

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE  
Département : GENIE MECANIQUE  
Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
Filière : GENIE MECANIQUE  
Spécialité : INGENIERIE DE MAINTENANCE

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de  
Master

### Thème:

**Contribution à l'amélioration de la durée de vie des appareils  
de forage au sein de l'Entreprise ENTP**

Présenté par : BOUHADJERA TAYEB

Encadrant : KHELIF RABIA

Professeur

UBMA

### Jury de Soutenance :

LAISSAOUI RACHID	MAA	UBMA	Président
KHELIF RABIA	Professeur	UBMA	Encadrant
KALLOUCH ABDELKADER	MCB	UBMA	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023

## Remerciements

*Toute ma gratitude et mes remerciements vont à Allah, notre créateur, le clément et le miséricordieux qui nous a donné la raison, la patience, le courage et la volonté pour surmonter tous les obstacles et les difficultés durant nos années d'études et d'avoir éclairé notre chemin afin de réaliser ce modeste travail.*

*Je remercie très sincèrement le Pr. Khelif Rabia, mon professeur, d'avoir encadré ma thèse, je tiens à lui exprimer mes profonds respects et mes respectueuses grâces pour ses orientations, sa patience et le soutien qu'il m'a accordé durant l'élaboration de ce Master.*

*Aussi, je tiens à remercier chaleureusement les Enseignants du Département de Génie mécanique et je leur exprime toute ma reconnaissance et ma gratitude.*

*Je remercie, les membres de jury qui auront la patience et l'amabilité d'accepter d'évaluer mon travail.*

*Pour terminer, je tiens à remercier mes parents et mes frères pour m'avoir soutenu et encouragé tout le long de mes études.*

Tayeb



## *Dédicace*

*Je dédie ce travail et fruit de mes années d'études du primaire à la faculté à toutes les chères personnes de ma vie:*

*Ma Maman et Mon Papa,*

*Mes frères Mehdi et Achraf,*

*Mes petits neveux Mohamed et Ayoub,*

*Mon oncle Haoues et son fils youcef,*

*Toute ma famille Bouhadjera et Sedda,*

*Tous mes professeurs et éducateurs du primaire à l'Université et notamment le Pr. Khelif Rabia.*

*A la mémoire de mes professeurs Benghersallah Mohieddine et Zeghib Nacer Eddine, que Dieu le miséricordieux accueille leurs âmes dans son vaste paradis.*

*Tayeb*



## Table des matières

	<b>Sommaire</b>	4
	- <b>Liste des figures</b>	5
	- <b>Liste des tableaux</b>	7
	- <b>Liste des abréviations</b>	8
	<b>Introduction générale</b>	10
<b>Chapitre un:</b>	<b>Généralités</b>	12
	I.1 <b>Introduction</b>	13
	I.2 <b>Organisation de l'Entreprise</b>	14
	I.3 <b>Plan Stratégique</b>	19
	I.4 <b>Généralités sur les Appareils de forage</b>	20
	I.4. 1. Mission d'un Appareil de forage	20
	I.4. 2. Description d'un Appareil de forage	21
	I.4. 3. Classification des Appareils de forage	32
	I.4. 4. Spécifications d'un Appareil de forage	33
	I.4. 5. Les Diverses fonctions d'un Appareil de forage (Motrice, Rotation, Levage, Pompage, Sécurité aux puits	38
	I.4. 6. Fluide de forage	44
<b>Chapitre deux:</b>	<b>Management de la Maintenance dans les Entreprises de forage</b>	47
	II.1. <b>Généralités</b>	48
	II.1.1. Les Objectifs de la Maintenance	48
	II.1.2. Les Objectifs Stratégiques	49
	II.1.3. Les Missions de la Maintenance	50
	II.1.4. Politique de la Maintenance	51
	II.1.5. Méthodes de Maintenance	53
	II.1.6. La Fiabilité et la Sécurité	55
	II.1.7. L'Amélioration Continue en Maintenance	72
	II.1.8. Processus de Maintenance	73
	II.1.9. Programmation des Travaux de Maintenance	75
	II.1.10. Externalisation des Opérations de Maintenance	77
	II.1.11. La Sous-traitance	78
	II.2. <b>Exploitation et Maintenance des Equipements de forage</b>	79
<b>Chapitre trois:</b>	<b>Fiabilisation des trains de sonde</b>	81

III.1.	<b>Etude des causes de défaillance des trains de sonde</b>	82
III.2.	<b>Notions de fiabilité des structures</b>	90
III.3.	<b>Fiabilité des trains de sonde</b>	97
<b>Chapitre quatre:</b>	<b>Contribution à l'Amélioration de la durée de vie des trains de sonde</b>	101
IV.1.	<b>Durée de vie des trains de sonde:</b>	102
IV.1.1	Paramètres de calcul	102
IV.1.2	Amélioration de la Durée de Vie	110
IV.2.	<b>Analyse des coûts</b>	117
IV.3.	<b>Plan de Maintenance</b>	120
	<b>Conclusion générale</b>	122
	<b>Bibliographie</b>	127

### Liste des figures

**Figure01:** Courbes de répartition de la consommation mondiale d'énergie

**Figure I.1:** Gisements découverts 1952- 1956 Sud de l'Algérie

**Figure I.2:** Schéma Historique ENTP

**Figure I.3:** Schéma Directeur de la Macrostructure de l'ENTP

**Figure I.4:** Parc appareils de forage et Work-over ENTP

**Figure I.5:** DTM (Démontage, Transport et Montage- Rig Move)

**Figure I.6:** Camp de vie

**Figure I.7:** Les trois types de forage

**Figure I.8:** Description de l'appareil de forage

**Figure I.9:** Plan de masse d'un appareil de forage

**Figure I.10:** Mât & Plateforme du moufle fixe

**Figure I.11:** Substructure

**Figure I.12:** Le moufle fixe et le moufle mobile

**Figure I.13:** Le moufle mobile et crochet

**Figure I.14:** Treuil de Forage

**Figure I.15:** le câble de forage en acier

**Figure I.16:** système de mouflage

**Figure I.17:** La table de rotation

**Figure I.18:** LeTop drive

**Figure I.19:** LaTige carré (hexagonale)

**Figure I.20:** Schéma général du circuit de fluide de forage

**Figure I.21:** La pompe de forage

**Figure I.22:** Flexible d'injection de la boue de forage

**Figure I.23:** bacs à eau pour un appareil de forage

**Figure I.24:** Tête d'injection

**Figure I.25:** Système de production d'énergie

**Figure I.26:** Obturateur annulaire

**Figure I.27:** Obturateur à mâchoires

**Figure I.28:** Mâchoires

**Figure I.29:** Unité hydraulique de commande KOOMEY

**Figure I.30:** Manifold duses (*Choke Manifold*)

**Figure I.31:** Tiges de forage

**Figure I.32:** Masse-tiges spiralées  
**Figure I.33:** Outil de forage  
**Figure I.34:** Classification des appareils de forage  
**Figure I.35:** Câble de forage  
**Figure I.36:** Schéma du mouflage  
**Figure I.37:** Matériels annexes de levage  
**Figure I.38:** Transmission de la puissance diesel  
**Figure I.39:** Ensemble d'outil de forage et carottage  
**Figure I.40:** Schéma d'un forage en circulation directe et d'un forage en circulation inverse  
**Figure II.1:** Courbes coût/niveau de maintenance  
**Figure II.2:** Organigramme du choix de type de maintenance  
**Figure II.3:** Courbes Fonction fiabilité, Densité de probabilité, Taux de défaillance:  $\lambda(t)$   
**Figure II.4:** Courbes théoriques de Weibull  
**Figure II.5:** Diagramme d'Ishikawa théorique  
**Figure II.6:** Diagramme d'Ishikawa du treuil de forage  
**Figure II.7:** Découpage de l'entreprise  
**Figure II.8:** Découpage des équipements de forage  
**Figure II.9:** Découpage des équipements de levage  
**Figure II.10:** Histogramme de défaillances des équipements de levage  
**Figure II.11:** Histogramme de défaillances des équipements du treuil  
**Figure II.12:** Courbe ABC  
**Figure II.13:** Découpage fonctionnel de l'appareil de freinage  
**Figure II.14:** Histogramme de criticité  
**Figure II.15:** Processus de la maintenance  
**Figure II.16:** Activité: Service Production & Service Maintenance  
**Figure III.1:** Causes de panne de la garniture de forage  
**Figure III.2:** Effet combiné de la traction et de la torsion  
**Figure III.3:** Localisation des contraintes maximales dans une connexion vissée  
**Figure III.4:** Défaillance par éclatement  
**Figure III.5:** Défaillance par écrasement  
**Figure III.6:** les modes de déformation de la garniture de forages  
**Figure III.7:** Rupture d'une tige de forage  
**Figure III.8:** Outil ayant subi des vibrations sévères  
**Figure III.9:** Vibrations latérales et whirling  
**Figure III.10:** Stick slip mesuré dans un gisement de pétrole  
**Figure III.11:** (a) Wash out; (b) Twist-off  
**Figure III.12:** BHA Connexion Fatigue Locations  
**Figure III.13:** Courbe: Fonction de défaillance (F(t))  
**Figure III.14:** Courbes: Fonction associée (F(t) & R(t))  
**Figure III.15:** Probabilité de réparation au cours de temps  
**Figure III.16:** Vie d'un système: évolution dans le temps  
**Figure III.17:** Courbe du taux de défaillance en mécanique  
**Figure III.18:** Courbes d'évolution des coûts en fonction de la fiabilité  
**Figure III.19:** Composants en série (Fiabilité)  
**Figure III.20:** Composants en parallèle (Fiabilité)  
**Figure III.21:** Evolution du taux de défaillance  
**Figure III.22:** Tige câblée  
**Figure III.23:** Tige aluminium  
**Figure III.24:** Courbe:  $\lambda(t)$  taux de défaillance calculé  
**Figure III.25:** Courbe:  $f(t)$  la densité de probabilité calculée  
**Figure III.26:** Courbe:  $R(t)$  probabilité de survie calculée  
**Figure IV.1:** Situation de bassin étudié

**Figure IV.2:** Diagrammes 4.1: les charges exercées sur le train de tiges

**Figure IV.3:** Trajectoire du puits (section verticale)

**Figure IV.4:** Fatigue ratio

**Figure IV.5:** Courbe montrant le nombre de rotations de la tige de forage en fonction des contraintes

**Figure IV.6:** Les contraintes pour un train de forage mixte pendant le forage

**Figure IV.7:** Décomposition des coûts de maintenance

**Figure IV.8:** Evolution des coûts de défaillance

**Figure IV.9:** Bande de marquage pour classer les tiges de forage (adapté d'API RP 7 G)

## **Liste des tableaux**

**Tableau I.1:** Les bases de l'ENTP

**Tableau I.2:** Classification des appareils de forage

**Tableau I.3:** Classification des Appareils de forage de l'ENTP

**Tableau I.4:** Classification des appareils de forage par la puissance du treuil

**Tableau I.5:** Spécifications des Appareils de Forage de L'ENTP

**Tableau II.1:** Feuille standard d'une analyse AMDEC

**Tableau II.2:** Critères de gravité

**Tableau II.3:** Critères d'occurrence.

**Tableau II.4:** Critères de non détection

**Tableau II.5:** Critères de criticité

**Tableau II.6:** Modes de défaillance

**Tableau II.7:** Récapitulatif des défaillances des équipements de levage

**Tableau II.8:** Classement des équipements

**Tableau II.9:** Grille de cotation

**Tableau II.10:** AMDEC du système de freinage

**Tableau II.11:** Capacité de rénovation annuelle, par nature d'équipements

**Tableau III.1:** Résistance à la traction et le couple du raccord male de la connexion

**Tableau III.2:** Vitesse critique approximative pour différents diamètres de tiges

**Tableau III.3:** Calcul des paramètres de fiabilité

**Tableau IV.1:** Gradient géothermique

**Tableau IV.2:** Résumé de la section d'étude 8"½

**Tableau IV.3:** Sollicitations agissantes sur le train de tiges

**Tableau IV.4:** Synthèses des charges

**Tableau IV.5:** Charges liées aux opérations de back-reaming.

**Tableau IV.6:** Les détails de stress pour l'opération de back-reaming.

**Tableau IV.7:** l'opération de back-reaming 5"½ drill pipe grade S 135

**Tableau IV.8:** Synthèses des charges

**Tableau IV.9:** Coordonnées d'implantation

**Tableau IV.10:** Geothermal Gradient Data

**Tableau IV.11:** Résumé de la section d'étude 8"½

**Tableau IV.12:** Degré de sévérité du dog- leg pour une tige de forage en acier

**Tableau IV.13:** Synthèse des charges sur le train de tiges en acier

**Tableau IV.14:** Side force for steel drill pipe

**Tableau IV.15:** Les contraintes pour un train de forages en acier pendant le forage

**Tableau IV.16:** Indice de gravité de flambement (Buckling Severity Index (BSI))

**Tableau IV.17:** Spécifications de chaque train de forage

**Tableau IV.18:** les contraintes pour un train de forages mixte, pendant le forage

## Liste des abréviations

**ENTP:** Entreprise nationale des travaux aux puits,  
**ENAFOR:** Entreprise Nationale de Forage,  
**ENSP:** Entreprise nationale de Services aux puits,  
**ENAGEO:** Entreprise nationale de Géophysique,  
**ENGTP:** Entreprise nationale des Grands travaux Pétroliers,  
**GWDC:** Great Wall Drilling Company,  
**NDIL:** Nabors drilling international limited,  
**SPEC:** international petroleum Service Corporation,  
**WOB:** Weight On Bit (Poids sur l'outil),  
**IADC:** International Association of Drilling Contractors,  
**IWCF:** International Well Control Forum  
**SCR:** Redresseur commandé au silicium ou thyristor (Redresseur à silicium convertit le courant alternatif en contenu AC/DC),  
**V-SAT:** Very Small Aperture Terminal (Interconnexion de réseaux par Satellite),  
**BOP:** Blow Out Preventer (Obturateur de sécurité),  
**HWDP:** Heavy Weight Drill Pipe (Tige lourde de forage),  
**RPM:** Rotation Par Minute,  
**AMDEC:** Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leurs Criticités,  
**ABC:** Activity Based Costing,  
**SG:** Specific Gravity (unité de la densité de la boue de forage),  
**S:** Sinusoidal buckling,  
**T:** Torque,  
**F:** Fatigue,  
**DP:** Drill pip,  
**B:** Buckling,  
**(-):** No buckling, No stress,  
 **$\sigma_m$ :** Von mises stresses,  
 **$\sigma_a$ :** axial stress (Psi),  
 **$\sigma_r$ :** radial stress (Psi),  
 **$\sigma_t$ :** tangential (hoop) stress (Psi),  
 **$\tau_t$ :** tangential shear stress(Psi),  
 **$\tau_r$ :** radial shear stress (Psi),  
 **$\tau_z$ :** longitudinal stress(Psi),  
 **$F_{lamb}$ :** Force de flambage sur la paroi de la tige de forage en (mn),  
 **$F_{apa}$ :** Force axiale déterminée par la méthode de la zone de pression, en (mn),  
 **$\Sigma_a$ :** Contrainte axiale à l'extérieur de la paroi de la tige de forage,  
 **$A_c$ :** la section transversale des unités composant (m<sup>2</sup>),  
 **$F_{ay}$ :** Axial yield force (mn),  
 **$F_{btm}$ :** est la pression du fond, qui est une force de compression due à la pression du fluide, unités (mn),  
 **$F_{drag}$ :** Force de traînée, en (mn),  
 **$L_D$ :** Longueur de la corde, en (m),  
 **$W_{air}$ :** Poids par pied de la corde dans l'air, en (N/ft),  
 **$W_{bit}$ :** Poids sur trépan, en (N),  
 **$\Delta F_{area}$ :** variation de la force due à un changement de surface à la jonction entre deux composants ayant des surfaces de section transversale différentes,  
 **$\Sigma_{fel}$ :** La limite d'endurance à la fatigue est limitée à 35 000 psi,  
 **$F_{ab}$ :** Axial force calculated using the buoyancy method,  
 **$F_{ay}$ :** Axial yield force (mn),  
 **$F_{ay}$ :** Axial yield force, (mn),



**$\Sigma_{my}$** : Minimum yield stress,  
**A<sub>eff</sub>**: Effective sectional area (m<sup>2</sup>),  
**A<sub>e</sub>**: External area of the pipe (m<sup>2</sup>),  
**A<sub>i</sub>**: Internal area of the pipe (m<sup>2</sup>),  
**F<sub>apa</sub>**: Force axiale, en (mn),  
**L<sub>c</sub>**: la longueur de l'élément composant de la chaîne de travail, en (m),  
**A<sub>c</sub>**: la section transversale des unités composant (m<sup>2</sup>),  
 **$\Sigma_{bend}$** : la contrainte de flexion corrigée par le facteur d'amplification de la contrainte deflexion en (Psi),  
**r<sub>o</sub>**: Rayon extérieur de la tige de forage, tel que modifié par la classe de la tige,  
 **$\delta$** : Courbure du puits comme gravité du dog leg (degré/100) pour le soft-string model; stiff-string model calcule courbure locale,  
**BMSF**: Facteur d'intensité des contraintes (Bending stress magnification factor),  
 **$\Sigma_{buckle}$** : Contrainte de flambage sur la paroi de la tige de forage en (Psi),  
 **$\Sigma_{buckle0}$** : Contrainte de flambement à l'extérieur de la paroi de la tige de forage,  
**r<sub>cl</sub>**: Distance maximale entre le train de tiges et le mur du puits de forage,  
 **$\Delta F_{apa}$** : La variation de la force axiale de la zone de pression sur la longueur du composant, calculée selon la méthode de la zone de pression,  
 **$\Delta F_{btm}$** : est la pression du fond, qui est une force de compression due à la pression du fluide Appliquée sur la surface de la section transversale de la composante inférieure, unités (mn),  
**F<sub>drag</sub>**: Force de traînée, en (mn),  
**L<sub>D</sub>**: Longueur de la corde, en (m),  
**W<sub>air</sub>**: Poids par pied de la corde dans l'air, en (N/ft),  
**W<sub>bit</sub>**: Poids sur trépan, en (N).  
 **$\Sigma_{fel}$** : La limite d'endurance à la fatigue est limitée à 35 000 psi.  
**F<sub>ab</sub>**: Axial force calculated using the buoyancy method,  
**F<sub>ay</sub>**: Axial yield force,  
 **$\Sigma_{my}$** : Minimum yield stress,  
**L<sub>c</sub>**: La longueur de l'élément composant de la chaîne de travail, en (m) ;  
**A<sub>c</sub>**: La section transversale des unités composant (m<sup>2</sup>)  
**E**: Module de Young du composant, en (MPa).  
**I**: Moment d'inertie,  
**MAO (MOA)**: Traitement en surface par Oxydation de Micro Arcs (OMA),  
**CND**: Control Non Destructif,  
**MTBF**: Temps Moyens de Bon Fonctionnement,  
**MUT**: Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement (Mean Up Time),  
**MTTR**: Temps Moyen pour Réparation (Mean Time to Repair),  
**C<sub>m</sub>**: Coûts directs de Maintenance,  
**C<sub>mc</sub>**: Coûts directs de Maintenance Corective,  
**C<sub>mp</sub>**: Coûts directs de Maintenance Préventive,  
**C<sub>me</sub>**: Coûts de Maintenance Externalisée,  
**C<sub>mo</sub>**: Coûts de Main d'Oeuvre,  
**C<sub>f</sub>**: Coûts des dépenses fixes du Service Maintenance,  
**C<sub>PDR</sub>**: Coûts des Pièces De Rechange,  
**PDR**: Pièces De Rechange,  
**C<sub>i</sub>**: Coûts indirects de Maintenance,  
**C<sub>d</sub>**: Coûts de défaillances,  
**T<sub>i</sub>**: Temps d'Indisponibilité,  
**r**: Taux horaire de non production,  
**API**: American Petroleum Institut,  
**BHA**: Bottom hole assembly.

## Introduction générale

Dans le monde entier le souci de tous les jours est de répondre à la demande énergétique qui augmente de plus en plus. L'augmentation rapide de l'activité industrielle dans les pays développés et l'investissement des entreprises dans les pays qui assurent un coût de production moins élevé a accru très rapidement la demande mondiale d'énergie.

Compte tenu des évolutions prévisibles, la consommation mondiale d'énergie devrait augmenter considérablement d'ici à la seconde moitié de ce siècle. Pour relever un tel défi, on dispose de trois sources pour couvrir ces besoins futurs:

- Les combustibles fossiles,
- Le nucléaire,
- Les agents renouvelables.

Les parts prises par chacune d'elles dépendront de leurs réserves respectives, leurs disponibilités, mais aussi de leurs coûts et des limites imposées par la politique et la protection de l'environnement.

Selon l'Agence fédérale allemande pour les sciences de la Terre et les matières premières, Les réserves mondiales prouvées d'énergie fossile pouvaient être estimées en 2020, à 40 517 exajoules (1 exajoule =  $10^{18}$  joules), dont:

- 55 % de charbon,
- 25 % de pétrole,
- 19 % de gaz naturel [1].

Ces réserves assurent 83 ans de production au rythme actuel; cette durée est très variable selon le type d'énergie:

- 56 ans pour le pétrole,
- 54 ans pour le gaz naturel,
- 139 ans pour le charbon [1].

Pour l'uranium, avec les techniques actuelles, elle serait de 90 à 130 ans selon les estimations, et sa durée d'utilisation pourrait se compter en siècles en ayant recours à la surgénération. À plus long terme, la fusion nucléaire pourrait apporter des ressources encore plus élevées [1].

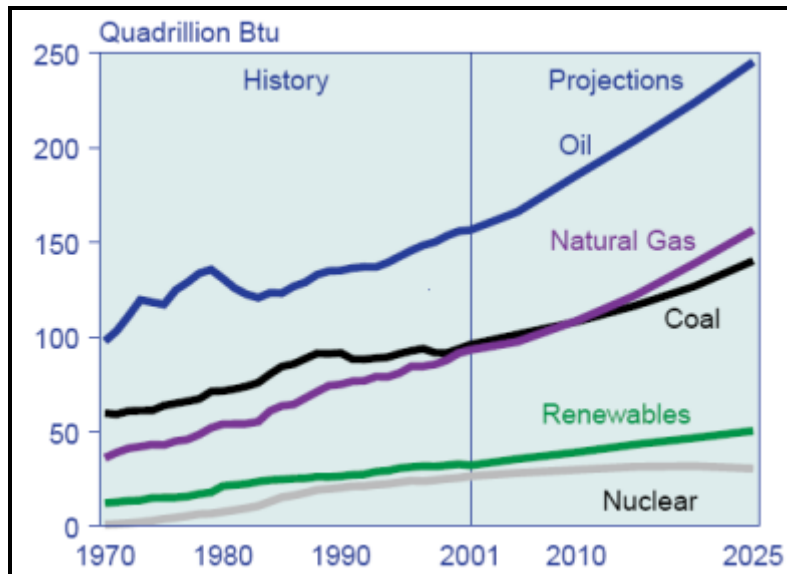
Le potentiel de l'énergie solaire est également quasi illimité.

La production mondiale d'énergie commercialisée était en 2021, selon BP, de 595 exajoules, en progression de 14,3 % depuis 2011. Elle se répartissait:

- 31,0 % de pétrole,
- 26,9 % de charbon,
- 24,4 % de gaz naturel,
- 4,3 % de nucléaire
- 13,5 % d'énergies renouvelables, dont:
  - 6,8 % hydroélectricité,
  - 6,7 % éolien, solaire, biomasse, géothermie, biocarburants [1].

Depuis la révolution industrielle, la consommation d'énergie ne cesse d'augmenter. La consommation finale énergétique mondiale a progressé de 115 % entre 1973 et 2019, elle s'élève en 2019, selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), à 418 exajoules, dont 19,7 % sous forme d'électricité, mais sa répartition par source d'énergie n'a guère évoluée:

- La part des énergies fossiles recule de 1,3 points, mais leur domination reste massive: 81,4 %,
- La part des d'énergies renouvelables passe de 15,0 % en 1990 à 16,3 % en 2019 [1].



**Figure 1:** Courbes de répartition de la consommation mondiale d'énergie depuis 1970, extrapolées jusque 2025, selon l'Agence internationale de l'énergie, chiffres publiés en 2004 [1].

De nos jours, l'énergie sous ses différentes formes présentes dans la nature, occupe une place primordiale dans l'économie d'un pays. La demande d'énergie qui repose jusqu'à présent en majeure partie sur l'exploitation des hydrocarbures, devrait augmenter. Dans ce contexte et dans le cadre de sa nouvelle stratégie de développement à l'horizon 2030, le secteur des hydrocarbures Algérien, compte doubler ses capacités de production en pétrole et gaz, estimées actuellement à 1,5 million de barils par jour. A cet effet, la compagnie pétrolière Algérienne Sonatrach, s'est fixée comme missions prioritaires:

- Recherche et Exploration,
- Développement des champs productifs,
- Amélioration du taux de récupération,
- Alléger les coûts d'exploration.

Actuellement en Algérie, le nombre de puits d'hydrocarbures forés est de 08/10000m<sup>2</sup>, alors que la moyenne internationale se situe entre 50 et 100. Dans ce contexte, les objectifs de la compagnie Sonatrach en matière de forage, sont donc appelés à évoluer de manière significative, ce qui est pris en charge par:

- Sa division forage,
- Ses filiales (ENTP, ENAFOR, ENSP, ENAGEO, ENGTP, etc...),
- Ses partenaires internationaux.

Dans le domaine du forage pétrolier, où les risques sont majeurs et les capitaux engagés sont énormes, le rôle de l'Entreprise Nationale des Travaux aux Puits (ENTP) est essentiel et important dans la réalisation des objectifs de sa maison mère SONATRACH et par conséquent participer au développement de notre pays à réaliser ses plans de développement.

De ce fait nous avons réalisés cette étude sur le thème: Contribution à l'amélioration de la durée de vie des appareils de forage au sein de l'Entreprise Nationale des Travaux aux Puits (ENTP).

Notre travail se présente comme suit:

- Le premier chapitre concerne la présentation de l'Entreprise Nationale des Travaux aux Puits (ENTP), son plan stratégique et une étude (description: mission, spécifications, les diverses fonctions, etc...) sur les appareils de forage, et sur les fluides de forage,
- Le deuxième chapitre se rapporte au Management de la maintenance dans les Entreprises de forage,
- Le troisième chapitre est consacré à la Fiabilisation des trains de sonde,
- Le quatrième chapitre se rapporte à l'Amélioration de la durée de vie des trains de sonde.

## **CHAPITRE UN : GENERALITES**

## I.1. Introduction

### L'histoire du forage:

Le battage au câble ou à tige pourrait être la plus ancienne procédure de perforation. La première consiste à lâcher un outil de forage en métal qui s'enfonçait dans le sol par son propre poids et à extraire la roche réduite en poudre à l'aide d'un conteneur cylindrique. Alors que la deuxième technique consistait à enfoncer, en présence de l'eau, une tige en bambou dans le sol et à l'aide d'une valve à mains ; l'eau munie de débris est rejetée. Cette technique est apparue en Egypte et en Chine, il y a quatre mille ans [3-4].

1859 - Premier forage industriel de pétrole:

Edwin L. Drake, recruté par la Seneca Oil Company, extrait du pétrole en Pennsylvanie en adaptant la technique utilisée dans les mines de sel. Le forage d'Edwin L. Drake marque le début d'une ruée vers l'or noir et la véritable naissance de l'industrie pétrolière [3-4].

### Le Forage Rotary:

Le forage en mode dit "rotary" consiste à entraîner depuis la surface, un train de tiges transmettant au trépan, situé au fond du puits, un effort longitudinal de compression en fonctionnement normal (WOB) et un couple [3].

### Les premières découvertes au Nord de l'Algérie:

L'observation de pétrole en surface en Algérie a été remarquée à Tliouanet Ain Zeft en 1915 dans la région de Relizane puis en 1948 à Oued Gueterini dans celle de Sidi Aissa [5].

### Les premières découvertes dans le sud de l'Algérie:

Au lendemain de la seconde guerre mondiale les besoins de pétrole sont d'une portée stratégique, il fallait du pétrole et il faut aller le chercher là où il se trouve en Algérie [6].

Des programmes de recherches et d'investissements sont engagés en 1951 par les compagnies pétrolières existantes:

- SN REPAL (Société Nationale de Recherche et d'Exploitation de Pétrole en Algérie),
- La CFP (Compagnie Française de Pétrole),
- La CPA (Compagnie de Pétrole d'Algérie de Shell),
- La CREPS (Compagnie de Recherche et d'Exploitation de Pétrole au Sahara) [5].

Gisements découverts 1952- 1956: Avec ces gisements géants, l'Algérie faisait ainsi son entrée sur la scène énergétique mondiale.

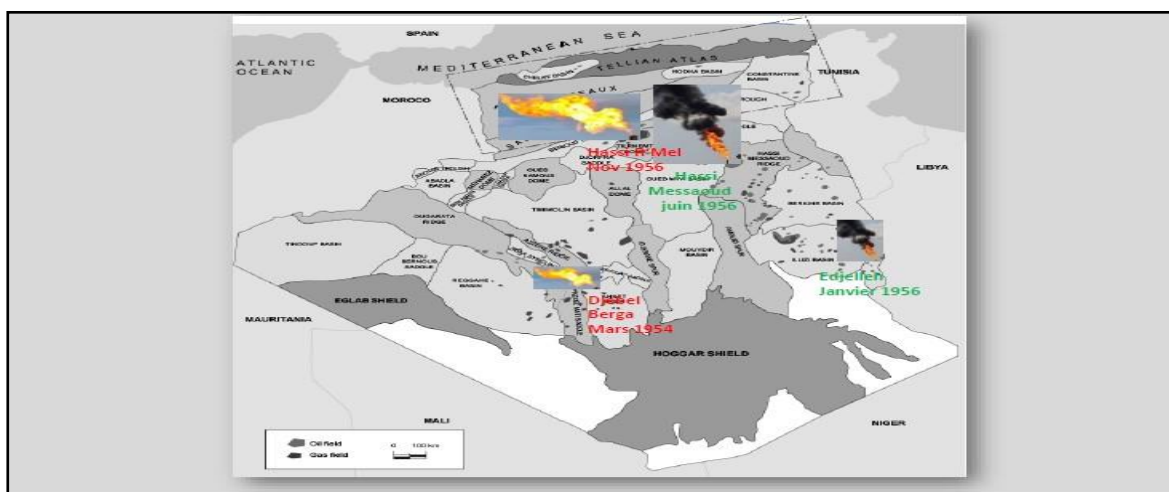


Figure I.1: Gisements découverts 1952- 1956 Sud de l'Algérie [6].


## I.2. Organisation de l'Entreprise

### **Présentation de l'Entreprise Nationale des Travaux aux Puits (ENTP):**

L'ENTP est une Entreprise Publique Economique 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 – Spa. SONATRACH [7].

ENTP



- **Raison sociale** : Entreprise Nationale des Travaux Aux Puits
- **Dénomination** : E.N.T.P
- **Date de création** : 1<sup>er</sup> août 1981
- **Forme juridique** : EPE/SPA en date du 21 Juin 1989
- **Adresse du siège social**: Base Industrielle du 20 août 1955, Hassi Messaoud, wilaya d'Ouargla
-  [Algérie](#)
- **Base Birkhadem** : Les Vergers-BP 12- ALGER
- **Capital Social** : 67 000 000 000 DA
- **Actionnaires** : Sonatrach (100%)
- **Société sœur** : ENAFOR
- **Effectif** : 9230 agents
- **Site web** : www.entp.dz

### **Historique:**

- Le forage algérien est un produit de Sonatrach depuis l'année **1968**. **Keskassa 1** étant le premier puits foré. La structure opérationnelle s'appelait Direction des Services Pétroliers (DSP) et disposait d'un parc de quatre (04) appareils de forage,
- **Juillet 1972**: la DSP prend le nom de Direction des Travaux Pétroliers (DTP),
- **1er Août 1981**: de la restructuration de SONATRACH au début des années 80, émergeait l'ENTP (Entreprise Nationale des Travaux aux Puits) héritière de la DTP pour les activités de forage et de Work – Over (entretien des puits),
- **Créée par décret n° 81-171**: l'ENTP est devenue opérationnelle le premier janvier (1<sup>er</sup>) 1983,
- **21 Juin 1989**: Transformation du statut juridique de l'ENTP en société par actions,
- **Juin 1993**: l'ENTP est devenue membre de l'IADC (International Association of Drilling Contractors),
- **30 Mars 1998**: l'ENTP fait partie du Groupe Services Hydrocarbures (GSH) Sonatrach, (cession de 51% du capital social ENTP par le holding RGT, en faveur de Sonatrach),
- **04 Avril 2003** : ENTP a obtenu la certification ISO 9001: 2000 pour l'ensemble de ses activités,
- **01 janvier 2005**: Transfert des actions détenus par la Société de gestion des participations TRAVEN (dissoute), vers la Société de Gestion des participations dénommée "INDJAB",

- **28 décembre 2005**: cession à titre gratuit des actions détenues par la SGP INDJAB (49%) en faveur du Holding Sonatrach "SPP Spa". ENTP devient 100% Sonatrach. Le siège social est situé à HASSI MESSAOUD, wilaya d'OUARGLA, à environ 900 km au Sud- Est d'Alger,
- **25 mars 2006** : holding Sonatrach Services Para Pétroliers "SPP Spa" devient l'unique actionnaire de l'ENTP,
- **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**".

Avec plus de 50 ans d'existence, l'ENTP est désormais de renommée internationale.

**Depuis sa création à ce jour, ENTP a réalisé :**

- Plus de 2900 forages pétroliers et plus de 4800 opérations de Work-Over,
- Sur le plan international, l'Entreprise a foré 30 puits: 3 en Tanzanie, 16 au Sultanat d'Oman et 11 en Libye.

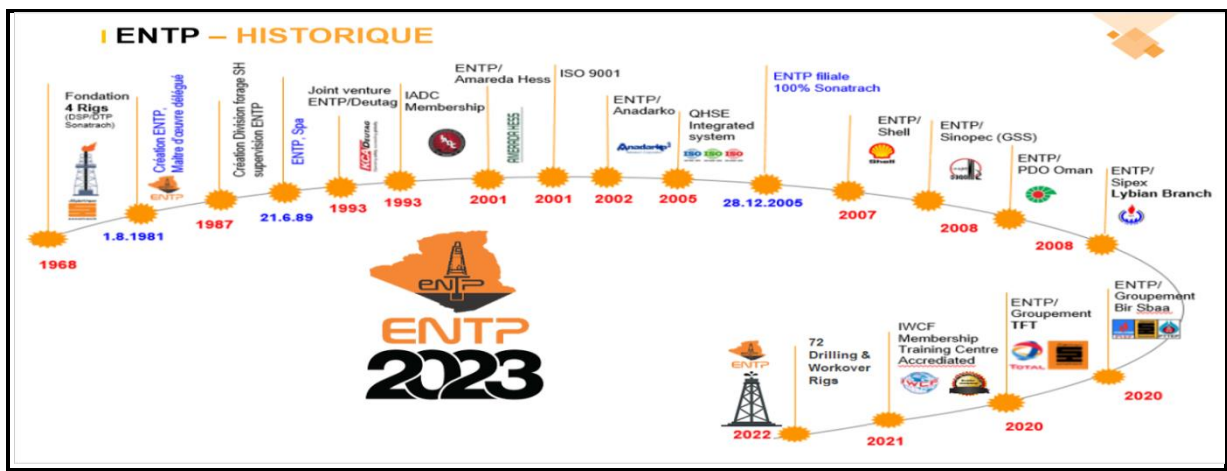


Figure I.2: Schéma Historique ENTP [7].

### **Activités (Métiers):**

- Forage des puits d'hydrocarbures,
- Entretien des puits d'hydrocarbures (Work-Over),
- Forage des puits d'eau de grande profondeur,
- Transport (DTM des appareils et camps de forage, et rénovation des véhicules).
- Maintenance pétrolière,
- Hôtellerie [7].

### **Marché de l'ENTP:**

L'ENTP, est le premier Entrepreneur de forage en Algérie (44.3% du marché). Ses principaux clients sont:

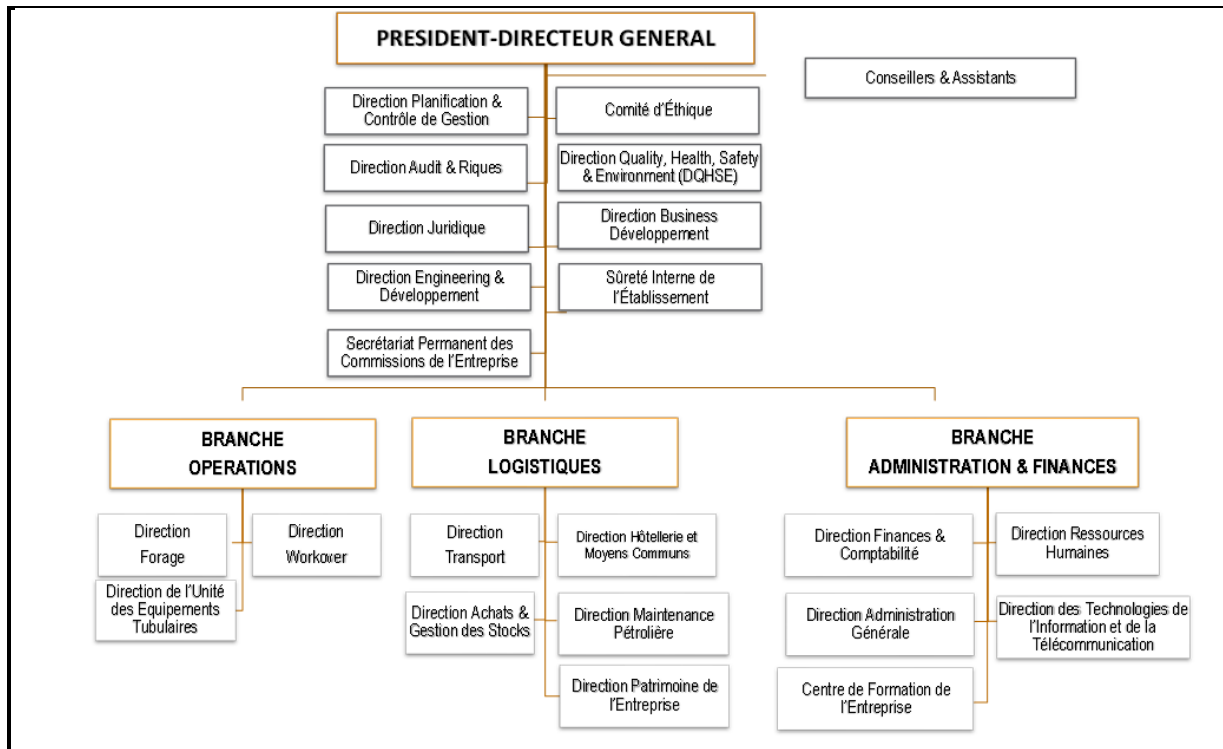
- SONATRACH,
- Groupement Bir Seba (GBRS),
- Groupement Tin Fouyé Tabankort (GTFT - projet II),
- Groupement Berkine (SONATRACH/ANADARKO),
- Groupement SONATRACH/AGIP,
- Association SONATRACH /REPSOL,
- Shell Exploration et Production,
- Petro-Vietnam Exploration Production (PVEP-Algeria),
- Libye.

