations de forage complexes, qu'il s'agisse de forage en mer, de forages horizontaux ou de forages directionnels.

Les innovations récentes incluent des systèmes entièrement automatisés qui intègrent des capteurs pour la surveillance en temps réel des paramètres de forage, ainsi que des technologies avancées pour la gestion des données et l'optimisation des performances.[8],[4]

## III.4 – Les différents types de Top Drive

Dans l'industrie pétrolière, les Top Drives se déclinent en plusieurs modèles, classés selon leur constructeur ou en fonction du type de moteur d'entraînement utilisé.

### III.4.1 – Classification selon le fabricant

#### a) Canrig

Conçu spécifiquement pour les petits mâts, ce modèle intègre un système de manutention avancé permettant d'éliminer l'usage de la muserole et du système de stockage des tiges, optimisant ainsi les opérations de forage.

### b) Varco

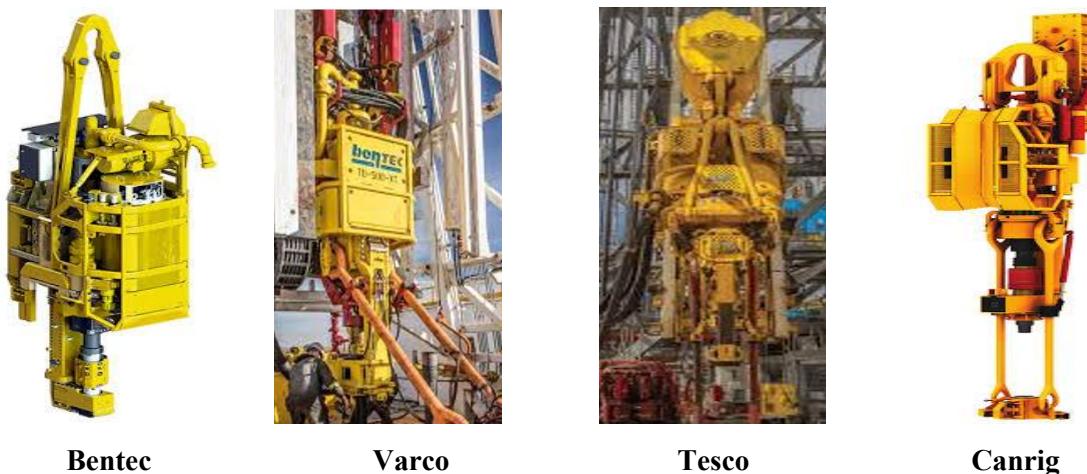
Ce modèle se distingue par sa simplicité. Il ne comporte pas de système hydraulique, mais il est équipé de deux moteurs à courant alternatif (AC), d'une glissière, d'un ventilateur et d'un manipulateur de tiges. Il conserve néanmoins l'utilisation du crochet et de la tête d'injection du système conventionnel.

### c) Bentec

Conçu pour opérer dans des conditions climatiques extrêmes, notamment à basse température, ce Top Drive dispose d'un système de contrebalancement performant, d'une grande capacité de Link Tilt, et se caractérise par un faible niveau sonore.

### d) Tesco

Comparable au modèle Canrig, il est également destiné aux petits mâts. Son système de manutention évolué permet de se passer de la muserole et du stockage des tiges, améliorant ainsi l'efficacité du processus de forage.



**Figure III.2 : Différents types de Top Drive selon le fabricant [8]**

#### III.4.2 – Classification selon le type de moteur d'entraînement

##### a) Top Drive à moteur hydraulique

Moins utilisés aujourd'hui, ces modèles présentent des inconvénients liés à l'entretien (multiplication des flexibles, joints, fuites d'huile) et à la sécurité (risques liés à la haute pression). Leur utilisation entraîne également des pertes de temps. Toutefois, certains composants hydrauliques restent intégrés dans les Top Drives modernes en raison de leur utilité.

##### b) Top Drive à moteur électrique

Devenus la norme actuelle, ces modèles sont plus compacts, faciles à entretenir et d'utilisation simple. On distingue deux types de moteurs :

- **Moteur à courant continu (DC)** : Offre un contrôle très précis grâce à une variation continue de la vitesse. Cependant, il est plus lourd, complexe à fabriquer et à entretenir.
- **Moteur à courant alternatif (AC)** : Plus léger et plus simple d'entretien. La variation de vitesse y est discrète, donc moins précise qu'avec un moteur DC, mais suffisante pour la plupart des applications

### III.5 – Rôle du Top Drive

Le Top Drive joue un rôle central dans les opérations de forage, en remplissant plusieurs fonctions essentielles que l'on peut regrouper en trois grandes catégories à savoir la rotation, la manipulation du train de tiges et la circulation du fluide de forage.

- **Rotation** : Grâce à son moteur électrique, le Top Drive assure la rotation de l'ensemble du train de tiges, permettant l'avancement du trépan dans le sous-sol.
- **Manipulation du train de tiges** : Le système permet la montée et la descente du train de tiges dans le puits. Il facilite également le serrage et le desserrage des connexions filetées à l'aide d'un système de couple renforcé, connu sous le nom de Torque Boost. Par ailleurs, les bras de levage (Link Tilts) permettent une manipulation précise et sécurisée des tiges.
- **Circulation du fluide de forage** : Le Top Drive permet l'injection continue du fluide de forage à travers le train de tiges, assurant ainsi le nettoyage du fond du puits, le refroidissement du trépan et le transport des déblais vers la surface. Il intègre aussi un système de freinage permettant de maintenir et de sécuriser la garniture de forage lorsque nécessaire.

### III.6 Avantages et les inconvénients du Top drive

Le Top Drive présente de nombreux avantages par rapport aux systèmes de forage traditionnels, notamment la table de rotation et la tige Kelly :

#### III.6.1 Avantages

- **Gain de temps significatif** : En éliminant la manipulation de la tige Kelly et en permettant le forage par triplets, le Top Drive réduit le temps de forage d'environ **25 %**.

- **Flexibilité opérationnelle** : Il autorise la connexion des tiges à n'importe quelle hauteur du mât, ce qui accroît l'efficacité des opérations.
- **Meilleure gestion des tiges** : Le système optimise la manutention du train de tiges, réduisant les efforts physiques requis et les risques d'accident.
- **Puissance de rotation accrue** : Le moteur du Top Drive fournit un couple de rotation plus variable et contrôlable que celui d'une table rotative conventionnelle.
- **Circulation continue du fluide** : Il permet la rotation de la garniture et la circulation du fluide de forage à tout moment, même lors des descentes et remontées, ce qui contribue à la prévention des incidents tels que les collages ou les éruptions.
- **Réduction du nombre de connexions** : Le forage par triplets diminue les opérations d'assemblage/désassemblage, réduisant ainsi les risques de fuites et les temps morts.
- **Application prolongée du couple** : Dans les modèles hydrauliques, le Top Drive permet un couple statique prolongé, utile pour certaines opérations de vissage ou de déblocage.
- **Meilleur alignement du puits** : Grâce à la stabilité accrue du train de tiges, il favorise le forage de puits plus verticaux.
- **Allègement du travail des accrocheurs** : En automatisant une partie des opérations de manutention, il réduit la pénibilité du travail au sol.