### **Macrostructure de l'ENTP:**

Piloté par un **Conseil d'Administration (C.A)**, l'ENTP a de tout temps œuvré pour le maintien de son statut de premier entrepreneur de forage pétrolier en Algérie.

Le schéma directeur actuel de la macrostructure de l'Entreprise, approuvé par Le Conseil d'Administration, se présente sous une configuration structurelle scindée en branches:

- La Direction Générale,
- La Branche "Opérations",
- La Branche "Logistique",
- La Branche "Administration & Finances".



**Figure I.3:** Schéma Directeur de la Macrostructure de l'Entreprise Nationale des Travaux aux Puits [7].

### **Système de Management QHSE:**

Le 17 Avril 2020, l'ENTP a certifié son système de management intégré - Qualité, Santé-Sécurité et Environnement, conformément aux exigences des référentiels suivants:

- **ISO 9001/2015** --> Système de Management de la Qualité,
- **ISO 14001/2015** --> Système de Management Environnemental,
- **ISO 45001/2018** --> Systèmes de Management de la Santé et de la Sécurité au Travail [7].

### **Les Activités Cœur du Métier de l'ENTP:**

#### **1- La Maintenance Pétrolière:**

La maintenance pétrolière est une activité cœur du métier, les appareils de forage requièrent des mastodontes d'organes, qu'on aime dénommer « les organes nobles » de part leur longévité, nécessitant pour ce faire des révisions périodiques.

Pour répondre au mieux aux diverses préoccupations en maintenance pétrolière, l'Entreprise ENTP dispose de 10 ateliers occupant une surface couverte de 9 750 m<sup>2</sup> et une surface non couverte de 49 800 m<sup>2</sup>, ainsi que 4 aires de montage des appareils de forage et de workover en revamping d'environ 40 000 m<sup>2</sup>.



Des divers ateliers de maintenance, nous citons les ateliers: Maintenance Équipements de Forage, Maintenance Moteurs Industriels, Maintenance des Équipements Électriques et Atelier bobinage, Atelier Maintenance des Équipements Spéciaux et Atelier Habillages de Sonde, Atelier Maintenance Équipements de Mesure & Régulation, Atelier Fabrication Pétrolière Équipements Forage, 02 Ateliers Chaudronnerie & Soudure [7].

## **2- Forage & Work-over:**

Concerne les travaux aux puits, qui sont les réalisations des forages de recherche, d'exploration et de développement sur les gisements d'hydrocarbures liquides ou gazeux; c'est aussi l'entretien des puits producteurs d'huile et de gaz (work-over) et accessoirement la réalisation des forages hydrauliques profonds.

### **Parc appareils, forage et work-over:**

L'ENTP dispose d'un parc d'appareils destinés pour le forage et le Work-Over. Certains de ces appareils sont dotés d'équipements modernes: Top Drive, SCR, et système (V.SAT) de télécommunication par satellite, à l'ensemble des chantiers de forage.

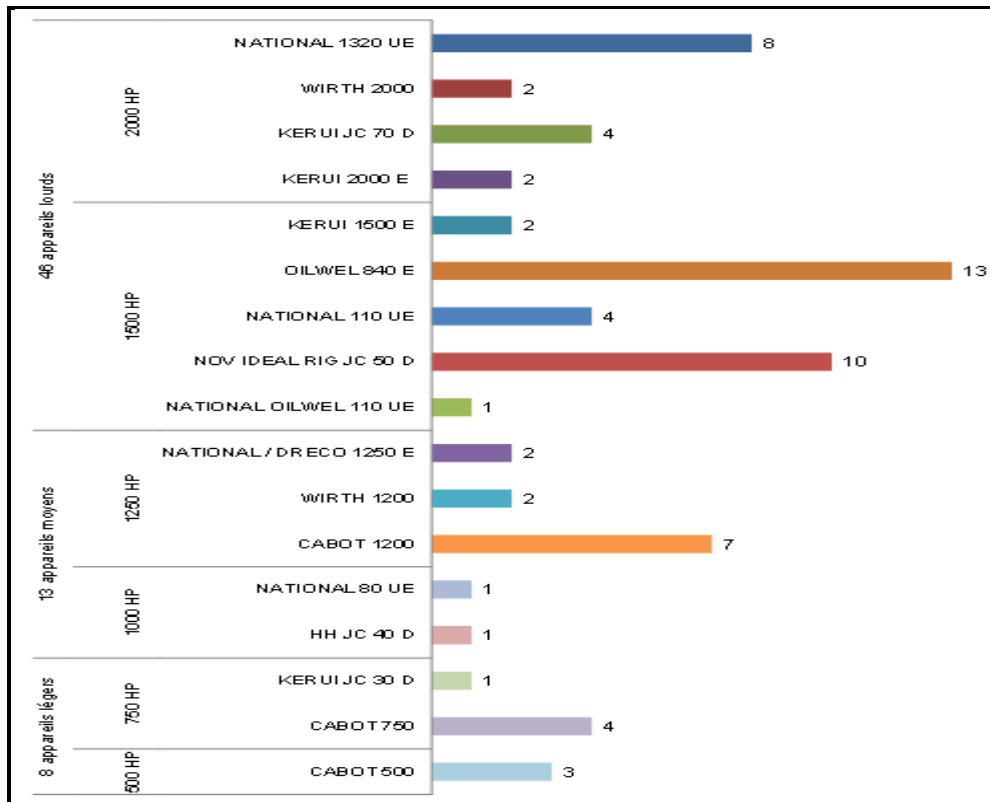


Figure I.4: Parc appareils de forage et Work-over ENTP [7].

## **3- L'Engineering:**

La Direction Engineering a pour mission principale l'assistance technique des Directions opérationnelles en matière de:

- Spécifications techniques des équipements de forage,
- Procédure de revamping,
- Etudes techniques pour acquisition d'appareils et d'équipements de forage,
- Mise à disposition de documentations techniques et normes,
- Projets de conception [7].

#### **4- Transport:**

Il est fait appel à l'activité cœur du métier, le Transport pour assurer la logistique optimale au service des chantiers mobiles, appelés à changer d'emplacement à chaque fin de puits, appelé communément (DTM).

Les DTM (Démontage, Transport et Montage- Rig Move) qui sont des opérations lourdes et complexes, représentent environ 250 DTM annuellement, donc une moyenne mensuelle de 22 DTM, nécessitant des moyens de transport et de manutention importants, c'est pour ce faire que l'ENTP dispose d'un parc roulant comptant 1024 unités, tous types confondus.

Pour la Maintenance du parc roulant, l'ENTP dispose de cinq ateliers d'une superficie totale de 11 512 m<sup>2</sup> répartie en ateliers de véhicules spéciaux, de semi-remorques, d'engins de manutention, de véhicules lourds et de véhicules légers et d'un atelier de maintenance préventive systématique (entretien) ainsi que trois stations mobiles d'entretien.



Figure I.5: DTM (Démontage, Transport et Montage- Rig Move) [7].

#### **5- Hôtellerie et Moyens Communs:**

Pour assurer le **bien-être** de ses employés, ENTP dispose de sa propre Direction Hôtellerie et Moyens Communs. Cette Direction se charge d'assurer l'**hébergement** et la **restauration** optimale, procurant le **confort** escompté: sur bases de vie, blocs administratifs, camps de vie et chantiers de forage et de workover opérants sur tout le territoire national.



Figure I.6: Camp de vie.

#### **Les Infrastructures de l'ENTP:**

L'ENTP dispose de plusieurs bases et ateliers à Hassi Messaoud et d'une base à Birkhadem Alger.

**Tableau I.1:** Les bases de l'ENTP.

Bases	Superficies	Fonctions
Base 20/8/55	594 930 m <sup>2</sup>	Siège social et Dépendances administratives, Ateliers et Parcs matériels de logistique: - 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 FP (Centre de Formation)	1 2000 m <sup>2</sup>	- Bloc pédagogique de 17 classes (150 places) - Laboratoire de langues, Salle de conférences (50 places)

**Moyens humains:**

- L'effectif de l'ENTP est en croissance de 6657 en 2017 à 9230 en 2023 suite au recrutement, notamment de plusieurs ingénieurs en maintenance et forage.
- L'encadrement représente une fraction de 2/3 des permanents.
- Le forage et Work-over occupent à eux deux plus de 50 % de l'effectif global.

**I.3. Plan Stratégique**

Afin de consolider sa position de leader sur le marché de forage en Algérie, l'ENTP demeure déterminée à:

- Maintenir le cap sur les grands Objectifs Stratégiques suivants:
  - Poursuivre les actions déjà engagées en matière de préservation, de modernisation et de développement de sa capacité de production, en axant ses efforts sur:
    - Le **maintien** de sa position de **leader national du forage pétrolier** et du **Work-Over**.
    - Le **perfectionnement** de son **savoir-faire** pour aller au devant des **exigences clientèles** et des **réalités économiques** du marché national et international,
    - **Accroître la production et élargir l'assise financière** de l'Entreprise,
    - **Se concentrer et développer les activités cœur de métiers** tout en renforçant la compétitivité de l'Entreprise,
    - **Veiller sur le patrimoine** de l'Entreprise [7].

A ce titre, la **stratégie de développement** de l'Entreprise comprend d'autres mesures, qui touchent aussi bien le volet production que le volet management, tels que:

**Les Ressources Humaines (RH) au centre névralgique de la Performance:**

Dans la même ligne directive de la **politique RH** de la maison mère «**Sonatrach**», la stratégie d'évolution accorde aux Ressources Humaines une attention particulière, pour faire d'elle une fonction partagée par tous, et fournir tous les efforts pour l'amélioration et la réingénierie constante des processus de gestion et de développement [7].

**Maintenir et consolider les valeurs de l'ENTP suivantes:**

- Santé, Sécurité et Bien Être des Travailleurs,
- Appartenance à l'Entreprise,
- Reconnaissance & Esprit d'Équipe,
- Responsabilité & Professionnalisme [7].

## I.4. Généralités sur les Appareils de forage

### Introduction:

L'Appareil de forage est un complexe d'équipements comprenant des machines et des mécanismes liés entre eux pour accomplir une fonction bien déterminée. Le choix d'un appareil de forage est réalisé en tenant compte de:

- Sa capacité et sa puissance, afin de réaliser dans les règles de l'art le programme de forage arrêté par le client.

### I.4.1. Mission d'un Appareil de forage

La mission d'un appareil de forage est principalement la réalisation des forages de puits au cours de toutes les étapes du développement d'un champ pétrolier ou gazier:

- Des forages d'exploration,
- Des forages de développement des gisements d'hydrocarbures liquides ou gazeux,
- L'entretien des puits producteurs d'huile et de gaz (Work-Over),
- La réalisation des forages hydrauliques de grandes profondeurs.

Le **processus** de forage assure l'extraction des hydrocarbures liquides ou gazeux que ce soit sur terre (on shore) ou en mer (off shore).

Ce processus se déroule via la contribution d'un ensemble d'organes de forage qui se composent de deux groupes:

- L'installation de surface (plate forme),
- La garniture de forage qui opère dans le puits.

### Les différents types de forage:

Si les résultats obtenus lors de la campagne géophysique sont concluants, un forage est réalisé afin de confirmer la présence d'hydrocarbures dans le gisement et valider la mise en production d'un puits.

- **Le forage vertical:** permet de forer le puits à l'aplomb vertical de la zone du gisement où les hydrocarbures sont susceptibles d'être présent dans le sous-sol,
- **Le forage dévié:** permet de forer plusieurs cibles depuis un même site de forage. Cela limite le nombre de sites en surface et permet d'utiliser les installations déjà existantes,
- **Le forage horizontal:** permet l'atteinte de plusieurs cibles dans le sous-sol depuis un même site et de maximiser la surface d'échange avec le réservoir, réduisant ainsi le nombre de forages nécessaires.

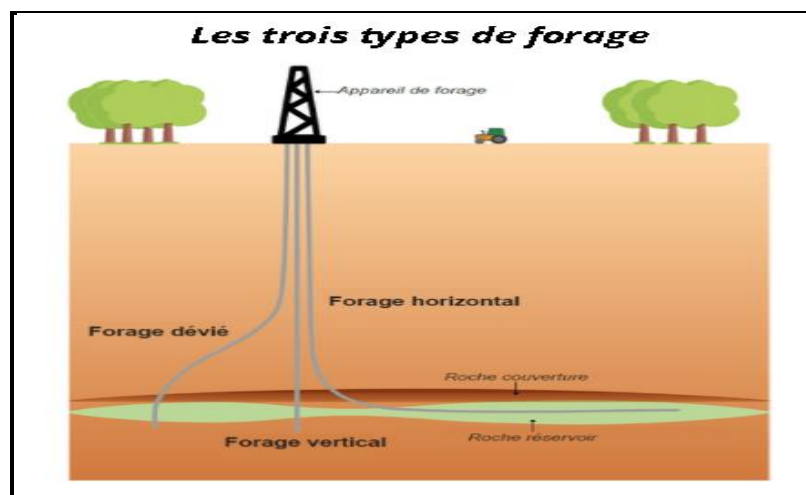


Figure I.7: Les trois types de forage.

### I.4.2. Description d'un Appareil de forage

Un Appareil de forage se compose d'un ensemble d'équipements, de divers organes et matériel pour réaliser des puits d'hydrocarbures reliant un gisement à la surface.

#### Appareil de forage

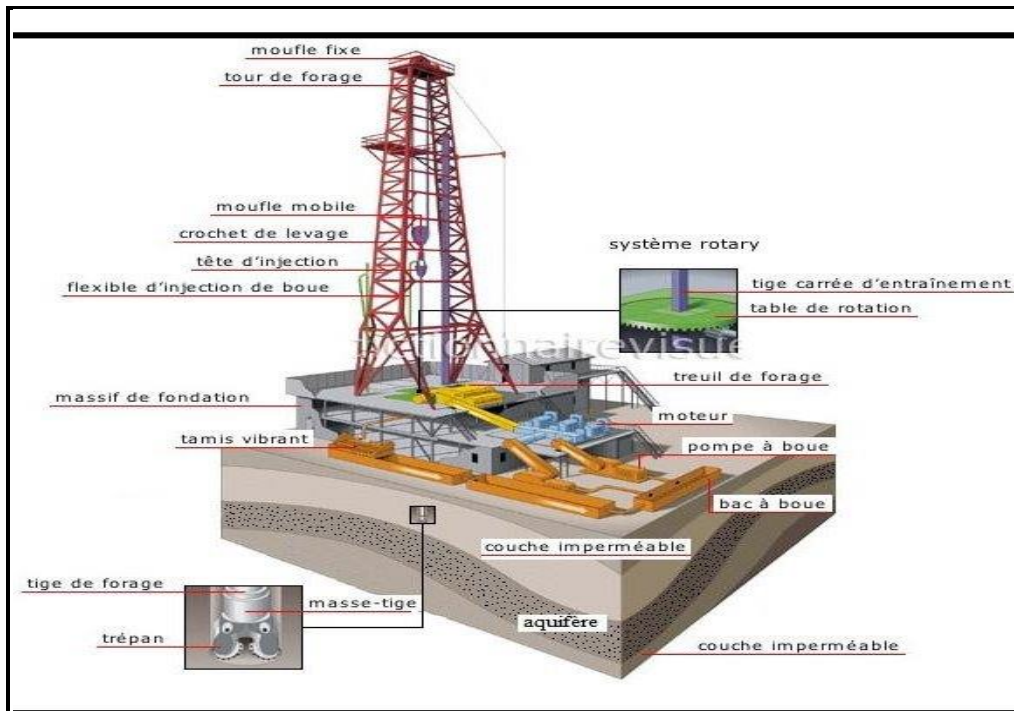


Figure I.8: Description de l'appareil de forage.

#### Plan de masse d'un appareil de forage

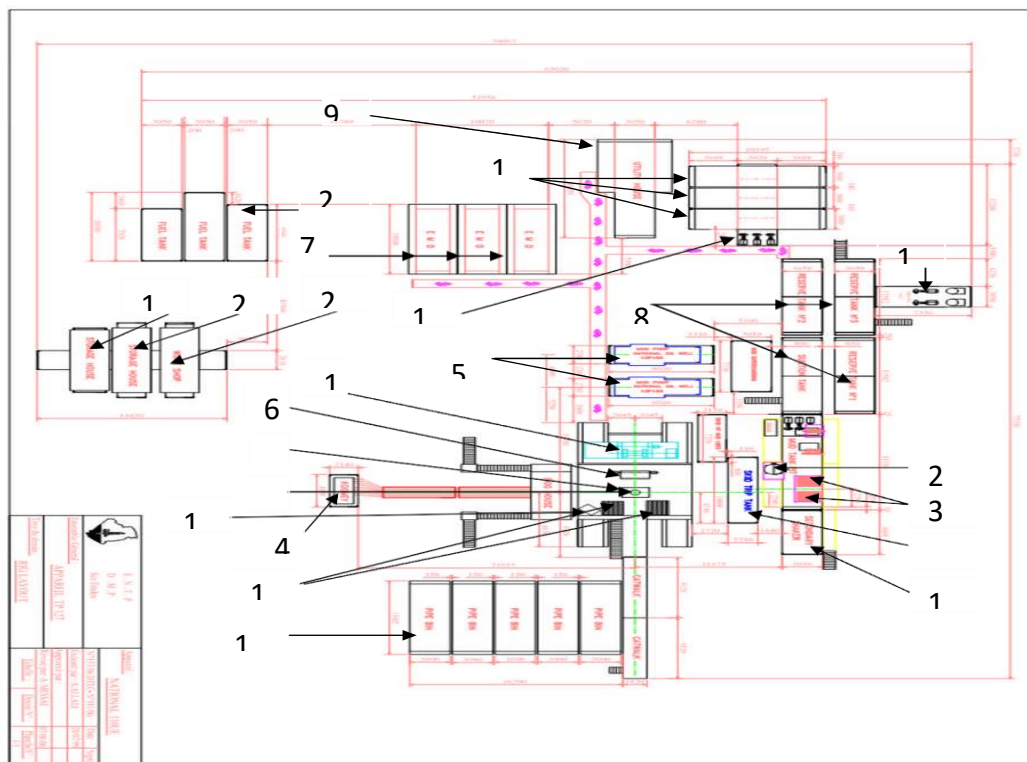


Figure I.9: Plan de masse d'un appareil de forage [2].

1- Treuil de forage (drawworks)	12- Treuil à air
2- Table de rotation (rotary table)	13- Rack à tiges (stockage tiges)
3- Tête de Puits (BOP)	14- Bac de remplissage de boue
4- Accumulateur de pression (koomey)	15- Tamis vibrants (séparation des cuttings de la boue)
5- Pompe à eau	16- Tamis vibrants (shall shakers)
6- Catworks	17- Mixeurs
7- Moteur du groupe électrogène (caterpillard)	18- Pompe centrifuge (eau)
8- Bac à boue	19- Magasin (stockage matériel forage)
9- Centrale électrique	20- Magasin (matériel mécanique + électrique)
10- bacs à eau	21- Atelier mécanique
11- Gerbier (stockage tiges + masse tiges)	22- Citerne de stockage gasoil

## **L'appareil de forage regroupe deux catégories de matériel:**

### **1- Équipements de surface:**

C'est l'ensemble de tous les équipements qui travaillent en surface et qui composent les cinq systèmes principaux suivants:

- Système de Levage,
- Système de Rotation,
- Système de Pompage (Circulation),
- Système de Puissance,
- Système des obturateurs (Sécurité aux puits).

### **Système de Levage:**

Le Système de levage est composé des éléments principaux suivants:

- Mât et Substructure,
- Moufles fixe et mobile (crown and travelling blocks),
- Crochet de levage (Hook),
- Treuil de forage (Drawworks),
- Catworks,
- Le câble de forage (Drilling line),
- Réa (dead line anchor).

### **Ils permettent les opérations suivantes:**

- Le contrôle du poids sur l'outil (WOB),
- Les manœuvres de garnitures (descente et remontée de la garniture),
- Les changements d'outils,
- La descente des colonnes de tubages (casing),
- Les levées et descentes du mât (lors des DTM: Démontage - Transport - Montage).

### **Mât de Forage: Derrick (Tour de forage):**

Il existe trois grandes catégories de structures : la tour, le mât et le mât haubané monté sur une remorque, ces structures ont des caractéristiques techniques spécifiques qui ont un rôle commun pendant le forage.

#### **• La Tour**

C'est la plus ancienne forme qui dérive de la tour construite en bois. Elle est en forme de pyramide très pointue.

### • **Le Mât**

Le mât est une structure en forme de A. Il a la particularité d'être articulé à sa base ce qui lui permet d'être assemblé ou démonté horizontalement puis relevé en position verticale en utilisant le treuil de forage et un câble de levage spécial (raising line).



Figure I.10: Mât & Plateforme du moufle fixe [13].

### **Le Mât haubané monté sur remorque:**

Les mâts haubanés sont utilisés pour les forages de faible et moyenne profondeur. Ils ne se démontent pas, mais se rabattent sur des camions ou des remorques. Ces mâts sont haubanés pour résister aux vents [13].

### **Substructure (Massif de fondation):**

Infrastructure métallique sur laquelle repose la tour de forage, les moteurs et les équipements annexes. Ces constructions répondent au besoin de surélévation du plancher de forage pour laisser la place aux empilages de tête de puits ainsi que pour l'obturateur (BOP) [13].

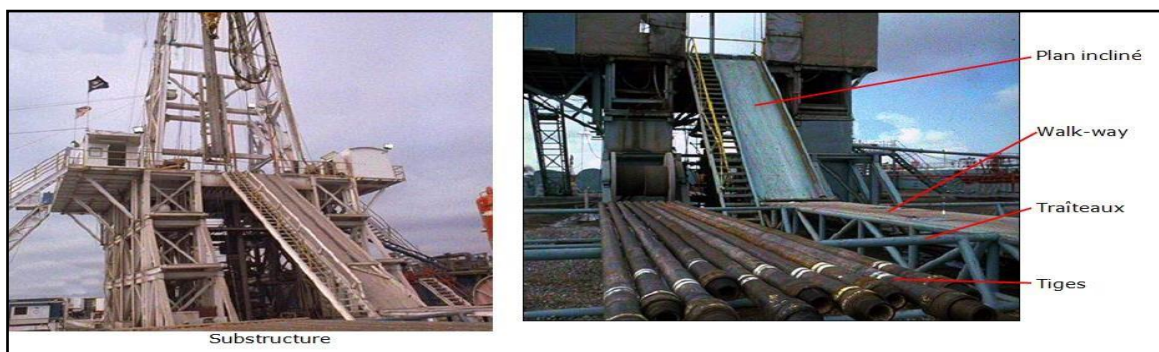


Figure I.11: Substructure [13].

### **Moufle fixe (Crown block):**

Moufle fixé au sommet du mat de forage, et qui supporte le poids de la colonne de tiges de forage. Il consiste en un groupe de poulies à gorge, monté sur un axe et reposant sur des paliers, à l'intérieur d'une lourde armature rectangulaire.

### **Moufle mobile (Travelling block):**

Dispositif mécanique mobile à poulies, relié au moufle fixe par un câble et portant le crochet de levage. Formé également d'un certain nombre de poulies par lesquelles passe le câble de forage, il se déplace sur une certaine hauteur entre le plancher de travail et le moufle fixe [5].

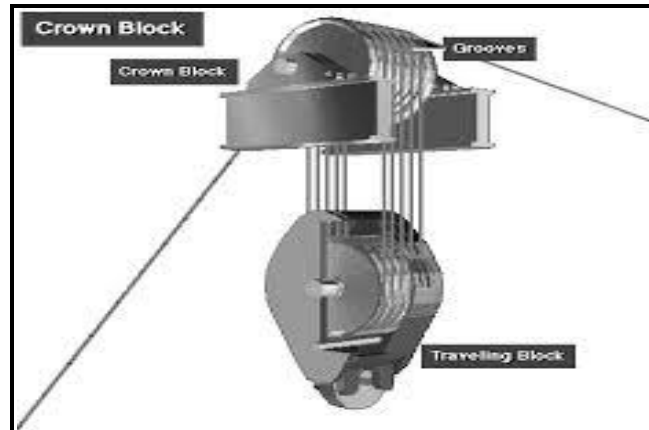


Figure I.12: Le moufle fixe et le moufle mobile.

**Crochet de levage (Hook):**

Sert à la suspension de la garniture pendant le forage. Des bras sont accrochés de part et d'autre de ce crochet servent à supporter l'élévateur, utilisé pour la manœuvre de la garniture.

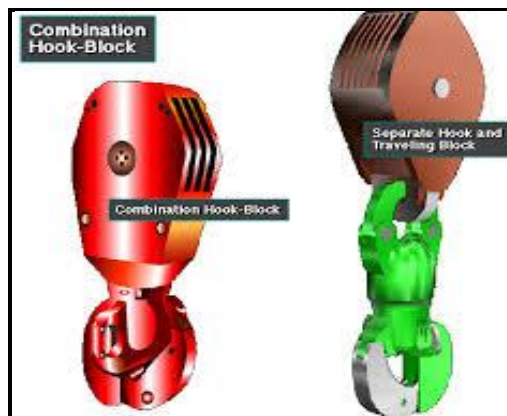


Figure I.13: Le moufle mobile et crochet.

**Treuil de forage (Drawworks):**

Le treuil de forage est l'organe principal de la sonde.

- Le Treuil est un tambour autour duquel s'enroule le câble de forage. Il tire et alimente le câble de forage, en levant ou descendant la garniture de forage,
- Il permet aussi de descendre les différents tubages et la colonne de production.



Figure I.14: Treuil de Forage.



### Le câble de forage:

Le câble de forage qui relie le treuil au moufle mobile en passant par le moufle fixe, est l'organe de transmission du travail qui permet aux charges d'être déplacées à la verticale dans les deux sens.



Figure I.15: Le câble de forage en acier.

### Le mouflage:

Le mouflage est l'ensemble des différentes boucles de câble de forage intercalées entre le treuil et le point fixe et reliant les moufles fixe et mobile.

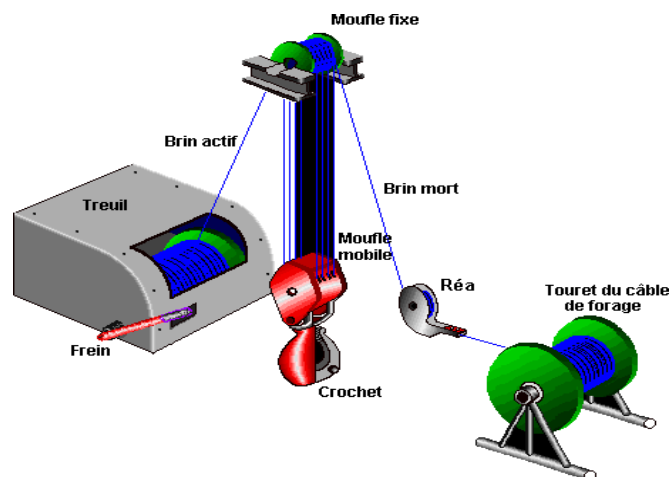


Figure I.16: Système de mouflage.

### Système de Rotation:

Les équipements de rotation sont composés principalement de:

- La table de rotation (rotary table) ou Top-drive,
- Du carré d'entraînements (Kelly drive bushing),
- De la tige d'entraînement (Kelly),
- Des cales (coins),
- De la tête d'injection (swivel).

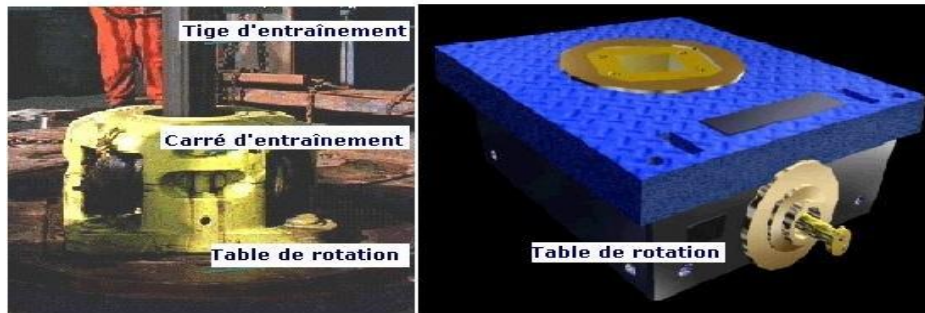
• Le Système de rotation est un dispositif par lequel une tige carrée (ou hexagonale) passe à travers une table de rotation transmet le mouvement rotatif aux tiges de forage grâce à de puissants moteurs.

• Actuellement, il existe deux systèmes:

- Le système Conventionnel: **la table de rotation**,
- Le système **Top-Drive** (Nouvelle technologie).

**La Table de Rotation (Rotary table):**

Plateau circulaire mû par de puissants moteurs, qui transmet, par l'intermédiaire de la tige carrée (ou hexagonale) d'entraînement, le mouvement de rotation à l'outil de forage par l'intermédiaire du train de sonde (tiges de forage, masse-tiges, etc...).

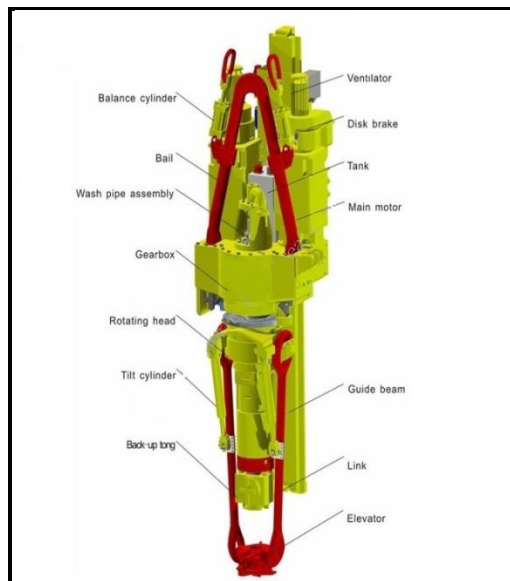


**Figure I.17:** La table de rotation.

**Top Drive:**

Le Top-drive est une tête d'injection motorisée qui, en plus de l'injection, assure la rotation de la garniture de forage. Ainsi, on n'a besoin ni de la tige d'entraînement ni de la table de rotation pour faire tourner la garniture, c'est le top drive qui s'en charge.

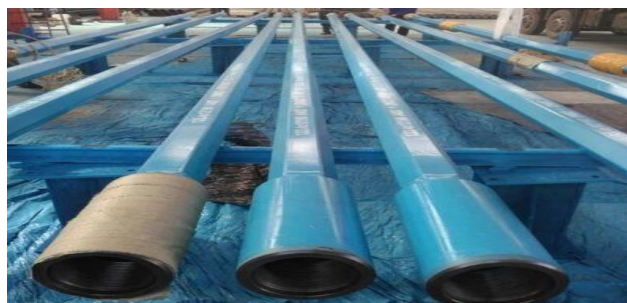
Des rails placés tout le long du mât le guident dans ses déplacements.



**Figure I.18:** Le Top drive.

**Tige carrée d'entraînement (ou hexagonale):**

Tige spéciale de section carrée (ou hexagonale) vissée au sommet des tiges de forage, entraînée par la table de rotation, pour faire tourner la garniture de forage.



**Figure I.19:** La Tige carré (hexagonale).

### **Système de Pompage (Circulation):**

Le système de circulation est constitué de plusieurs équipements par lesquels circule la boue de forage de la surface jusqu'au fond du puits et remonte à travers l'outil et l'espace annulaire à la surface (circulation directe) ou par l'intérieur des tiges de forage (circulation inverse).

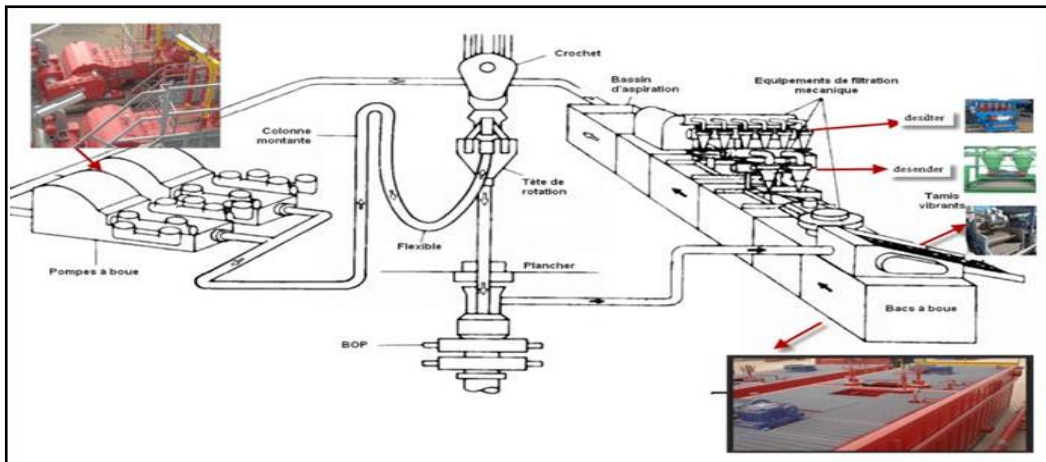


Figure I.20: Schéma général du circuit de fluide de forage [13].

### **Équipements de pompage et de circulation:**

Ils sont composés principalement de:

- Pompes à boue (mud pumps), Bacs à boue (mud tanks), Mixeurs, Agitateurs (hélicomélangeurs), Mitrailleuses de fond et de surface (agitateurs hydrauliques), Tamis vibrants, Désableurs, Désilteurs, Centrifugeuses, Dégazeur, Les conduites d'aspirations et vannes, Le flexible d'injection.

Ces équipements assurent la fabrication, le pompage et la circulation ainsi que le traitement mécanique des fluides de forage.

### **Pompes de forage (Mud pumps):**

Elles jouent un rôle important dans l'installation de forage, et permettent la circulation de la boue lors d'un forage et assurer un débit de travail compatible avec le rendement optimal du trépan utilisé.

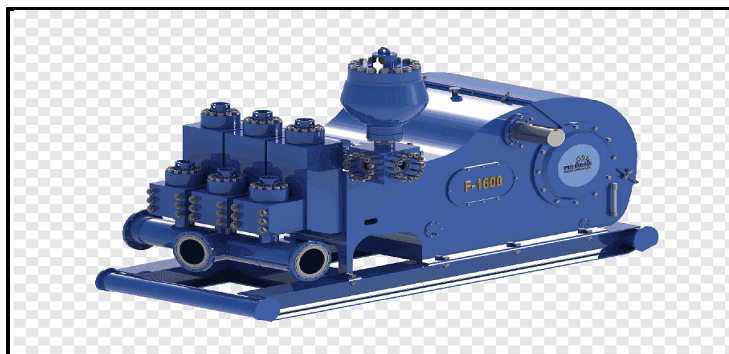


Figure I.21: La pompe de forage.

### **Bacs à boue (Mud tanks):**

Bassins contenant la boue de forage (fabriquée à partir de mélange d'eau, d'argile et de produits chimiques).

### **Tamis vibrant (Shale shakers):**

Bac vibrant percé de trous qui permettent de filtrer la boue à la sortie du puits pour la débarrasser des déblais et la reconditionner afin de la réutiliser.

**Flexible d'injection de boue:**

Conduit souple qui introduit la boue de forage dans la tête d'injection.



Figure I.22: Flexible d'injection de la boue de forage.

**Bacs à eau (Water tanks):**

Bassins contenant de l'eau industrielle utilisée dans la fabrication de la boue de forage et dans d'autres activités d'entretien, etc....



Figure I.23: Bacs à eau pour un appareil de forage.

**Tête d'injection (Swivel):**

Pièce reliée au crochet de levage et à la tige carrée, qui permet d'injecter la boue dans les tiges de forage pour refroidir et lubrifier le trépan.



Figure I.24: Tête d'injection.

**Système de Puissance**

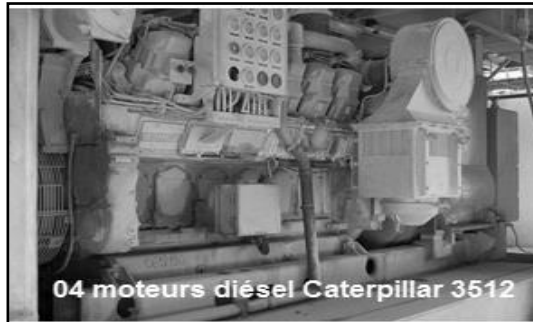
Le système de puissance produit l'énergie nécessaire au fonctionnement du chantier de forage, par l'intermédiaire de moteurs diesels [14].

**Équipements de puissance:**

- Moteurs diesel (Caterpillar ou autres), Génératrices, Compresseurs.  
Ils fournissent l'énergie nécessaire au bon fonctionnement de la sonde.

### Moteur (Engine):

Appareil qui transforme en énergie mécanique la combustion d'un mélange air-carburant. Dans pratiquement tous les cas, un moteur Diesel fournit la puissance nécessaire aux forages. La puissance est alors délivrée soit par électricité, soit mécaniquement. Dans le cas de forages profonds, des générateurs électriques alimentés par un moteur Diesel sont le plus souvent utilisés. L'option « électrique » a de nombreux avantages dont, entre autres, la réduction du bruit et une organisation du chantier plus simple.



(A) Moteurs diesels.