### III.6.2 Inconvénients

- **Coût de maintenance élevé** : La complexité du système implique des frais d'entretien importants.
- **Encombrement** : Les dimensions importantes du Top Drive peuvent compliquer son installation, surtout sur des structures existantes non conçues pour l'accueillir.
- **Poids supplémentaire** : Son poids additionnel augmente l'usure du câble de forage et impose des contraintes supplémentaires sur la structure du derrick.
- **Exigence en personnel qualifié** : Son utilisation nécessite une équipe formée et expérimentée.
- **Maintenance quotidienne** : Un entretien régulier est indispensable (lubrification, vérifications mécaniques, stabilisation).

- **Mobilité réduite** : En cas de changement de site, le Top Drive est plus difficile à transporter et nécessite souvent un démontage complet, ce qui engendre un surcroît de logistique.

### III.7 Principe de fonctionnement du Top Drive

Le Top Drive est un équipement central dans les opérations de forage pétrolier et gazier. Il permet l'automatisation de plusieurs fonctions clés à savoir l'injection de la boue de forage, la rotation de la colonne de forage, ainsi que la manipulation verticale et horizontale du train de tiges. Son fonctionnement repose sur l'intégration de plusieurs systèmes mécaniques et hydrauliques interconnectés.

#### III.7.1 Fonction de pompage

Le Top Drive est équipé d'une tête d'injection intégrée, fixée de manière permanente au moufle mobile du derrick. La boue de forage, essentielle pour refroidir le trépan, évacuer les déblais et maintenir la pression dans le puits, est injectée via un flexible haute pression. Ce fluide circule à travers un col de cygne (gooseneck), un tuyau coudé spécifique, pour atteindre le tube d'usure (wash pipe). La boue transite ensuite dans la colonne de forage jusqu'au trépan situé au fond du puits, assurant ainsi une circulation continue.

#### III.7.2 Fonction de rotation

Le Top Drive fournit la force de rotation nécessaire à la progression du forage.

Cette rotation est générée par un moteur, généralement électrique, qui transmet son mouvement à l'arbre principal par l'intermédiaire d'une boîte de vitesses.

Un raccord d'usure est fixé à la base de l'arbre pour en préserver l'intégrité et limiter l'usure des filetages, soumis à de fortes contraintes mécaniques.

Ce système permet une transmission efficace du couple et une réduction des opérations de maintenance.

#### III.7.3 Fonction de levage et d'abaissement

Le Top Drive est suspendu au moufle mobile du système de levage, à l'aide d'une anse de suspension. Il se déplace verticalement le long d'un rail de guidage fixé dans le derrick, garantissant une trajectoire rectiligne, stable et sécurisée.

Cette fonction assure un positionnement précis de la colonne de forage et facilite les opérations de descente et de remontée du train de tiges (*tripping*).

#### III.7.4 Fonction de manutention des tiges

Le Top Drive intègre un système de manutention automatisée des tiges, réduisant considérablement l'intervention manuelle et améliorant la sécurité.



**Figure III.3 : Poste de Commande [2]**

Des composants mécaniques spécialisés facilitent les opérations de manutention des tiges, ainsi le bras manipulateur guide et stabilise les tiges lors de leur connexion ou déconnexion avec la colonne de forage. L'élévateur quant à lui, permet de soulever ou d'abaisser les tiges avec précision. Un système d'inclinaison automatique des bras (*Link Tilt*) ajuste l'angle des bras pour aligner les tiges avec la table de travail ou les structures de stockage.

L'ensemble de ces systèmes est piloté par le chef de poste depuis une console de contrôle centralisée. Celui-ci peut manœuvrer à distance les bras manipulateurs et l'élévateur pour les orienter vers la zone de déchargement, où les tiges sont ensuite manipulées et positionnées avec précision, alignées et connectées à la colonne de forage ou déposées sur les racks de stockage situés le long des passerelles d'accrochage.

**Tableau III.1 : Dispositifs de sécurité et de contrôle**

Désignation	Abréviation	Rôle
Upper Well Control Valve	UWCV	vanne de contrôle située en partie haute, permettant de fermer le puits en cas d'urgence.
Lower Well Control Valve	LWCV	vanne située en bas, assurant la même fonction à l'interface avec le train de tiges.
Inside Blowout Preventer	IBOP	dispositif de sécurité interne, permettant de maîtriser une surpression soudaine dans le puits.
Clé de secours	<i>backup wrench</i>	utilisée pour visser ou dévisser les tiges de forage en cas de défaillance du système principal.

Ce contrôle automatisé améliore la sécurité, réduit la pénibilité des opérations manuelles et augmente la productivité sur le plancher de forage

### III.8 Présentation générale du Top Drive Bentec TD-500-XT

Le Top Drive Bentec TD-500-XT se distingue par sa conception robuste, modulaire et hautement intégrée, alliant des technologies mécaniques, électriques et hydrauliques avancées. Ce modèle est conçu pour répondre aux exigences les plus strictes des environnements de forage, y compris dans des conditions extrêmes telles que les basses températures.

Il permet non seulement d'optimiser la sécurité et la performance des opérations de forage, mais aussi de réduire les temps d'arrêt grâce à une maintenance facilitée et une architecture orientée vers la fiabilité.

**Tableau III.2 : Caractéristiques de Top Drive Bentec TD-500-XT [7]**

Puissance moteur	850 kW	Poids	15,7 tonnes
Moteur de forage	Moteur à induction AC	Pression de travail	517 bars
Vitesse à couple continu maximal	115 tr/min	Hauteur de travail	6,35 mètres
Vitesse maximale	230 tr/min	Largeur x profondeur	1,66 m x 1,55 m
Plage de température	-45 °C / +55 °C	Système de refroidissement	Ventilateur local
Capacité de levage et de rotation	500 tonnes / 454 tonnes métriques	Alimentation hydraulique	Embarquée

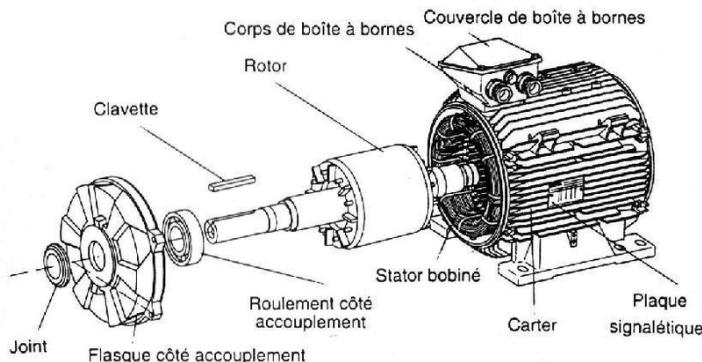
#### III.8.1 Moteur à induction AC

Le système d' entraînement du Top Drive repose sur un moteur à induction AC, dont la fonction principale est de fournir l'énergie mécanique nécessaire à la rotation de la tige de forage. Ce type de moteur est particulièrement adapté aux exigences du forage grâce à sa capacité à fournir un couple élevé à basse vitesse, ce qui permet de percer avec précision tout en assurant un contrôle optimal du couple, indispensable pour la maîtrise de la colonne de forage.