(B) Générateurs de courant.

Figure I.25: Système de production d'énergie [14].

### Système des Obturateurs (Sécurité aux puits)[15]:

C'est une large valve à la partie supérieure du puits, qui peut fermer les annulaires et les tubulaires quand le contrôle des fluides de forage est perdu ou l'arrivée d'une venue de fluide (huile ou gaz) non contrôlée. Cette valve est actionnée à distance par des vannes manuelles ou automatiques.

#### Équipements de sécurité:

Les équipements qui assurent la sécurité des puits sont constitués de:

- La tête de puits (composée de différents obturateurs),
- L'accumulateur de pression,
- Le manifold de duses [15].

#### Les Obturateurs annulaires (Annular BOP):

L'obturateur annulaire ou obturateur à membrane, se monte toujours au sommet des BOP, il a une forme cylindrique et constitue le premier élément à actionner en cas d'une éruption.

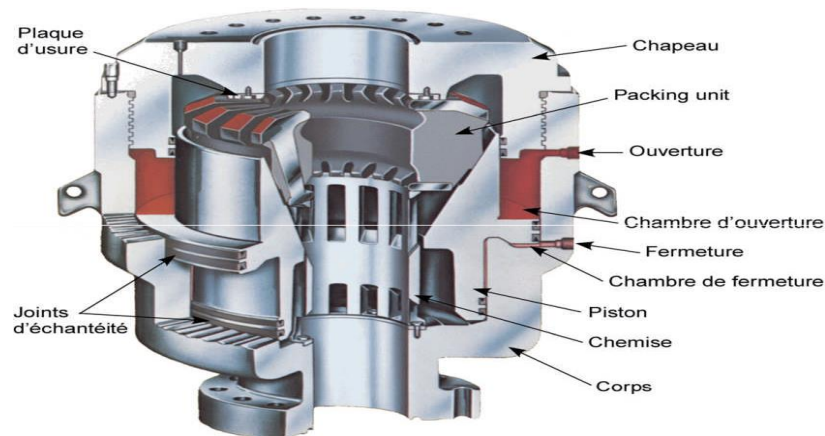


Figure I.26: Obturateur annulaire.

### Les Obturateurs à mâchoires (Rams BOP):

Les obturateurs à mâchoires ferment l'espace annulaire autour des tiges par le déplacement d'une paire de mâchoires (figure I.28).

Les mâchoires ferment et rendent étanche le puits en cas d'éruption, elles peuvent être:

- 1. A fermeture totale:** elles permettent de fermer totalement le puits en l'absence de tiges ou de les cisailer si elles sont présentes dans le puits,
- 2. A fermeture sur tiges:** elles sont munies d'ouvertures semi-circulaires, correspondant au diamètre extérieur des tiges, pour lesquelles elles sont prévues.
- 3. A fermeture variable:** elles permettent de fermer sur différentes tailles de tiges et même sur la tige d'entraînement [15].

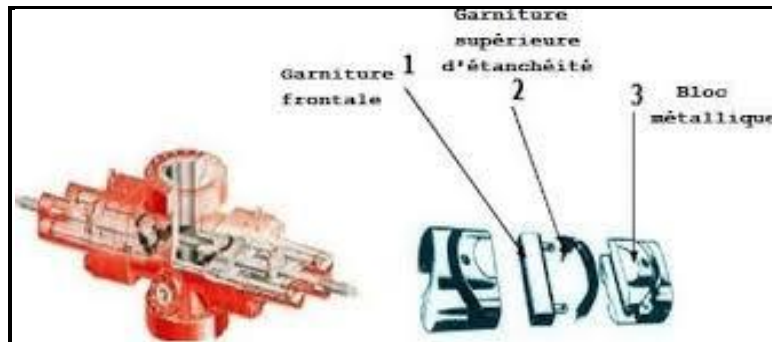


Figure I.27: Obturateur à mâchoires. Figure I.28: Mâchoires.

### Commande des Obturateurs:

Les ouvertures et les fermetures des obturateurs sont à commandes hydrauliques. Une unité d'accumulateurs permet de stocker un fluide hydraulique sous pression de manière à assurer une fermeture rapide des obturateurs en cas d'éruption.



Figure I.29: Unité hydraulique de commande (KOOMEY).

### Manifold duses (Choke Manifold):

C'est un ensemble de duses qui permettent de contrôler une venue.



Figure I.30: Manifold duses (Choke Manifold).

## **2- Matériel de fond:**

Cette partie regroupe l'ensemble de la garniture et des outils de forage qui travaillent à l'intérieur du puits, et sont en général:

-Tiges de forage (drill pipes), Masses tiges (drill collars), Outil de forage (rock bit), Raccords divers, Équipements auxiliaires.

### **Tiges de forage (Drill pipes):**

Tiges creuses en acier qui sont raccordées entre elles selon la profondeur du puits, dont la rotation active le trépan. Celles-ci permettent aussi le passage de la boue de forage.

Il existe des tiges de forage simples et des tiges de forage lourdes (heavy weight drill pipes).



Figure I.31: Tiges de forage.

### **Masse-tiges (Drill collars):**

Tiges lourdes d'acier situées immédiatement au-dessus du trépan sur lequel elles appliquent un certain poids pour qu'il entame la roche et creuse le puits. Il existe des masse-tiges lisses et des masse-tiges spiralées.



Figure I.32: Masse-tiges spiralées.

### **Trépan (Outil de forage):**

L'outil de forage assure sous l'effet du poids du train de sonde et de rotation la destruction des roches. L'outil de forage (trépan) est entraîné dans son mouvement de rotation au fond du puits par une colonne composée de tiges et masse-tiges creuses, vissées les unes aux autres.

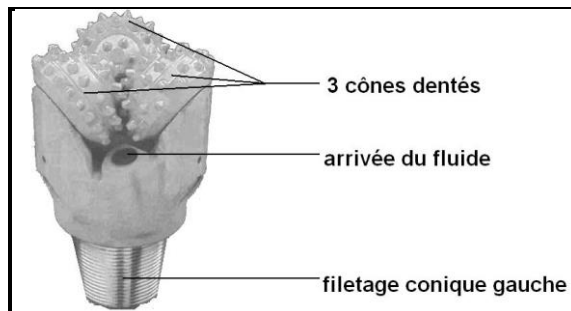


Figure I.33: Outil de forage.

### I.4. 3. Classification des Appareils de forage

#### 1- La classification des appareils de forage se fait en première approche par la capacité à atteindre une certaine profondeur de forage maximale et selon la puissance du treuil.

Les appareils de forage sont conçus pour forer dans des gammes de profondeurs données:

**Tableau I.2:** Classification des appareils de forage [9].

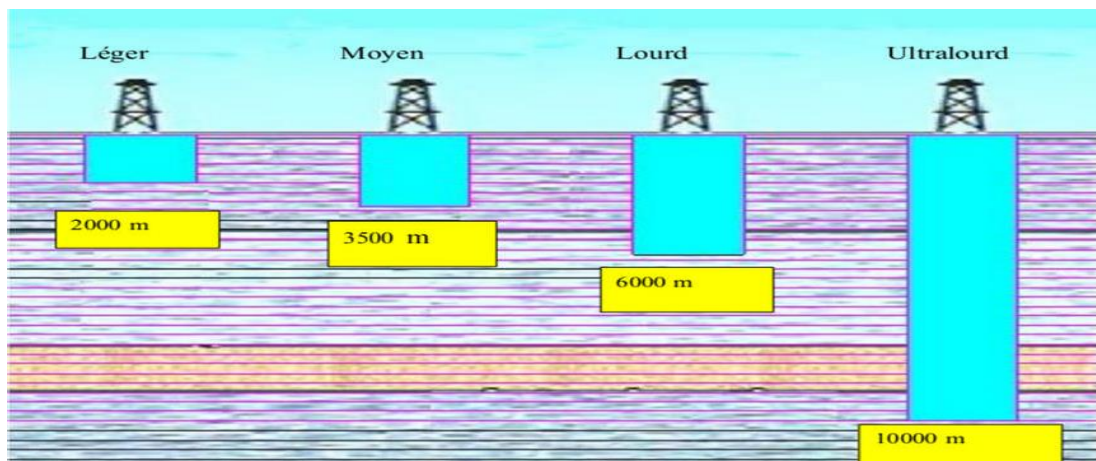
Type d'appareil	Profondeur en feet	Profondeur en m	Puissance
Appareil léger	4921 feet – 6561feet	1500 m- 2000 m	650 HP
Appareil moyen	11482 feet	3500 m	1500 HP
Appareil lourd	19685 feet	6000 m	2000 HP
Appareil super lourd	26246 feet	8000m-10000m	3000 HP

Les deux caractéristiques relativement liées qui interviennent dans la classification d'un appareil de forage sont:

1. La capacité de profondeur de forage maximale,
2. La puissance du treuil.

La règle du pouce donne d'une manière pragmatique: Pour 100 feet de forage, il faut 10 HP de puissance au treuil.

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



**Figure I.34:** Classification des appareils de forage [11].

#### 2- Les appareils de forage et work-over de l'ENTP sont classés aussi par classe selon la fourniture et les spécifications techniques des équipements:

**Tableau I.3:** de classification des Appareils de forage de l'ENTP.

Classe	Type de transmission	Numéro de l'Appareil
Classe I	Electrique	TP 137, TP 139, TP 169, TP 194, TP 198, TP 199, TP 202, TP 203, TP 206, TP 220, TP 221, TP 222, TP 223
Classe II	Electrique	TP 127, TP 128, TP 129, TP 130, TP 158, TP 160, TP 161, TP 162, TP 180, TP 181, TP 182, TP 183, TP 184, TP 185, TP 205, TP 206, TP 207, TP 208, TP 209, TP 210, TP 211, TP 212, TP 213, TP 214, TP 215, TP 216, TP 217
Classe III	Electrique	TP 195, TP 196, TP 197, TP 200, TP 201, TP 219
	Mecanique	TP 179, TP 186, TP 187, TP 188, TP 189, TP 192
Classe IV	Mecanique	TP 170, TP 172, TP 173, TP 178, TP 175, TP 176, TP 177, TP 218



#### **I.4. 4. Spécification d'un Appareil de forage**

La puissance du treuil est une caractéristique primordiale pour déterminer la puissance d'un appareil de forage.

Pour les catégories d'appareils, on peut les classer selon la puissance de levage (tableau I-4) [11].

**Tableau I.4:** Classification des appareils de forage par la puissance du treuil.

<b>Léger</b>	<b>Moyen</b>	<b>Lourd</b>	<b>Ultralourd</b>
650 HP	1500 HP	2000 HP	3000 HP

#### **Système de levage:**

Pour soulever la garniture de forage (ensemble tiges - tiges lourdes – masse-tiges – outil de forage, etc...), il faut utiliser un système de levage de grande capacité, car la garniture de forage peut atteindre un poids supérieur à 150 tonnes.

Ce système de levage est constitué:

- d'un mât,
- d'un treuil,
- d'un palan comprenant les moufles fixe et mobile et le câble de forage [5].

#### **Les Paramètres de forage:**

On appelle paramètres de forage les différents facteurs qui conditionnent la vitesse d'avancement d'un outil de forage.

Ils peuvent être classés en deux catégories:

##### **1. Les paramètres mécaniques:**

- Type de l'outil,
- Poids sur l'outil,
- Vitesse de rotation,
- Nature de roche.

##### **2. Les paramètres hydrauliques:**

- Le débit,
- La pression,
- La nature du fluide de forage et ses caractéristiques (densité, viscosité et filtrat).

**Tableau I.5:** Spécifications des Appareils de Forage de L'ENTP

<b>Appareil 2000 HP</b>	<b>Appareil 1500 HP</b>
<b>Mat (Mast)</b> Depth rating : 9000 m with DP 3''1/2 Static hook load capacity: 1025000 lbs Max wind speed w/pipe racked: 100 Knots Height : 142' to 156'	<b>Mat (Mast)</b> Depth rating : 19737' with DP 3''1/2 Static hook load capacity: 1025000 lbs Max wind speed w/pipe racked: 100 Knots Height : 142'
<b>Substructure</b> Clear heigh : 35' Racking capacity : 272 stands (28 m) of 5''1/2 DP	<b>Substructure</b> Clear heigh : 25' Max rotary load of set back: 700.000 lbs Maxi pipe set back load of rotary load: 400.000lbs
<b>Treuil (Drawworks)</b> Puissance: 2000 HP Range (profondeur max de forage): 9000 m	<b>Treuil (Drawworks)</b> Puissance: 1500 HP Range (profondeur max de forage): 16000'
<b>Capacité statique au crochet (hook)</b> En 14 brins : 1 300 000 lbs	<b>Capacité statique au crochet (hook)</b> En 08 brins → 333 tonnes

	<p>En 10 brins → 416 tonnes En 12 brins → 500 tonnes</p>
<p><b>Moufle fixe (crown block)</b> Sheaves : 07 / 60" and 01/60" Max rated static hook load: 1 500 000 lbs</p>	<p><b>Moufle fixe (crown block)</b> Max rated static hook load: 1 100 000 lbs Sheaves : 06/60" and 01/60"</p>
<p><b>Moufle mobile (travelling block)</b> Capacité : 1 000 000 lbs Sheaves : 06 / 60"</p>	<p><b>Moufle mobile (travelling block)</b> Capacité : 1 000 000 lbs Nombre de poulies : 06/60"</p>
<p><b>Cable de forage</b> Diamètre : 1" 1/2 – 6 x 19 IWRC – EIPS</p>	<p><b>Cable de forage</b> Diamètre : 1 3/8 – 6 x 19 IWRC – EIPS</p>
<p><b>Table de rotation (Rotary table)</b> Opening size : 37"1/2 RPM : 250 tr/mn Static load rating: 1 000 000 lbs Tractor motor : GE 752 ARB 3</p>	<p><b>Table de rotation (Rotary table)</b> Opening size: 27½ Static load rating: 350 tonnes RPM: 250 tr/mn Tractor motor : GE 752 ARB 3</p>
<p><b>Tête d'injection (Swivel)</b> Type: PC 500 Capacité : 500 tonnes</p>	<p><b>Tête d'injection (Swivel)</b> Type: P-400 Capacité : 400 tonnes</p>
<p><b>Pompe à boue (Mud pump)</b> Nombre : 02 Type: 12P160 Puissance d'entrée: 1600HP Tractor motor : GE 752 ARB 3 <b>Chemisage et pressions</b> 7" ¼ pression max 3200 Psi 7" pression max 3430 Psi 6" ½ pression max 3980 Psi 6" pression max 4670Psi 5" ½ pression max 5000Psi</p>	<p><b>Pompe à boue (Mud pump)</b> Nombre : 02 Type: 12P160 Puissance d'entrée: 1600HP Tractor motor : GE 752 ARB 3 <b>Chemisage et pressions</b> 7" ¼ pression max 3200 Psi 7" pression max 3430 Psi 6" ½ pression max 3980 Psi 6" pression max 4670Psi 5" ½ pression max 5000Psi</p>
<p><b>Stockage (Storage)</b> Mud tank : 7 tanks 3145 BBL Water tank : 3 tanks 1510 BBL Fuel tank : 2 tank 818 BBL <b>Contrôle des solides (Solids control)</b> Mud agitators : 1 Brandt-Dual Tandem 20/80 Mud agitators : 2 Derrick 160-96F-3P Mud cleaner : 1 Brandt SMC -12x4" Desander : 1 Brandt SRS2-2x10" Degasser : 1 Brandt DG-10</p>	<p><b>Stockage (Storage)</b> Mud tank : 7 tanks 3145 BBL Water tank : 3 tanks 1258 BBL Fuel tank : 2 tank 818 BBL <b>Contrôle des solides (Solids control)</b> Mud agitators : 3 Derrick FLC514 Mud cleaner : 1 Derrick 20x4" Desander : 1 Derrick 2x10" Degasser : 1 Brandt DG-10</p>
<p><b>Système de puissance (Power system)</b> <b>CAT engine model 3512</b> (number: 04) KVA:1288 – KW:902 – Volt:600– RPM: 1200 <b>CAT engine model 3406 emergency</b> KVA: 400 – KW: 320 – VOLT: 480 RPM: 1800–Hz : 60 <b>Generator</b> : 4 KATO.ENG 21064</p>	<p><b>Système de puissance (Power system)</b> <b>CAT engine model 3512</b> (number:04) KVA:1288 – KW:902 – Volt:600– RPM: 1200 <b>CAT engine model 3406 emergency</b> KVA: 400 – KW: 320 – VOLT: 480 RPM: 1800–Hz : 60 <b>Generator</b> : 4 KATO.ENG 21064</p>
<p><b>Equipement de sécurité (Blow Out Equipment) BOP</b> - Annular 13 5/8 10 000 Psi Marque: HYDRIL Type: GK - Ram BOP 13 5/8 10 000 Psi Model : Double, Marque: CAMERON Type: U  <b>Coflexible</b> 4<sup>1/16</sup> 5000 Psi w/Hub connection</p>	<p><b>Equipement de sécurité (Blow Out Equipment) BOP</b> - Annular 13 5/8 5000 Psi Marque: HYDRIL Type: GK Latched head - Ram BOP 13 5/8 5000 Psi Model : Double, Marque: CAMERON Type: U  <b>Coflexible</b> 4<sup>1/16</sup> 5000 Psi w/Hub connection</p>

<p><b>Kill line valves</b> Manuelle: 2 <sup>1/16</sup> 10000Psi R– Checkvalve: 2 <sup>1/16</sup> 10000 Psi</p> <p><b>Chocke line valves</b> HCR: 4 <sup>1/16</sup> 10 000 Psi Manuelle : 4 <sup>1/16</sup> 10 000 Psi</p> <p><b>Manifold porte duses</b> Manufactured: CAMERON P.pressure: 10 000 Psi Duse manuelle 4 <sup>1/16</sup> 10 000 Psi w/ H2 – 2” Hydraulic chocke : SUPERIOR 4 <sup>1/16</sup> 10 000 Psi</p> <p><b>Accumulateur (Accmulator unit)</b> Stewart Stevenson 80 with 22 bottles of 3000 Psi</p>	<p><b>Kill line valves</b> Manuelle: 2 <sup>1/16</sup> 5000Psi R– Checkvalve: 2 <sup>1/16</sup> 5000 Psi</p> <p><b>Chocke line valves</b> HCR: 4 <sup>1/16</sup> 5000 Psi Manuelle : 4 <sup>1/16</sup> 5000 Psi</p> <p><b>Manifold porte duses</b> Manufactured: CAMERON P.pressure: 10 000Psi Duse manuelle 4 <sup>1/16</sup> 10 000 Psi w/ H2 – 2” Hydraulic chocke : SUPERIOR 4 <sup>1/16</sup> 10 000 Psi</p> <p><b>Accumulateur (Accmulator unit)</b> Stewart Stevenson 80 with 22 bottles of 3000 Psi</p>
--	---

<b>Appareil 1200 HP</b>	<b>Appareil 1000 HP</b>
<p><b>Mat (Mast)</b> Depth rating : 13 158’ with DP 3”1/2 Static hook load capacity: 600 000 lbs Max wind speed w/pipe racked: 100 Knots Height : 142’</p>	<p><b>Mat (Mast)</b> Depth rating : 12 000’ with DP 3”1/2 Static hook load capacity: 600 000 lbs Max wind speed w/pipe racked: 100 Knots Height : 142’</p>
<p><b>Substructure</b> Clear heigh : 21’ Racking capacity : 200 stands of 5” DP + 10 stands of 8” to 9”1/2 DC</p>	<p><b>Substructure</b> Clear heigh : 21’ Racking capacity : 135 stands of 5” DP + 10 stands of 8” to 9”1/2 DC</p>
<p><b>Treuil (Drawworks)</b> Puissance: 1200 HP</p>	<p><b>Treuil (Drawworks)</b> Puissance: 1000 HP</p>
<p><b>Mouflefixe (crown block)</b> Sheaves : 05 / 42” and 01/42” / 720 000 lbs Max rated static hook load: 360 tonnes</p>	<p><b>Mouflefixe (crown block)</b> Sheaves : 05 / 42” and 01/42” / 720 000 lbs Max rated static hook load: 360 tonnes</p>
<p><b>Moufle mobile (travelling block)</b> Capacité: 350 tonnes Nombre de poulies : 05/42”</p>	<p><b>Moufle mobile (travelling block)</b> Capacité: 350 tonnes Nombre de poulies : 05/42”</p>
<p><b>Cable de forage</b> Diamètre : 1” 3/8 – 6 x 19 IWRC – EIPS</p>	<p><b>Cable de forage</b> Diamètre : 1”1/4 – 6 x 19 IWRC – EIPS Charge de rupture effective: 87108 KgF/brin-192000lbs</p>
<p><b>Table de rotation (Rotary table)</b> Opening size : 27”1/2 RPM : 250 tr/mn Static load rating: 1 000 000 lbs Tractor motor : GE 752 ARB 3</p>	<p><b>Table de rotation (Rotary table)</b> Opening size: 27½ RPM : 250 tr/mn Static load rating: 1 000 000 lbs Tractor motor : GE 752 ARB 3</p>
<p><b>Tête d’injection (Swivel)</b> Type: P-400 Capacité : 400 tonnes</p>	<p><b>Tête d’injection (Swivel)</b> Type: P-400 Capacité : 400 tonnes</p>
<p><b>Pompe à boue (Mud pump)</b> Nombre : 02 Type: 9P100 Puissance d’entrée: 1085HP Tractor motor : GE 752 ARB 3</p>	<p><b>Pompe à boue (Mud pump)</b> Nombre : 02 Type: 9P100 Puissance d’entrée: 1085HP Tractor motor : GE 752 ARB 3</p>
<p><b>Stockage (Storage)</b> Mud tank : 5 tanks 2233 BBL Water tank : 3 tanks 1500 BBL Fuel tank : 1 tank 472BBL</p>	<p><b>Stockage (Storage)</b> Mud tank : 5 tanks 2359 BBL Water tank : 3 tanks 1500 BBL Fuel tank : 1 tank 497BBL</p>

<p><b>Contrôle des solides (Solids control)</b>  Mud agitators : 2 Derrick 2/48 – 120F – 4TA  Mud cleaner : 1 Brandt SMC -12x4"  Desander : 1 Brandt SRS2-2x12"  Degasser : 1 Brandt DG-10</p>	<p><b>Contrôle des solides (Solids control)</b>  Mud agitators : 1 Brandt-Dual Tandem 20/80  Mud cleaner : 1 Brandt SMC 12x4"  Desander : 1 Demco -2x10"  Degasser : 1 Brandt DG-10</p>
<p><b>Système de puissance (Power system)</b>  <b>CAT engine model 3512</b> (number: 03)  KVA:1288 – KW:902 – Volt:600– RPM: 1200  <b>CAT engine model 3406 emergency</b> (number: 01)  KVA: 400 – KW: 320 – VOLT: 480  RPM: 1800–Hz : 60  <b>Generator</b> : 4 KATO.ENG 21064</p>	<p><b>Système de puissance (Power system)</b>  <b>CAT engine model 3512</b> (number: 03)  KVA:1288 – KW:902 – Volt:600– RPM: 1200  <b>CAT engine model 3406 emergency</b> (number: 01)  VA: 400 – KW: 320 – VOLT: 480  RPM: 1800–Hz : 60  <b>Generator</b> : 4 KATO.ENG 21064</p>
<p><b>Équipement de sécurité (Blow Out Equipment) BOP</b>  Annular 13 <sup>5/8</sup> 5 000 Psi  Marque: HYDRIL Type: GK  Double Rams BOP 13 <sup>5/8</sup> 5000 Psi  Model : Double Marque: CAMERON  Type: U  <b>Kill line valves</b>  Manuelle: 2 <sup>1/16</sup> 5000 Psi  R– Check valve: 2 <sup>1/16</sup> 5000 Psi  <b>Chocke line valves</b>  HCR: 4 <sup>1/16</sup> 5000 Psi  Manuelle : 4 <sup>1/16</sup> 5000 Psi  <b>Manifold porte duses</b>  Manufactured: CAMERON  P.pressure: 5000 Psi  Duse manuelle 4 <sup>1/16</sup> 5000 Psi w/ H2 – 2"  Hydrolic chocke : SUPERIOR 4 <sup>1/16</sup> 5000 Psi  <b>Accumulateur (Accmulator unit)</b>  Koomey 80 ABB with 22 bottles of 3000 Psi</p>	<p><b>Équipement de sécurité (Blow Out Equipment) BOP</b>  Annular 11" 5000 Psi  Marque: HYDRIL Type: GK  Double Rams BOP 11" 5000 Psi  Model : Double Marque: CAMERON  Type: U  <b>Kill line valves</b>  Manuelle: 2 <sup>1/16</sup> 5000 Psi  R– Checkvalve: 2 <sup>1/16</sup> 5000 Psi  <b>Chocke line valves</b>  HCR: 4 <sup>1/16</sup> 5000 Psi  Manuelle : 4 <sup>1/16</sup> 5000 Psi  <b>Manifold porte duses</b>  Manufactured: CAMERON  P.pressure: 5000 Psi  Duse manuelle 4 <sup>1/16</sup> 5000 Psi w/ H2 – 2"  Hydrolic chocke : SUPERIOR 4 <sup>1/16</sup> 5000 Psi  <b>Accumulateur (Accmulator unit)</b>  Koomey 80 ABB with 22 bottles of 3000 Psi</p>

<b>Appareil 750 HP</b>	<b>Appareil 500 HP</b>
<p><b>Mat (Mast)</b>  Depth rating : 7500' with DP 3"1/2  Static hook load capacity: 300 000 lbs  Max wind speed w/pipe racked: 100 Knots  Height : 112'</p>	<p><b>Mat (Mast)</b>  Depth rating : 7500' with DP 2"7/8  5000' with DP 3"1/2  Static hook load capacity: 215 000 lbs  Max wind speed w/pipe racked: 100 Knots  Height : 112'</p>
<p><b>Substructure</b>  Clear heigh : 13'  Racking capacity : 125 stands of 3"1/2 DP + 06 stands of 6"3/4 to 8" DC</p>	<p><b>Substructure</b>  Clear heigh : 4'-7'  Casing load : 300 000lbs  Seatback load : 260 000lbs</p>
<p><b>Treuil (Drawworks)</b>  Puissance: 750 HP</p>	<p><b>Treuil (Drawworks)</b>  Puissance: 500 HP</p>
<p><b>Moufle fixe (crown block)</b>  Max rated static hook load: 300 000lbs  Sheaves : 05/30" and 01/30"</p>	<p><b>Moufle fixe (crown block)</b>  Max rated static hook load: 300 000lbs  Sheaves : 05/30" and 01/30"</p>
<p><b>Moufle mobile (travelling block)</b>  Max rated static hook load: 300 000 lbs  Sheaves : 04/30"</p>	<p><b>Moufle mobile (travelling block)</b>  Max rated static hook load: 300 000lbs  Sheaves : 04/30"</p>
<p><b>Cable de forage</b>  Diamètre: 1"– 6 x 19 IWRC – EIPS</p>	<p><b>Cable de forage</b>  Diamètre: 1"– 6 x 19 IWRC – EIPS</p>

<p><b>Table de rotation (Rotary table)</b>  Opening size : 17"1/2  RPM : 125 tr/mn  Static load rating: 650 000 lbs  Tractor motor : GM12VA (ou mécanique/cardan)</p>	<p><b>Table de rotation (Rotary table)</b>  Opening size : 17"1/2  RPM : 125 tr/mn  Static load rating: 650 000 lbs  Tractor motor : GM12VA (ou mécanique/cardan)</p>
<p><b>Tête d'injection (Swivel)</b>  Type: PC 150  Capacité : 150 tonnes</p>	<p><b>Tête d'injection (Swivel)</b>  Type: PC 150  Capacité : 150 tonnes</p>
<p><b>Pompe à boue (Mud pump)</b>  Nombre : 02  Type: PZ9 GD  Puissance d'entrée: 1000HP  Tractor motor : CAT 399 D</p>	<p><b>Pompe à boue (Mud pump)</b>  Nombre : 01  Type: PT 350  Puissance d'entrée: 1000HP  Tractor motor : GMV12 - 750</p>
<p><b>Stockage (Storage)</b>  Mud tank : 5 tanks 1447 BBL  Water tank : 3 tanks 944 BBL  Fuel tank : 1 tank 440 BBL</p> <p><b>Contrôle des solides (Solids control)</b>  Mud agitators : 2Derrick – Flo line 58  Mud cleaner : 1 Brandt SMC 12x4"  Desander : 1 Brandt SRS2-2x10"  Degasser : 1 Brandt DG-10</p>	<p><b>Stockage (Storage)</b>  Mud tank : 3 tanks 566BBL  Water tank : 2 tanks 465 BBL  Fuel tank : 1 tank 63 BBL</p> <p><b>Contrôle des solides (Solids control)</b>  Mud agitators  Manufactured: BRANDT  Type: MA-15  Number: 10 (08-20HP)</p>
<p><b>Système de puissance (Power system)</b>  <b>CAT engine model D379</b> (number:02)  <b>CAT engine model 3406 emergency</b>  KVA: 400 – KW: 320 – VOLT: 480  RPM: 1800–Hz : 60  Generator : 4 KATO.ENG 21064</p>	<p><b>Système de puissance (Power system)</b>  <b>CAT engine model D353</b> (number:02)  <b>CAT engine model 3406 emergency:</b>  1 FILLIPINI 150 KVA  Generator : Two (02) 250 TH SRCR</p>
<p><b>Equipement de sécurité (Blow Out Equipement) BOP</b>  Annular 7"1/16 5000 Psi  Marque: HYDRIL Type: GK  Double Rams BOP 7"1/16 5000 Psi  Type:U</p> <p><b>Kill line valves</b>  Manuelle: 2 1/16 5000 Psi  R– Checkvalve: 2 1/16 5000 Psi</p> <p><b>Chocke line valves</b>  HCR: 4 1/16 5000Psi  Manuelle : 4 1/16 5000 Psi</p> <p><b>Manifold porte duses</b>  Manufactured: CAMERON  P.pressure: 5000 Psi  Duse manuelle 4 1/16 5000 Psiw/ H2 – 2"  Hydrolic chocke : SUPERIOR 4 1/16 5000 Psi</p> <p><b>Accumulateur (Accmulator unit)</b>  Stewart Stevenson 80 with 20 bottles of 3000 Psi</p>	<p><b>Equipement de sécurité (Blow Out Equipement) BOP</b>  Annular 7"1/16 5000 Psi  Marque: HYDRIL Type: GK  Double Rams BOP7"1/16 5000 Psi  Type: Shaffer LWS</p> <p><b>Kill line valves</b>  Manuelle: 2 1/16 5000 Psi  R– Checkvalve: 2 1/16 5000 Psi</p> <p><b>Chocke line valves</b>  HCR: 4 1/16 5000 Psi  Manuelle : 4 1/16 5000 Psi</p> <p><b>Manifold porte duses</b>  Manufactured:CAMERON  P.pressure: 5000 Psi  Duse manuelle 4 1/16 5000 Psi w/ H2 – 2"  Hydrolic chocke : SUPERIOR 4 1/16 5000 Psi</p> <p><b>Accumulateur (Accmulator unit)</b>  Stewart Stevenson 80 with 12 bottles of 3000 Psi</p>

#### **I.4.5. Les Divers fonctions d'un Appareil de forage (Levage, Rotation, Pompage, Motrice, Sécurité aux puits)**

L'appareil de forage est constitué d'un ensemble d'équipements et d'installations, des techniques opératoires et un personnel qualifié pour être apte à réaliser les fonctions suivantes, dans les règles de l'art et en toute sécurité des personnes et du matériel:

- 1- Fonction Levage,
- 2- Fonction Rotation,
- 3- Fonction Pompage (Circulation),
- 4- Fonction Motrice (Puissance),
- 5- Fonction Sécurité aux puits.

#### **Fonction levage:**

Cette fonction assure:

- Les manœuvres de descente et de remontée de la garniture de forage équipée d'outil servant à forer les différents terrains du gisement qu'il traverse,
- La descente des différents tubages,
- La descente de la colonne de production,
- Supporte toutes les charges de forage.

#### **Les éléments essentiels de la fonction levage sont:**

- Mât (Tour), Il supporte toutes les charges du forage,
- Substructure,
- Moufle fixe,
- Moufle mobile,
- Crochet de levage,
- Câble de forage,
- Treuil de forage.

#### **Mât ou Tour de forage:**

- Structure métallique dressée au-dessus d'un puits, par laquelle s'effectuent le levage et la descente des outils servants à creuser les roches.
- Une plateforme installée au sommet, comportant des traverses de forte capacité, supporte le moufle fixe. Une passerelle d'accrochage est installée à une hauteur de 26 mètres environ du plancher pour permettre l'accrochage des tiges. A environ 9 mètres du plancher, est montée une passerelle de tubages qui permet le guidage de ces derniers lors de leur vissage. La hauteur de cette passerelle est ajustable entre 6 et 12 mètres à l'aide d'un treuil à air.

#### **Substructure:**

- Infrastructure métallique sur laquelle reposent la tour de forage, les moteurs et les équipements annexes.
- Pendant la descente de tubage, elle supporte le poids du tubage posé sur la table et celui de la garniture de forage stockée dans le gerbier [10].

#### **Moufle fixe:**

- Dispositif mécanique fixé au sommet du mat (tour de forage), comportant plusieurs poulies et soutenant, avec le moufle mobile, les tiges de forage.

Il est composé d'une série de poulies montées généralement sur un même axe. Ces poulies sont montées folles, elles peuvent tourner librement et indépendamment autour de cet axe.

#### **Moufle mobile:**

Il est composé également d'une série de poulies montées en parallèle et folles sur un même axe. Le nombre de poulie est égal à la moitié du nombre de brins.

### **Crochet de levage:**

Pièce d'acier attachée au moufle mobile, destinée à retenir la tête d'injection et les tiges de forage.

### **Câble de forage:**

Les câbles utilisés sur l'appareil de forage sont des câbles en acier mais dont l'âme peut par fois être en chanvre. Autour de l'âme sont enroulés des torons, chacun de ces torons étant composés d'un certain nombre de fils d'acier.

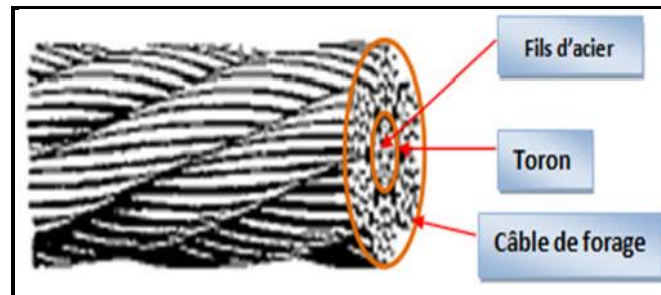


Figure I.35: Câble de forage [8].

### **Mouflage:**

Le système de mouflage comprend essentiellement le treuil, le moufle fixe, le moufle mobile et le câble de forage. Le schéma (figure I.36) représente l'ensemble du chemin du câble de forage et les différents composants qui le constituent.

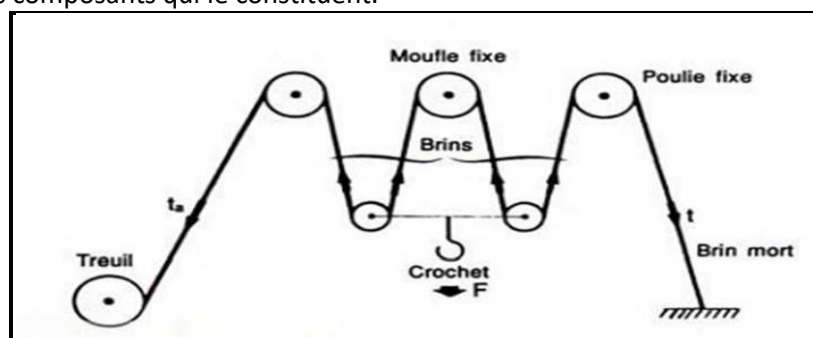


Figure I.36: Schéma du mouflage.

### **Treuil de forage (drawworks):**

Le treuil est le cœur d'un appareil de forage, il assure:

- La levée et la descente de la garniture de forage et du tubage,
- Tire et alimente le câble de forage,
- Contrôle la vitesse du moufle mobile et le poids exercé sur l'outil,

Un treuil de forage est caractérisé par sa puissance maximale de levage [4].

### **Outils de plancher:**

#### **Élévateurs:**

Ce sont des élévateurs à butée, le tool-joint venant buter sur la partie supérieure de l'élévateur lorsque celui-ci soulève un élément de train de tige.

#### **Coins de retenue (cales):**

Sont destinés à maintenir le train de sonde suspendu à la table de rotation pendant le dévissage de chaque longueur.

### **Clés de serrage à mâchoires:**

Les clés sont au nombre de deux. Elles sont destinées à bloquer le filetage des joints après chaque vissage ou les débloquer avant chaque dévissage.



Figure I.37: Matériels annexes de levage.

### **Fonction Rotation:**

La rotation de la garniture de forage est assurée par le système de rotation. Actuellement, il existe deux types de systèmes: Le Système "Conventionnel (Table de Rotation)" et le Système de Top-Drive.

#### **Table de Rotation:**

##### **Constitution de la table de rotation:**

- La table est une machine de rotation destinée à l'entraînement d'une colonne de forage suspendue verticalement. Elle fait tourner la garniture de forage par l'intermédiaire d'une tige carrée (ou hexagonale).
- Pendant les manœuvres, la table de rotation supporte le poids de la garniture, elle est utilisée aussi pour dévisser rapidement les tiges.

##### **Coins d'entraînement:**

Appelé aussi le Rotary Kelly Bushing (RKB), Il lie avec un engrenage la fourrure principale à l'aide de ses quatre broches qui entrent dans quatre trous correspondants de la fourrure principal.

##### **Fourrure Principale:**

Elle transmet le mouvement de rotation au coin d'entraînement et à la tige carrée. C'est aussi le lien de connexion entre la table de rotation et les cales.

#### **Top-drive ou Tête d'Injection motorisée:**

Un nouveau système de rotation a été mis en œuvre (nouvelle technologie), il s'agit du Top-Drive. Le Système Top-Drive ou Tête d'Injection motorisée, est accroché au moufle mobile et géré à partir du plancher.

Le Top-drive fait tourner la garniture de forage sans la table de rotation et la tige carrée.

Aussi l'avantage du Top-drive au cours des opérations de forage les ajouts de tiges se font par longueur de trois tiges au lieu d'une simple tige (gain de temps dans la réalisation du puits).

##### **Constitution du Top-drive:**

##### **Moteur et Transmission:**

C'est un moteur électrique attaché à la tête d'injection est utilisé pour faire tourner la garniture de forage.

##### **Les Pipe Handler et les Elévateurs:**

Manipulés par le foreur, ils servent à attacher ou libérer les tiges de forage.



**Dolly:**

C'est un chariot qui permet le mouvement vertical du top-drive.

**Fonction Pompage (Circulation):**

Le système de circulation composé des équipements par lesquels circule la boue de forage. Il s'agit des bacs à boue, la conduite d'aspiration, les pompes de boue, la conduite de refoulement, le flexible de forage, la colonne montante, la tête d'injection, la tige carrée et la garniture de forage avant son retour aux bacs à boue.

**Pompes à boue (Pompes de forage):****Fonctionnement de la pompe:**

Le rôle principal de la pompe à boue est d'aspirer les fluides de forage à partir des bacs à boue à travers la conduite d'aspiration et les refouler sous pression dans le puits.

**Types de pompes à boue:****1. Pompes à boue duplex à double effet:**

Ce sont des pompes volumétriques alternatives à mécanisme bielle - manivelle qui comportent deux pistons à double effet, c'est-à-dire que chaque piston aspire et refoule des deux côtés, deux clapets (un pour l'aspiration et l'autre pour le refoulement) sont placés à l'arrière de chaque cylindre.

**2. Pompes à boue triplex à simple effet:**

Ce sont des pompes volumétriques alternatives à mécanisme bielle - manivelle pour ces pompes les manivelles des trois pistons sont décalées à 120° et les clapets sont au nombre de 6 (3 à l'aspiration et 3 au refoulement).

**3. Avantages des pompes triplex par rapport au duplex:**

- Facilité d'entretien et de manipulation,
- Plus économique,
- Facilité d'accès à la section du fluide,
- Refoulement avec moins de surpression que la duplexe,
- Q (débit) et P (pression) importants exigés dans les forages profonds.

**Bacs à Boue:**

Ce sont des bassins en acier (lieu de fabrication et de stockage de la boue), on distingue les types de bacs selon leurs rôles:

- Bac de fabrication de la boue,
- Bac sous vibrateurs,
- Bac de décantation,
- Bac d'aspiration de la boue par la pompe de forage.

**Colonne montante et Flexible d'injection:**

La partie de surface du système de circulation est constituée de:

- Colonne montante: C'est une tige verticale qui conduit le fluide vers le flexible d'injection,
- Flexible d'injection: C'est le flexible du forage rotary, qui conduit les fluides de la colonne montante à la tête d'injection et la tige carrée.

**Tête d'injection:**

La tête d'injection représente un mécanisme qui relie le mouflage non tournant à la partie qui tourne au cours du forage; donc elle appartient autant à l'équipement de circulation de boue qu'à l'équipement de rotation, en effet la tête d'injection joue un double rôle:

- Permet la circulation de la boue jusqu'au trépan, animé d'un mouvement de rotation,
- Supporte le poids de la garniture pendant le forage [5].

### **Tamis vibrant (Shale shaker):**

Équipement sur lequel on place des toiles de tamis, qui permettent de filtrer et tamiser la boue à la sortie du puits pour la débarrasser des déblais et la reconditionner afin de la réutiliser.

### **Fonction Motrice (Puissance):**

Pour le fonctionnement de différents équipements, une source d'énergie est indispensable. Elle est produite par le système de puissance. Cette puissance se transforme en courant électrique par des générateurs de courant et distribué sur les différentes parties de la sonde.

### **Sources d'énergie:**

On peut rencontrer sur des plate-formes de production, l'utilisation de puissance fournie par des turbines à gaz et même parfois le raccordement du chantier de forage au réseau de distribution électrique, mais même si ce système présente des avantages majeurs tels qu'une énergie peu coûteuse, silencieuse, il modifie le caractère autonome du chantier de forage ce qui dans beaucoup de cas est réhabilitaire.

### **Systèmes de transmissions de puissance:**

#### **Transmission mécanique:**

Plusieurs moteurs diesels travaillent en parallèle grâce à leur interconnexion par un système de chaînes et d'embrayage. Les moteurs diesels sont équipés de convertisseurs de couple. Le chef de poste doit gérer l'affectation des moteurs en fonction de ses besoins: en forage, un ou deux moteurs pour le pompage, un moteur pour la transmission de la table de rotation, et sa manœuvre. Tous les moteurs peuvent être utilisés pour le treuil de levage [9].

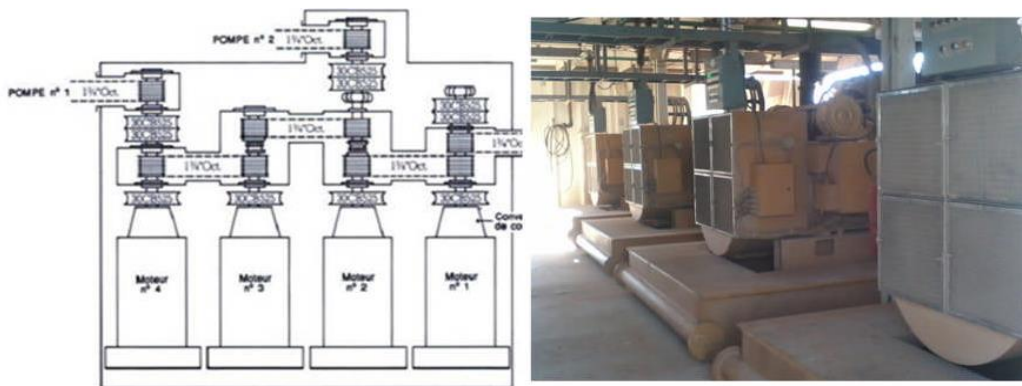


Figure I.38: Transmission de la puissance diesel.

#### **Transmission électrique:**

Les appareils de forage utilisent le système pour la consommation d'énergie électrique qui est fournie par le moteur diesel et les génératrices, l'avènement des thyristors SCR a pour rôle le développement du système AC/DC [9].

### **Fonction Sécurité au Puits (Obturbateurs)**

#### **Bloc d'obturation de puits pour la maîtrise des venues:**

La maîtrise des éruptions provenant d'un puits, nécessite un bloc d'obturation consistant en un système de vannes. Cette maîtrise peut se faire en contenant les venues dans le puits ou en évacuant ces dernières. Dans le cas de forages pétroliers, le bloc d'obturation doit réaliser les fonctions suivantes:

1. Obturation du puits par fermeture sur tige,
2. Cisaillement du train de tiges,
3. La suspension du train de tiges,
4. La maîtrise du puits avant sa réouverture.

### **Le système des Obturateurs:**

Il existe plusieurs types d'obturateurs:

- Obturateurs à membrane,
- Obturateurs à mâchoires.

### **Obturateurs annulaires:**

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

### **Obturateurs à mâchoires:**

Ces équipements comportent des mâchoires en acier [rams] équipées des garnitures qui assurent l'étanchéité entre l'intérieur du puits et les tiges qui en sortent.

Les mâchoires qui ferment le puits avec les tiges dedans s'appellent des mâchoires à fermeture sur tiges. Si le puits est vide, on utilise des mâchoires dites à fermeture totale.

### **Les Accumulateurs ou l'unité hydraulique de commandes des BOP (le Koomy):**

Il s'agit d'un accumulateur (de pression) qui permet la commande à distance des vannes du BOP. Il est capable de pomper un fluide à haute pression pour fermer ou ouvrir les vannes du BOP.

### **Circuit manifold:**

#### **a- Manifold de duses:**

Le manifold de duses permet durant le contrôle d'appliquer une contre pression dans le puits à l'aide d'une duse réglable et de diriger le retour vers les bacs, le séparateur, la torche ou le borbier.

#### **b- Choke line:**

La choke line est la conduite qui relie l'empilage des obturateurs au manifold de duse. Elle doit avoir une pression de travail égale à celle des obturateurs et un diamètre intérieur supérieur ou égal à 3" pour réduire l'effet des pertes de charges, minimiser le risque de bouchage et l'usure durant le contrôle.

## **Garniture de Forage**

### **Composition de la Garniture de Forage:**

1. Train de tiges de forage,
2. Outil de forage.

### **Composition du train de tiges :**

- Tiges de forage,
- Tiges de forage lourdes (HWDP),
- Masse tiges.

### **Fonctions de la Garniture de Forage:**

- Descente et remontée de l'outil dans le puits,
- Pose d'un poids sur l'outil pour qu'il pénètre dans la formation,
- Transmission de la rotation à l'outil,
- Acheminement du fluide de forage de la surface jusqu'à l'outil.

### **Outils de Forage:**

**Le fonctionnement de l'Outil de forage est conditionné par 3 paramètres:**

- 1- Le Poids sur l'Outil (WOB) (Fournis par le système de levage),
- 2- La Rotation (RPM) (Exécuté par le système de rotation),
- 3- Le Débit de boue (Exécuté par le système de circulation).

Pour un même type d'Outil, il existe plusieurs formes et tailles des dents ou taillants:

- Grande taille des dents ou taillants et faible nombre de rangés ou de lames (Formation tendre),
- Petite taille des dents ou taillants et nombre de rangés ou lames important (Formation dure).

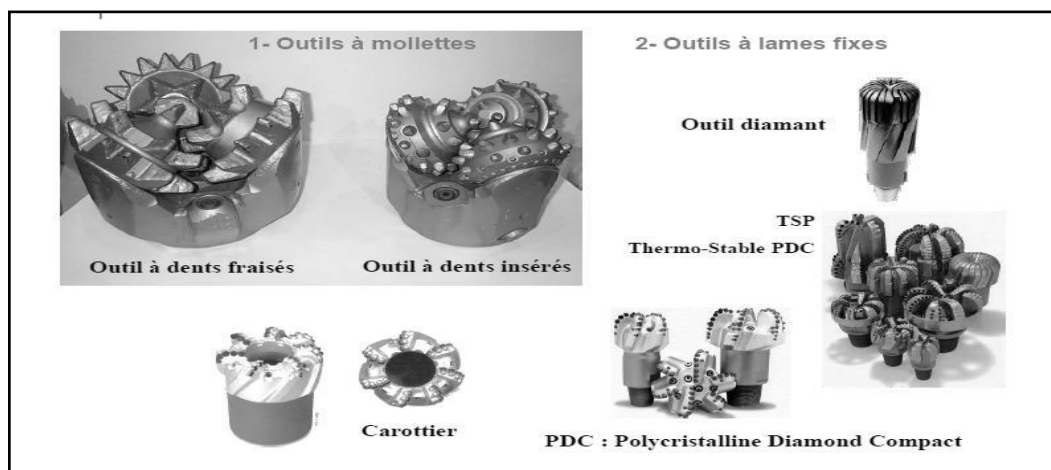


Figure I.39: Ensemble d'outil de forage et carottage [16].

### **Les Couronnes de Carottage [16].**

Pour des études approfondies, des morceaux de roches de forme cylindrique appelés carottes sont prélevés.

Les outils utilisés pour l'extraction de ces carottes sont les couronnes de carottage.

## **I.4. 6.Fluide de forage**

### **Introduction:**

La réussite d'un forage de puits de pétrole et de gaz dépend principalement des paramètres des fluides de forage (dites boues de forage). Le choix d'une boue adéquate aux particularités spécifiques des terrains traversés et aux conditions géologiques permet d'augmenter le rendement des appareils de forage et d'éviter l'endommagement (colmatage) des couches productrices, ce qui donnera une meilleure productivité des puits [1].

### **Généralités sur les boues de forage [16].**

#### **Définition de boue du forage:**

La boue de forage, est un système composé de différents Constituants.

#### **Les divers produits utilisés pour la fabrication des fluides de forage sont:**

L'eau, La bentonite (boues bentonitiques), L'huile (boue à l'huile), Le Sel (boue salée saturée), Les gels de polymère, utilisés pour la fabrication des boues ou comme additifs, les mousses, Le formiate de césium saturé dans l'eau est assez dense (densité  $d=2,3$ ) pour que certains sédiments flottent, La baryte en émulsion et les sels de sodium et de potassium augmentent aussi la densité des fluides.

La boue est préparée dans des bacs, elle est injectée à l'intérieur des tiges jusqu'à l'outil d'où elle remonte dans l'annulaire, chargée de déblais (cuttings).

A la sortie du puits, elle subit différents traitements, tamisage, dilution et ajouts de produits, de façon à éliminer les déblais transportés et à réajuster ses caractéristiques physicochimiques à leurs valeurs initiales, puis réutilisée.

### **Rôle des boues de forage:**

Les boues de forage sont des fluides, qui doivent avoir des propriétés leur permettant d'optimiser les fonctions suivantes, afin de réussir le forage du puits:

#### **1- Nettoyage du puits:**

La boue doit débarrasser le puits des particules des formations forées qui se présentent sous forme de débris de roche appelés « cuttings » ou « déblais ».

#### **2- Maintien des déblais en suspension:**

La boue de forage doit non seulement débarrasser le puits des déblais de forage durant les périodes de circulation, mais il doit également les maintenir en suspension pendant les arrêts de circulation.

#### **3- Refroidissement et lubrification de l'outil et du train de sonde:**

Du fait de son passage en surface, la boue en circulation se trouve à une température inférieure à celle des formations ce qui lui permet de réduire efficacement l'échauffement de la garniture de forage et de l'outil [6].

#### **4- Dépôt d'un cake imperméable:**

La filtration dans les formations perméables d'une partie de la phase liquide de la boue crée un film sur les parois du sondage, ce film est appelé cake. Le dépôt du cake permet de consolider et de réduire la perméabilité des parois du puits.

#### **5- Circulation du fluide de forage:**

Le fluide est injecté à l'intérieur des tiges [drill pipes], jusqu'à l'outil qui comporte également des orifices qui laissent passer la boue. Cette dernière une fois sortie de l'outil remonte par l'espace annulaire chargé de solides (déblais, etc...).

Elle est ensuite acheminée par un « tube goulotte » vers un « tamis vibrant » qui la tamise en enlevant les déblais et laissant la boue décanter pour être débarrassée de tous les solides venus du puits, puis subir des traitements (dilution, ajout de produits,...) et à réajuster ses caractéristiques physico-chimiques aux valeurs initiales, avant d'être réinjectée dans le puits.

#### **6- Lutter contre les pressions de formations:**

Contrebalancer la pression du gisement, éviter les éruptions incontrôlées et ainsi stabiliser le puits.

### **Système de circulation dans une installation de forage:**

#### **Destination et organisation:**

Pour des raisons de sécurité du puits et afin d'améliorer les conditions de travail dans le puits, la boue doit toujours remplir le trou, même en l'absence du train de sonde.

Dans la plus part des cas, le liquide de forage circule en circuit fermé, à partir des pompes dans le puits et du puits avec les déblais de terrain vers les équipements d'épuration et de nouveau vers les pompes.

#### **Fluide et circulation du fluide:**

##### **Fluide de forage:**

Pour évacuer les déblais, le fluide doit être d'une densité et d'une viscosité contrôlée régulièrement par le foreur, l'ajustement de ces paramètres se fait par ajout de bentonite et de polymères pour la viscosité, ainsi que de baryte, formiate de césium ou de sels de sodium ou de potassium pour la densité.

Le problème de l'évacuation des cuttings ne dépend pas uniquement des propriétés du fluide, la pression et le débit qui lui sont imposés, la surface de la colonne d'évacuation et les pertes sont d'autres facteurs dont il faut tenir compte.

#### **Circulation des fluides de forage:**

La boue est envoyée au moyen de pompes puissantes à travers un circuit de circulation.

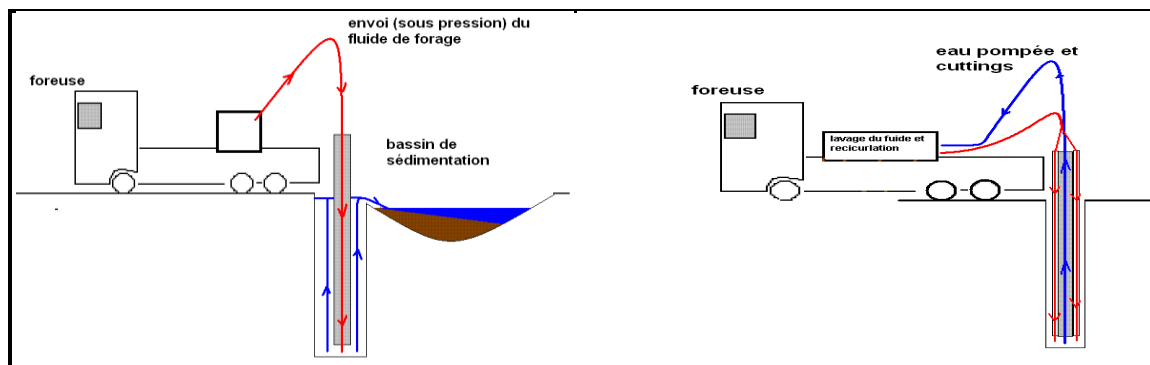
#### **On appelle le fluide:**

- En **circulation directe**, celui qui descend à l'intérieur du train de sonde et remonte par l'annulaire,
- Et le fluide en **circulation inverse** celui qui descend par l'espace annulaire et remonte à l'intérieur des tiges.

#### **La circulation inverse possède plusieurs avantages:**

- Si, lors de la circulation du fluide, les parois nues du forage s'éboulent, l'ébouillis est repris directement par la circulation, dans le cas contraire, l'ébouillis pourrait s'accumuler plus facilement,
- Les échantillons du terrain foré et l'eau prélevés pour analyse ne seront pas contaminés par les parois nues du forage.

Une « perte de fluide » indique habituellement la présence des fractures ou autres vides (cavages) dans les terrains traversés. La perte de fluide mène habituellement à une diminution de la pression, ce qui peut poser des problèmes majeurs au foreur (coincement de la garniture, etc...).



**Figure I.40:** Schéma d'un forage en circulation directe et d'un forage en circulation inverse [65].

**CHAPITRE DEUX :**  
**MANAGEMENT DE LA MAINTENANCE DANS LES**  
**ENTREPRISES DE FORAGE**

## **II.1. Généralités**

### **Introduction:**

Face aux marchés concurrentiels, les entreprises sont de plus en plus conscientes de l'enjeu économique que représente la maintenance, et en particulier celle des outils et équipements de production. La maintenance est désormais considérée comme une source de productivité et un pilier de l'activité industrielle.

### **Historique:**

Avant 1900, on parlait de réparation ou de dépannage d'un équipement lorsque celui-ci était défaillant. L'objectif était d'avoir un redémarrage rapide.

De 1900 à 1970, avec le développement de l'industrie ferroviaire, de l'automobile, de l'aviation et de l'armement pendant les deux guerres mondiales, on a utilisé la notion d'entretien.

À partir de 1970, le développement de secteurs à risques et d'outils modernes aboutit à la mise en œuvre de démarches de maintenance. Il a fallu apprendre à maîtriser ces systèmes automatisés, prévenir les incidents pour éviter les accidents, tout en limitant les surcoûts prohibitifs. [Monchy et Pichot 2003]

### **Management de la maintenance [12].**

Toutes les activités des instances de direction qui déterminent les exigences, les objectifs, la stratégie et les responsabilités en matière de maintenance et qui les mettent en application par des moyens tels que la planification, la maîtrise et le contrôle de la maintenance, l'amélioration des activités de maintenance et des aspects économiques.

### **Ingénierie de la Maintenance:**

- Bien situer le rôle de la maintenance dans l'entreprise,
- Comprendre mieux le management de la maintenance,
- Connaître mieux les activités de maintenance,
- Apprendre à organiser les opérations de maintenance,
- Utiliser une terminologie normalisée en matière de maintenance [12].

### **Définition de la Maintenance (selon norme FDX 60-000 et NF EN 13306-2018):**

Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.

## **II.1.1. Les Objectifs de la Maintenance:**

### **Objectifs de la maintenance:**

- Diminuer l'écart entre l'objectif et l'observation,
- Rechercher le meilleur compromis entre: coût et fiabilité,
- Buts fixés et acceptés pour les activités de maintenance [12].

L'objectif principal de l'Entreprise Nationale des Travaux aux Puits (ENTP) consiste à maximiser les profits et minimiser les pertes. Ainsi, les stratégies de maintenance adoptées s'orientent vers la réduction des coûts des actions de maintenance et/ou l'amélioration de la disponibilité du système de production à maintenir. D'autre part, les actions de maintenance contribuent à l'amélioration de la qualité de l'environnement de la sécurité des biens et notamment du personnel conformément à la politique de management QHSE de l'Entreprise.



Afin de suivre et contrôler la réalisation de ses objectifs l'ENTP a mis en place la démarche suivante :

- Chaque Direction doit présenter le tableau de bord de son activité en détail et avec commentaires sur les résultats obtenus mensuellement, trimestriellement et annuellement et lorsque l'activité l'exige, à une Direction de Contrôle de Gestion, qui doit vérifier, contrôler, consolider les résultats des différentes Directions et les présenter à la Direction Générale.

La Direction Générale présente le Tableau de bord consolidé de l'activité de l'Entreprise dans un conseil de Direction qui doit commenter, orienter, rejeter ou approuver partiellement ou totalement les résultats.

## **II.1.2. Les Objectifs Stratégiques**

### **Définition de la Stratégie de la Maintenance:**

1. Méthode de management utilisée en vue d'atteindre les objectifs de maintenance.

2. La stratégie de la maintenance est l'ensemble des décisions qui conduisent:

- A décider des politiques de maintenance des matériels (méthodes correctives, préventives, amélioratives à appliquer à chaque matériel),
- A organiser structurellement le système de conduite et les ressources productives pour y parvenir dans le cadre de la mission impartie (objectifs techniques, économiques et humains).

### **Les stratégies de maintenance:**

Nous présentons ci-dessous différentes stratégies pouvant être utilisées pour réaliser les opérations de maintenance:

#### **1- La stratégie TPM (Total Productive Maintenance) [12].**

La stratégie TPM est un élargissement de la mission de la maintenance à la totalité du personnel, c'est-à-dire impliquant la participation de tous les services notamment ingénierie, production, maintenance et tous les niveaux hiérarchiques, des dirigeants aux opérateurs.

Elle s'inscrit dans les stratégies fondamentales du juste à temps (zéro panne, zéro stock, zéro délai, etc.). Les fonctions et responsabilités envers les équipements sont partagées [Bufferne 2006].

#### **2- La stratégie LCC (Life Cycle Cost) [12].**

Le LCC prend en compte l'ensemble du cycle de vie de l'équipement. Il désigne la somme du coût d'investissement dans l'équipement, des coûts cumulés d'utilisation pendant la vie de l'équipement, des coûts cumulés de maintenance, ainsi que des coûts liés à l'élimination de l'équipement [Dhillon 1989].

**Dans le cadre de l'atteinte de ses objectifs stratégiques la Direction Générale de l'ENTP a décidé des orientations stratégiques suivantes [7]:**

- La Direction Générale s'engage à mettre à disposition toutes les ressources nécessaires et s'appuie sur l'implication et la mobilisation de l'ensemble de ses employés, pour le respect de ses engagements et l'atteinte de ces objectifs.
- La Direction Générale appelle l'ensemble de ses travailleurs, quelques soient leurs rangs dans la hiérarchie et leurs activités, à adhérer, collaborer et soutenir la politique QHSE, pour concrétiser ensemble cette démarche de progrès et travailler de manière plus efficace, plus performante et sécuritaire.
- Pour ce faire, la politique QHSE, en tenant compte du contexte de l'Entreprise, se traduit à travers **les orientations stratégiques** suivantes:

- Satisfaire et fidéliser les clients,
- Améliorer la productivité des appareils,
- Développer les compétences des ressources humaines,
- Améliorer le cadre de travail,
- Se doter d'un système d'information fiable et performant,
- Conquérir des parts de marché à l'international.

Dans le cadre de la réalisation de ses principaux objectifs stratégiques, l'ENTP a entrepris une démarche de modernisation de l'Entreprise par:

- La mise en place d'un Système informatique aux niveaux de toutes les structures de l'Entreprise,
- La mise en place d'un système de Gestion ERP,
- La généralisation du Système (V.SAT) de télécommunication par satellite, à l'ensemble des chantiers de forage.
- La formation du personnel et l'acquisition du matériel nécessaire pour mettre en place le système de la Maintenance Assisté par Ordinateur (GMAO).

### **II.1.3. Les Missions de la Maintenance**

#### **Introduction à la maintenance:**

Quelque soient les efforts entrepris au stade de la conception et la fabrication des machines pour assurer leur sûreté de fonctionnement, des défaillances apparaissent au cours de leur exploitation, et leurs causes sont variables.

C'est pourquoi on fait appel à la maintenance à fin de maintenir en état les machines et rétablir leur performance après défaillance.

La maintenance implique un certains nombres de mesures organisationnelles, techniques et économiques.

Les coûts de maintenance vont de celui du simple remplacement d'une pièce détériorée à d'importants frais d'immobilisation pour la machine donnée.

#### **Activités de maintenance [12].**

##### **1- Inspection:**

Examen de conformité réalisé en mesurant, en observant ou en testant les caractéristiques significatives d'un bien.

##### **2- Surveillance en fonctionnement:**

Activité, exécutée soit manuellement, soit automatiquement, destinée à mesurer à intervalles prédéterminés les caractéristiques et les paramètres de l'état physique réel d'un bien.

##### **3- Essai de conformité:**

Essai destiné à montrer si une caractéristique ou une propriété d'un bien est, ou non, conforme aux exigences stipulées.

##### **4- Essai de fonctionnement:**

Actions menées après une action de maintenance pour vérifier que le bien est en mesure d'accomplir la fonction requise.

##### **5- Entretien courant (maintenance de niveau 1):**

Activités de maintenance préventive simples régulières ou répétées.

- L'entretien courant peut inclure par exemple le nettoyage, le resserrage de connexions, le remplacement des connecteurs, le contrôle des niveaux de liquide, la lubrification, etc.

##### **6- Révision:**

Ensemble complet d'actions de maintenance préventive réalisées afin de maintenir le niveau requis de performance d'un bien.

- Une révision peut nécessiter un démontage total ou partiel du bien.

### **7- Diagnostic de panne:**

Actions menées pour la détection de la panne, sa localisation et l'identification des causes.

### **8- Localisation de panne:**

Actions menées en vue d'identifier à quel niveau d'arborescence du bien en panne se situe le fait générateur de la panne.

### **9- Remise à disposition:**

Événement correspondant au rétablissement de l'état de disponibilité après une défaillance.

### **10- Réparation:**

Action physique exécutée pour rétablir la fonction requise d'un bien en panne.

- La réparation peut également inclure la localisation de la panne et l'essai de fonctionnement.

### **11- Dépannage:**

Action physique exécutée pour permettre à un bien en panne d'accomplir sa fonction requise pendant une durée limitée jusqu'à ce que la réparation soit exécutée.

### **12- Reconstruction:**

Action suivant le démontage d'un bien et la réparation ou le remplacement des parties qui approchent de la fin de leur durée de vie utile et/ou qu'il convient de remplacer régulièrement afin de lui donner une vie utile étendue.

- La reconstruction diffère de la révision en ce qu'elle peut inclure des modifications et/ou des améliorations et/ou des modernisations.

### **13- Maintenance exceptionnelle:**

La maintenance exceptionnelle inclut les grandes actions de maintenance pouvant être:

- Inévitables et programmées, conduisant ainsi au développement de stratégies alternatives (par exemple, allongement de la durée de vie),

- Inattendues, à la suite d'erreurs de conception, de fabrication, d'installation, de fonctionnement ou de maintenance ou de situations accidentelles (incendie, inondation, etc),

- Les coûts de la maintenance exceptionnelle sont généralement comptabilisés comme des dépenses d'investissement,

- La maintenance exceptionnelle est parfois appelée «investissements de renouvellement».

## **II.1.4. Politique de la Maintenance [12].**

### **Définition:**

**La Politique de Maintenance:** ce sont les orientations et intentions générales d'un organisme relatives à la Maintenance telles qu'elles sont officiellement formulées par la direction en matière de Maintenance.

**Dans sa politique de Maintenance l'Entreprise doit apporter les réponses et les orientations aux principales questions suivantes:**

- Quelles gammes de travaux pour la structure maintenance,
- Quelles sont les contraintes du process de production,
- Quels types de relations Maintenance/Production,
- Centralisation - décentralisation: quel choix,
- Quel degré de sous- traitance.

**Les conditions nécessaires à la mise en œuvre d'une politique de maintenance:**

Un nombre minimum de conditions sont nécessaires à la mise en œuvre d'une politique de maintenance adaptée:

1. Volonté et compréhension de la Direction Générale,
2. Structures compatibles avec la fonction maintenance,
3. Dotation en moyens humains,
4. Dotation en moyens financiers,

- 5. Dotation en moyens matériels,
- 6. Maitrise du flux de communication.

**Exemple de Politiques de Maintenance:**

- Politique de type LCC (Life Cycle Cost)

**Stratégie de type LCC (Life Cycle Cost):**

Cette approche cherche à considérer l'impératif de maintenance sur l'ensemble du cycle de vie de l'équipement. Plus précisément, le Life Cycle Cost désigne la somme du coût d'investissement de l'équipement, des coûts cumulés d'utilisation sur la durée de vie de l'équipement, des coûts cumulés de maintenance en fonction d'une politique donnée.

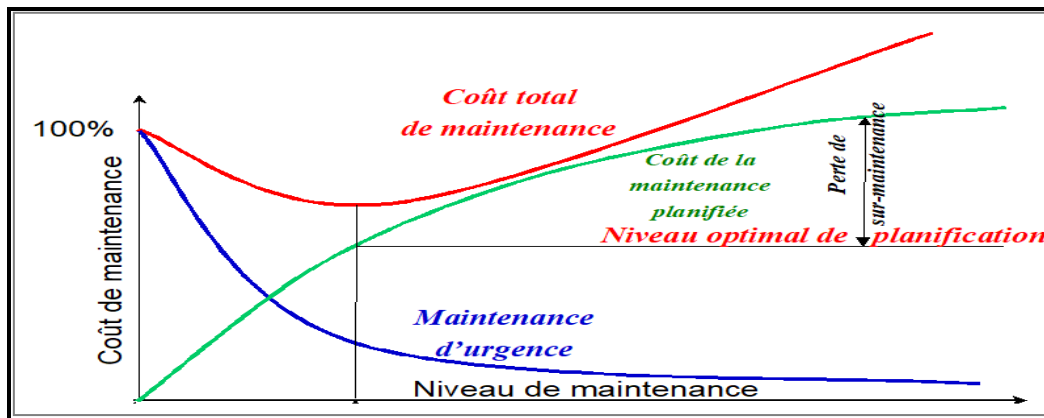


Figure II.1: Courbes coût/niveau de maintenance [12].

**Politique de maintenance au niveau de l'ENTP [7]:**

Pour répondre au mieux aux diverses préoccupations en maintenance pétrolière, et pour une maintenance à l'intérieur de l'Entreprise, l'ENTP a mis en place et dispose de:

- 10 ateliers occupant une surface couverte de 9 750 m<sup>2</sup> et une surface non couverte de 49 800 m<sup>2</sup>, ainsi que 4 aires de montage des appareils de forage et de workover en revamping d'environ 40 000 m<sup>2</sup>,
- Un centre de formation, pour la formation, la mise à niveau et le recyclage de tous les opérateurs de la maintenance et du forage,
- Dans le cadre d'une meilleure gestion et un management efficace de toutes les potentialités et des ressources disponibles, l'ENTP a mis en place et certifié un système QHSE intégré,
- Une maintenance interne efficace, gérée par une Direction et plusieurs Départements et services,
- Des équipes de maintenance, et spécialistes de maintenance pétrolière sont affectés en permanence sur chantiers de forage,
- Les chantiers de forage sont dotés d'ateliers de maintenance et de magasins de pièces de rechanges,
- Une sous traitance minimale, contrôlée par des receptions contradictoires des travaux et maitrisée par des audits conformément à la norme ISO.
- Un budget alloué conformément aux moyens de l'Entreprise, à la demande et prévision de la Direction Maintenance.

## **II.1.5. Méthodes de Maintenance [12].**

### **Objectif de la maintenance:**

La maintenance a pour objectif de maintenir et rétablir un équipement. Ceci conduit à distinguer différents types de maintenance [AFNOR 2002b].

Dans ce chapitre, nous présenterons les différents types de maintenance:

### **Types de maintenance:**

#### **1- Maintenance préventive:**

La maintenance préventive a pour but de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu. Elle est effectuée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits.

Les activités correspondantes sont déclenchées selon:

- Un échancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage (maintenance systématique).
- Et / ou des critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou de service (maintenance conditionnelle).

Cette politique de maintenance s'adresse aux machines engendrant une perte de production ou des coûts d'arrêts imprévisibles classés comme importants pour l'Entreprise. Tel est le cas des équipements des chantiers de forages.

Ainsi on doit pratiquer les trois formes de maintenance préventive suivantes:

#### **Maintenance Systématique:**

C'est la maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien (extrait norme NF EN 13306 X 60-319).

Des programmes d'entretien seront élaborés de façon à préciser le travail à exécuter par l'équipe de maintenance.

Un rapport sera rédigé mettant en exergue les résultats des diverses interventions, mesures prises et les observations significatives.

#### **Maintenance conditionnelle:**

Maintenance préventive subordonnée au franchissement d'un seuil prédéterminé significatif de l'état de dégradation du bien et qui inclut l'évaluation des conditions physiques, l'analyse et les éventuelles actions de maintenance qui en découlent.

- L'évaluation des conditions peut être effectuée par observation réalisée par l'opérateur et/ou inspection et/ou essais et/ou surveillance de l'état des paramètres système, etc. et menée selon un programme, sur demande ou en continu.

#### **Maintenance prévisionnelle:**

Maintenance préventive exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien.

#### **2- Maintenance corrective:**

C'est l'ensemble des activités réalisées après la défaillance d'un bien, ou la dégradation de son fonctionnement, pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, au moins provisoirement.

**La maintenance corrective comprend en particulier:**

- La localisation de la défaillance et son diagnostic,
- La remise en état avec ou sans modification,
- Le contrôle du bon fonctionnement.

**Maintenance corrective différée:**

Maintenance corrective qui n'est pas exécutée immédiatement après la détection d'une panne, mais est retardée en accord avec des règles de maintenance données.

**Maintenance corrective d'urgence:**

Maintenance corrective qui est exécutée sans délai après détection d'une panne afin d'éviter des conséquences inacceptables.

**Maintenance palliative:**

Activités de maintenance corrective destinées à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou une partie d'une fonction requise.

**Maintenance curative:**

Activités de maintenance corrective ayant pour objet de rétablir l'équipement dans un état spécifié pour lui permettre d'accomplir une fonction requise. Le résultat des activités réalisées doit présenter un caractère permanent.

Ces activités peuvent être:

- Des réparations,
- Des modifications, ou des améliorations ayant pour objet de supprimer la (ou les) défaillance (s).

**3- Amélioration / Maintenance améliorative:**

Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management, destinées à améliorer la fiabilité et/ou la maintenabilité et/ou la sécurité intrinsèque d'un bien, sans changer la fonction d'origine.

**4- Modernisation:**

Modification ou amélioration apportée au bien en tenant compte des avancées technologiques, pour satisfaire à de nouvelles exigences ou à des changements des exigences.

**5- Maintenance sur site:**

Maintenance exécutée à l'endroit où le bien est normalement utilisé ou stocké.

**6- Auto maintenance /maintenance autonome:**

Maintenance exécutée par un personnel d'exploitation.

- Ces actions de maintenance incluent la collecte de données.

**7- Niveau de maintenance:**

Classement en catégories des tâches de Maintenance en fonction de la complexité:

**Le niveau 1:** est caractérisé par des actions simples exécutées par du personnel ayant une formation minimale.

**Le niveau 2:** est caractérisé par des actions de base devant être exécutées par du personnel qualifié utilisant des instructions de maintenance détaillées.

**Le niveau 3:** est caractérisé par des actions complexes devant être exécutées par du personnel qualifié utilisant des instructions de maintenance détaillées.

**Le niveau 4:** est caractérisé par des actions qui impliquent la maîtrise d'une technique ou d'une technologie et sont exécutées par du personnel technique spécialisé.

**Le niveau 5:** est caractérisé par des actions qui impliquent un savoir-faire détenu par le fabricant ou une société spécialisée.

## **8- Réparation et Révision générale:**

Lorsqu'un équipement a été utilisé pendant une longue durée correspondant également à sa durée de vie, celui-ci atteint un certain degré d'usure qui compromet son état fonctionnel, à cet effet des dispositions doivent être prises pour qu'il puisse encore être utilisé.

Au cours de ce travail de restauration, les parties critiques de l'équipement ayant besoin de rénovation doivent être remises en état ou remplacées de façon à le rendre plus sûr et ainsi minimiser le travail d'entretien ultérieurement.

Avant d'entreprendre un travail de révision ou de réparation il faut vérifier:

- Si on détient toutes les informations et instructions,
- Si on dispose de moyens nécessaires à la révision,
- Si les pièces de rechange sont disponibles au magasin, ou si elles peuvent être obtenues à temps.

## **9- Les méthodes de maintenance:**

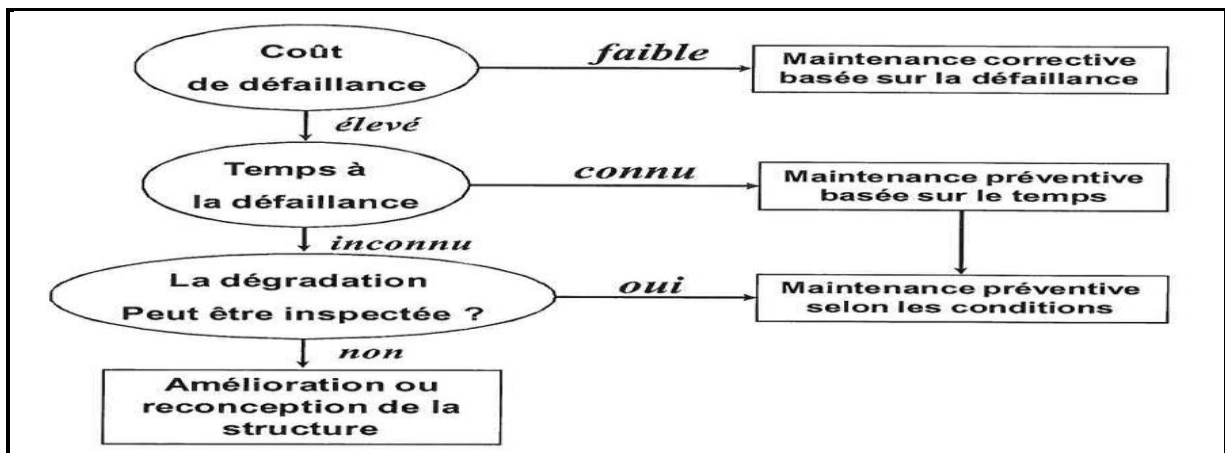


Figure II.2: Organigramme du choix de type de maintenance [12].