Sa réversibilité du sens de rotation est un atout essentiel pour les opérations de vissage et de dévissage des tiges. Par ailleurs, le moteur est conçu pour supporter les démarrages et arrêts fréquents, caractéristiques des cycles opérationnels du forage, sans compromettre sa durabilité ni ses performances.

Le moteur électrique utilisé dans le système Top Drive possède une puissance nominale de 1 140 chevaux, soit environ 850 kW. Il est compatible avec un variateur de fréquence (VFD), ce qui permet un contrôle précis de la vitesse et du couple, en fonction des besoins opérationnels du forage.

Ce moteur fonctionne généralement sous une tension d'alimentation comprise entre 600 V et 690 V AC, avec une fréquence de 50 Hz, adaptée aux standards industriels courants. Grâce à cette configuration, il offre une excellente adaptabilité aux conditions de forage variables, tout en garantissant performance et fiabilité.



**Figure III.4 : Moteur Asynchrone Triphasé [9]**

#### a) Caractéristiques techniques clés

- **Refroidissement** : Système de refroidissement forcé (air ou liquide), adapté aux environnements poussiéreux et à forte température.
- **Indice de protection** : IP55 ou supérieur, pour garantir l'étanchéité contre les poussières, l'eau et les vapeurs d'huile.
- **Surcharge admissible** : Jusqu'à 200 % pendant des périodes courtes (démarrage, déblocage de la tige, etc.).
- **Facteur de service (S.F.)** : 1.15 à 1.25 – Adapté aux charges continues avec pics de couple.

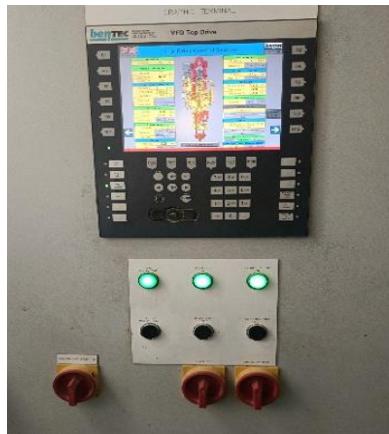
#### b) Avantages pour une utilisation Top Drive

- Grande fiabilité et longévité dans des conditions extrêmes (forage terrestre ou offshore).
- Compatibilité avec les systèmes de contrôle automatisés du Top Drive.
- Maintenance réduite, fonctionnement sans balais.

### III.8.2 Variateur de fréquence (VFD)

Le variateur de fréquence (VFD) est un système de commande électronique destiné à réguler la vitesse de rotation et le couple du moteur à induction AC en fonction des besoins de l'opération de forage. En ajustant la fréquence et la tension d'alimentation fournies au moteur, il permet une maîtrise précise des performances mécaniques, ce qui est essentiel pour :

- Adapter la vitesse de rotation aux différentes phases du forage (démarrage, forage en pleine charge, vissage/dévissage, etc.).
- Optimiser la consommation d'énergie et prolonger la durée de vie du moteur.
- Réagir rapidement aux variations de charge sur la tige de forage.
- Assurer une transition douce entre les phases de fonctionnement, limitant ainsi les chocs mécaniques.

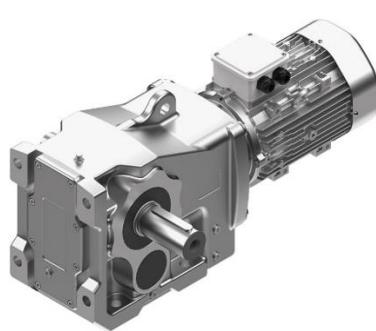


**Figure III.5 : Variateur de fréquence (VFD) [2]**

Le VFD est indispensable dans un système Top Drive moderne, où la précision, la sécurité et la flexibilité sont des critères critiques pour les performances de forage.

### III.8.3 Ensemble de Transmission et de Circulation du Fluide de Forage

Ce système comprend un réducteur à engrenages hélicoïdaux assurant une transmission de puissance efficace, fiable et silencieuse vers l'arbre principal. Ce dernier, de type creux avec un diamètre intérieur de 76,2 mm, permet à la fois le passage du fluide de forage (boue) et la connexion mécanique avec les tiges de forage.



Réducteur à engrenages hélicoïdaux



Swivel

**Figure III.6 : Système de transmission et de Rotation pour Forage[2]**

Un swivel intégré complète l'ensemble en autorisant la rotation continue de la colonne de forage tout en maintenant l'étanchéité et en garantissant le transfert optimal du fluide de forage sous pression.

### III.8.4 Systèmes de Sécurité et de Stabilisation pour Opérations de Forage

L'ensemble est équipé de dispositifs de sécurité et de stabilisation conçus pour optimiser les opérations de forage en conditions exigeantes. Le système Link-Tilt à haute sécurité, avec surveillance intégrée, permet l'inclinaison contrôlée des élingues, facilitant la manipulation des tiges tout en réduisant les risques pour les opérateurs.



**Figure III.7 : Système de sécurité mécanique et hydraulique en tête de forage[2]**

Les valves IBOP (Internal Blow Out Preventers), disponibles en versions manuelle et télécommandée, assurent une isolation rapide de la colonne de forage en cas de surpression ou d'incident. En complément, le Back-up Clamp permet le serrage et desserrage sécurisé des tiges, garantissant la fiabilité des connexions filetées. Enfin, la Guide Beam joue un rôle essentiel dans la stabilisation de la structure en absorbant les réactions de couple pendant la rotation, contribuant ainsi à la précision et à la sécurité globale du système.

### III.9 Environnement de Commande et d'Alimentation du Top Drive

La salle de contrôle regroupe l'ensemble des dispositifs nécessaires à la commande, à la sécurité et à la surveillance du Top Drive Bentec TD-500-XT. Elle comprend notamment un automate programmable industriel (API), une interface homme-machine (IHM), un centre de commande moteur (MCC), un transformateur abaisseur, un filtre harmonique, ainsi que tous les équipements de commande et de sécurité.

Afin de garantir un fonctionnement fiable, même dans des environnements extrêmes (très chauds ou très froids), un système de ventilation intégré assure le refroidissement du moteur et des composants électriques. De plus, une boucle de câbles dédiée assure une

connexion robuste entre le Top Drive et la salle de contrôle, capable de résister aux mouvements répétés de la tour de forage.

### III.9.1 Système électrique et hydraulique du Top Drive Bentec TD-500-XT

Le système de service électrique repose sur une boucle de service (Service Loop) composée de câbles et de connecteurs robustes assurant à la fois l'alimentation électrique et la transmission des signaux de commande entre le Top Drive et la salle de contrôle. Cette boucle garantit des communications stables et une commande à distance fiable, même dans des conditions difficiles.



Figure III.8 : Interfaces Électrique et Hydraulique du Système Top Drive[2]

En complément, le Top Drive intègre une unité hydraulique embarquée, éliminant le besoin de boucles hydrauliques externes. Cette solution compacte réduit l'encombrement, simplifie l'installation, améliore la sécurité et facilite la maintenance.

### III.9.2 Armoire électrique

Tous les composants électriques du système sont centralisés dans une armoire électrique dédiée, généralement installée dans la salle de contrôle. Cette armoire contient le API , le VFD (variateur de fréquence), les dispositifs de protection électrique, un transformateur pour l'adaptation de tension et des filtres harmoniques pour garantir la qualité de l'alimentation.



**Figure III.9 : Armoire électrique[2]**

Cette configuration modulaire et bien organisée facilite la maintenance, améliore l'accessibilité et protège l'ensemble des équipements contre les perturbations électriques.

### III.9.3 Automate programmable industriel (API)

Le API constitue le cœur du système de contrôle du Top Drive Bentec TD-500-XT. Il permet un pilotage précis du moteur via le VFD, la supervision continue des opérations de forage et le contrôle de paramètres critiques tels que la température, les vibrations et la consommation énergétique.

En cas d'anomalie, le API peut déclencher des mesures de sécurité automatiques, comme un arrêt d'urgence, afin de protéger les opérateurs et les équipements. Il est associé à une interface homme-machine (IHM) simple et intuitive, qui permet une surveillance en temps réel, un réglage aisément des paramètres, et une intervention rapide si nécessaire.

Compatible avec des protocoles de communication industriels standards tels que Modbus TCP et Profibus DP, le API peut être facilement intégré dans des systèmes de supervision à distance (SCADA), facilitant ainsi la maintenance prédictive, le diagnostic et l'analyse des performances.

### III.10 Conclusion

L'étude détaillée du Top Drive présentée dans ce chapitre met en lumière l'importance de cette technologie dans l'évolution des systèmes de forage modernes. En remplaçant les méthodes conventionnelles comme la table tournante, le Top Drive a permis des gains significatifs en termes de performance, de sécurité, de flexibilité et de temps d'exécution. Grâce à ses fonctionnalités avancées, à savoir la rotation, la circulation du fluide, l'automatisation de la manutention des tiges, il s'impose aujourd'hui comme un équipement essentiel dans les opérations de forage complexes, en particulier dans les environnements offshore et à forte contrainte.

Le cas du Bentec TD-500-XT, étudié plus spécifiquement, illustre parfaitement les avancées intégrées dans les modèles de dernière génération, entre autre la motorisation performante, le système de contrôle automatisé via API, la transmission optimisée, les composants de sécurité et l'architecture modulaire. L'intégration d'unités hydrauliques embarquées, de boucles de service électriques robustes et d'un environnement de commande centralisé permet une gestion efficace et fiable de l'ensemble des opérations.

En définitive, la technologie Top Drive constitue un levier stratégique dans l'optimisation des forages modernes. Sa maîtrise technique et sa bonne intégration dans l'ensemble de la chaîne de forage sont des facteurs déterminants pour améliorer la rentabilité, la sécurité et la durabilité des opérations pétrolières et gazières.

# **Chapitre IV : Optimisation énergétique du Top Drive**

## IV.1 Introduction

Au fil du temps, le système Top Drive a évolué pour répondre aux exigences croissantes de performance, de fiabilité et d'efficacité énergétique. Ce chapitre analysera les motorisations qui l'équipent, en comparant le moteur à courant continu (DC) et le moteur asynchrone triphasé (AC), tout en mettant en évidence l'importance de l'optimisation du facteur de puissance dans l'efficacité énergétique des entraînements électromécaniques. Enfin, une piste d'amélioration sera évoquée : l'intégration d'un moteur asynchrone à double étoile, offrant un meilleur rendement dans certains contextes industriels.

## IV.2 Notions fondamentales du Facteur de puissance

Le facteur de puissance ( $\cos \phi$ ) est un indicateur clé de l'efficacité énergétique dans les systèmes électriques. Il représente le rapport entre la puissance active, réellement utilisée pour effectuer un travail utile, et la puissance apparente, qui inclut également la puissance réactive nécessaire au maintien des champs magnétiques dans les équipements inductifs. Dans les applications industrielles telles que les systèmes de Top Drive, comprendre et optimiser ce facteur est essentiel pour améliorer la performance énergétique et réduire les coûts opérationnels.

### IV.2.1 Définition du facteur de puissance ( $\cos \phi$ )

Le facteur de puissance est défini comme le rapport entre la puissance active (P), mesurée en watts, et la puissance apparente (S), mesurée en voltampères (VA). Mathématiquement, il s'exprime par :

$$\cos \phi = \frac{P}{S}$$

Un facteur de puissance élevé indique une utilisation optimale de l'énergie, tandis qu'un facteur faible suggère des pertes énergétiques et une utilisation moins efficace de l'électricité fournie.

### IV.2.2 Importance et intérêt du facteur de puissance

Maintenir un facteur de puissance élevé présente plusieurs avantages significatifs qui sont :

#### a) Efficacité énergétique accrue

Un facteur de puissance proche de l'unité signifie que la majorité de l'énergie consommée est convertie en travail utile, réduisant ainsi les pertes énergétiques dans le système.

#### b) Réduction des coûts

Un bon facteur de puissance permet de diminuer les pertes dans les conducteurs et les transformateurs, ce qui se traduit par des économies sur la facture énergétique.

**c) Optimisation des équipements**

Un facteur de puissance élevé évite le surdimensionnement des installations électriques, permettant une utilisation plus rationnelle des ressources et une prolongation de la durée de vie des équipements.

**d) Conformité aux normes**

De nombreux fournisseurs d'énergie appliquent des pénalités aux consommateurs dont le facteur de puissance est inférieur à un seuil déterminé (souvent 0,85), incitant ainsi à l'amélioration de ce facteur.

**e) Stabilité du réseau**

Un bon facteur de puissance aide à maintenir la stabilité et la qualité de l'alimentation électrique, réduisant ainsi les fluctuations de tension et améliorant la fiabilité globale du réseau électrique.

### **IV.2.3 Impacts d'un mauvais facteur de puissance**

Un facteur de puissance faible peut entraîner plusieurs conséquences négatives :

**a) Augmentation des pertes d'énergie**

Une partie de l'énergie est utilisée pour maintenir les champs magnétiques, ce qui augmente les pertes dans le système.

**b) Surcharge des équipements**

Les câbles, transformateurs et autres équipements doivent supporter un courant plus élevé pour fournir la même puissance active, ce qui peut entraîner une usure prématuée et des coûts de maintenance accrus.

**c) Pénalités financières**

Les fournisseurs d'électricité peuvent facturer des surcoûts pour la puissance réactive consommée, augmentant ainsi les coûts opérationnels.

**d) Diminution de la capacité du réseau**

Un mauvais facteur de puissance peut limiter la capacité du réseau à fournir de l'énergie à d'autres consommateurs, nécessitant des investissements supplémentaires pour maintenir la stabilité du réseau.

**IV.3 Méthodes d'amélioration du facteur de puissance**

L'amélioration du facteur de puissance est essentielle pour optimiser l'efficacité énergétique des systèmes électriques, réduire les pertes et assurer la conformité aux normes de qualité de l'énergie. Plusieurs méthodes sont disponibles, chacune ayant ses spécificités et applications.

**IV.3.1 Compensation statique par batteries de condensateurs**

La compensation statique consiste à installer des condensateurs fixes en parallèle avec les charges inductives pour fournir de l'énergie réactive capacitive. Cette méthode est simple, économique et largement utilisée dans les installations industrielles.