### **II.1.6. La Fiabilité et la Sécurité**

#### **Définition de la Fiabilité:**

La fiabilité c'est l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, durant un intervalle de temps donné.

#### **Analyse de la fiabilité par les lois de probabilité [17, 19].**

##### **Analyse de la fiabilité à partir de la loi exponentielle:**

Cette loi repose sur l'hypothèse  $\lambda = \text{constante}$  ; dans ce cas les défaillances aléatoires émergent sous l'action de causes diverses et indépendantes par position à la période suivante, dite de vieillesse, pendant laquelle un ou plusieurs modes de défaillances prédominantes apparaissent (fatigue, corrosion, etc.) [13].

La plupart des analyses des défaillances prévisionnelles de fiabilité et de maintenabilité reposent sur les hypothèses exponentielles.

- Fonction fiabilité:  $\mathcal{R}(t) = e^{-\lambda t}$
- Densité de probabilité :  $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$
- Fonction de réparation :  $F(t) = 1 - \mathcal{R}(t)$
- Espérance mathématique :  $E(t) = 1/\lambda$

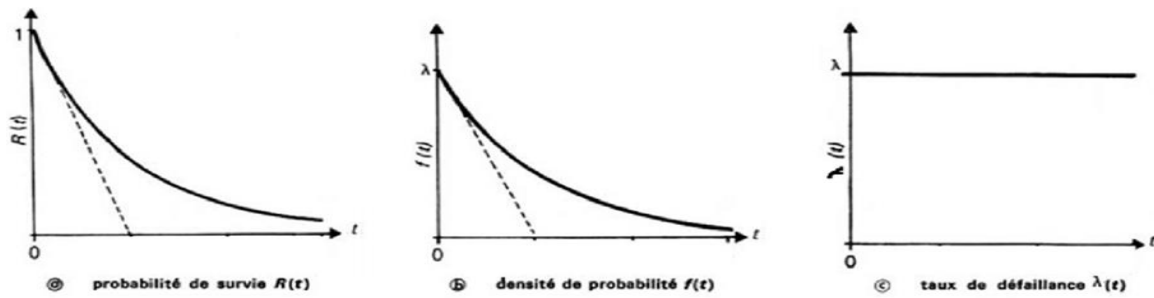


Figure II.3: Fonction fiabilité:  $\mathcal{R}(t)=e^{-\lambda t}$  Densité de probabilité:  $f(t)=\lambda e^{-\lambda t}$  Taux de défaillance:  $\lambda(t)$

### Analyse de la fiabilité à partir de la loi Weibull [17].

La loi de Weibull est utilisée en fiabilité, plus particulièrement en mécanique.

L'expression loi de Weibull recouvre en fait toute une famille de lois, certaines d'entre elles apparaissant en physique comme conséquence de certaines hypothèses. C'est en particulier, le cas de la loi exponentielle ( $\beta = 1$ ) et de la loi normale ( $\beta = 3$ ).

### Caractéristiques de la loi Weibull:

- Fonction de densité:  $f(t) = \lambda(t) \times R(t) = \frac{\beta}{\eta} \frac{(t-\gamma)^{\beta-1}}{(\eta)^{\beta-1}} \cdot e^{-\frac{(t-\gamma)^\beta}{\eta^\beta}}$

- Sa fonction de fiabilité est:  $R(t) = e^{-\frac{(t-\gamma)^\beta}{\eta^\beta}}$

Avec les paramètres de signification:

$\gamma, \beta, \eta$  définissent la distribution de Weibull.

On utilise trois paramètres:

- $\beta$  : paramètre de forme ( $\beta > 0$ )
- $\eta$  : paramètre d'échelle ( $\eta > 0$ )
- $\gamma$  : paramètre de position ( $-\infty > \gamma > +\infty$ )

Nous constatons que :

Si  $\beta < 1$  le taux de défaillances est décroissant, nous avons donc des pannes de jeunesse,

Si  $\beta = 1$  le taux de défaillances est constant,

Si  $\beta > 1$  le taux est croissant, panne de vieillesse ou maturité en mécanique.

$\eta$  : est le paramètre d'échelle et indique l'ordre de grandeur de la durée de vie moyenne.

$\gamma$  : est le paramètre de décalage, souvent il est égal à 0.

• Sa fonction de répartition  $F(t)$  est la probabilité que le dispositif soit en panne à l'instant  $t$ .

Elle est exprimée par:  $F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\frac{(t-\gamma)^\beta}{\eta^\beta}}$

• Son taux instantané de défaillance  $\lambda(t)$  est un estimateur de fiabilité. Il s'exprime par:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \frac{(t-\gamma)^{\beta-1}}{(\eta)^{\beta-1}}$$



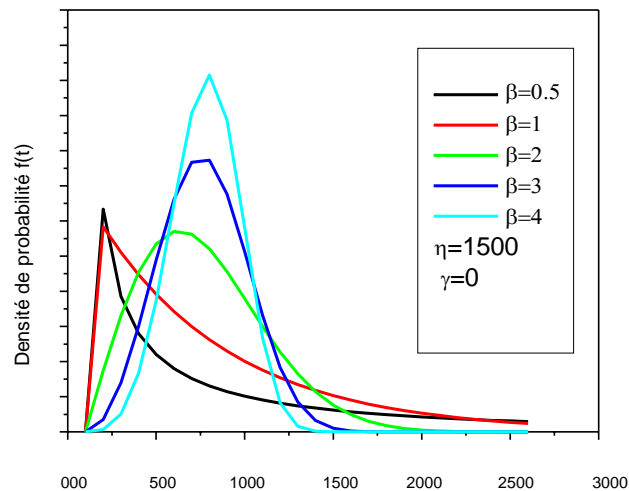


Figure II.4: Courbes théoriques de Weibul.

## **Applications de la fiabilité:**

### **Introduction:**

L'application des méthodes d'analyse "AMDEC", "ABC" et "ISHIKAWA" pour déterminer la dégradation des organes du treuil d'un appareil de forage ENTP (TP127), qui permettent au service maintenance d'identifier les actions prioritaires à entreprendre afin de remettre le treuil en bon fonctionnement.

### **Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC):**

L'AMDEC est l'acronyme de l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticités. Grâce à cette méthode d'amélioration continue, le responsable pourra identifier les problèmes qui peuvent survenir et mieux les poser pour les résoudre. L'AMDEC permet d'identifier, de rationaliser les problèmes potentiels pour ensuite les résoudre [18].

### **Avantages de la méthode AMDEC:**

La méthode AMDEC confronte les connaissances de tous les secteurs d'activité de l'organisation, pour obtenir, les résultats suivants:

- La satisfaction de la bonne maintenance est l'objectif majeur de l'AMDEC,
- Le pilotage de l'amélioration continue par la gestion,
- L'AMDEC aide à réduire les coûts internes d'obtention de la qualité,
- Un des objectifs majeurs de l'AMDEC se traduira par la mise en place de mesures préventives, voire par l'élaboration de plans d'actions pour l'élimination des causes de défaillances,
- D'apporter des solutions par des actions de fiabilisation de l'équipement en définissant des actions correctives dès la conception, des actions préventives en exploitation ainsi que la prévision des pièces de rechanges nécessaires.

Cette méthode permet donc d'analyser et d'estimer les risques d'apparition de défaillances et leurs conséquences et de contribuer ainsi à l'obtention de la fiabilité [18].

### **Mise au point de la fiche AMDEC:**

Sur un tableur, il faut définir les « lignes » et les « colonnes » nécessaires (AMDE ou AMDEC) réparties en quatre grandes familles [18]:

- Analyse fonctionnelle,
- Analyse de défaillance potentielle,
- Estimation de la criticité,
- Mesures à appliquer.

**Tableau II.1:** Feuille standard d'une analyse AMDEC.

Analyse Fonctionnelle		Analyse de défaillance				Estimation de criticité				Mesures	
Composant Nom	Rep	Fonction	Mode de Défaillance	Causes	Effet local	Effet Système	Gravité	Occurrence	Non Détection	Criticité	Mesures Envisagées

**Analyse fonctionnelle:**

**a. Les composants:**

Dans la première colonne figurent toutes les organes composant le système, un composant est pour un système simple un élément intègre non dissociable.

**b. Les fonctions:**

Les fonctions d'un composant sont des actions souvent discrètes par rapport au système complet mais elles permettent la réalisation de la fonction globale. Un composant peut avoir plusieurs fonctions.

**Analyse de défaillance:**

L'AMDEC a pour but premier de déceler les défaillances probables ou les points faibles. Il est donc nécessaire que les événements soient davantage précisés.

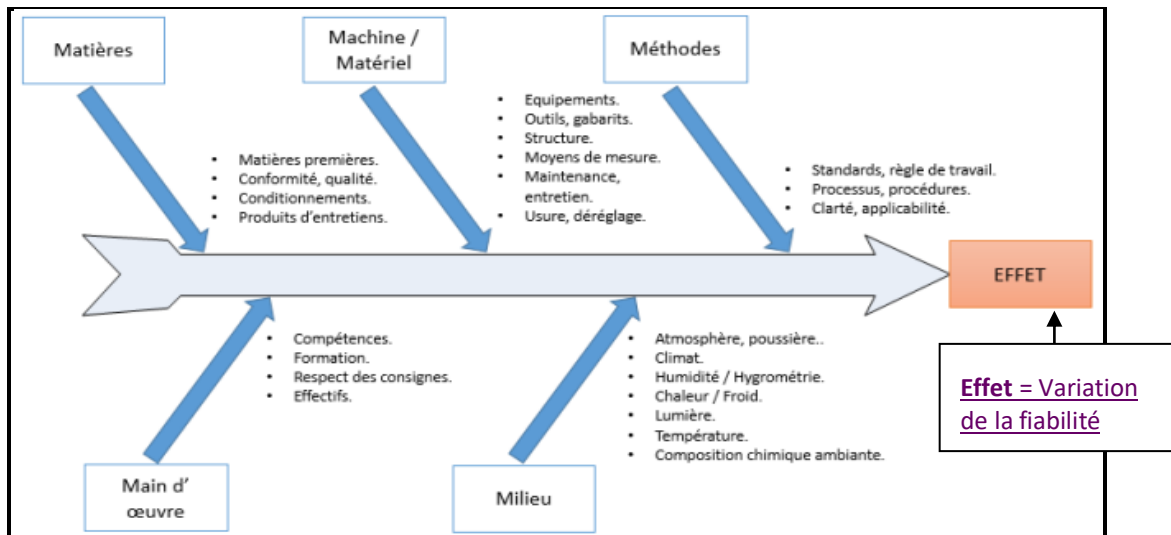
Une défaillance se caractérise par son mode d'apparition, sa cause et ses effets sur le système et sur les autres composants.

**a. Modes de défaillance:**

La norme (NF X60-510), relative à la procédure d'analyse des modes de fonctionnement et de leurs effets, propose une liste de trente trois (33) modes de défaillance génériques suffisamment ouvert pour cerner tous types d'élément.

**b. Causes de défaillance:**

La recherche des causes de défaillance peut être facilitée par l'emploi de la méthode connue dite les cinq (5) M (méthode Ishikawa ou causes-effets).



**Figure II.5:** Diagramme d'Ishikawa théorique.

**Les Causes de défaillance au niveau du treuil OIL WELL 840 E, du TP 127:**

Application de la méthode connue dite les cinq (5) M (méthode Ishikawa ou causes-effets) [6]: Le diagramme Ishikawa permet aux responsables de la maintenance de bien-cerner le problème de la dégradation des équipements, et donc de déterminer les moyens pour y remédier.

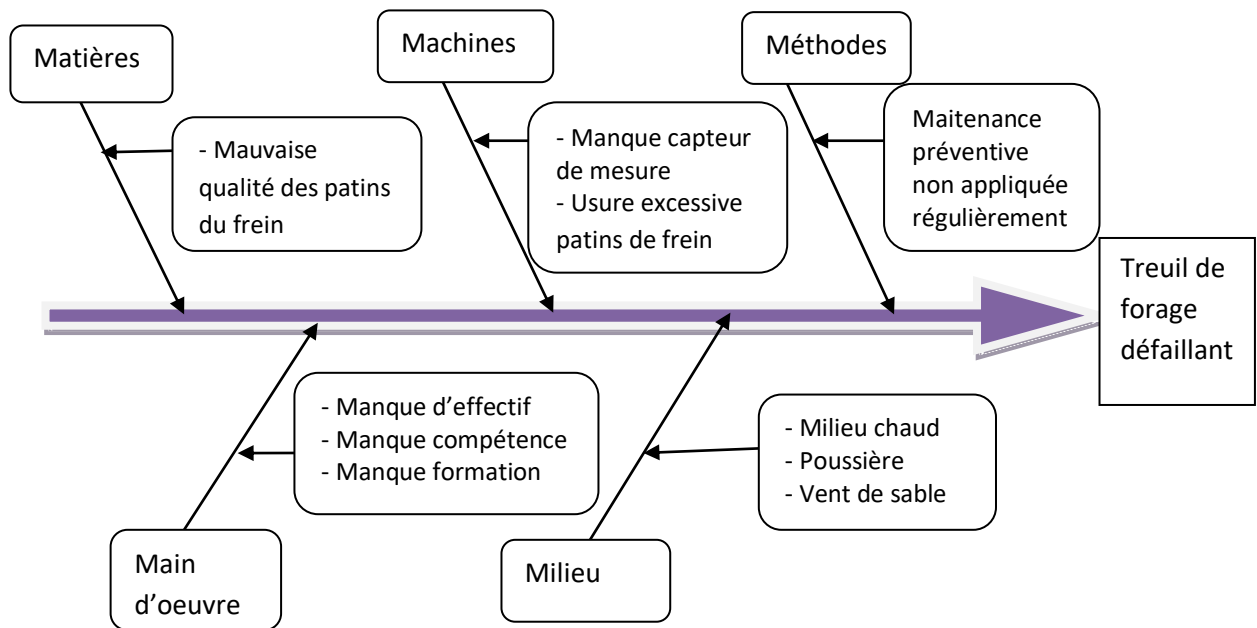


Figure II.6: Diagramme d'Ishikawa du treuil de forage.

**c. Effets:**

Il est important pour la précision de l'AMDEC de répartir les effets d'une défaillance selon deux catégories:

- Les effets sur le système: Ils sont les conséquences directes du dysfonctionnement sur l'ensemble du dispositif.
- Les effets locaux, ces cas se rencontrent lorsque l'on n'a pas pu détecter les défaillances plus tôt.

**Critères:**

La définition de ces critères doit être absolument rigoureuse pour que l'interprétation soit dans tous les cas identique. Généralement, chaque critère reçoit un indice sur une échelle qui varie de 1 à 4 en fonction de son importance.

**a. Critère G (gravité):**

Le critère de gravité évalue le risque pour l'utilisateur ainsi que pour le système et le service rendu. A chacun des effets d'une défaillance correspond un indice de gravité.

Tableau II.2: Critères de gravité

Niveau	Définition
1	<b>Mineure:</b> défaillance ne provoquant pas l'arrêt de production supérieur à 5 minutes. Aucune dégradation ni production défectueuse.
2	<b>Moyenne:</b> défaillance provoquant un arrêt de 5 à 30 minutes et nécessitant une réparation sur site.
3	<b>Importante:</b> défaillance provoquant un arrêt de 30 à 60 minutes et/ou nécessitant le remplacement d'un matériel défectueux.
4	<b>Grave:</b> défaillance provoquant un arrêt supérieur à 1 heure et/ou impliquant des risques potentiels pour la sécurité des personnes et des biens.

**b. Critère F (Occurrence):**

Le critère d'occurrence indique le niveau de probabilité d'apparition d'une défaillance, donc, de la fiabilité en quelque sorte.

La définition des niveaux d'occurrence doit être précise comme le montre le tableau suivant.

**Tableau II.3: Critères d'occurrence.**

Niveau	Définition
<b>1</b>	<b>Faible:</b> Moins de 1 fois par semestre.
<b>2</b>	<b>Possible:</b> En moyenne 1 fois par mois.
<b>3</b>	<b>Certaine:</b> En moyenne 1 fois par semaine.
<b>4</b>	<b>Forte:</b> Possible 1 fois par jour

**c. Critère D (non détection):**

Le critère **D** est l'indice de non détectabilité. Il s'évalue à partir du mode de défaillance par une note estimée allant de 1 (dégradation élémentaire) à 4 (défaillance soudaine).

**Tableau II.4: Critères de non détection.**

Niveau	Définition
<b>1</b>	<b>Elémentaire:</b> Défaillance possible à éviter.
<b>2</b>	<b>Aisée:</b> Apparition d'une défaillance avec recherche et action corrective évidente.
<b>3</b>	<b>Moyenne:</b> Apparition d'une défaillance, recherche et action corrective menées par un technicien de maintenance.
<b>4</b>	<b>Délicate:</b> Défaillance difficilement détectable et nécessite le démontage et un technicien spécialisé.

**d) Critère C (criticité):**

La criticité s'obtient en calculant le produit des indices des critères précédents (**C=FxGxD**). Cette valeur de criticité s'établit souvent sur une échelle de 1 à 64 (4x4x4). Mais dans le cadre de l'exploitation d'un système, les indices de criticité élevés orientent les actions à mettre en œuvre (modification, type de maintenance, conduite...) dans le but d'éviter un événement fâcheux. Un indice isolément très élevé, généralement un indice de 4 pour le critère G peut à lui seul conduire à une décision, alors que l'indice C n'est pas particulièrement important. Tableau II.5.

**Tableau II.5: Critères de criticité**

Niveau	Définition
C<9	<b>Faible:</b> Aucun problème particulier. Surveillance habituelle.
9<C<25	<b>Acceptable:</b> Nécessite une surveillance particulière et/ou une révision de la politique de maintenance.
C>25	<b>Forte:</b> Surveillance accrue. Remise en cause de la maintenance. Eventuellement, arrêt pour amélioration.
S=4	<b>Dangereuse:</b> Révision de la politique de maintenance et/ou modification du système. (Arrêt si sécurité est menacée).

**Mesure:**

Elle est souvent décomposée suivant les rubriques possibles:

- Modifications de conception,
- Moyens de détection ou consignes de surveillance ou inspections périodiques,
- Dispositif de remplacement, reconfiguration, repli,
- Observations, recommandations.

Il appartient au groupe de travail de tirer le maximum de préconisations du travail long et fastidieux, mais riche d'enseignements avec une AMDEC appliquée.

**Modes des défaillances:**

Selon la norme AFNOR (X 60-510) le tableau suivant donne les modes de défaillances.

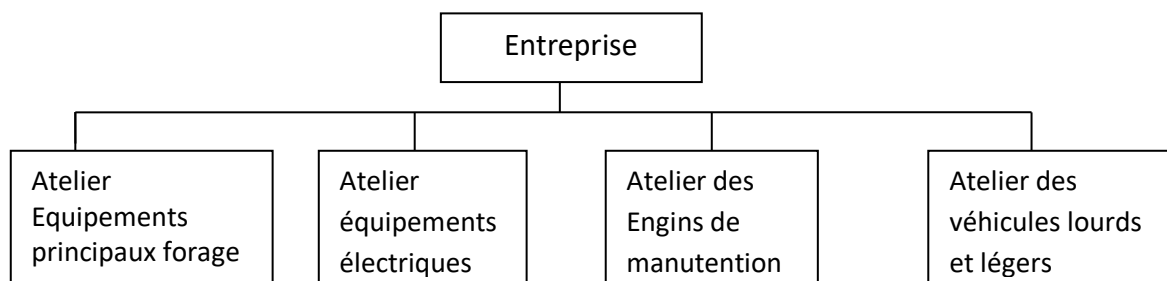
<b>1</b>	Défaillance structurelle (rupture)	<b>19</b>	Ne s'arrête pas
<b>2</b>	Blocage physique ou coincement	<b>20</b>	Ne démarre pas

3	Vibrations	21	Ne commute pas
4	Ne reste pas en position	22	Fonctionnement prématuré
5	Ne s'ouvre pas	23	Fonctionnement après le délai prévu (retard)
6	Ne se ferme pas	24	Entrée erronée (augmentation)
7	Défaillance en position ouverte	25	Entrée erronée (diminution)
8	Défaillance en position fermée	26	Sortie erronée (augmentation)
9	Fuite interne	27	Sortie erronée (diminution)
10	Fuite externe	28	Perte de l'entrée
11	Dépasse la limite supérieure tolérée	29	Perte de la sortie
12	Dépasse la limite inférieure tolérée	30	Court-circuit (électrique)
13	Fonctionnement intempestif (inopportun)	31	Court-ouvert (électrique)
14	Fonctionnement intermittent (discontinu)	32	Fuite (électrique)
15	Fonctionnement irrégulier	33	Autres conditions de défaillance exceptionnelles suivant les caractéristiques du système, les conditions de fonctionnement et les contraintes opérationnelles
16	Indication erronée		
17	Ecoulement réduit		
18	Mise en marche		

**Tableau II.6:** Modes de défaillance.

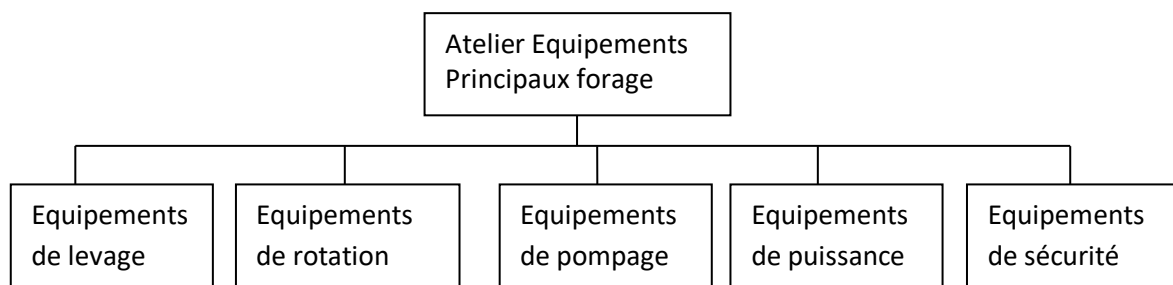
### **Découpage de l'Entreprise:**

Le problème qui se pose alors est comment découper l'ensemble de l'équipement à des niveaux plus fins pour atteindre l'élément que l'on veut étudier.



**Figure II.7:** Découpage de l'entreprise.

Ce premier découpage sera suivi par un second qui permet d'étudier fonctionnellement l'atelier prioritaire au niveau de l'Entreprise (Atelier principale).



**Figure II.8:** Découpage des équipements de forage.

Ce découpage nous permet d'appliquer la méthode AMDEC pour l'équipement de levage.

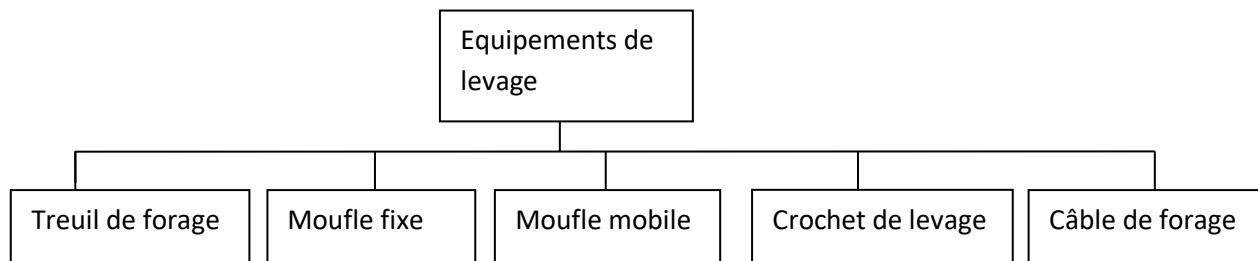


Figure II.9: Découpage des équipements de levage.

**Classification du matériel:**

La classification est principalement utilisée comme une base d'établissement d'un programme de maintenance préventive ou pour mesurer les effets de cette maintenance. Elle consiste en pratique à ne pas traiter le matériel sur un même pied d'égalité, mais selon des critères détaillés [18].

**Application:**

Les données pour cette application sont relevées à partir des dossiers historiques de chaque équipement. Le choix est porté sur l'atelier des équipements de levage à cause des dossiers historiques, tenus à jour.

**Collecte des données:**

Afin de réaliser une bonne étude de fiabilité, le nombre de défaillances de chaque organe a été relevé à partir du dossier historique de chaque équipement, tableau II.7.

Tableau II.7: Récapitulatif des défaillances des équipements de levage.

Equipements de levage	Nombre de pannes					Σ
	1	2	3	4	5	
Treuil de forage	1	4	1	2	2	10
Moufle fixe	0	0	1	0	1	4
Moufle mobile	1	0	1	0	0	3
Crochet de levage	0	0	0	1	1	2
Câble de forage	0	1	0	1	0	2

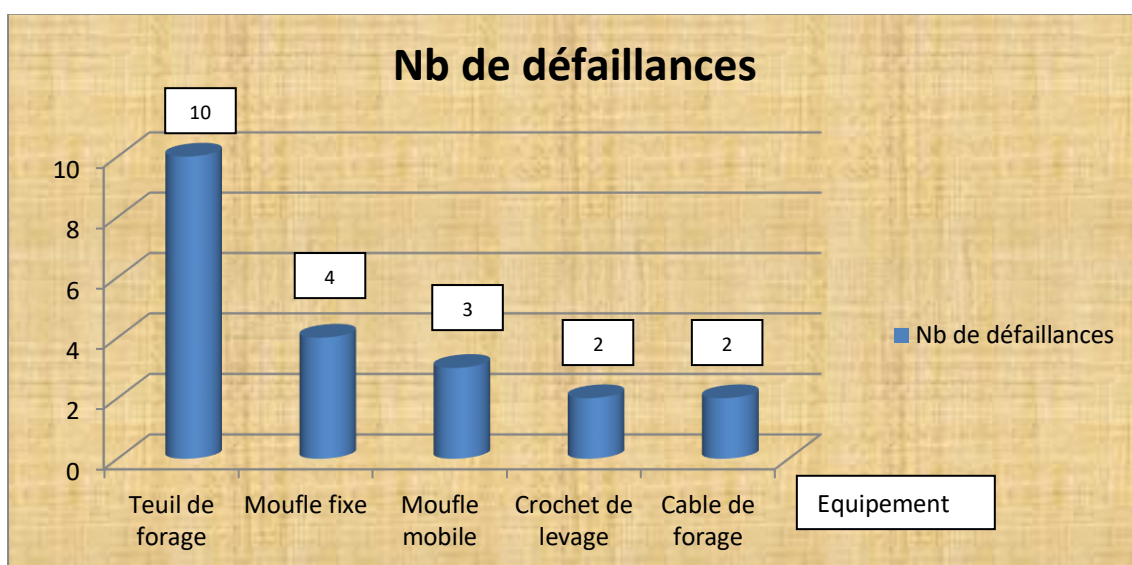


Figure II.10: Histogramme de défaillances des équipements de levage

L'analyse des résultats présentés ci-dessus, montrent que l'élément le plus critique est le treuil de forage, qui doit être pris en charge par le service Maintenance.

**Analyse des données:**

Les données ont été relevées à partir du dossier historique du treuil de forage.

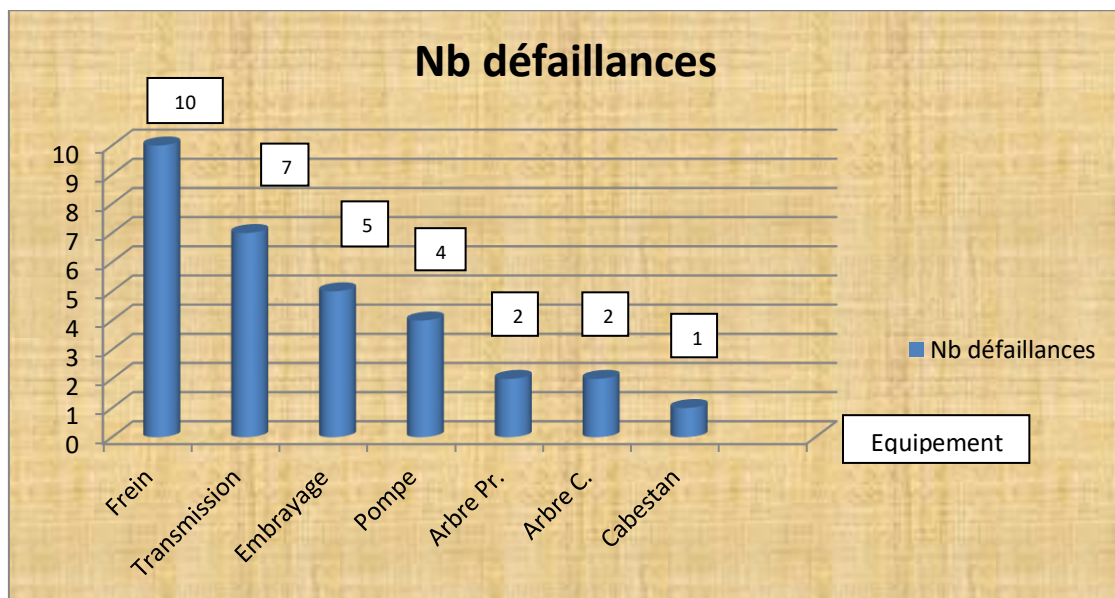
- 1- Le système de freinage: 10 défaillances,
- 2- Les organes de transmission: 07 défaillances,
- 3- L'embrayage: 05 défaillances,
- 4- Circuit d'eau: 04 défaillances,
- 5- Arbre principal: 02 défaillances,
- 6- Arbre de curage: 02 défaillances,
- 7- Système cabestan: 01 défaillance.

**Sélection de l'équipement:**

En utilisant la courbe «ABC» on peut sélectionner l'équipement ou l'organe à prendre en considération dans notre étude. Dans ce cas le nombre d'équipement est égal à 7, tableau II.8.

**Tableau II.8:** Classement des équipements du treuil.

Désignation	N° d'ordre	Fréquence	% du Cumul
Freinage	1	10	32
Les organes de transmission	2	07	54
L'embrayage	3	05	71
Circuit d'eau	4	04	84
Arbre principal	5	02	90
Arbre de curage	6	02	97
Cabestan	7	01	100



**Figure II.11:** Histogramme défaillances des équipements du treuil.

**Principe de la méthode «ABC» [21]:**

La méthode permet de classer les problèmes par ordre d'importance en trois catégories à fin de traiter chacune d'elles d'une manière différente. Elle permet au service maintenance d'identifier les cibles et d'entreprendre les actions prioritaires et urgentes [9].

### 1- Description de l'analyse:

- Recensement des pannes à partir du dossier historique,
- Classement des nombres de pannes par ordre décroissant,
- Calcul du cumul de ces valeurs à partir du plus haut,
- Calcul pour chaque valeur cumulée la valeur en %,
- Le rang relatif % des différentes pannes,
- Tracer la courbe correspondante aux couples de points ci-dessous sur un graphique à deux dimensions, abscisses et ordonnées en pourcentage (%) à la même échelle,
- Déterminer les zones ABC: il s'agit de délimiter sur la courbe des zones à partir de l'allure de la courbe. En général la courbe possède deux cassures ce qui permet de définir trois zones.

### 2- Tracé de la courbe ABC [21]:

**La courbe ABC permet de classer les équipements par ordre de priorité, voir figure II.12.**

Ainsi la courbe «ABC » a permis de classer les équipements en trois catégories (A, B et C). Les résultats obtenus de la courbe ABC, permettent d'opter pour un suivi particulier des sous ensembles de la classe «A» (les plus défaillants) et un suivi spécifique pour les sous ensembles des classes «B» (les moyennement défaillants) et «C» (les moins défaillants).

L'analyse AMDEC, nous permet de bien fixer le type de la maintenance à appliquer pour ces équipements.

### Théoriquement:

- **la Zone A:** 25% des équipements, représentent 50 à 70% des nombres de défaillances. Ils sont donc à étudier en priorité pour le treuil de forage.
- **la Zone B:** 50% des équipements, représentent 25% des nombres de défaillances.
- **la Zone C:** 25% des équipements, représentent 5 à 10% des nombres de défaillances.

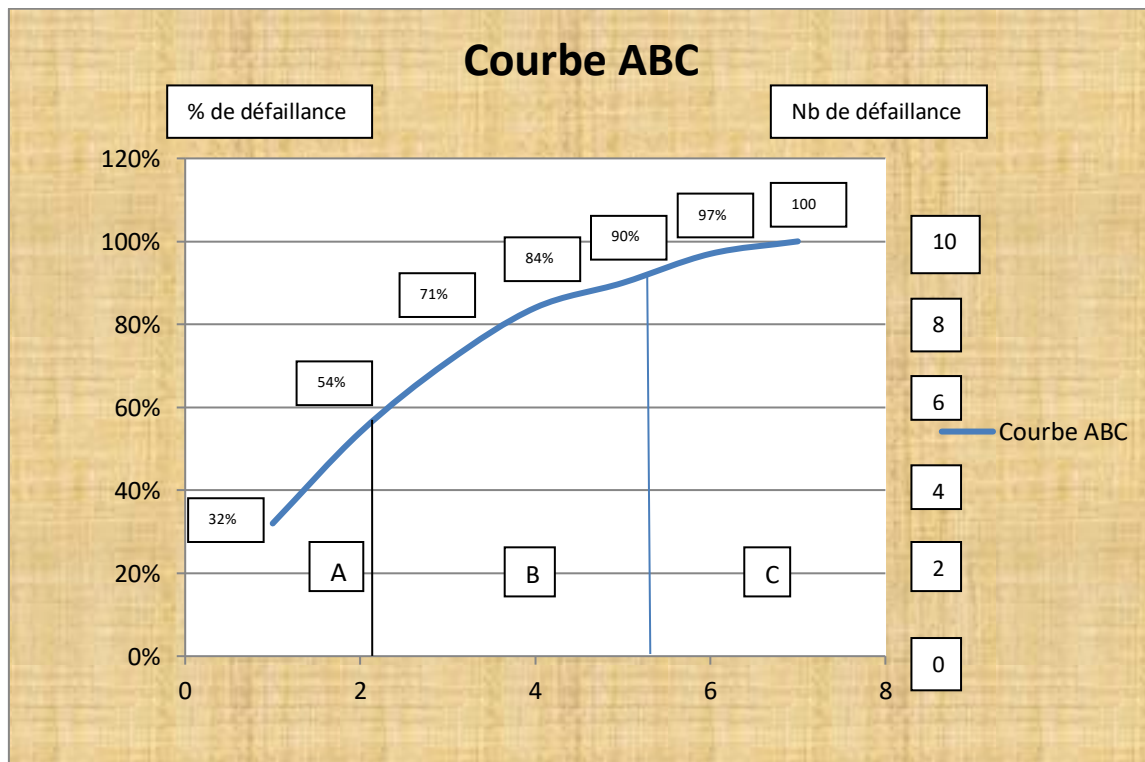


Figure II.12: Courbe ABC



**Analyse Pratique de la courbe ABC (Figure II.12):**

- la Zone A: 28,5 % des équipements, représentent 54 % des nombres de défaillances. Ils sont donc à étudier en priorité pour le treuil de forage.
- la Zone B: 42,8 % des équipements, représentent 36 % des nombres de défaillances.
- la Zone C: 28,5 % des équipements, représentent 10% des nombres de défaillances.

**Diagnostic par la méthode AMDEC:**

**1- Analyse du système:**

Pour cela on utilise la méthode "AMDEC" qui est une méthode de réflexion créative et repose sur la décomposition fonctionnelle du système en éléments simples jusqu'au niveau des composants les plus élémentaires. On procède au découpage fonctionnel dus ystème de freinage du treuil de forage figure II.12 [18].

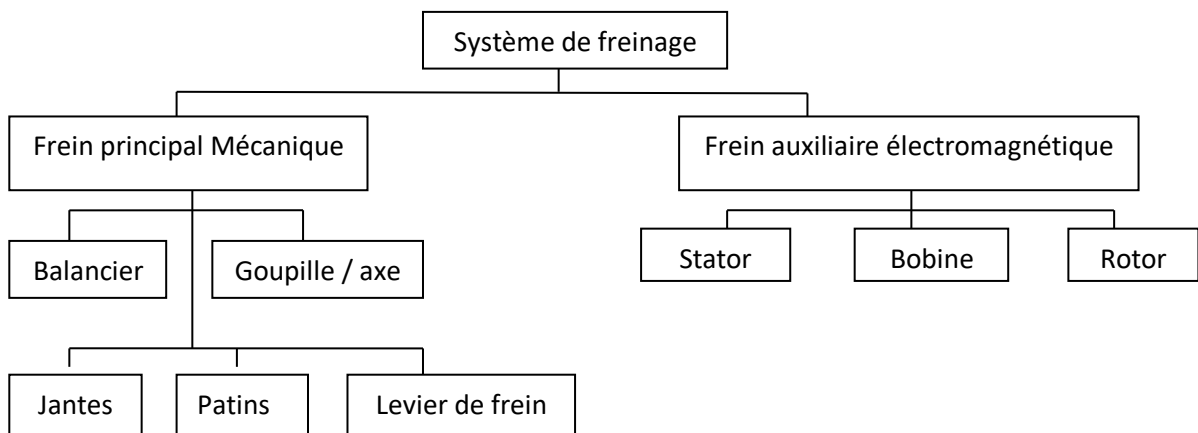


Figure II.13: Découpage fonctionnel de l'appareil de freinage.

**2- Tableau de cotation:**

Les valeurs des coefficients sont fixées au maximum égale à quatre (04) pour limiter le niveau des détails et faciliter la manipulation des chiffres, tableau II.9.