**Figure III.1 : Condensateurs pour la correction du facteur de puissance**

Dans une installation industrielle utilisant un moteur de forage Top Drive, l'ajout de condensateurs fixes en parallèle avec le moteur peut fournir l'énergie réactive nécessaire, améliorant ainsi le facteur de puissance. Cela réduit les pertes dans les câbles et transformateurs, diminue la charge sur le réseau électrique et peut entraîner des économies substantielles sur les coûts énergétiques.

**a) Avantages**

Les condensateurs fixes sont faciles à installer et nécessitent peu de maintenance. Leur conception simple permet une mise en œuvre rapide et à faible coût, ce qui les rend

particulièrement adaptés aux installations industrielles avec des charges relativement constantes.

En fournissant localement l'énergie réactive nécessaire, les condensateurs fixes réduisent la quantité d'énergie réactive inductive demandée par les charges. Cela permet d'augmenter le facteur de puissance, réduisant ainsi les pertes d'énergie dans le système et améliorant l'efficacité globale de l'installation.

### **b) Inconvénients**

Comme inconvénients, les condensateurs fixes ne s'ajustent pas aux variations dynamiques de la charge dont un manque de flexibilité. Le risque de surcompensation peut survenir dans le cas où la charge est réduite et la compensation peut devenir excessive, entraînant des surtensions.

Les condensateurs peuvent interagir avec les harmoniques présentes dans le système, créant des résonances et endommageant les équipements.

### **IV.3.2 Compensation dynamique par variateurs à correction intégrée**

La compensation dynamique par variateurs à correction intégrée est une méthode moderne et efficace d'amélioration du facteur de puissance (FP), en particulier dans les installations industrielles équipées de moteurs asynchrones commandés par des variateurs de vitesse (VSD ou VFD – Variable Speed Drives).

Les variateurs de vitesse avec correction de FP intégrée sont conçus pour alimenter le moteur avec un courant proche d'un facteur de puissance unitaire ( $\approx 1$ ) en corrigeant automatiquement le déphasage entre le courant et la tension afin d'éliminer ou limiter la puissance réactive absorbée par le moteur.

Cela se fait grâce à des redresseurs commandés, des onduleurs performants, et souvent un contrôle vectoriel ou direct du couple qui permet un contrôle fin du courant moteur.

### **a) Avantages**

Avec cette méthode, la correction automatique et continue du facteur de puissance est assurée, quelles que soient les conditions de charge. Sans avoir recours à l'ajout de condensateurs externes, la qualité d'énergie se trouve améliorée et peut être adaptée aux charges variables et peut réduire la consommation énergétique globale par un meilleur contrôle du moteur.

**b) Inconvénients**

Le coût est plus élevé que les moteurs ayant une simple compensation par condensateurs et nécessite parfois des filtres d'harmoniques pour respecter les normes (EN 61000, IEEE 519). La maintenance est plutôt plus technique comparée à d'autres méthodes.

**IV.3.3 Utilisation de filtres actifs en présence d'harmoniques**

Les filtres actifs sont des dispositifs électroniques capables de détecter et d'annuler les courants harmoniques présents dans le système.

Son fonctionnement nécessite la détection avec une mesure en temps réel des courants harmoniques dans le système puis l'injection de courants de compensation en phase inverse pour annuler les harmoniques.

**a) Avantages**

Les harmoniques sont éliminés efficacement avec une large gamme de fréquences. Les filtres s'ajustent automatiquement aux variations du profil harmonique du système. La qualité de l'énergie est améliorée avec une réduction des perturbations et un prolongement de la durée de vie des équipements.

**b) Inconvénients**

Le coût se trouve normalement élevé compte tenu que les filtres actifs sont plus coûteux que les solutions passives. Un entretien régulier pour assurer leur performance optimale est nécessaire pour maintenir ses performances.

**IV.3.4 Compensation automatique avec régulateur de puissance réactive**

Les régulateurs de puissance réactive « Automatic Power Factor Correction » (APFC) sont des dispositifs qui ajustent automatiquement la compensation en fonction des variations de la charge.

Avec une mesure continue, il surveille en temps réel le facteur de puissance pour pouvoir assurer une commutation automatique des condensateurs fixes en fonction des besoins.

**a) Avantages**

Le facteur de puissance est maintenu proche de l'unité réduisant les pertes et les coûts énergétiques. C'est un procédé facile à intégrer dans les systèmes existants. Une économie d'énergie est ainsi obtenue grâce à la réduction de la consommation d'énergie réactive et entraînant une baisse des factures d'électricité.

### b) Inconvénients

Un risque de résonance est à prévoir dans le cas d'un mauvais dimensionnement et peut entraîner une amplification des harmoniques. Les composants actifs peuvent nécessiter un entretien périodique.

#### IV.3.5 Choix technologique : avantages et limites de chaque méthode

Le choix de la méthode d'amélioration du facteur de puissance dépend de plusieurs facteurs, tels que la nature de la charge, les variations de la demande, la présence d'harmoniques et les contraintes budgétaires.

**Tableau IV.1 : Choix de la méthode d'amélioration du facteur de puissance**

Méthode	Avantages	Inconvénients
<b>Condensateurs fixes</b>	Coût faible, simplicité	Manque de flexibilité, risque de surcompensation
<b>SVC</b>	Réponse rapide, régulation précise	Coût élevé, complexité
<b>SVG</b>	Réduction des harmoniques, adaptabilité	Coût très élevé, nécessite un contrôle sophistiqué
<b>Filtres actifs</b>	Elimination efficace des harmoniques	Coût élevé, maintenance
<b>APFC</b>	Optimisation automatique	Risque de résonance, entretien

#### IV.3.6 Simulation d'un cas d'amélioration sur le Top Drive Bentec TD-500-XT

Les systèmes de top drive sont essentiels dans les opérations de forage, où la gestion efficace de l'énergie est cruciale. Le moteur, composant clé de ces systèmes, influence directement le facteur de puissance ( $\cos \varphi$ ) de l'installation. Un facteur de puissance faible entraîne des pertes d'énergie, une surcharge des transformateurs et des coûts supplémentaires liés à la consommation de puissance réactive.

Pour illustrer l'impact des différentes méthodes de compensation, une simulation a été réalisée sur le système d'entraînement Top Drive Bentec TD-500-XT.

Les résultats montrent que :

- **Avant compensation** : Le facteur de puissance était de «  $\cos(\Phi) = 0,78$  », entraînant des pertes énergétiques significatives et des coûts élevés.
- **Après compensation avec SVC** : Le facteur de puissance a augmenté à «  $\cos(\Phi) = 0,95$  », réduisant les pertes et améliorant l'efficacité.

- **Après compensation avec filtre actif** : Le facteur de puissance a atteint «  $\cos(\Phi) = 0,98$  », avec une réduction notable des harmoniques et une amélioration de la qualité de la puissance.

Les condensateurs fixes sont particulièrement efficaces dans le cas où l'installation ait des charges relativement constantes, telles que des moteurs fonctionnant à une vitesse fixe. Le budget alloué pour l'installation est à prendre en compte dans le choix de la technique de compensation.

#### IV.4 Comparaison des moteurs utilisés dans les Top Drive

L'entraînement Top Drive, composant essentiel des équipements de forage pétrolier, a connu une évolution marquante au fil des décennies, notamment en ce qui concerne la motorisation. Initialement, ces systèmes utilisaient principalement des moteurs à courant continu (DC). Ces moteurs étaient largement choisis pour leur capacité à fournir un couple élevé à faible vitesse et pour la simplicité de leur régulation, particulièrement adaptée aux exigences des opérations de levage et de rotation dans les forages.

##### IV.4 .1 Moteur à courant continu (DC)

Un moteur à courant continu (ou moteur DC) est une machine électrique qui convertit l'énergie électrique en courant continu en énergie mécanique, généralement sous forme de rotation d'un arbre. Ce fonctionnement repose sur l'action d'un champ magnétique sur un courant circulant dans des conducteurs. Le moteur DC s'appuie sur deux principes physiques fondamentaux, à savoir la loi de Laplace, selon laquelle un conducteur parcouru par un courant placé dans un champ magnétique subit une force mécanique, et la commutation mécanique assurée par un collecteur, permettant de maintenir un couple moteur constant dans un même sens de rotation.

Le moteur à courant continu se compose principalement d'un stator, qui génère le champ magnétique, et d'un rotor ou induit contenant les conducteurs parcourus par le courant. Le collecteur ou commutateur joue un rôle essentiel en inversant le courant dans les bobines à chaque demi-tour, tandis que les balais ou charbons assurent le contact électrique entre l'alimentation et le rotor en rotation.

Il existe plusieurs types de moteurs à courant continu, selon le mode d'excitation du champ magnétique entre autres, le moteur à excitation indépendante, le moteur à excitation

série, le moteur à excitation shunt (ou dérivation) et le moteur à excitation composée, qui combine les deux précédents.[10]

### **a) Avantages des moteur à courant continu**

Le moteur à courant continu (DC) se caractérise par sa capacité à ajuster la vitesse avec précision simplement en faisant varier la tension d'alimentation. Cette particularité en fait un choix idéal pour les applications nécessitant un contrôle fin de la vitesse.

Il est également très apprécié pour sa capacité à fournir un couple élevé dès le démarrage, ce qui le rend adapté aux charges lourdes ou aux démarrages en charge.

Sa rapidité de réponse aux variations de charge le rend efficace dans les situations où les changements de régime sont fréquents.

De plus, le moteur DC offre un fonctionnement stable même à basse vitesse, tout en maintenant une bonne régulation, ce qui est essentiel dans les applications exigeant de la précision.

### **b) Inconvénients des moteur à courant continu**

L'usure des balais et collecteur devient l'inconvénient majeurs nécessitant un entretien fréquent. Ces moteurs sont moins adaptés aux puissances très élevées.

Le MCC est moins robuste dans les environnements hostiles où la poussière, l'humidité ou l'atmosphère explosive peuvent détériorer les balais ou provoquer des étincelles. En raison de l'entretien et du remplacement des pièces d'usure, le coût devient plus élevé à long terme.

#### **IV.4.2 Moteur asynchrone triphasé (AC)**

Le moteur à induction AC, aussi appelé moteur asynchrone, est largement utilisé dans l'industrie en raison de sa construction simple, robuste et économique, ainsi que de sa fiabilité. Son fonctionnement repose sur le principe de l'induction électromagnétique où un champ magnétique tournant est créé par le courant alternatif circulant dans les bobinages du stator, ce champ induit des courants dans le rotor, lesquels produisent une force électromagnétique mettant le rotor en mouvement.

Contrairement aux moteurs synchrones, le rotor tourne à une vitesse légèrement inférieure à celle du champ statorique, un phénomène appelé glissement.

Ce type de moteur est apprécié pour son faible besoin en maintenance (car sans balais ni collecteur), sa bonne efficacité énergétique et son adaptabilité via des variateurs de

fréquence. Il est omniprésent dans les domaines tels que le pompage, la ventilation, l'usinage, le transport, ou encore les appareils électroménagers.

En revanche, il présente quelques limites, comme un couple de démarrage plus faible et un contrôle de vitesse plus complexe comparé aux moteurs à courant continu.[9]

#### a) Avantages du moteur à induction AC

Le moteur asynchrone (MAS) est un moteur robuste, simple à construire et sans balais ni collecteur, ce qui limite les risques de panne et réduit considérablement l'usure des pièces. Il nécessite donc peu d'entretien, ce qui en fait une solution fiable sur le long terme. Sa résistance aux environnements industriels difficiles, tels que la poussière, l'humidité ou les vibrations, en fait un moteur très apprécié dans l'industrie. Par ailleurs, son coût de fabrication et d'exploitation relativement faible en fait une option économiquement avantageuse. Le MAS offre également un bon rendement énergétique, en particulier lorsqu'il est associé à un variateur de fréquence, ce qui permet d'optimiser ses performances tout en réduisant la consommation d'énergie.

#### b) Inconvénients du moteur à induction AC

Le principal inconvénient du moteur asynchrone classique utilisé dans les Top Drives réside dans son mauvais facteur de puissance ( $\cos \varphi$ ), notamment lorsqu'il fonctionne à charge partielle. Ce faible facteur de puissance entraîne une surconsommation de puissance apparente, ce qui provoque des pertes supplémentaires dans les câbles et les transformateurs.

Ces pertes peuvent non seulement diminuer le rendement global de l'installation, mais aussi conduire à d'éventuelles pénalités financières imposées par le fournisseur d'électricité. À cela s'ajoute un manque de précision dans le contrôle du couple, ce qui peut poser problème dans des applications nécessitant un pilotage fin et stable de la machine.

### IV.4.3 Comparaison entre le MCC et le MAS triphasé

Les moteurs à courant continu ont longtemps été prisés pour leur excellent contrôle de vitesse et leur couple élevé, notamment dans les applications industrielles exigeantes. Cependant, avec l'évolution des technologies, ils ont progressivement été remplacés par les moteurs à induction en courant alternatif (AC), qui sont plus simples, robustes et économiques. Ces moteurs fonctionnent grâce à un champ magnétique tournant, généré dans le stator, qui induit des courants dans le rotor, provoquant ainsi sa rotation. Leur fiabilité, leur faible besoin en maintenance et leur bon rendement global en font une solution largement adoptée dans l'industrie moderne.

**Tableau IV.2 : Tableau comparatif**

Critère	Moteur DC	Moteur Asynchrone AC
Précision de contrôle	Très élevée	Moyenne à bonne
Maintenance	Élevée	Faible
Robustesse	Moyenne	Très bonne
Coût	Élevé	Moyen à faible
Facteur de puissance	Bon à pleine charge	Variable
Utilisation avec VFD	Non courant	Très courant
Rendement global	85–90 %	90–96 % avec VFD
Durée de vie	Moyenne	Longue

Toutefois, malgré ces nombreux avantages, notamment la simplicité de conception, la robustesse, l'entretien réduit et l'efficacité énergétique, les moteurs à induction AC présentent également certains inconvénients.

L'un des principaux réside dans leur consommation de puissance réactive, indispensable à la création du champ magnétique tournant. Cette énergie, bien qu'essentielle au fonctionnement du moteur, ne produit aucun travail mécanique utile. Elle surcharge le réseau électrique et peut entraîner une détérioration du facteur de puissance, ce qui, à grande échelle, peut avoir un impact économique et énergétique non négligeable.