Tableau II.9: Grille de cotation.

Niveau ou Cotation	1	2	3	4
Indice de Fréquence	Moins d'une fois par année	Moins d'une fois Par mois	Moins d'une fois par semaine	Plus d'une fois par semaine
Indice de Gravité	Durée d'intervention $D \leq 1h$	Durée d'intervention $1h \leq D \leq 3h$	Durée d'intervention $3h \leq D \leq 5h$	Durée d'intervention $D > 5h$
Indice de Détection	Signe avant Défaillance	La défaillance, sa cause est évidente	La défaillance se produit mais décelable	Défaillance non décelable

**3- Analyse du système freinage au niveau du treuil de forage:**

L'analyse «AMDEC» de l'appareil de freinage du treuil de forage permet de déterminer l'élément le plus critique de l'équipement, tableau II.10.

**Tableau II.10: AMDEC du système de freinage.**

Système: treuils ou système: freinage (frein principal mécanique, Frein auxiliaire)									
Organe	Fonction d'état	Mode de Défail.	Cause	Effet sur le système	Criticité				Action à engager
					F R	G r	D	C	
<b>Levier de frein</b>	Fournit une pression à l'aide des bandes sur les jantes pour assurer le freinage	- Usure  -Fissure	- Délogement de l'axe fixant les bandes  -Surcharge	-Mauvais freinage	1	2	2	4	-Contrôle Visuel -Bruit Vibration  <b>Réparer ou changer le levier du frein</b>
<b>Patins</b>	Assure le freinage à partir de l'action de pression effectuée par les bandes	-Usure	- Mauvais réglage - Echauffement des jantes -Balancier non réglé -Non utilisation de frein auxiliaire électromagnétique -Fissure de jantes (fuite d'eau de refroidissement) - Climat (pluie, vent de sable)	-Mauvais freinage  -Effet sur l'opérateur humain (chef de poste)	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>12</b>	-Contrôle Odeur  - Procéder à un réglage  -Utiliser le frein auxiliaire  - Procéder au changement des patins et remplacer les jantes
<b>Jantes</b>	Assurer le freinage du tambour	- Echauffement  -Usure	-Mauvaise circulation d'eau de refroidissement - Endommagement de la conduite qui assure le lien entre les deux jantes  -Patins non réglés (contact avec la jante)	-Usure de patins  -Mauvais freinage	1	3	3	9	-Contrôle d'usure  - Rétablir la circulation d'eau et réparer la conduite  - Régler les patins
<b>Balancier</b>	Le maintien des bandes de frein en position égale	- Usure  - Mauvais positionnement	- Surcharge  - Surcharge - Défaut de construction	-Délogement de l'axe -Délogement de goupille -Vibration des pièces maintenues	1	4	1	4	Contrôle Périodique  <b>Revoir la conception du balancier avec le fabricant</b>

<b>goupille /axe</b>	Axe : servant à assembler un mécanisme ou à maintenir deux pièces l'une contre l'autre  Goupille: maintien la position de l'axe	-Usure  -rupture	- Surcharge  -Surcharge  - Défaut de construction	- Délogement de l'axe  - Délogement de goupille  -Vibration des pièces maintenues	1	1	3	3	Inspection périodique  <b>Remplacer l'axe et les goupilles dans leurs logements</b>  <b>Remédier au défaut de construction avec le fabricant</b>
<b>Rotor</b>	Assurer la procédure de freinage par frein auxiliaire	-Usure	-Variation du jeu entre le rotor, bobine et stator (calcaire causé par l'eau de refroidissement )	-Mauvais freinage  - Usure de stator	3	3	1	9	Contrôle Visuel  <b>- Réparer le stator</b> <b>- Utiliser une eau filtrée sans calcaire</b>
<b>Bobine</b>	Crée le champ magnétique	- Echauffement	-Mauvais refroidissement -Variation de jeu entre le rotor, bobine et stator (calcaire causé par l'eau de refroidissement -court-circuit	-Mauvais freinage  -Courant de Foucault insuffisant pour le freinage	2	2	2	8	Inspection périodique  <b>Eliminer le jeu</b>  <b>Utiliser une eau filtrée sans calcaire (distillée)</b>
<b>Stator</b>	Support de la bobine et rotor	-Usure	- Variation de jeu entre le rotor, bobine et stator (calcaire causé par l'eau de refroidissement)	-Mauvais freinage  -Courant de Foucault insuffisant pour le freinage	1	3	3	9	Inspection périodique  <b>Réparer ou changer le stator</b>

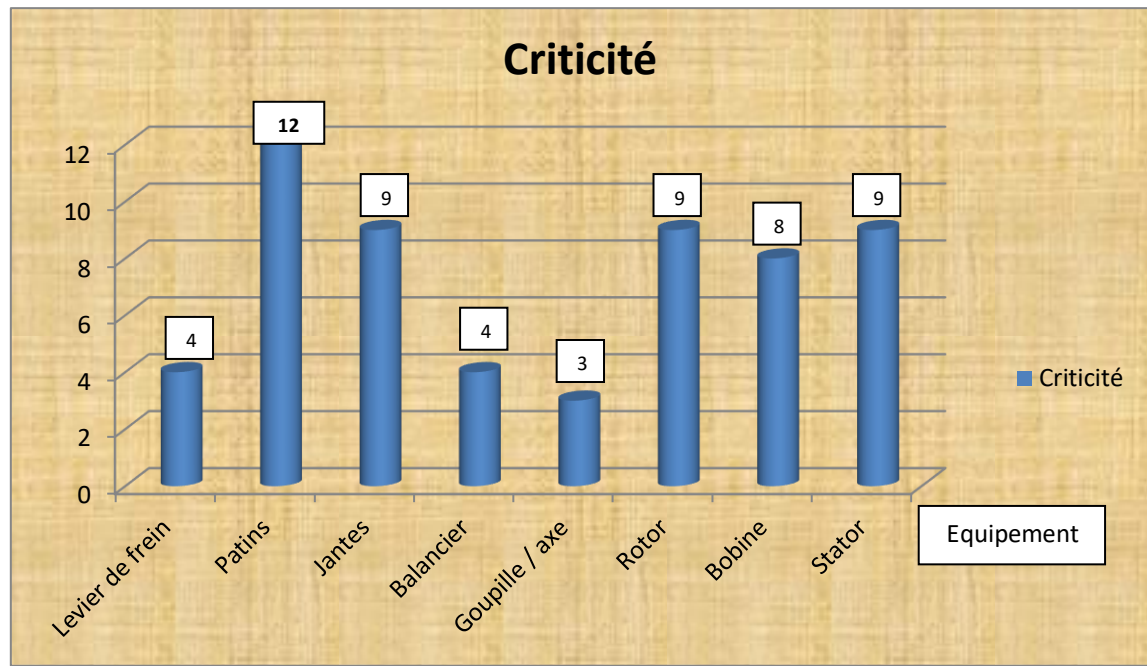


Figure II.14: Histogramme de criticité.

#### **Résultats:**

- On remarque que l'organe le plus critique: les patins de frein du treuil.
- L'analyse effectuée dans ce chapitre nous a permis de déterminer les principaux problèmes dans le système de freinage qui influent négativement sur la disponibilité et le fonctionnement du treuil de forage OIL WELL 840 E.

#### **Les actions préventives et correctives:**

Pour décider du type d'actions à entreprendre pour réparer et éliminer un problème, il suffit de connaître son degré de criticité:

- Pour les défaillances qui ont une criticité très grande on procède à un changement au niveau de la conception (action corrective),
- Pour les actions qui ont une criticité moyenne ou faible, il suffit d'entreprendre des actions préventives.

#### **Action proposée:**

Mettre en place et appliqué un plan de maintenance préventive basée sur les données de l'analyse AMDEC.

#### **4-Conclusion:**

Les méthodes d'analyse utilisées en fiabilité à savoir la méthode: «ABC», l'analyse par«l'AMDEC », et « ISHIKAWA » permettent à la Direction de Maintenance de pouvoir suivre les équipements, en particulier le système de freinage qui est une partie sensible dans le fonctionnement du treuil de forage.

La défaillance de ce système entraine l'arrêt de l'activité, augmente la durée et le coût des opérations de réalisation des forages et peut engendrer des dommages matériels et humains importants.

Pour avoir une maintenance efficace au niveau de l'Entreprise ENTP, nous suggérons d'appliquer rigoureusement la maintenance préventive recommandée par le constructeur de l'équipement car cela permettra d'assurer:

- Le bon fonctionnement de l'appareil avec un rendement optimal,
- Une continuité des opérations de forage,
- Une réduction des coûts de maintenance,
- Une diminution des pannes imprévues et la probabilité des défaillances en service,
- Une diminution de la consommation des pièces de rechange,
- Une augmentation de la durée de vie des équipements de forage,
- Une amélioration de la sécurité du personnel et la protection de l'environnement.

## **Sécurité [23]:**

### **1- Les aspects réglementaires de la maintenance:**

Les services maintenance, dans l'optique d'assurer la sécurité des intervenants, sont en charge de l'application de la réglementation relative aux équipements qu'ils doivent maintenir. Il faut savoir que:

- Les matériels utilisés doivent être conformes ou mis en conformité,
- Les situations relatives aux opérations de maintenance, réalisées en interne ou externalisées doivent être considérées comme dangereuses par nature,
- La responsabilité pénale de la hiérarchie est engagée, pour tout accident de travail consécutif à une opération de maintenance ou à une défaillance d'un appareil soumis à règlement.

### **On distingue trois grandes familles dans la sécurité:**

- **La sécurité industrielle et les risques technologiques** sont tournés vers les accidents majeurs, les risques chroniques et la protection des riverains.
- **La santé sécurité au travail**, quant à elle, concerne la prévention des risques professionnels, pour préserver la santé mentale et physique des salariés, et améliorer les conditions de travail.
- **La sûreté des installations** considère les agressions que peut subir une installation telles que le terrorisme, les intrusions informatiques, l'espionnage industriel, et fait appel à des métiers particuliers.

Selon la norme AFNOR X-06-010, la sécurité est «l'aptitude d'un dispositif à éviter de faire apparaître des événements critiques ou catastrophiques». L'objectif est d'évaluer et de prévoir l'occurrence des risques potentiels induits par l'existence même du système et qui conduiraient à un dommage.

### **2- Dimension technique: la Sûreté de fonctionnement:**

Selon la norme NF X 60-010, la sûreté de fonctionnement est l'ensemble des aptitudes d'un bien qui lui permet de remplir une fonction requise, au moment voulu, pendant la durée prévue, sans dommage pour lui-même ou son environnement [AFNOR 2002b].

### **La sûreté de fonctionnement se caractérise par quatre paramètres [AFNOR 2002b, 2005]:**

- **La sécurité**, aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître des événements critiques ou catastrophiques. La sécurité apparaît comme un indicateur de performance de la sûreté de fonctionnement d'un système.
- **La fiabilité**, aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné.
- **La disponibilité**, aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné.
- **La maintenabilité**, dans des conditions données d'utilisation, aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie, sur un intervalle de temps donné, dans un état dans lequel elle peut

accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits.

### **3- La Fiabilité Humaine:** (De la fiabilité technique à la fiabilité humaine):

#### **Définition :**

La fiabilité humaine est définie dans le prolongement de la fiabilité technique comme la probabilité qu'un individu effectue avec succès la mission qu'il doit accomplir, pendant une durée déterminée et dans des conditions définies [Rook 1962].

#### **L'homme source d'infirmité:**

Les accidents industriels majeurs dans l'aviation, le nucléaire ou la chimie (Tenerife en 1977, Three Mile Island en 1979, Bhopal en 1984) ont largement participé au développement des théories sur la fiabilité humaine. L'analyse de différents accidents à cette époque a fait apparaître l'homme comme un facteur d'infirmité et une source de dysfonctionnements dans le système.

### **4- La Prescription comme outil de la Sécurité [23]:**

L'une des stratégies les plus systématiques pour améliorer la sécurité des systèmes complexes à hauts risques consiste à accroître la prévisibilité des comportements techniques et humains. Cette «stratégie d'anticipation» vise à supprimer l'imprévu à travers la mise en place d'un système de règles et de procédures censé couvrir tous les cas possibles.

#### **Les règles de sécurité:**

##### **Définition:**

[Hale et Swuste 1998] définissent les règles de sécurité comme un état du système, ou une façon définie de se comporter en réponse à une situation prévue, établie avant que l'événement ne se produise et imposée à et/ou acceptée par les opérateurs du système en tant que moyen d'améliorer la sécurité ou d'atteindre un niveau de sécurité requis.

### **5- La Santé Sécurité au Travail:**

La protection de la santé et de la sécurité au travail repose sur la prévention des risques professionnels qui regroupe l'ensemble des dispositions à mettre en œuvre pour préserver la santé et la sécurité des salariés, améliorer les conditions de travail et tendre au bien être au travail.

#### **Réglementations et préconisations:**

A partir du XIXème siècle, le développement industriel a conduit le législateur à intervenir pour édicter les premières mesures de protection au bénéfice des travailleurs:

- Création de l'Inspection du travail, les premiers jalons d'une politique globale de protection de la santé et de la sécurité des travailleurs sont posés,
- La responsabilité civile systématique de l'employeur pour les accidents survenus dans son entreprise,
- La Sécurité sociale et la médecine du travail sont mises en place,
- Principe de la formation pratique à la sécurité de chaque salarié à son poste de travail,
- Création des Comités d'Hygiène, de Sécurité et des Conditions de Travail dans l'entreprise [23].

## **Indicateurs de Santé Sécurité au Travail:**

### **Taux de Fréquence et Taux de Gravité:**

**Taux de fréquence** = (Nombre d'accident avec arrêt x 1 000 000)/(Nombre d'heures travaillées)

**Taux de gravité** = (Nombre de journées perdues par Incapacité Temporaire x 1 000)/(Nombre d'heures travaillées)

Ces indicateurs sont les plus couramment utilisés par l'ensemble des entreprises, et parfois même les seuls utilisés pour apprécier leur performance en matière de santé sécurité [Roy et al. 2004].

### **6- Maintenance et Sécurité:**

[Grusenmeyer 2005b] met en évidence la relation antinomique qu'entretiennent la maintenance et la sécurité. En effet, d'une part, les activités de maintenance contribuent à la maîtrise des risques en permettant la détection et la correction de pannes et de défauts paradoxe susceptibles d'être à l'origine d'accidents. Cependant, d'autre part, des risques importants leurs sont associés; le personnel chargé de ces activités est alors d'autant plus exposé que ses activités sont soutenues.

### **7- Maintenance et risques de défaillance du système:**

La surveillance, la maintenance préventive et corrective améliorent la fiabilité et la disponibilité des équipements et permettent par là même une meilleure maîtrise des risques de défaillance du système.

### **8- Maintenance et sécurité des employés:**

Le deuxième volet de la relation entre la maintenance et la sécurité est celui de la santé sécurité au travail, avec le risque d'accident pour un employé lors de l'exécution de travaux de maintenance.

### **Le système des autorisations de travail pour un lieu de travail sûr:**

Si un travail comporte des risques ou se situe dans une zone dangereuse, un système d'Autorisation de Travail (AT) doit être mis en place. Un tel système est obligatoire pour les installations pétrolières.

Les principes suivants sont les bases d'un système d'Autorisation de Travail:

- l'isolation des équipements doit être faite et être sécurisée,
- chaque équipement ainsi que sa localisation doivent être clairement identifiés,
- les opérateurs de maintenance doivent être correctement formés et entraînés,
- aucun changement non autorisé du travail planifié ne doit être permis,
- l'équipe de maintenance et l'équipe d'exploitation doivent être impliquées dans l'Autorisation de Travail.

### **9- Maintenance et sous-traitance:**

#### **Sous-traitance des activités de maintenance et santé sécurité des sous-traitants:**

Les travaux de recherche sur la sous-traitance et ses impacts sur la sécurité, s'ils sont peu nombreux, sont unanimes sur l'impact négatif de la sous-traitance sur la sécurité des prestataires et sur la dégradation des conditions de travail [23].

**Une polémique est soulevée : une vraie amélioration des résultats sécurité des grands donneurs d'ordres et/ou une externalisation des risques?**

### **II.1.7. L'Amélioration Continue en Maintenance [12]:**

L'amélioration continue en maintenance passe par le respect et l'application de certains principes de management de la qualité:

#### **Principes de management de la qualité:**

1. Orientation vers le client,
2. Leadership,
3. Implication du personnel,
4. Approche processus,
5. Amélioration,
6. Prise de décision fondée sur des preuves,
7. Management des relations avec les parties intéressées.

#### **L'introduction de l'outil informatique en maintenance permet de:**

- Améliorer la gestion des activités de maintenance,
- Faciliter la diffusion de l'information pour tout le personnel de maintenance,
- Automatiser certaines tâches.

#### **GMAO:**

La GMAO sous entend l'utilisation d'un logiciel de gestion réservé à la Maintenance.

Il permet de gérer complètement le parc machines à travers l'analyse du curatif, l'organisation des interventions préventives, la gestion de la PDR et en fin la création de tableaux de bord et l'apport de statistiques.

#### **Les systèmes experts:**

Un système expert est un logiciel capable de répondre à des questions, en effectuant un raisonnement à partir de faits et de règles connues.

Il peut servir notamment comme outil d'aide à la décision.

Généralement, Un système expert comporte 3 parties essentielles:

1. La base de faits,
2. La base de règles,
3. Le moteur d'inférence (logiciel basé sur l'intelligence artificielle capable de simuler le raisonnement déductif).

#### **La maintenance et la sécurité de travail:**

- La sécurité,
- L'hygiène,
- La conservation de la santé du personnel est une fonction primordiale pour le gestionnaire de la maintenance et les dirigeants de l'entreprise.

On distingue les deux points en relation directe avec la maintenance:

- Les règles de base de la sécurité,
- La sécurité des ateliers (mécaniques, électriques).

**Les accidents de travail sont le plus souvent le résultat d'une négligence. Pour les éviter il est nécessaire:**

- Garantir les meilleures conditions de sécurité au travail,
- Formation et apprentissage du personnel,
- Sensibilisation.



## **La sécurité dans les ateliers de maintenance (mécanique, électrique et autres...):**

### **Ensemble de mesures regroupées en catégories:**

- Précautions personnelles: code vestimentaire et port des équipements de sécurité,
- Propreté: le nettoyage des machines, stockage des matériaux,
- Fixation des pièces et machines outils: consignes de mise en marche, de montage, de démontage et de fixation des éléments de machines,
- Usinage des pièces: relatives au fonctionnement des machines-outils et le comportement de l'opérateur devant la machine.

Depuis sa création l'Entreprise Nationale des Travaux aux Puits (ENTP), n'a ménagé aucun effort pour adopter une démarche de développement et d'amélioration continue, pour le maintien de son statut de premier entrepreneur du forage pétrolier en Algérie et acquérir une place au niveau international.

### **Pour concrétiser ses ambitions l'ENTP a entrepris les démarches suivantes [7] :**

- L'ENTP est **Membre IADC** (Association Internationale des Contracteurs de Forage), depuis **1993**.
- L'ENTP a obtenu son **Accréditation IWCF** (International Well Control Forum), en juillet **2020**, et a été agréée pour délivrer le "**Brevet Professionnel de Transport de Personnes et de Marchandises**".
- L'ENTP a **certifié son système de management intégré** - Qualité, Santé-Sécurité et Environnement le 17 Avril 2020.

Dans l'optique de cette vision d'amélioration continue de l'ENTP, son premier responsable le Directeur Général a pris les engagements suivants dans sa politique QHSE et d'amélioration continue de l'Entreprise:

- L'Entreprise Nationale des Travaux aux Puits (ENTP), activant dans le domaine du forage et du work-over, a pour mission principale la mise à disposition d'un outil de production performant (appareils de forage et de work-over) et d'un personnel qualifié.
- Afin d'accomplir notre mission, pérenniser la société face à l'évolution des marchés et continuer à nous développer, nous devons continuer à déployer notre démarche d'amélioration continue en nous appuyant sur l'engagement de chacun et en renforçant notre approche processus.
- L'ENTP s'engage à satisfaire en permanence les exigences légales et réglementaires, les exigences de ses clients et de ses parties intéressées pertinentes et autres exigences applicables.

### **Comme elle s'engage aussi à:**

- Assurer des conditions de travail sûres et saines,
- Eliminer les dangers et réduire les risques pour la SST avec la participation et la consultation de ses travailleurs,
- Protéger l'Environnement et prévenir la pollution,
- Améliorer continuellement l'efficacité du Système de Management Intégré.

## **II.1.8. Processus de Maintenance [12]:**

### **Le processus Maintenance:**

Le processus de maintenance est constitué des différentes fonctions suivantes:

- Préparation,
- Ordonnancement,
- Méthodes,
- Achats,
- Gestion de stock – Magasin.
- Réalisation travaux de maintenance,

▪ **L'activité de maintenance industrielle est une activité accidentogène.**

Pour éviter ces évènements et dans une démarche de **management de la qualité**, on peut mettre en place **des processus de maintenance**.

**La définition d'un processus selon ISO 9001:**

La **norme ISO 9001** qui permet de baliser l'approche processus comme étant: "l'ensemble des activités corrélées ou en interaction qui utilise des **éléments d'entrée** pour produire un **résultat escompté**".

Dans cette acception, on définit:

- Les **éléments d'entrée** comme pouvant être des objets matériels ou des informations,
- Les **éléments d'entrée** dans une unité d'une entreprise peuvent être des **éléments de sorties** pour une autre unité,
- Les processus sont souvent **cadrés, coordonnés et planifiés** dans une entreprise pour pouvoir mesurer les **performances des résultats**.

Dans l'entreprise, les processus peuvent concerner entre autres des activités diverses:

- Ressources humaines,
- Ressources financières,
- Ressources matérielles ou de maintenance,
- Gestion et traitement des informations,
- Processus support.

La **norme EN 13306** définit l'activité de **maintenance** comme l'ensemble des actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.

Une définition qui rappelle donc très précisément la définition d'un processus. On peut donc dire que **l'activité de maintenance industrielle en elle-même** est un processus.

**Les avantages à découper l'activité de maintenance industrielle en processus:**

- Identifier clairement les activités à réaliser,
- Indiquer les entrées et sorties de chacune des activités,
- Mettre en avant les liens entre les acteurs (ou unités de travail dans l'entreprise) et les activités,
- Définir des indicateurs pour mesurer la réalisation de chaque processus et ainsi avoir une idée de leur efficacité,

À noter qu'il n'existe pas de schéma type pour organiser son processus de maintenance: chaque organisation produit le sien en s'appuyant sur les bonnes pratiques. On réalise alors une fiche de processus maintenance.

Quand on parle d'une opération de maintenance industrielle sur un chantier, le processus se découpe en plusieurs sous processus. Pour ce faire, il est important de recueillir toutes les informations nécessaires [23].

**Les différents composants du processus de maintenance:**

Le processus de maintenance est en fait décomposé en différents processus:

- Le **processus de management**: où il est question de la stratégie de maintenance ou des ressources humaines,
- Les **processus de réalisation**: qui consistent à prévenir les événements indésirables ou encore améliorer les machines,
- Les **processus de support**: comment s'assure-t-on de la sécurité des personnes?, comment l'organisation est-elle structurée?,
- Pour mettre à disposition la documentation adéquate à l'utilisation des machines...

Chaque processus est mesuré grâce à des indicateurs de résultats. Ainsi, pour avoir un regard critique sur ses processus et les améliorer: il s'agit de passer en revue chacun de ces processus.

**Les données à recueillir pour suivre le processus de maintenance:**

Pour définir le **processus de maintenance industrielle**, il faudra décrire et identifier:

- Quelle est la **politique** et la **stratégie de maintenance** en vigueur?
- Toutes les **activités** des différents processus de maintenance qui sont réalisés en interne ou par des prestataires externes,
- Faire l'**inventaire des profils d'emplois** (les personnes nécessaires pour mener à bien les activités de maintenance),
- Identification des moyens** nécessaires (outils de travail, machines, pièces de rechange...),
- Noter les **interactions** entre les différents processus et entre les différentes personnes,
- Fixer des **objectifs qui peuvent être quantifiables** et détailler les activités et flux qui seront mesurés,
- Analyser l'efficacité du processus et ses dysfonctionnements et proposer des **améliorations**.

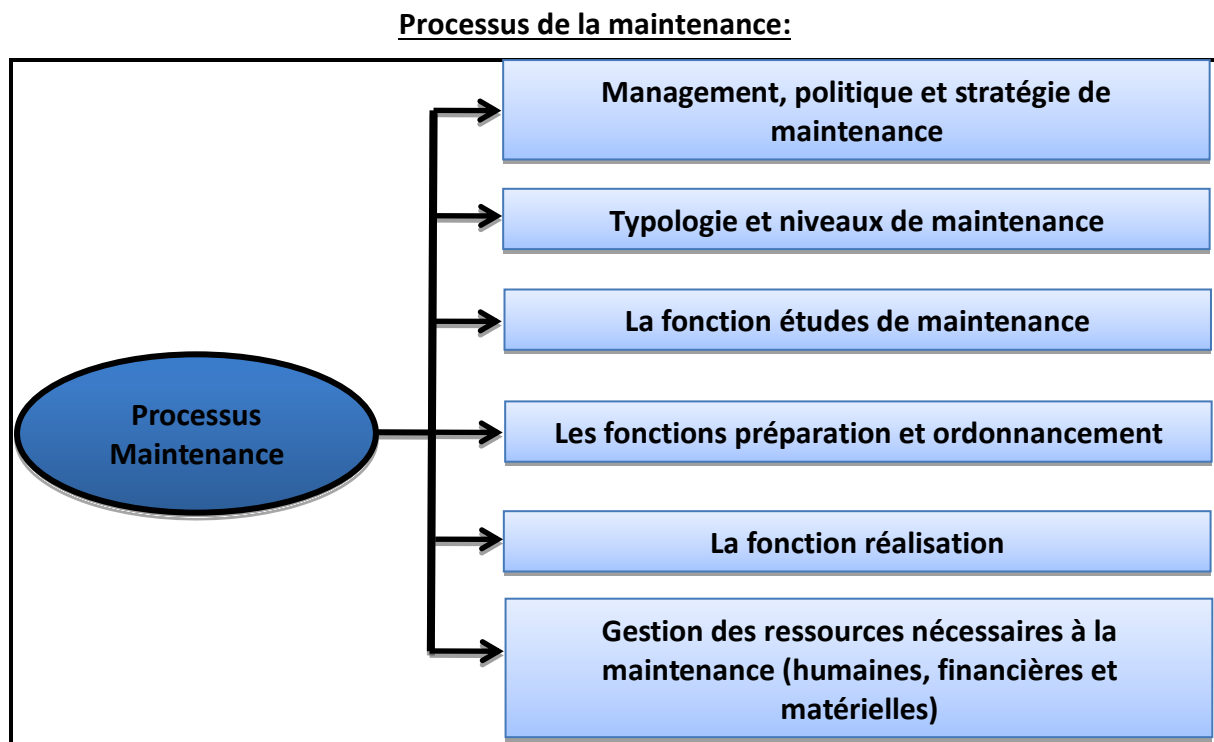


Figure II.15: Processus de la maintenance [12].

**II.1.9. Programmation des Travaux de Maintenance**

**Planning de maintenance:**

Plan élaboré à l'avance notifiant quand il convient d'exécuter une tâche de maintenance spécifique.

**Planification des interventions de Préventif, Conditionnel ou Systématique, ou Prédicatif:**

- Elaboration du programme prévisionnel (réglementaire, systématique, etc...)
- Suivi et replanification des interventions en fonction des problèmes.

### **Préparation des tâches de maintenance:**

Fourniture de toutes les informations nécessaires et identification des ressources requises pour permettre d'effectuer les tâches de maintenance.

### **Implantation et structuration du service maintenance:**

#### **Deux façons:**

**a) La centralisation:** Toute la maintenance est assurée par un service.

#### **Les avantages:**

- La vision sur l'état de la maintenance et du parc des équipements est globale,
- La gestion du personnel et des moyens est plus aisée,
- Les méthodes, procédures de travail et les moyens de communication sont standardisés,
- La diminution des quantités de pièces de rechange disponibles,
- Le regroupement favorise l'investissement dans un matériel plus coûteux,
- L'optimisation de l'utilisation des moyens matériels,
- La simplicité de la communication.

**b) La décentralisation:** La maintenance est assurée par plusieurs services. Pas de direction unique.

#### **Les avantages:**

- Réactivité renforcée face aux problèmes,
- Meilleure connaissance des matériels,
- Effectifs moins importants dans les différentes antennes de maintenance,
- Gestion administrative allégée.

### **La fonction méthode [12]:**

Relative à la préparation des travaux de maintenance, elle comporte:

1. Analyse (études) des travaux à effectuer,
2. Préparation des interventions,
3. Contrôle de la réalisation,
4. Mise à jour des dossiers techniques,
5. Gestion économique de l'activité maintenance,
6. Assistance technique.

#### **Les objectifs:**

1. Optimiser les coûts de maintenance,
2. Réduire les temps d'arrêt dû aux pannes des équipements,
3. Réduire les temps d'intervention,
4. Réduire le stock des PDR,
5. Améliorer les conditions de travail et de sécurité.

### **La fonction ordonnancement [12]:**

Organise l'intervention optimale en fonction des paramètres:

- Date et heure de réalisation (Horodatage: tâche informatisée),
- Moyens: personnel, outillage, dossier technique,
- Pièces de rechange,
- Moyens complémentaires: appareils de levage, etc...,
- Consignes de sécurité.

### **La fonction réalisation [12]:**

Concerne le personnel opérationnel de maintenance (équipes d'intervention):

- Pluridisciplinaires,
- Composition adaptée au matériel.

### **La communication:**

Le système de communication entre le moment d'apparition d'une défaillance et la remise en état de l'équipement sont:

- DT : demande de travail,
- OT : ordre de travail,
- BT : bon de travail,
- DA : demande d'approvisionnement (demande d'achat),
- BSM : bon de sortie de magasin.

#### Activité: Service Production & Service Maintenance:

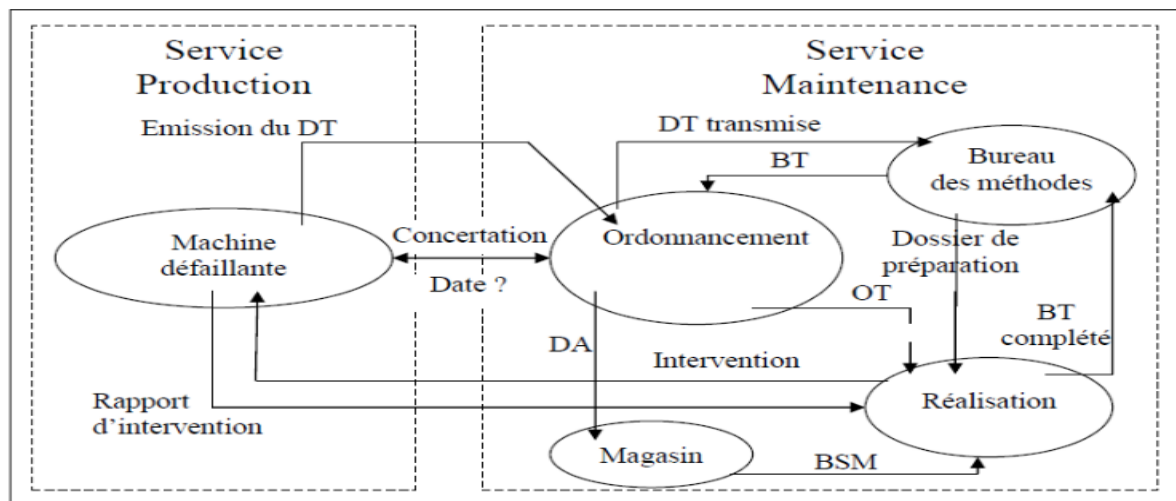


Figure II.16: Activité: Service Production & Service Maintenance [12].

### **II.1.10. Externalisation des Opérations de Maintenance [23]:**

#### **Définition:**

- L'externalisation est le transfert total ou partiel d'une tâche ou d'une fonction de l'entreprise utilisatrice vers une entreprise extérieure [AFNOR 2002a]
- Le recours croissant à la sous-traitance et à l'externalisation est une évolution structurelle lourde dans l'organisation des entreprises. Les grands donneurs d'ordres des industries à risques telles que le nucléaire ou les industries chimiques et pétrolières externalisent l'exécution de leurs travaux de maintenance depuis de nombreuses années.

#### **Les activités à externaliser:**

Les activités dont la technicité requise est décalée par rapport aux compétences internes, doivent être externalisées. Il en est ainsi pour les travaux à faible technicité ou à technicité très spécifique, ainsi que pour les travaux lourds réalisables en temps différé ou impliquant une grosse surcharge [Lavina et Loubère 1994 ; Monchy et Pichot 2003].

### **Les activités à conserver en interne:**

La Direction du service maintenance qui garantit la cohérence et définit la politique de maintenance, ainsi que le service méthodes qui est le centre vital de l'amélioration permanente des process, doivent rester en interne.

### **Les limites de l'externalisation:**

Les limites de l'externalisation seront atteintes lorsque l'externalisation aura un impact sur l'outil de production. Ces limites peuvent être:

- Techniques, liées à la difficulté de conserver le savoir-faire interne sur les équipements sensibles, même si des opérations complexes sont ponctuellement confiées à des spécialistes,
- Stratégiques, avec le risque de défaillance d'un prestataire pouvant mettre l'entreprise en danger [Barthélemy 2007].

La différence entre sous-traitance et externalisation est floue; beaucoup d'auteurs ne distinguent d'ailleurs pas explicitement ces deux termes.

### **II.1.11. La Sous-traitance [23]:**

#### **Définition:**

- La sous-traitance permet aux entreprises de réagir avec souplesse aux sollicitations du marché, de disposer de compétences qu'elles ne possèdent pas et qu'elles ne pourraient maintenir en interne. La sous-traitance devient un phénomène courant, et le volume d'heures sous-traitées peut représenter une forte proportion d'heures travaillées dans une installation industrielle.

#### **Les motivations à sous-traiter:**

La majorité des entreprises opte pour une politique axée sur deux objectifs:

- La volonté de se recentrer sur son cœur de métier en externalisant les tâches satellites,
- La volonté de réduire ses coûts internes [Monchy et Pichot 2003].

Enfin, la sous-traitance peut être motivée par une anticipation limitée de certains phénomènes:

- une activité est en développement (intensification de la demande, nouvel investissement, nouvelle activité, nouvelle technologie) pour laquelle le donneur d'ordres ne dispose pas des ressources en interne,
- Le départ massif de salariés n'a pas ou a mal été anticipé (pyramide des âges) [Groupe d'échange Sous-traitance 2008].

#### **Sous-traitance de la maintenance:**

• Les entreprises se tournent de plus en plus vers des compétences extérieures, à condition de pouvoir continuer à maîtriser la fiabilité de leurs équipements. Les activités de maintenance étant ainsi entièrement ou partiellement sous-traitées dans de nombreuses entreprises, la sous-traitance de la maintenance représente aujourd'hui un gros marché.

• Les prestataires de la maintenance se voient ainsi confier des rôles déterminants, non seulement du point de vue quantitatif du fait de leur flexibilité et de leur réactivité, mais aussi comme acteurs de la qualité, de la sécurité et de la sûreté de fonctionnement des équipements confiés [AFNOR 2002a].

### **Au niveau de l'Entreprise Nationale des Travaux aux Puits (ENTP):**

• La sous-traitance dans la maintenance n'est pas une stratégie permanente, mais elle est utilisée dans le cadre d'acquisition d'une nouvelle technologie et parfois dans le cadre de grosses opérations de rénovation, son activité se déroule à l'intérieur des structures de l'Entreprise.

- Conformément à la norme ISO, une procédure de maîtrise et d'évaluation des entreprises de sous-traitance, existe, appliquée et audité.
- Toutes les prestations fournies par les sous-traitants font l'objet de réceptions contradictoires systématiquement, conformément à la procédure et aux exigences de la norme ISO, concernant la gestion et le suivi de la sous-traitance.
- Des audits sont réalisés et les écarts soulevés sont traités et levés conformément à la réglementation et la norme ISO.

## **II.2. Exploitation et Maintenance des Equipements de forage**

### **1- Exploitation et Maintenance des Equipements de Forage au niveau ENTP [7]:**

Les appareils de forage de l'Entreprise Nationale des Travaux aux Puits (ENTP) et l'ensemble de leurs équipements sont exploités conformément aux instructions de leurs fabricants, dans la limite de leurs capacités pour réaliser le programme de forage du client, sous le contrôle des équipes de maintenance, de forage et leurs hiérarchies.

Pour répondre au mieux aux diverses préoccupations en maintenance pétrolière, l'Entreprise ENTP dispose de 10 ateliers occupant une surface couverte de 9 750 m<sup>2</sup> et une surface non couverte de 49 800 m<sup>2</sup>, ainsi que 4 aires de montage des appareils de forage et de workover en revamping d'environ 40 000 m<sup>2</sup>.

Des divers ateliers de maintenance, nous citons les ateliers: Maintenance Équipements de Forage, Maintenance Moteurs Industriels, Maintenance des Équipements Électriques et Atelier bobinage, Atelier Maintenance des Équipements Spéciaux et Atelier Habillages de Sonde, Atelier Maintenance Équipements de Mesure & Régulation, Atelier Fabrication Pétrolière Équipements Forage, 02 Ateliers Chaudronnerie & Soudure [7].

**Tableau II.11: Capacité de rénovation annuelle, par nature d'équipements.**

<b>Type D'équipements</b>	<b>Equipement</b>	<b>Capacité de Rénovation</b>
<b>Equipements de Forage</b>	Treuil de Forage	10
	Table de Rotation	12
	Top-Drives	08
	Pompes à Boue	12
<b>Equipements de Puissance</b>	Groupes électrogènes pour Appareils de Forage	24
	Groupes électrogènes pour Camps de vie	12
	Groupes de Force pour Appareils de Forage	12
	Alternateurs	36
<b>Equipements de Sécurité aux Puits</b>	BOP (tous types)	50
	Unité Accumulateurs	05
	Manifold Duses	12

## **2- Chaudronnerie, Soudure et Fabrication Pétrolière [7]:**

- Fabrication de plusieurs pièces mécaniques (axes, arbres, pignons, bagues, brides, engrenages, pièces filetés ou taraudés, etc...),
- Restauration de corps hydrauliques des pompes à boue,
- Soudage des pièces complexes pour les différentes sections de l'appareil,
- Réalisation des circuits à eau et à boue des appareils de forage,
- Restauration des équipements métalliques (mâts, substructures, bâtis pour moufles ou tables de rotation, etc.).