#### **IV.5 Remplacement par un moteur asynchrone à double étoile**

Le remplacement du moteur asynchrone triphasé classique par un moteur asynchrone à double étoile représente une alternative pertinente pour améliorer la performance énergétique et la stabilité du système, notamment dans les applications exigeantes comme le Top Drive.

##### **IV.5.1 Proposition d'un moteur asynchrone à double étoile**

Le moteur à double étoile est une variante du moteur asynchrone triphasé, équipée de deux enroulements statoriques identiques, répartis dans deux circuits distincts connectés chacun en étoile. Ces enroulements sont généralement décalés de  $30^\circ$  électriques, ce qui permet d'optimiser la distribution du champ magnétique et d'améliorer l'efficacité globale de la machine.

#### IV.5.2 Justification technique du remplacement

L'un des avantages majeurs de cette configuration est la réduction significative de la puissance réactive consommée, permettant ainsi une amélioration notable du facteur de puissance, qui peut atteindre 0,95 ou plus sans nécessiter de dispositifs de compensation externes.

Cette amélioration se traduit également par une meilleure stabilité du réseau électrique, en limitant les fluctuations liées à la consommation de puissance réactive.

Le moteur à double étoile permet également de réduire les courants d'appel au démarrage grâce à un effet de soft start naturel, ce qui diminue les contraintes électriques sur l'installation. Il offre également une meilleure répartition thermique, prolongeant ainsi la durée de vie de la machine, et présente une bonne stabilité à basse vitesse, un critère essentiel dans les cycles fréquents d'arrêt/redémarrage typiques des systèmes de forage.

#### IV.5.3 Comparaison des performances

Comparé au moteur asynchrone triphasé classique, le moteur à double étoile affiche de meilleures performances électriques et mécaniques à savoir:

- Un facteur de puissance supérieur,
- Une diminution des pertes énergétiques,
- Un couple de démarrage plus élevé,
- Une réduction des échauffements internes,
- Une qualité de puissance améliorée avec moins de perturbations harmoniques.

Ces atouts le rendent particulièrement adapté aux environnements de travail sévères et aux opérations à régime variable comme celles rencontrées dans les systèmes Top Drive.

#### IV.5.4 Impact sur le rendement global du système

Grâce à son meilleur rendement énergétique, le moteur à double étoile permet de réduire la consommation globale d'énergie du système.

Lorsqu'il est couplé à un variateur de fréquence (VFD) adapté, le contrôle de la vitesse et du couple devient plus précis, permettant d'adapter la consommation à la charge réelle et de minimiser les pertes énergétiques.

Ainsi, l'intégration de ce type de moteur contribue directement à l'optimisation de la performance globale du système de forage, tout en réduisant les coûts d'exploitation.

#### IV.5.5 Faisabilité technique et économique

Concernant l'intégration dans un système Top Drive, quelques adaptations mécaniques peuvent être nécessaires, notamment au niveau de l'interface de l'arbre moteur. D'un point de vue électrique, l'utilisation d'un variateur de fréquence adapté à double sortie ou à pilotage différencié des deux circuits statoriques est recommandée.

Bien que le coût initial d'un moteur à double étoile soit légèrement plus élevé que celui d'un moteur classique, cet investissement est largement compensé par les gains en efficacité, la réduction des pertes, la diminution des coûts d'entretien, et l'amélioration de la durée de vie de l'installation.

Ces facteurs font du moteur à double étoile une solution techniquement viable et économiquement rentable pour les applications industrielles exigeantes comme le Top Drive.

#### IV.6 Amélioration du facteur de puissance : Cas du Top Drive Bentec TD-500-XT

L'amélioration du facteur de puissance est une démarche essentielle pour optimiser la performance énergétique d'un système électromécanique comme le Top Drive Bentec TD-500-XT. Un facteur de puissance insuffisant entraîne des surcharges dans les réseaux électriques, une consommation excessive de puissance apparente, des pertes supplémentaires dans les câbles et transformateurs, ainsi que des coûts financiers accrus. Une correction ciblée permet d'améliorer l'efficacité globale du système.

##### IV.6.1 Analyse énergétique du moteur actuel utilisé dans le Top Drive

Tableau IV.3 : Données de départ

Puissance active (P)	P	850 kW
Facteur de puissance initial	$\cos \varphi$	0,82
Tension d'alimentation	U	690 V
Fréquence	f	50 Hz
<b>Objectif de correction</b>	$\cos \varphi'$	<b>0,95</b>

##### a) Calcul de la puissance apparente (S) actuelle

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{850}{0,82} = 1036,6 \text{ kVA}$$

**b) Calcul de la puissance réactive actuelle (Q)**

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{1036.6^2 - 850^2} \approx 630.6 \text{ kVAR}$$

**IV.6.2 Calcul de la compensation nécessaire**

**a) Nouvelle puissance apparente avec  $\cos \varphi = 0,95$**

$$S' = \frac{P}{\cos \varphi'} = \frac{850}{0.95} = 894.7 \text{ kVA}$$

**b) Nouvelle puissance réactive Q'**

$$Q' = \sqrt{S'^2 - P^2} = \sqrt{894.7^2 - 850^2} \approx 274.5 \text{ kVAR}$$

**c) Compensation nécessaire**

$$Q_c = Q - Q' = 630.6 - 274.5 = 356.1 \text{ kVAR}$$

**d) Conclusion**

Pour ramener le facteur de puissance de 0,82 à 0,95, il faut ajouter une capacité de compensation d'environ 356 kVAR, typiquement réalisée à l'aide de condensateurs ou d'un système de correction automatique du facteur de puissance.

Voici un tableau comparatif clair avant et après amélioration du facteur de puissance pour le Top Drive Bentec TD-500-XT :

**Tableau IV.4 : Tableau comparatif – Amélioration du facteur de puissance**

Paramètre	Avant amélioration	Après amélioration
Puissance active (P)	850 kW	850 kW
Facteur de puissance ( $\cos \varphi$ )	0,82	0,95
Puissance apparente (S)	1 036,6 kVA	894,7 kVA
Puissance réactive (Q)	630,6 kVAR	274,5 kVAR
Compensation nécessaire	–	356,1 kVAR

**IV.6.3 Impact de l'amélioration proposée**

L'amélioration du facteur de puissance du moteur du Top Drive a des impacts directs et mesurables sur la performance du système :

**a) Réduction de la puissance apparente**

- De 1 036 kVA à 895 kVA, soit une diminution de plus de 13,6 %
- Permet d'alléger la charge sur les transformateurs, les disjoncteurs et les câbles

**b) Amélioration du rendement énergétique**

- Moins de puissance réactive à transporter ce qui entraîne une réduction des pertes en ligne
- Moins d'échauffements dans les équipements

**c) Baisse des coûts d'exploitation**

- Moins de consommation d'énergie inutile
- Suppression des pénalités financières liées à un mauvais facteur de puissance

**d) Meilleure stabilité du réseau interne :**

- Réduction des fluctuations de tension
- Moins de perturbations pour les autres équipements sensibles

**e) Compatibilité avec un moteur à double étoile :**

- Cette amélioration peut également être atteinte sans compensation externe en optant pour un moteur asynchrone à double étoile, qui naturellement présente un meilleur cos φ (jusqu'à 0,98), et offre une solution plus fiable à long terme

**IV.6.4 Résumé technique de l'amélioration du facteur de puissance**

Pour compenser 356,1 kVAR de puissance réactive, le passage du facteur de puissance de 0,82 à 0,95 permet de réduire la puissance apparente de 13,7 %. Cette optimisation allège la charge supportée par les équipements électriques (transformateurs, câbles, disjoncteurs), diminue les pertes d'énergie (effet Joule), et supprime les pénalités financières liées à un faible cos φ.

La correction peut être mise en œuvre de deux manières :

- **Par ajout de batteries de condensateurs**, contrôlées automatiquement si nécessaire,

- **Ou naturellement grâce à un moteur asynchrone à double étoile**, qui offre un facteur de puissance élevé (proche de 0,98) sans nécessiter de dispositifs de compensation externes.

#### IV.7 Conclusion

L'analyse approfondie menée dans ce chapitre a mis en lumière l'importance cruciale de l'optimisation énergétique dans les systèmes de Top Drive, en particulier dans des contextes industriels exigeants tels que les opérations de forage pétrolier. La maîtrise du facteur de puissance ( $\cos \phi$ ) s'est révélée être un levier stratégique pour améliorer l'efficacité globale du système, réduire les pertes énergétiques, limiter les surcharges des équipements, et alléger les coûts d'exploitation.

En comparant les moteurs à courant continu (DC) et les moteurs asynchrones triphasés (AC), il apparaît que bien que les moteurs DC soient précis, leur maintenance complexe les rend moins avantageux que les moteurs AC, surtout lorsqu'ils sont associés à des variateurs de fréquence. Toutefois, ces derniers souffrent souvent d'un facteur de puissance défavorable, particulièrement à charge partielle.

L'étude de cas sur le Top Drive Bentec TD-500-XT a permis de quantifier les bénéfices concrets d'une correction du facteur de puissance de 0,82 à 0,95 : une réduction de la puissance apparente de plus de 13 %, une baisse de la puissance réactive de 356 kVAR, et un allègement notable des contraintes sur les infrastructures électriques. Ces gains peuvent être obtenus soit par l'ajout de batteries de condensateurs, soit de façon plus durable en adoptant un moteur asynchrone à double étoile, qui améliore naturellement le facteur de puissance tout en assurant une meilleure stabilité du système.

Ainsi, cette démarche d'optimisation énergétique, alliant analyse technique, correction capacitive et choix technologique judicieux, s'inscrit pleinement dans une logique de performance industrielle durable, où efficacité rime avec rentabilité et fiabilité.

## **Conclusion générale**

### Conclusion générale

Au terme de cette étude, il ressort que le forage pétrolier constitue un système technico-industriel complexe, fondé sur une interaction étroite entre plusieurs sous-ensembles mécaniques, hydrauliques, électriques et automatisés. Chaque composant, de la plateforme de surface jusqu'aux équipements de fond de puits, joue un rôle essentiel dans la réussite des opérations, tant sur le plan technique qu'économique et environnemental.

L'évolution constante des exigences du secteur a conduit à une transformation progressive des appareils de forage, désormais orientée vers des solutions à plus haute performance, à sécurité renforcée et à efficacité énergétique optimisée. Parmi les innovations les plus marquantes figure le top drive, qui remplace les dispositifs de rotation traditionnels tels que le kelly ou la table tournante. Cette technologie offre une meilleure maîtrise des opérations de vissage et de dévissage, une réduction significative des temps non productifs, ainsi qu'un gain de sécurité et de fiabilité grâce à une automatisation accrue.

Par ailleurs, l'intégration de systèmes de contrôle avancés (SCR-DC), de freins électromagnétiques et de moteurs asynchrones à double étoile s'inscrit dans une logique d'optimisation des performances énergétiques et de maintenance. Ce dernier, notamment, permet une gestion dynamique du couple moteur, une réduction des pertes joules, ainsi qu'un meilleur rendement global, tout en s'adaptant parfaitement aux systèmes de commande modernes.

Ainsi, la maîtrise technologique des systèmes de forage, couplée à une démarche d'innovation continue, apparaît comme un levier stratégique pour améliorer la compétitivité, la sécurité et la durabilité des opérations pétrolières. Dans un contexte énergétique mondial en profonde mutation, caractérisé par une pression croissante sur les ressources et une exigence accrue de responsabilité environnementale, l'ingénierie des équipements de forage doit s'inscrire dans une approche intégrée, prospective et résolument orientée vers la performance durable.

# **Bibliographie**

### Bibliographie

- [1] Site Web : <http://www.entp.dz> .
- [2] ENTP ‘ Catalogue des appareils de forage TP139 ‘.
- [3] Wikipédia. (2023). Hassi Messaoud. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Hassi\\_Messaoud](https://fr.wikipedia.org/wiki/Hassi_Messaoud)
- [4] Sonatrach, " Cours d'équipement de forage ".
- [5] Site Web : <https://www.osha.gov/SLTC/etools/oilandgas>.
- [6] Skalle, P. (n.d.). Associate Professor, Department of Petroleum Engineering and Applied Geophysics, NTNU.
- [7] Bentec GmbH. top drives. Flyer PDF, Bentec, s.d. Site Web : [https://www.bentec.com/pdf\\_files/topdrive-flyer\\_491\\_1.pdf](https://www.bentec.com/pdf_files/topdrive-flyer_491_1.pdf) .
- [8] DOGHMANE-ILYES ‘Etude et amelioration de la strategie de la commande d'un top drive modele canrig 1050 e500 au niveau de ENTP’ Mémoire d'ingénieur, université badji mokhtar annaba 2017.
- [9] Caron, J.-P., & Hautier, J.-P. (1995). Modélisation et commande des machines asynchrones. Paris : Éditions Technip.
- [10] Piou, M. (2014, 9 avril).la machine à courant continu (édition 20/10/2015).
- [11] site web : <https://fr.scribd.com/document/475260526/1320-UE-dwks-pl-pdf> .
- [12] site web : <https://fr.scribd.com/document/104757328/HHF-1600> .
- [13] site web : <https://fr.scribd.com/presentation/331062493/Drilling-Equipment> .

## Résumé

Ce mémoire de fin d'études porte sur l'étude technologique et énergétique des systèmes de forage utilisant le Top Drive, un équipement moderne remplaçant la table rotative traditionnelle dans les opérations de forage pétrolier. Après une présentation de l'Entreprise Nationale des Travaux aux Puits (ENTP), l'étude détaille les différents composants des appareils de forage, les fonctions techniques du Top Drive, ses avantages comparatifs, ainsi que les méthodes d'optimisation énergétique par amélioration du facteur de puissance. Une attention particulière est portée à la performance des moteurs et à la modernisation des équipements pour accroître l'efficacité opérationnelle.

**Mots clés :** Top Drive, forage pétrolier, ENTP, optimisation énergétique, facteur de puissance.

## Abstract

This thesis focuses on the technological and energy-related study of drilling systems using the Top Drive, a modern device that replaces the traditional rotary table in oil drilling operations. After presenting the National Well Works Company (ENTP), the study details the various components of drilling rigs, the technical functions of the Top Drive, its comparative advantages, and methods of energy optimization through power factor improvement. Particular attention is given to motor performance and equipment modernization to enhance operational efficiency.

**Keywords:** Top Drive, oil drilling, ENTP, energy optimization, power factor.