## **3- Le Montage en Effort propre:**

Avec son savoir-faire cumulé pour près de 50 ans, l'ENTP a réussi le montage d'appareils de forage en effort propre. Elle a assuré cette opération tout à fait complexe en associant d'autres entreprises Nationales dans le processus du montage, pour arriver à un taux d'intégration Nationale de 40%.

Entre 2013 et 2016, ENTP a réussi le Montage de 05 appareils avec ses propres moyens. Il s'agit des appareils : TP-181 (Pyramid 1500 HP), TP-217 (Pyramid 1500 HP), TP-224 (Cabot 1200 HP), TP-230 (Cabot 750 HP) et TP-225 (LCM 2000 HP).

ENTP a les capacités de Revamping et Montage des Appareils en effort propre de 04 appareils /an [7].

## **4- Maintenance préventive quotidienne:**

Ce type de maintenance préventive à actions quotidiennes, doit être appliqué à tous les équipements de l'appareil sans exception, il doit être fait quotidiennement par les équipes de maintenance. Les responsables de chantier doivent veiller strictement à sa réalisation.

## **5- Maintenance corrective:**

Cette maintenance s'applique une fois qu'une défaillance est survenue sur un équipement ou un organe. La réalisation de cette maintenance corrective sur les appareils impose les conditions suivantes:

- Faire un travail méthodique,
- Avoir une bonne préparation au travail,
- Avoir une bonne gestion de toutes les informations.



**CHAPITRE TROIS :**  
**FIABILISATION DES TRAINS DE SONDE**

### III.1- Etude des causes de défaillance des trains de sonde

#### Introduction:

Les opérations de forage des différents gisements pétroliers, sont souvent interrompues, quelque soit les précautions prises et ce, pour diverses raisons d'ordre technique. Les défaillances qui se manifestent au niveau des trains de sonde, sont dues entre autre, au phénomène de fatigue. La rupture peut se produire dans les tiges lorsqu'elles sont soumises à des chargements cycliques provenant de différentes sources:

- Cisaillement du train de tiges engendré par la fatigue,
- Cisaillement du train de tiges dû à un excès de tension,
- Cisaillement du train de tiges dû à un excès de torsion,
- Cisaillement du train de tiges dû à une combinaison de torsion et de tension,
- Cisaillement du train de tiges par écrasement ou éclatement.

#### Causes de pannes imprévues de la garniture de forage

##### Pannes de la garniture au-dessus de la limite élastique:

###### 1- Défaillance due à un excès d'effort axial:

Selon la norme ISO/CD 10407-1 de 2004 [28], lorsque la contrainte maximale de traction appliquée pendant le forage, dépasse la limite élastique minimale de l'acier de la tige de forage, on s'attendra à une rupture ductile de la tige.

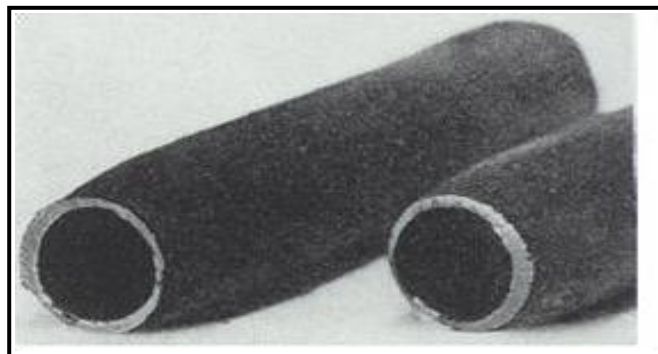


Figure III.1: Causes de panne de la garniture de forage [28].

A cet effet, La traction maximale applicable sur une tige est donnée par la formule suivante :

$$T_{\max} = \sigma_{e \min} \cdot S \quad (3.1)$$

$T_{\max}$  : Tension maximale applicable sur la tige, en N,

$\sigma_{e \min}$  : Limite élastique minimale de l'acier utilisé, en Pa,

$S$  : Section minimale de la tige, en  $m^2$ .

Le formulaire du foreur donne les valeurs de  $T_{\max}$  en fonction du grade d'acier, des dimensions nominales des tiges, du poids nominal et de l'usure (classe) des tiges.

###### 2- Défaillance due à un excès de torsion:

Du point de vue résistance à la torsion, relativement au train de tige, ce sont bien les connexions au sein de ce train qui représentent les points faibles. Les 'tool-joints' conventionnels présentent une résistance à la torsion de l'ordre de 80% de celle du corps de tige, sur lequel ils sont soudés.

**Tableau III.1:** Résistance à la traction et le couple du raccord male de la connexion [26].

Grade	ID standard	OD standard	Résistance à la Traction	Couple de serrage optimum
E	3''3/4	6''5/8	38060 ft-lbf	22840 ft-lbf
X	3''1/2	6''5/8	45130 ft-lbf	27080 ft-lbf
G	3''1/4	6''5/8	51700 ft-lbf	31020 ft-lbf
S	2''3/4	6''5/8	63400 ft-lbf	38040 ft-lbf

Lorsque l'on exerce un couple de torsion  $M$  sur une barre métallique de rayon  $R$ , la contrainte de torsion  $\tau$  exercée sur cette barre est [30]:

$$\tau = M/(J/R) \quad (3.2)$$

$\tau$  : Contrainte de torsion, en Pa,

$M$  : Moment du couple de torsion, en N.m. (avec  $M = 2 F.R.$ ),

$R$  : Rayon de la barre, en m,

$J$  : Moment d'inertie polaire de la barre, en  $m^4$ .

Pour une barre creuse comme les tiges de forage, le moment d'inertie polaire est:

$$J = \pi/2(Re^4 - Ri^4) \quad (3.3)$$

$Re$  : Rayon extérieur de la barre, en m,

$Ri$  : Rayon intérieur de la barre, en m.

La contrainte de torsion est maximale sur la surface extérieure de la barre. C'est cette valeur que l'on considère dans le cas des tiges de forage, d'où:

$$\tau_{max} = M/(J/Re) \quad (3.4)$$

$J/Re = \pi/2 ((Re^4 - Ri^4)/Re)$  : s'appelle module polaire de section transversale

La contrainte de torsion maximale est toujours inférieure à la limite élastique. Les différentes théories expliquant le cisaillement conduisent à des valeurs du rapport

$$\sigma_{emin}/\tau_{max} \quad (3.5)$$

Comprises entre 1.33 et 2. L'API a choisi  $\sqrt{3}$  comme valeur. Avec cette valeur, le couple de torsion maximum applicable sur une tige est :

$$M_{max} = 0.577. \sigma_{emin}. (J/Re) \quad (3.6)$$

$\sigma_{emin}$  : Limite élastique minimale de l'acier utilisé, en Pa,

$M_{max}$  : Moment du couple de torsion maximal, en N.m.

La valeur du couple de torsion maximal que l'on peut appliquer sur le corps d'une tige est donnée dans le formulaire du foreur en fonction du grade et de la classe d'usure (voir caractéristiques mécaniques des tiges de forage) [19].

### 3- Défaillance due à une combinaison de contraintes traction et de la torsion:

Selon la norme ISO/CD 10407-1 de 2004, lorsqu'une tige de forage, est soumise à un couple combiné à une charge axial dépassants les valeurs limites définies, la défaillance se manifeste par une face de rupture angulaire suivant une trajectoire hélicoïdale [28,31].



Figure III.2: Effet combiné de la traction et de la torsion [28].

Donc si l'on applique un effort de traction élevé combiné avec un moment de torsion important, on risque de plastifier le corps de la tige. Ce problème peut survenir lorsque l'on réalise une remontée de la garniture avec 'back-reaming' (poids au crochet élevé associé à un couple de torsion important à la table de rotation) [31,32].

Les efforts combinés se calculent par la formule suivante (Von Mises). L'API a choisi le critère de Von Mises comme critère de travail dans le domaine élastique. Dans la configuration d'effort de traction et torsion, la relation suivante est utilisée [31]:

$$\sigma^2 + 3\tau^2 \leq \sigma_{emin}^2 \quad (3.7)$$

$\sigma_{emin}$ : Limite élastique minimale de l'acier utilisé, en Pa,

$\sigma$ : Contrainte de traction, en Pa,

$\tau$ : Contrainte de torsion, en Pa.

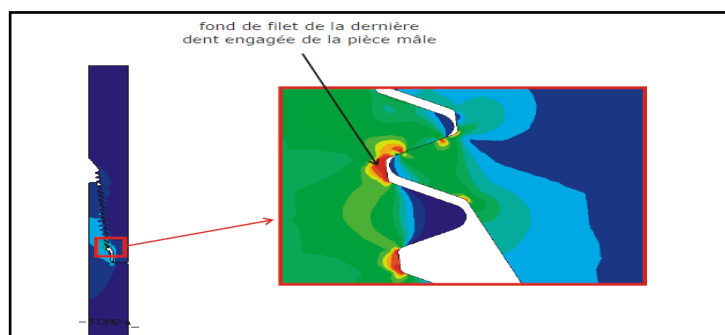
Nous retrouvons les deux critères cités précédemment:

- Pour la traction pure,  $\tau = 0$ , d'où :  $\sigma \leq \sigma_{emin}$
- Pour la torsion pure,  $\sigma = 0$ , d'où :  $\tau \leq \sigma_{emin} / \sqrt{3}$

### 4 - Effets combinés (tension/torsion) pour la connexion:

Lorsque l'on applique des efforts combinés excessifs sur une connexion, trois types de défaillance sont possibles:

1. Le raccord male se plastifie par excès de torsion, par excès de tension ou par excès des deux.
2. Le raccord femelle se plastifie par excès de torsion.
3. Rupture de la connexion suite à un effort de tension combiné avec un couple de serrage inadéquat [28, 31].

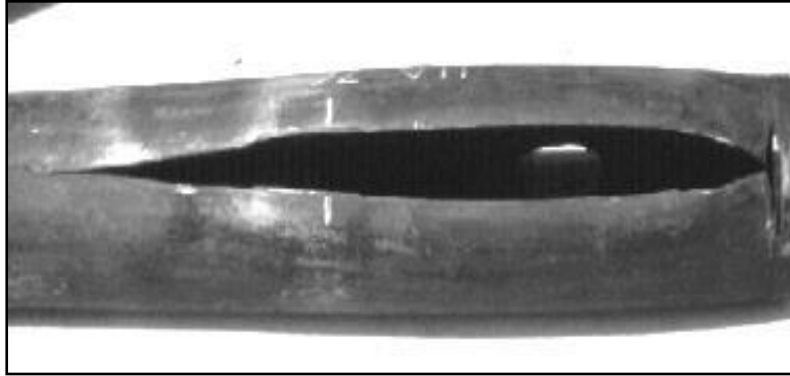


**Figure III.3:** Localisation des contraintes maximales dans une connexion vissée.

### **5- Défaillance du train de tiges due à la pression:**

#### **Défaillance du train de tiges due à la pression éclatement:**

Les ruptures d'éclatement se produisent sur les tiges de forage dans n'importe quelle opération, entraînant une différence de pression interne élevée par rapport à la pression externe et se manifestent sous la forme d'une rupture d'éclatement. Comme on peut le voir à la figure III.4



**Figure III.4:** Défaillance par éclatement [28].

#### **Défaillance du train de tiges par l'écrasement:**

La défaillance par l'écrasement se produit sur les tiges de forage principalement en raison de la densité élevée de la boue dans l'espace annulaire et d'une basse pression à l'intérieur de la tige et apparaît comme un écrasement à plat ou un tuyau en forme de demi-lune comme on peut le voir à la figure III.5.



**Figure III.5:** Défaillance par écrasement [28].

#### **Combinaison de trois contraintes (traction, torsion et éclatement):**

En cours de forage, la traction, la torsion et la pression à l'intérieur de la garniture agissent ensemble. Il existe peu de données relative à la combinaison des différentes contraintes engendrées.

### **6- Défaillance du train de tiges par vibration:**

Lors des opérations de forage pétrolier, de violentes vibrations peuvent se produire dans le train de tiges. Ces vibrations indésirables, conduisent à une fatigue accrue des éléments de la garniture

de forage, pouvant provoquer une rupture prématurée. Les vibrations de la garniture sont décomposées selon trois modes : axial, de torsion et latéral (Figure.III.6).

Sous des conditions nominales de forage, les trois modes se manifestent. Les garnitures de forage subissent typiquement un vrillage élastique de l'ordre de quelques tours, une élévation de l'ordre d'un mètre et des gradients d'inclinaison dans les portions courbes généralement compris entre 1 et 8°/30 m. Dans les trois modes, l'hypothèse des petites déformations est généralement justifiée [32, 33, 34, 35, 36].

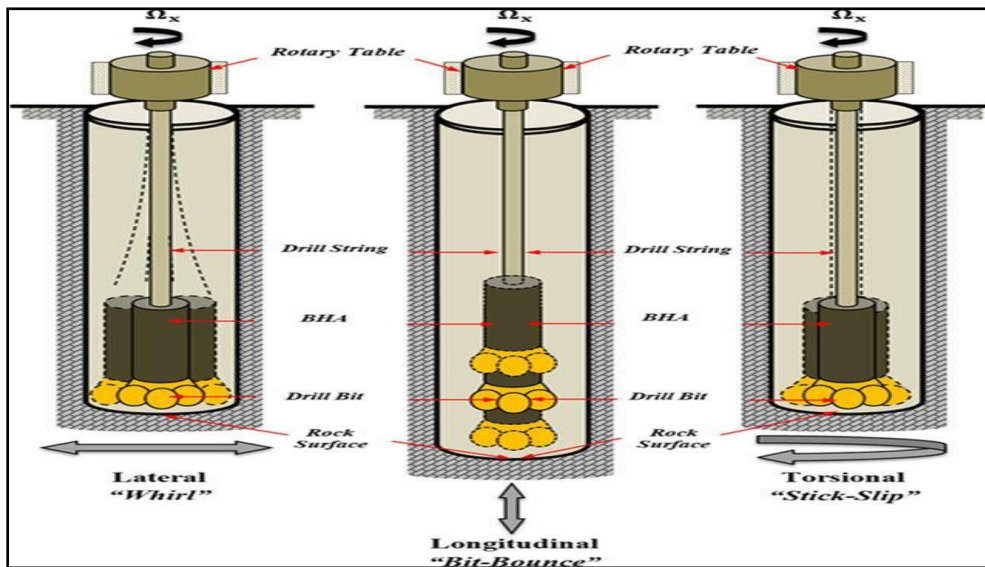


Figure III.6: Les modes de déformation de la garniture de forages [32].

#### **Vitesse critique de rotation des tiges:**

Certaines vitesses de rotation dites vitesses critiques induisent des phénomènes de résonance longitudinale et transversale dans la garniture. Ces vibrations sont souvent la cause de tiges tordues, d'une usure excessive et d'une détérioration rapide entraînant des ruptures par fatigue. Il faut donc éviter d'utiliser une garniture aux vitesses critiques [31, 39, 40, 27, 37, 38].

**Tableau III.2:** Vitesse critique approximative pour différents diamètres de tiges [30].

Diamètre extérieur de tige en (")	Vitesse critique approximative en (Tr/min)
3"1/2	160
4"1/2	210
5"	235
5"1/2	260

#### **Les vibrations axiales (Le bit-bounce):**

Les vibrations axiales (Figure.III.6), sont les premières à être observées puisque ce mode de vibrations se propage facilement vers la surface et sont à l'origine des fluctuations du poids sur l'outil. Les vibrations axiales sont dues essentiellement aux rugosités des roches forées et aux effets de la pompe à boue [27, 35].

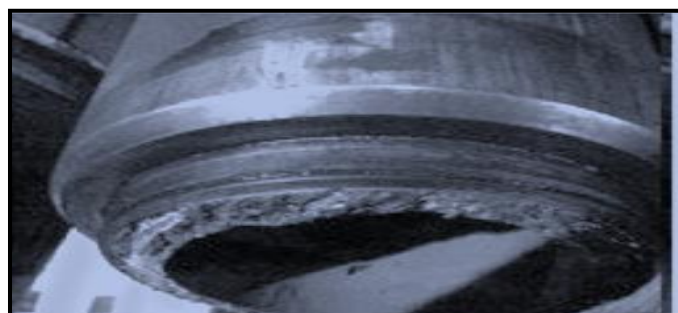


Figure III.7: Rupture d'une tige de forage [28].

### **Les vibrations latérales (le phénomène de whirl):**

Les vibrations latérales (Figure.III.6), ne se propagent pas à la surface et sont rapidement atténuées, elles restent souvent localisées au niveau de la partie basse du système de forage, c'est-à-dire au niveau de la BHA [33].

En fait, ces vibrations sont responsables de la rupture des tiges par fatigue (Figure III.7) et de l'usure de l'outil (Figure III.8) [33, 41, 42, 44].



Figure III.8: Gauche: outil neuf, droite: outil ayant subi des vibrations sévères (Les chocs répétés entre la garniture et la paroi du puits peuvent élargir le trou dans certaines zones et sont responsables de la non-uniformité du diamètre de forage [33].

Le whirling est une forme sévère des vibrations latérales, on le définit comme le mouvement orbital de la tige de forage autour de la paroi du puits (Figure.III.9). Le whirling est une cause majeure de la dégradation des performances du système de forage et de la perte de son efficacité. Il est donc une véritable cause de défaillances des garnitures et d'augmentation des coûts de forage [31, 38, 41, 42].

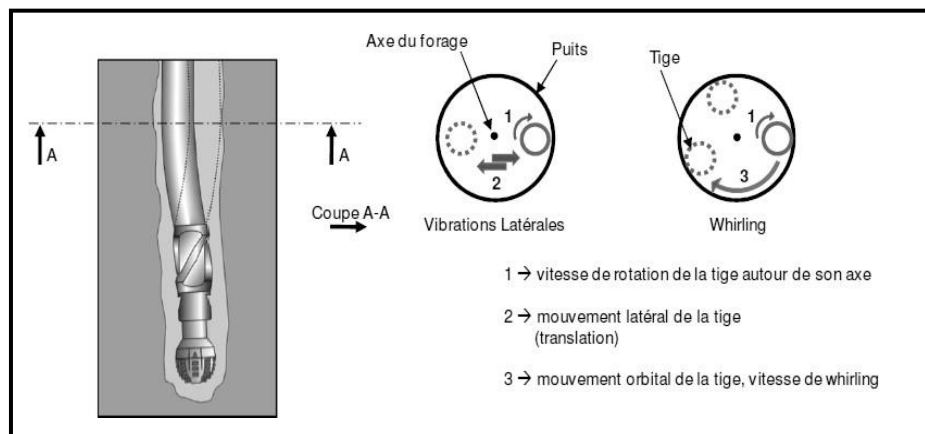


Figure III.9: Vibrations latérales et whirling [33].

### **Les vibrations de torsion (le phénomène de stick-slip):**

Des variations du couple de torsion en surface sont souvent observées au cours du forage. Par ailleurs, même si la vitesse de rotation est maintenue constante en surface, des mesures de fond de trou, montrent que la vitesse de rotation de l'outil de forage, peut présenter des fluctuations. Ces observations mettent en évidence l'existence des vibrations de torsion au niveau de la garniture (Figure.III.6) [50, 51, 52, 53, 54].

La figure.III.10, illustre un cas réel d'oscillations persistantes, qui ont été mesurées dans un système de forage [33, 45, 46, 47, 48, 49].

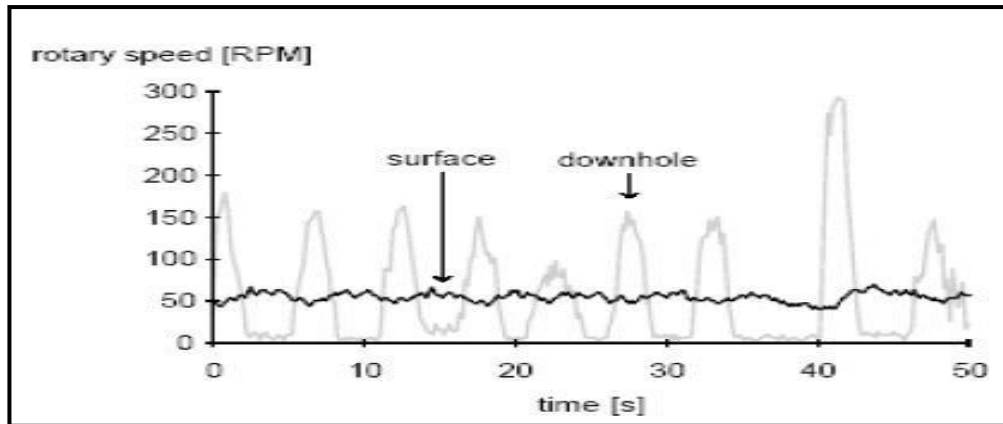


Figure III.10: Stick slip mesuré dans un gisement de pétrole [33].

La courbe en noir montre la vitesse de la table de rotation (en surface) qui varie entre 45 et 65 RPM (tr/min) et la grise montre la vitesse de rotation du trépan (down hole). On peut remarquer que la vitesse de rotation du trépan peut atteindre 3 à 5 fois sa valeur nominale et avec une période d'oscillations de 1 à 5 sec [33].

### **7- Défaillance du train de tiges par flambage:**

Les phénomènes de flambage apparaissent quand on observe des déplacements latéraux non uniformes résultant d'une charge axiale de compression excessive, s'exerçant sur une tige initialement rectiligne [24].

### **Pannes de la garniture en dessous de la limite élastique:**

#### **1- Fatigue du corps de tige de forage:**

Les endommagements par fatigue des tiges de forage se produisent lorsque celles-ci sont soumises à des contraintes alternées, en particulier lorsque les tiges traversent des sections à forte courbure du puits (dog-leg).

- Les contraintes cycliques qui induisent des microfissures dans le matériau. La fissure peut devenir rapidement un endommagement localisé (Wash out) sous forme de trou, Figure.III.11 (a) à cause de l'effet d'érosion corrosive de l'écoulement du fluide de forage sous haute pression.
- D'autres manœuvres de forage comme le jarring (battage pour libérer des tiges coincées), le tripping (manœuvres de remontée et descente de la garniture de forage dans le puits) [36].



Figure III.11: (a) Wash out. (b) Twist-off (source OLF, 2010) [43].

Par ailleurs, si la fissure (Figure III.11(a)) grossit jusqu'à ce que la section droite restante ne soit plus suffisante pour supporter les chargements en service, la garniture est cassée (twist-off), Figure III.11 (b).



## **2- Fatigue au niveau de la connexion:**

Après un certain nombre d'heures de service, des amorces de rupture sous forme de microfissures vont se développer dans les filetages. Le seul remède consiste alors à couper la partie fissurée du filetage et à exécuter un nouveau filetage [30].

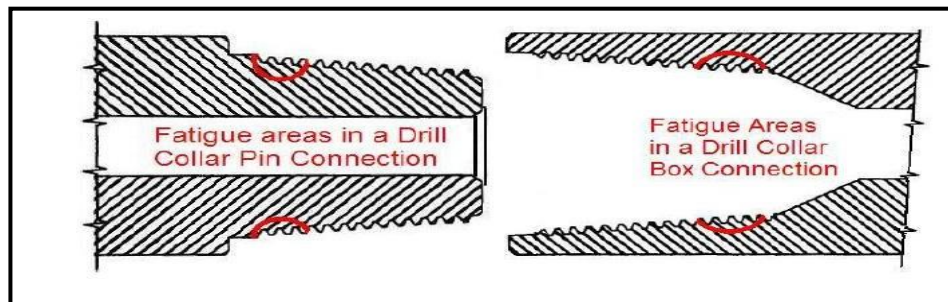


Figure III.12: BHA Connexion Fatigue Locations.

## **Défaillances dues à l'environnement**

### **1- Défaillance par corrosion:**

La corrosion des éléments de la garniture de forage, résulte de l'action chimique des fluides de forage ou fluides de formation rencontrés, qui peuvent réduire considérablement la durée de vie des éléments du train de tiges [26,55].

### **2- Défaillance par abrasion / érosion:**

L'abrasion et l'érosion résultent des frictions entre les éléments du train de tiges et les autres composantes du puits:

- frictions entre parties métalliques (usure du tubage due aux joints des tiges de forage)
- frictions entre le train de tiges et le puits (usure des joints et des corps)
- frictions entre le train de tiges et les solides contenus dans le fluide de forage [26].

### **3- Défaillance due à l'influence de la température:**

Le train de tiges s'allonge sous: son propre poids, celui des masses-tiges et de la température. Il se raccourcit sous l'action de la boue.

Dans un puits vertical, l'allongement de la garniture  $\Delta L_1$  produit sous l'action du poids des tiges et de la boue est donné par: [15].

$$\Delta L_1 = (L^2 / 2E) \cdot ([\rho_a - 2\rho_f (1 - \nu)] \cdot g)$$

$\Delta L_1$ : Allongement de la garniture, en m,

L: Longueur de tiges, en m,

$\rho_a$ : Masse volumique de l'acier, en kg / m<sup>3</sup>,

$\rho_f$ : Masse volumique du fluide de forage dans le puits, en kg / m<sup>3</sup>,

E: Module de Young de l'acier, en Pa,

$\nu$ : Coefficient de Poisson (0.3 pour l'acier),

g: Accélération de la pesanteur

L'allongement  $\Delta L_2$ , exprimé en m, dû à la température est donné par la formule suivante:

$$\Delta L_2 = 11.8 \cdot 10^{-6} \cdot L \cdot \Delta t$$

(3. 8)

$\Delta t$ : Variation de la température entre la surface et l'extrémité inférieure des tiges, en °C.  
L'allongement total  $\Delta L$  de la garniture est égal à  $(\Delta L_1 + \Delta L_2)$ .

$$\Delta L = (\Delta L_1 + \Delta L_2)$$

(3. 9)

Les formules précédentes sont applicables uniquement lorsque la garniture est en traction (absence de flambage, etc.) et que le poids est transmis intégralement du fond vers la surface.

### **Défaillance due à une friction (torque and drag)**

Les valeurs de "Torque & Drag" enregistrées lors du forage d'un puits pétrolier sont influencées par de nombreux facteurs:

#### **1- Facteurs opératoires liées à l'état du puits:**

Ces facteurs sont nombreux et dépendent fortement du mode opératoire lors du forage d'un puits. Les valeurs de "Torque & Drag", sont donc d'autant plus importantes que le mode opératoire est mauvais. En voici quelques exemples:

1. Coincement de la garniture par pression différentielle (stuck pipe,...),
2. Eboulement des parois du puits et dégradation de la qualité de trou (trou de serrure, puits étroit, ...etc),
3. Stagnation de déblais à l'intérieur du puits suite à un mauvais nettoyage du trou.

#### **2- Facteurs liées aux frottements:**

1. Frictions excessives associées aux forces latérales (side-forces) et essentiellement définies par la géométrie du puits,
2. La perte de couple tout le long du train de tiges, est telle que la puissance disponible à l'outil pour la destruction de la roche est considérablement plus faible que celle appliquée à la table de rotation. Les frottements peuvent être, tels qu'il devient pratiquement impossible de mettre en mouvement le train de tiges que ce soit lors d'une descente ou d'une remontée.

## **III.2- Notions de fiabilité des structures**

### **Introduction:**

La fiabilité est vite devenue une science à part entière dans les applications appartenant à de nombreux domaines. Elle a pour fondements mathématiques la statistique et le calcul des probabilités qui sont nécessaires à la compréhension et à l'analyse des données de fiabilité.

### **Définition de la fiabilité:**

Selon la Norme NF X 06-501: la fiabilité est la caractéristique d'un dispositif exprimée par la probabilité que ce dispositif accomplisse une fonction requise dans des conditions d'utilisation données et pour une période de temps déterminée.

### **Fonction de fiabilité R(t) – Fonction de défaillance F(t) [17]:**

Considérons un matériel dont on étudie la fiabilité. Soit X la variable aléatoire qui à chaque matériel associe son temps de bon fonctionnement. On choisit un de ces matériels au hasard. Soit les événements A: «Le matériel est en état de bon fonctionnement à l'instant t» et B: «Le matériel est défaillant à l'instant t+ $\Delta t$  ». On a alors :

$$P(A) = P(T > t) \text{ et } P(B) = P(T \leq t + \Delta t)$$

(3.10)

$$\begin{aligned}
 \text{Donc: } p(A \cap B) &= p(t < T < t + \Delta t) \\
 &= (t + \Delta t) - (t) \\
 &= (1 - (t + \Delta t)) - (1 - (t)) \\
 &= R(t) - R(t + \Delta t)
 \end{aligned}$$

On en déduit que :

$$p(B/A) = \frac{p(A \cap B)}{p(A)} = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} \quad (3.11)$$

On appelle fonction de défaillance la fonction **F** définie pour tout  $t \geq 0$

$$\mathbf{F(t) = P(T \leq t)}$$

Le nombre **F(t)** représente la probabilité qu'un dispositif choisi au hasard ait une défaillance avant l'instant **t**. La figure III.13: donne l'allure de cette fonction.

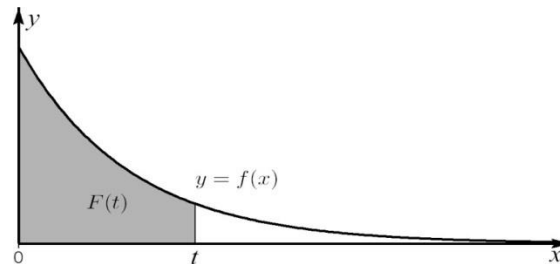


Figure III.13: Courbe: Fonction de défaillance (F(t)) [17].

Cette fonction nous amène naturellement une fonction associée: la fonction de fiabilité **R** définie pour tout  $t \geq 0$  par: **R(t) = 1 - F(t)**. Le nombre **R(t)** représente la probabilité qu'un dispositif choisi au hasard dans la population n'ait pas de défaillance avant l'instant **t**. La figure III.14, montre les deux fonctions associées.

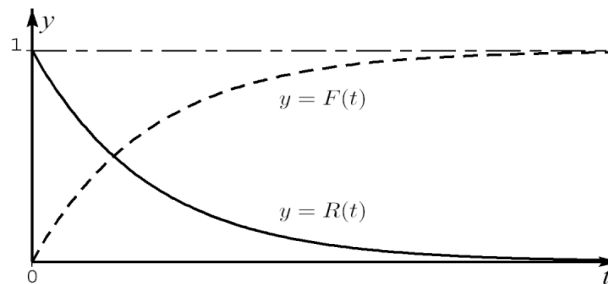


Figure III.14: Courbes: Fonction associée (F(t) & R(t)).

Le taux d'avarie moyen dans l'intervalle de temps **[t, t+Δt]** est alors:

$$\frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} \times \frac{1}{\Delta t} \quad (3.12)$$

### **1- Taux de défaillance instantané [17]:**

C'est la probabilité ( $0 \leq R \leq 1$ ); un produit doit accomplir de manière satisfaisante une fonction requise, sous des conditions données et pendant une période de temps donné.

L'écriture mathématique du taux de défaillance à l'instant **t**, noté **λ(t)**, défini sur R est la suivante:

$$\lambda(t) = \lim \left( \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} \right) \quad (3.13)$$

Physiquement le terme  $\lambda(t) \cdot \Delta t$ , mesure la probabilité qu'une défaillance d'un dispositif se produise dans l'intervalle de temps  $[t, t+\Delta t]$  sachant que ce dispositif a bien fonctionné jusqu'à l'instant  $t$ .

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= -\frac{dR(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} \\ &= \frac{dF(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} \\ &= \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1-F(t)} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Où  $R$  est la fonction de fiabilité de ce matériel.

On est alors amené à résoudre une équation différentielle du 1er ordre. En effet si  $\lambda$  est connu, la résolution de l'équation différentielle linéaire du 1er ordre :

$$R'(t) + \lambda(t) R(t) = 0 \quad (3.15)$$

Donne la fonction de fiabilité  $R$  du matériel. On déduit alors la fonction de défaillance  $F$  qui est la fonction de répartition de la variable  $X$  puis la densité de probabilité  $f$  de  $X$  qui est la dérivée de  $F$ .

On a alors:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad \text{et} \quad F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (3.16)$$

## 2-Indicateurs de la fiabilité [17]:

Indicateurs de fiabilité ( $\lambda$ ) et (**MTBF**): Précédemment le taux de défaillance  $\lambda$  a été défini par des expressions mathématiques à travers un calcul de probabilité. On peut également l'exprimer par une expression physique.

$$\lambda = \frac{\text{nombre total de défaillances pendant le service}}{\text{duree total de bon fonctionnement}} \quad (3.17)$$

### Temps moyen de bon fonctionnement:

Le **MTBF** (Mean Time Between Failure) est souvent traduit comme étant la moyenne des temps de bon fonctionnement, mais représente la moyenne des temps entre deux défaillances. En d'autres termes, Il correspond à l'espérance de la durée de vie  $t$ .

$$MTBF = \int_0^{+\infty} R(t) dt \quad (3.18)$$

Physiquement le **MTBF** peut être exprimé par le rapport des temps:

$$MTBF = \frac{\text{somme des temps de fonctionnement entre les (n) défaillances}}{\text{nombre d'intervention de maintenance avec immobilisation}} \quad (3.19)$$

$$\text{Si } \lambda \text{ est constant:} \quad MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (3.20)$$

**Moyenne des temps de bon fonctionnement MUT (Mean Up Time):**

Le temps moyen jusqu'à défaillance (ou moyenne des temps de bon fonctionnement) est [18]:

$$MUT = \frac{\sum \text{temps de bon fonctionnement}}{\text{nombre d'intervalles de temps de bon fonctionnement}} \quad (3.21)$$

**Temps moyen pour réparer MTTR (Mean Time To Repair):**

Exprime la moyenne des temps de tâches de réparation. Il est calculé en additionnant les temps actifs de maintenance ainsi que les temps annexes de maintenance, le tout divisé par le nombre d'interventions [17].

$$MTTR = \frac{\text{Temps d'arrêt Total}}{\text{nombre d'arrêt}} \quad (3.22)$$

**Taux de réparation  $\mu$ :**

La probabilité de réparation d'un composant est principalement fonction du temps écoulé depuis l'instant de défaillance. Il existe un certain délai  $t$  avant que le composant puisse être réparé. Ce délai  $t$  comprend le temps de détection et le temps d'attente de l'équipe de réparation. Il s'y ajoute le temps de réparation proprement dit. Figure III.15, donne l'allure de la probabilité de réparation d'un composant tombé en panne en  $t = 0$  [17].

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (3.23)$$

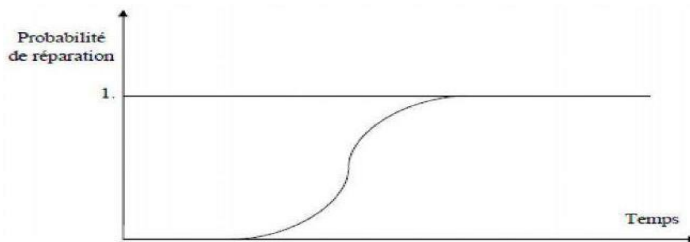


Figure III.15: Probabilité de réparation au cours de temps [17].

**La relation entre les indicateurs de fiabilité: MUT, MTBF, et MDT:**

On a :  $MTBF = MUT + MDT$

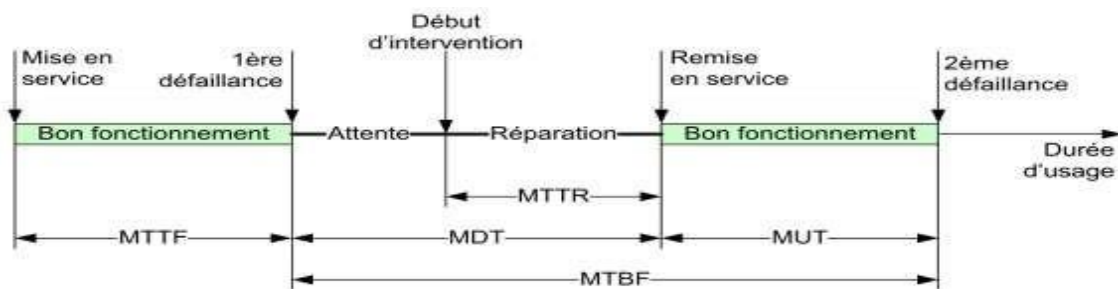


Figure III.16: Vie d'un système: évolution dans le temps [17].

**MTTF (Mean Time to Failure):** C'est le temps moyen de fonctionnement jusqu'à l'occurrence de la première défaillance.

**MDT (Mean Down Time) ou TMI:** C'est le temps moyen d'indisponibilité.

### Taux de défaillance pour des composants mécaniques:

Les composants mécaniques sont soumis, dès le début de leur vie, au phénomène d'usure ou de vieillissement. Si on trace la courbe du taux de défaillance, en fonction du temps, on obtient une courbe qui ne présente pas le plateau de la période de vie utile (taux de défaillance constant) n'existe pas ou elle est réduite. Le taux de défaillance du dispositif est une fonction non linéaire du temps et ceci dans chaque phase de sa vie (voir figure III.17):

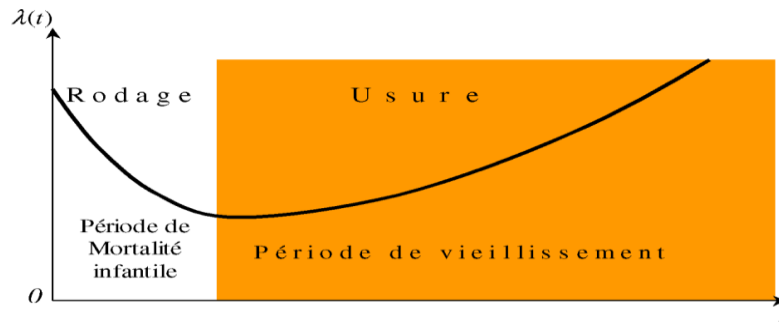


Figure III.17: Courbe du taux de défaillance en mécanique.

#### **Phase 1:**

La première phase définit la période de mortalité infantile. C'est une durée de vie en principe très courte.

#### **Phase 2:**

La dernière phase définit la période de vieillissement qui comporte la majorité de la vie du dispositif. Elle est caractérisée par une augmentation progressive du taux de défaillance.

### Objectifs et intérêts de la fiabilité en mécanique:

L'analyse de la fiabilité dans le domaine de la mécanique est un outil très important pour caractériser le comportement du produit dans les différentes phases de vie, mesurer l'impact des modifications de conception sur l'intégrité du produit, qualifier un nouveau produit et améliorer ses performances tout au long de sa mission.

### Evolution des coûts en fonction de la fiabilité:

La non fiabilité augmente les coûts d'après vente. Construire plus fiable, augmente les coûts de conception et de production. Le coût total prend en compte ces deux contraintes.

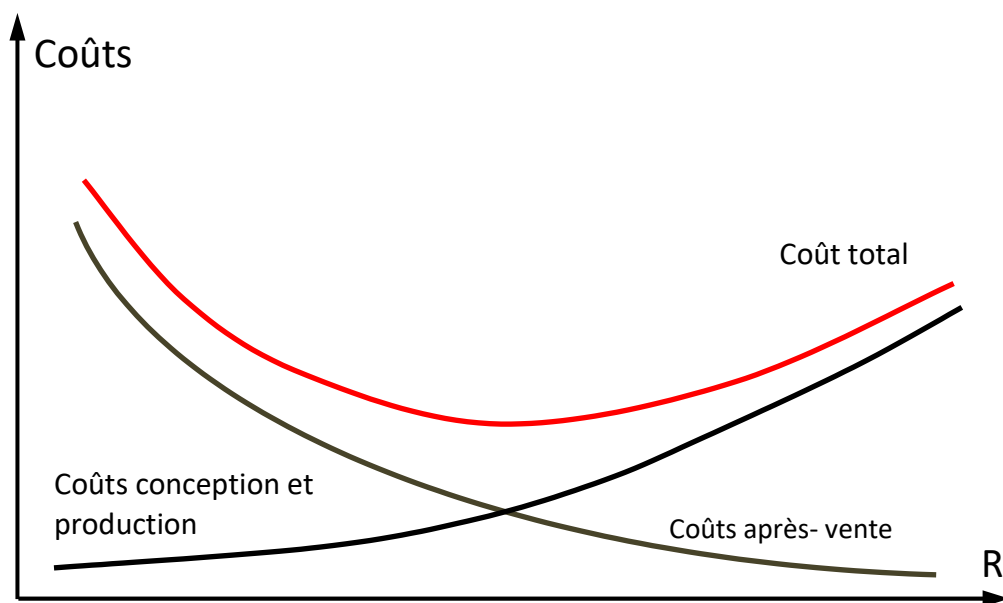


Figure III.18: Courbes d'évolution des coûts en fonction de la fiabilité [17].

La fiabilité d'une machine a tendance à diminuer avec le nombre de ses composants ou de leurs complexités. La maîtrise de la fiabilité devient donc plus délicate.

Une très haute qualité pour chaque composant, n'entraîne pas nécessairement une grande fiabilité. Après assemblage, les interactions entre les composants diminuent la capacité de l'ensemble.

**Fiabilité d'un système:**

Les systèmes mécaniques sont des ensembles d'éléments technologiques liés par des relations statiques et dynamiques assez complexes.

La fiabilité d'un système mécanique, contrairement à l'électronique, repose sur la fiabilité de quelques composants élémentaires responsables de son dysfonctionnement, dits composants "responsables" ou "critiques" (parfois un seul).

**Fiabilité de système constitué de plusieurs composants:**

• **En série:**

La fiabilité **Rs** d'un ensemble de **n** constituants connectés en série est égale au produit des fiabilités respectives **RA, RB, RC, Rn** de chaque composant.

$$R_s = R_A * R_B * R_C * ... * R_n$$

Si les "n" composants sont identiques avec une même fiabilité **R** la formule sera la suivante:

$$R(s) = R^n$$



Figure III.19: Composants en série.

Si les taux de défaillances sont constants au cours du temps la fiabilité sera calculée suivant la formule:

$$R(s) = (e^{-\lambda_A t}) * (e^{-\lambda_B t}) * (e^{-\lambda_C t}) * ... * (e^{-\lambda_n t})$$

Avec:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C + \dots + \lambda_n}$$

(3.24)

Si en plus, les composants sont identiques:  $\lambda_A = \lambda_B = \lambda_C = \dots = \lambda_n$

Alors:

$$R(s) = (e^{-\lambda n t}) \quad \text{et} \quad MTBF = \frac{1}{n \cdot \lambda}$$

(3.25)

• **En parallèle**

La fiabilité d'un système peut être augmentée en plaçant les composants en parallèle. Un dispositif constitué de **n** composants en parallèle ne peut tomber en panne que si les **n** composants tombent en panne au même moment.

Si **Fi** est la probabilité de panne d'un composant, la fiabilité associée **Ri** est son complémentaire:

$$F_i = 1 - R_i$$

(3.26)

$F_i$  représentant la fiabilité associée.

Soit les “n” composants de la figure ci-dessous montés en parallèle. Si la probabilité de panne pour chaque composant repéré (i) est notée  $F_i$  alors:

$$R(s) = 1 - (1 - R)^n \quad (3.27)$$

Le cas particulier de deux dispositifs en parallèle si  $\lambda$  est constant  $R_S$  est obtenu par:

$$R_S = 1 - (1 - R_A) \cdot (1 - R_B) = R_A + R_B - R_A \cdot R_B = e^{-\lambda_A t} + e^{-\lambda_B t} - e^{-(\lambda_A + \lambda_B) t}$$

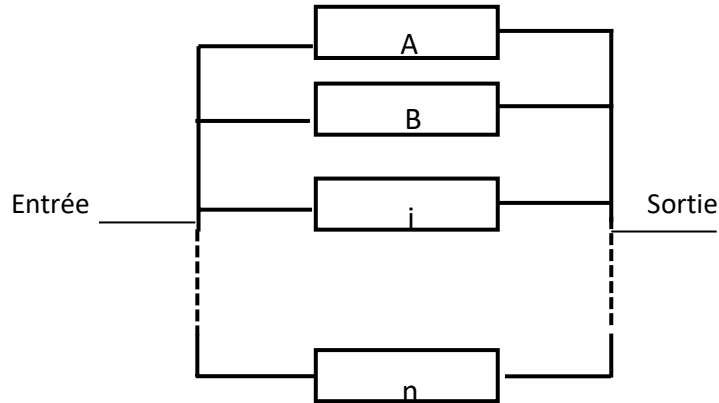


Figure III.20: Composants en parallèle.

### La relation entre la fiabilité et la maintenance:

Tous les équipements d’une installation industrielle sont soumis à des mécanismes de dégradation dus aux conditions de fonctionnement et/ou d’environnement: usure, fatigue, vieillissement.

Devant cette situation, le responsable de maintenance ne doit pas se contenter de surveiller et de réparer, il doit envisager des stratégies.

C’est dans ce contexte que la maintenance s’est dotée de méthodes qui considèrent à la fois, et plus ou moins, la technique et l’organisation. Les industries de processus ont appliquée des démarches alliant une évaluation des risques, une analyse du retour d’expérience, et une logique de sélection de tâches de maintenance. L’Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité (OMF).

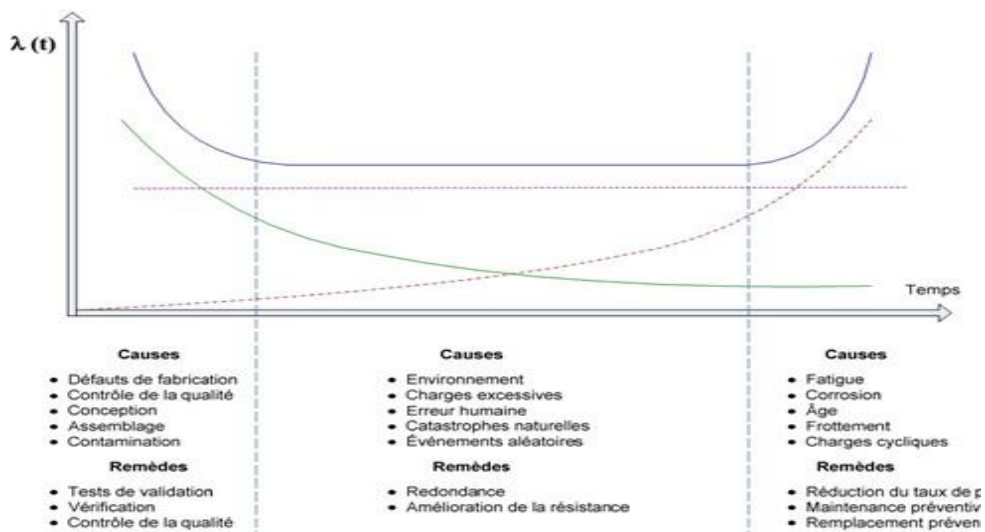


Figure III.21: Evolution du taux de défaillance [17].



La prolongation de la durée de vie d'un matériel ne peut se faire que par des actions de maintenance.

**La maintenance peut:**

1. Diminuer la fiabilité (erreurs humaines dues à l'intervention),
2. N'avoir aucun effet (aucun mécanisme de vieillissement, aucun phénomène d'usure),
3. Améliorer la fiabilité (présence de mécanisme de vieillissement, de phénomène d'usure).

La maintenance idéale est la probabilité que le système survive au temps  $t$ .

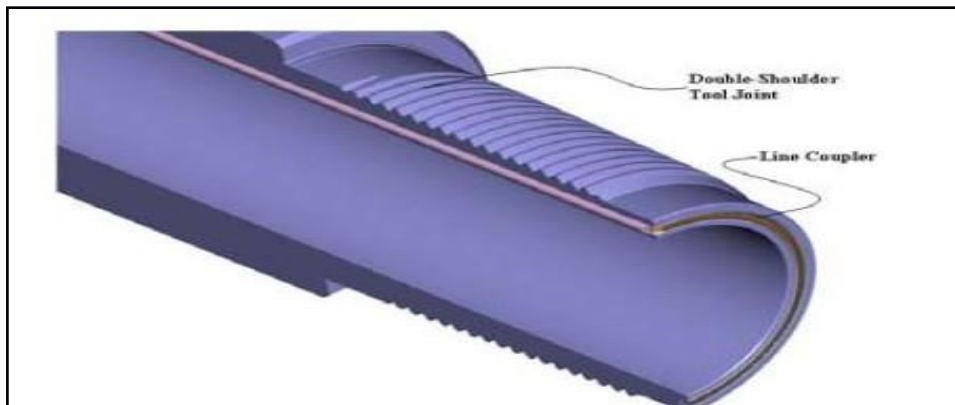
### III.3- Fiabilité des trains de sonde

**L'évolution des structures de forage:**

Face à la complexité des puits forés à ce jour, les techniques de forage dites conventionnelles ne suffisent plus pour aller exploiter des réserves de plus en plus profondes et/ou dans des environnements très agressifs. Les nombreux challenges que l'industrie pétrolière rencontre aujourd'hui, sont propices à l'innovation technique et technologique. Les principales évolutions et avancées technologiques en forage ces 10 dernières années, depuis le fond du trou jusqu'à la surface:

- Utilisation d'appareils de forage plus puissants: le moteur top drive remplace la table d'entraînement rotative,
- Exploitation de tiges de forage plus résistantes, qui acceptent du couple et sont en mesure de le transmettre de la surface vers le fond,
- Utilisation d'outils et de garnitures de forage toujours plus efficaces.

Les tiges câblées sont certainement l'une des innovations phares de ces dernières années. Cette technologie utilise un câble dans les tiges couplées à des bobines d'induction au niveau des connexions, pour transmettre l'information de tige en tige et quelques répéteurs disposés à des endroits discrets le long du train de tige de manière à garder un signal acceptable [56].



**Figure III.22:** Tige câblée [56].

Les fabricants d'équipements de forage/complétion et les contractants de forage doivent donc répondre à la demande de plus en plus exigeante des opérateurs, en fournissant un équipement dont la tenue mécanique en service est garantie dans les conditions extrêmes, (températures de l'ordre de 250° C et pression dépassant les 2500 bars) [56].

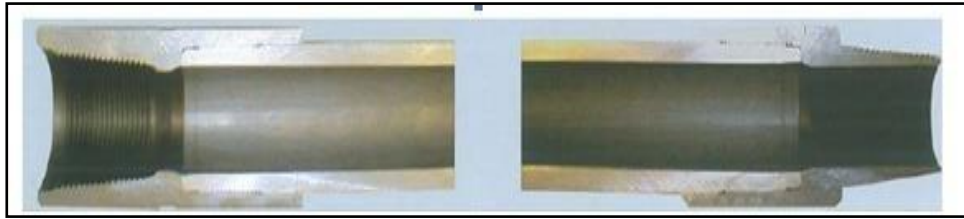


Figure III.23: Tige aluminium (source weatherford-Aquatic company) [56].

Les fabricants de tiges de forage ont également repoussé les limites de conception des connexions (tool-joint). En fait, les puits ERD (Extended Reach Drilling), en raison de leur frottement élevé, génèrent un couple de serrage élevé, ce qui nécessite des raccords à couple de serrage élevé. En moins de dix ans, le couple de serrage a encore gagné près de 20 % atteignant aujourd'hui plus de 80 % d'amélioration par rapport aux standards API, grâce notamment au double épaulement (double-shoulder) [56].

### Application: Fiabilité des tiges de forage [17]:

Nous avons utilisé la loi de survie pour le calcul de la fiabilité des tiges de forage 5''1/2 sur un appareil ENTP:

Un appareil de forage de l'ENTP est doté de 500 tiges de forage de diamètre 5''1/2 conformément aux exigences des clients et notamment SONATRACH pour le forage des puits d'hydrocarbures profonds.

A chaque fin de puits les tiges sont envoyées à l'Unité Tubulaire (UET) pour être contrôlées, réparées en cas de dommage puis triées et classées selon la gravité de leurs usures.

#### Notons que:

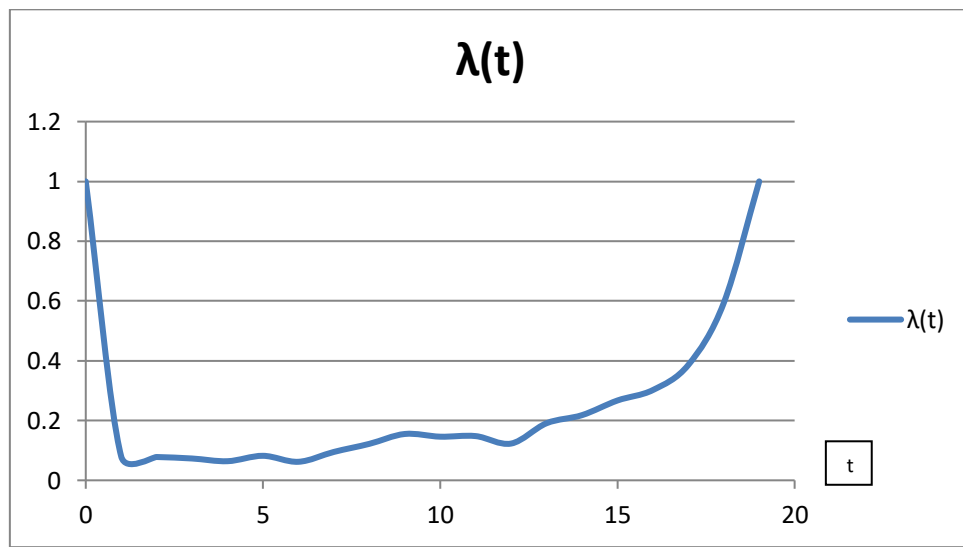
<b>N(t)</b> : nombre de survivants à la date <b>t</b> (on fait le compte des tiges encore en service)	
<b>ΔN(t)</b> : mortalité absolue à la fin de la période <b>t</b> (nombre d'éléments défectueux après le dernier inventaire)	
<b>N(0)</b> : nombre de tiges mis en service à la date <b>t<sub>0</sub></b> (il s'agit ici de 500)	
<b>R(t)</b> : Probabilité de survie (c'est la proportion des tiges encore en service par rapport au nombre initial, peut s'exprimer en %)	$R(t) = \frac{N(t)}{N(0)}$
<b>F(t)</b> : Probabilité d'observer une défaillance avant <b>t</b> (c'est le complément de R(t))	$R(t) = 1 - F(t)$
<b>f(t)</b> : Proportion des défectueux dans l'intervalle [(t-1) ; t] (c'est la proportion de tiges défectueuses depuis le dernier inventaire par rapport au total initial)	$f(t) = \frac{\Delta N(t)}{N(0)} = \frac{N(t-1) - N(t)}{N(0)}$
<b>λ(t)</b> : Taux de défaillance (ou taux d'avarie); c'est la proportion de tiges défectueuses depuis le dernier inventaire par rapport au total précédent	$\lambda(t) = \frac{N(t-1) - N(t)}{N(t-1)}$

Tableau III.3: Calcul des paramètres de fiabilité.

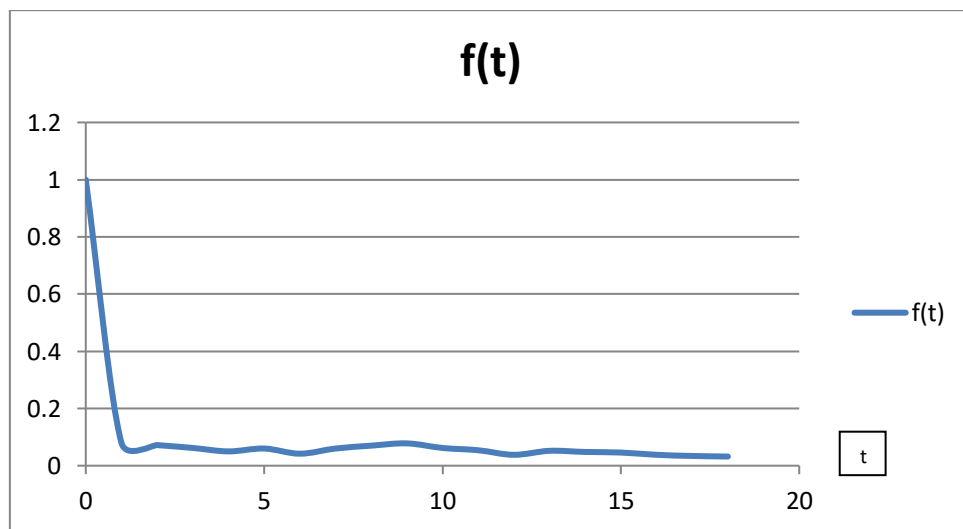
Période <b>t</b>	Survivants <b>N(t)</b>	Mortalité absolue <b>ΔN(t)</b>	Mortalité relative <b>f(t)</b>	Probabilité de survie <b>R(t)</b>	Taux de défaillances ou d'avarie <b>λ(t)</b>
0	500	0	1.000	1.000	1.000
1	460	40	0.080	0.920	0.080
2	424	36	0.072	0.848	0.078
3	393	31	0.062	0.786	0.073
4	368	25	0.050	0.736	0.064
5	338	30	0.060	0.676	0.082
6	317	21	0.042	0.634	0.062
7	287	30	0.060	0.574	0.095

8	252	35	0.070	0.504	0.122
9	213	39	0.078	0.426	0.155
10	182	31	0.062	0.364	0.146
11	155	27	0.054	0.310	0.148
12	136	19	0.038	0.272	0.123
13	110	26	0.052	0.220	0.191
14	86	24	0.048	0.172	0.218
15	63	23	0.046	0.126	0.267
16	44	19	0.038	0.088	0.302
17	27	17	0.034	0.054	0.386
18	11	16	0.032	0.022	0.593
19	0	11	0.022	0	1.000

**Représentation graphique:**



**Figure III.24:** Courbe  $\lambda(t)$  taux de défaillance calculé (ou taux d'avarie)



**Figure III.25:** Courbe  $f(t)$  la densité de propabilité calculée

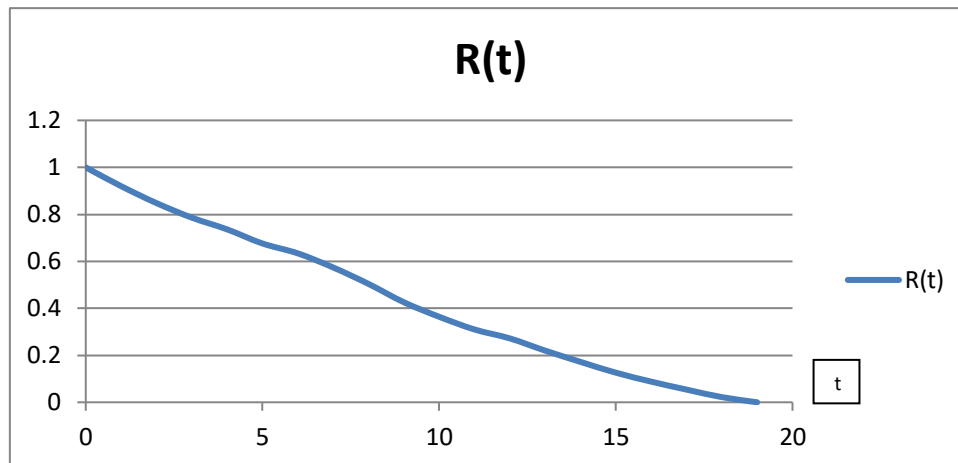


Figure III.26: Courbe  $R(t)$  probabilité de survie calculée

**Conclusion:**

**Les différentes phases du cycle de vie des tiges de forage:**

La courbe du taux de défaillances  $\lambda(t)$  montre l'évolution de ce dernier suivant trois zones distinctes:

**Zone(1). Période de jeunesse:**

Le taux de défaillance décroît relativement vite après l'élimination des tiges de mauvaise qualité ou mal utilisée (serrage anormal, etc...),

**Zone(2). Période de maturité (pleine activité):**

Le taux de défaillance est constant. C'est la période de vie utile des tiges (ou période de pannes fortuites).

**Zone(3). Période de vieillesse ou d'usure:**

Les défaillances sont dues à l'âge ou à l'usure sous différentes contraintes,  $\lambda(t)$  croît avec le temps du fait de la dégradation des tiges de forage (usures, fatigue, etc....) [22].

- Le comportement en baignoire du taux de défaillance est signe d'un fonctionnement plus ou moins normal.
- Les tiges de forage exploitées aux niveaux des appareils de forage de l'ENTP, fonctionnent plus ou moins correctement et s'usent normalement avec le temps.

Les tiges rebutées sont déclassées et signalées avec bande rouge sur le corps des tiges et retirées de l'activité de forage.

**CHAPITRE QUATRE :**  
**CONTRIBUTION A L'AMELIORATION DE LA DUREE DE**  
**VIE DES TRAINS DE SONDE**

## IV.1. Durée de vie des trains de sonde

### IV.1.1- Paramètres de calcul:

#### Introduction:

Suite à l'aperçu général donné dans les chapitres précédents relatifs à la défaillance du train de sonde conventionnel, particulièrement les différents modes de défaillances, nous consacrerons ce chapitre, à l'amélioration de la durée de vie du train, en s'articulant sur deux études:

- Le premier cas s'articule sur l'évaluation de la dangerosité des contraintes engendrées par les charges de traction et de torsion, qui affectent le train de tiges lors de l'opération de back\_ream.
- Le deuxième volet étudie les risques associés au problème de fatigue de la tige de forage lors d'un chargement dynamique dans un puits à trajectoire tortueuse, et l'utilisation des tiges de forage en alliage d'aluminium 2024, superficiellement traité (ST) par (OMA).

Ces études de cas permettent d'évaluer la dangerosité des défaillances telles que la fatigue et de configurer les composants des trains de tiges de forage de manière à retarder la fatigue et **améliorer la durée de vie de ces tiges** autant que possible et dans le respect des principes de rentabilité et de fonctionnalité.

#### Première Etude:

##### **Les études et travaux concernent des forages sur le bassin de BERKINE:**

- Le bassin de BERKINE est devenu l'un des bassins les plus importants d'hydrocarbures en Algérie et compte le plus grand nombre de partenaires étrangers opérant dans le cadre de l'association avec Sonatrach.

##### **Situation Géographique du bassin de Berkine:**

Le bassin de BERKINE se situe dans l'erg oriental, du Sahara Algérien entre les latitudes 29° et 34° Nord et les longitudes 5° et 10° Est, à l'Est des champs de Hassi Messaoud, Rhourde El Baguel et Rhourde Nous. Il s'étend sur trois pays, La partie occidentale située en Algérie, la partie orientale située en Libye et le sud de la Tunisie pour sa partie septentrionale.

##### **Situation géologique:**

Du point de vue géologique, le bassin de Berkine, est de type intracratonique (WEC. 2005), il se situe dans la partie Nord Est de la plateforme saharienne.

Sa superficie globale est de 102 395 km<sup>2</sup>.

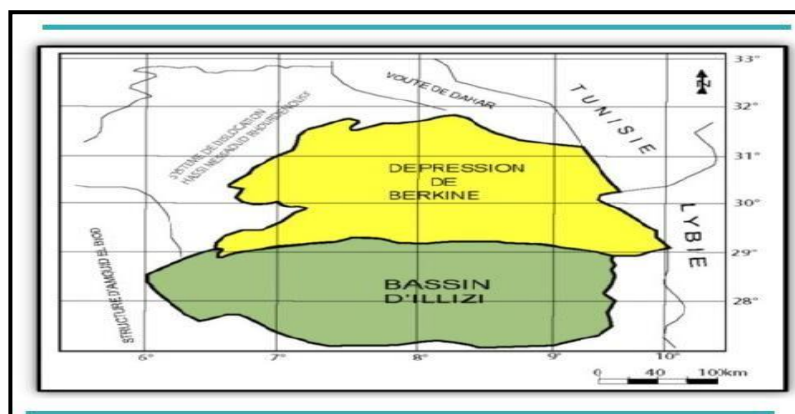


Figure IV.1: Situation du bassin étudié [57].

##### **Système pétrolier du bassin de Berkine:**

Ce bassin a fait l'objet d'activités d'exploration et de découvertes majeures d'hydrocarbures au cours des deux dernières décennies [57].

### **Problèmes attendus durant le forage:**

Les Puits recensés datent d'octobre 2008 à nos jours, les problèmes rencontrés sont:

- Spirale de trou ou tortuosité des puits avec des problèmes de traction,
- Problèmes de torque,
- Sévère reaming and back-reaming (au cours de la remontée dans la section 8''1/2),
- Vibration de la garniture de forage,
- Coincement lors des manœuvres ou de contrôle trou [58].

### **Présentation de la zone d'étude: Menzel Ladjmet East**

#### **1- Présentation de la zone d'étude (MLE):**

Le puits est foré dans le cadre du projet de puits Haute Pression, Haute températures (HTHP), situé dans le secteur MLE (Bloc 405a) du champ de Berkine. Il a été conçu comme un puits vertical d'exploration et d'évaluation des Quartzites el Hamra à 5303 m et des formations cambriennes à 5500 m [59].

#### **2- Spécificité de l'alésage en arrière (Back-reaming) pour le forage de la section 8''½:**

Les causes des différents problèmes rencontrés dans la phase 8''½, peuvent être attribuées aux principaux facteurs suivants:

**Le puits 1**, par exemple [59]:

1. Géométrie des trous (Tortuosité du puits - spirale),
2. Inharmonie dans des paramètres tels que la conception des trains de tiges de forage et les procédures de forage inadaptées,
3. Caractéristiques du fluide (densité du fluide, rhéologie, salinité, lubrification),
4. Reaming and back- reaming (Alésages et Alésages en arriérés) fréquents pendant le dégagement (tripping) du train de sonde entre 3200-5148 m. Les conditions sévères d'alésage ont été combiné avec des tractions (enregistrement de 25T), qui ont nécessité de travailler l'intervalle de 3255m à 3290m puis continuer le forage jusqu'à 4367m avec une augmentation de densité de 1,28 à 1,3 SG, pour une meilleure stabilité du puits.

**Tableau IV.1:** Gradient géothermique.

Température Ambiante	Température À profondeur	Gradient de Temperature
26.667 °C	200 °C à 4165.84m	4.17 °C/100m

**TableauIV.2:** Résumé de la section d'étude 8''½

Type de tronçon	Profondeur De section (m)	Longueur de section(m)	Profondeur de Sabot (m)
Casing	2850m	2850m	2850m
Open Hole	5148m	2298m	/

### **3- Distribution des contraintes de traction et de torsion le long du train de tiges pour les puits Profonds:**

Cette partie de l'étude présente les principaux types de défaillances des tiges de forage, dues à des charges de traction et de torsion résultant d'une mauvaise opération de dégagement de l'outil. (Tableau IV.3)

**Tableau IV.3:** Sollicitations agissantes sur le train de tiges

Déplacement du train de tiges	Charge exercée
<b>Axial:</b> Le long de son axe	Charges de traction
<b>Latéral:</b> Transversal à son axe	Force de frottement (friction)
<b>Flexion:</b> Déplacement du train de forage en suivant la Tortuosité du puits	Contrainte de flexion
<b>Torsion:</b> Se torsionner autour de son axe	Charge de Torsion
<b>Charges combinées</b> de traction et de torsion	Une contrainte plus élevée dans la direction résultante.

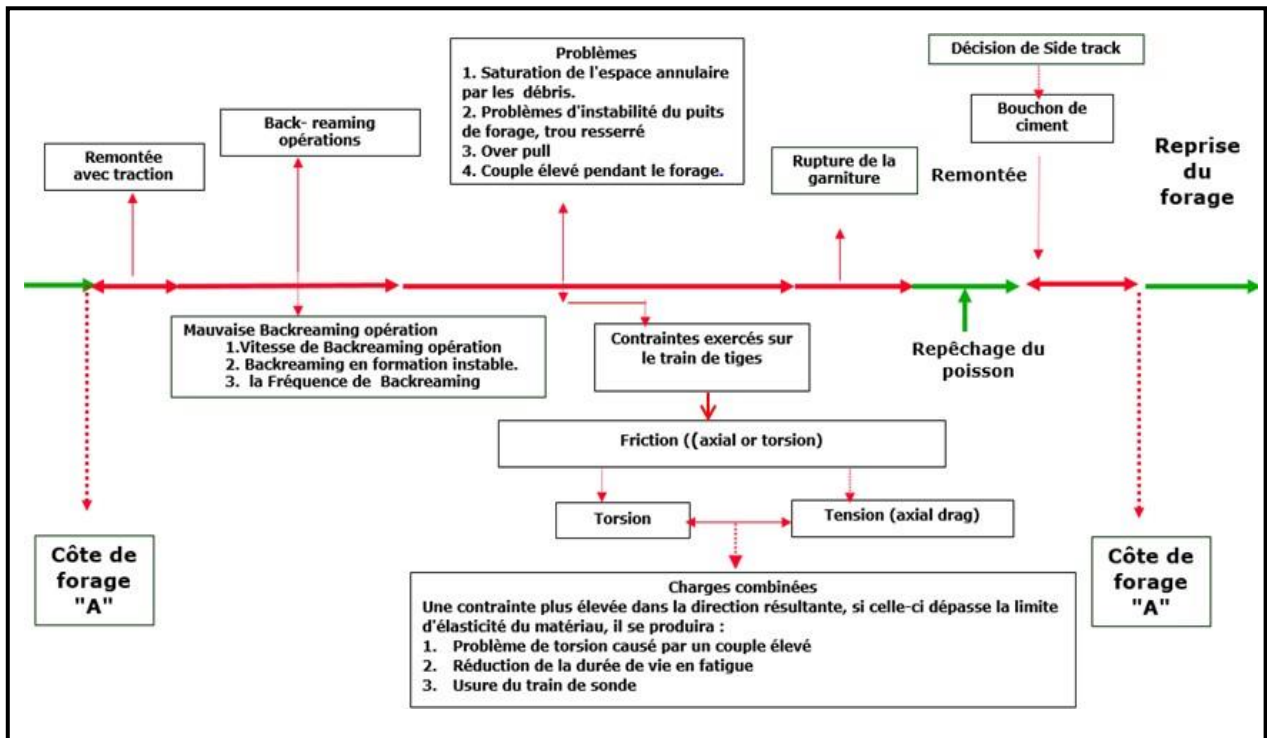
**Charges supportées par le train de tiges, pendant les opérations de back-reaming:**

D'après le diagramme sommaire de charge 4.1 et la courbe de trajectoire du puits (figure IV.3) où la trajectoire varie en fonction de la tortuosité, il est tout à fait évident que le train de forage est soumis à une rupture par fatigue due à l'opération de back-reaming, qui est illustrée dans le tableau IV.4.

**Tableau IV.4:** Synthèses des charges.

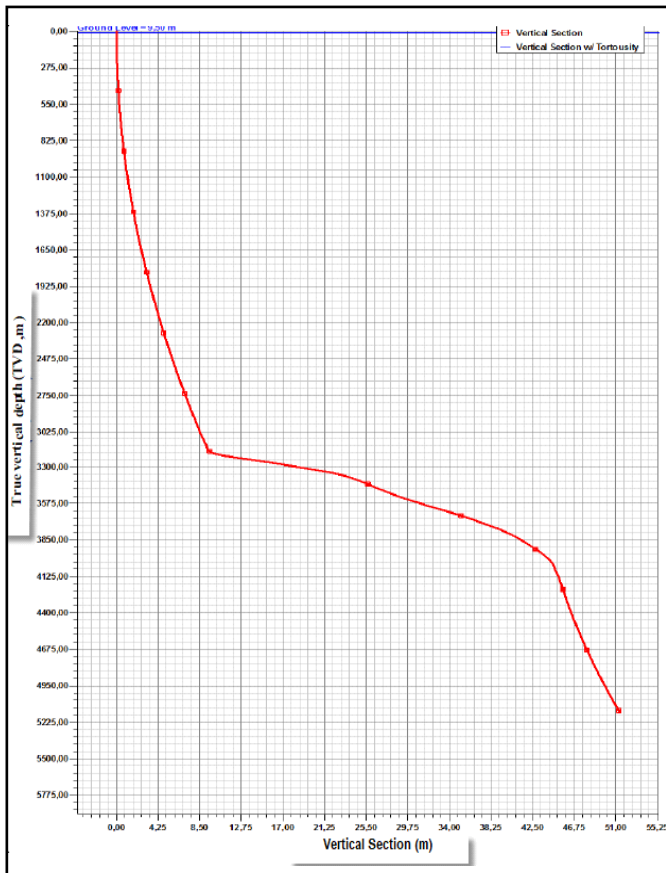
Opération de forage	S	B	Torsion à la table de rotation (ft/lbf)	Couple total (Totale torque) (revs)	Couple Total without bit torque (revs)	Poids Mesuré (ton)	Allongement de la garniture (m)	Axial stress=0	
								distance from surface (m)	Distance From Bit (m)
Back-reaming	F	-	6722.2	4.0	3.8	205.72	12.43	4791.82	356.58

S=sinusoidal, H=helical, L=lockup Stress, T=Torque, B=buckling et (-) no buckling F=Fatigue X=Exceeds 90% of yield, Y=Yield Reached. Max Over pull=5.91t, Over pull at bit=11.00 t, Torque at Bit=200 ft-lbf



**Figure IV.2:** Diagrammes 4.1: les charges exercées sur le train de tiges du fait de Back-reaming opération.





**Figure IV.3:** Trajectoire du puits (section verticale).

Cette déviation de trajectoire avec un dog-leg de 5,88°/30 m a été générée lors de l'opération side-track du nouveau trou 8 1/2", à partir de 3171m à 4573 m où le Mud Weight (Densité de la boue) est passé de 1,30 à 1,33 SG pour améliorer la stabilité du trou.

Le problème a été amplifié lorsque les trains de forage soumis à des conditions plus sévères en raison du mouvement cyclique (tension et torsion), généré par l'opération de back-reaming ainsi que le contact avec le puits, augmente la charge de friction qui peut conduire à une rupture par fatigue comme le montre le tableau IV.5 ci-dessous.

Le déplacement latéral de la tige peut être amplifié dans la section du dog leg. C.à.d. quand la tige arrive en contact avec la formation une force de contact se crée, entre 2978 lbf /m et 4191 lbf/m de 3214 m à 3186 m. La force s'annule quand le contact est rompu. Par conséquent, cette situation rend les zones de fortes concentrations de contraintes, susceptibles d'être détériorées par la fatigue ; et de ce fait, le taux de fatigue (ratio), augmente au-delà de 1,75 (le taux maximal Admissible est 1), comme illustré à la figure IV.4.

**Le ratio de fatigue est le rapport entre la contrainte de flexion cyclique et la limite d'endurance.**

L'effet du dog-leg de 5,88°/30m sur la contrainte de flexion et la réduction de la limite d'endurance due à la tension axiale élevée indiquent que la limite de fatigue est dépassée dans le dog leg. Le ratio de fatigue  $R_f$ , se détermine comme suit :

$$R_f = \frac{(|\sigma_{bend}| + |\sigma_{buckle}|)}{\sigma_{fL}} = 1 \text{ is equal to safety limit} \quad (4. 1)$$

Où :  $\sigma_{bend}$ , est la contrainte de flexion corrigée par le facteur d'amplification de la contrainte de flexion en (Psi)

$$\sigma_{bend} = \sigma_{flex} = \frac{r_0 E \delta B_{BSMF}}{68754.9} \quad (4.2)$$

$r_0$ : Rayon extérieur de la tige de forage, tel que modifié par la classe de la tige,

$\delta$ : Courbure du puits comme gravité du dog leg (degré/100) pour le soft-string model; stiff-string model calcule courbure locale,

**BSMF**= Facteur d'intensité des contraintes (Bending stress magnification factor),

Et  $\sigma_{buckle}$  Contrainte de flambement (buckling),

$\sigma_{buckle}$  = Contrainte de flambage sur la paroi de la tige de forage en (Psi).

$$\sigma_{buckle0} = \frac{(r_0)(r_{cl})|F_{apa}|}{2I} \quad (4.3)$$

$\sigma_{buckle0}$  = Contrainte de flambement à l'extérieur de la paroi de la tige de forage,

$r_{cl}$  : Distance maximale entre le train de tiges et le mur du puits de forage,

$I$  = Moment d'inertie,

$\Delta F_{apa}$  : La variation de la force axiale de la zone de pression sur la longueur du composant, calculée selon la méthode de la zone de pression (pressure area method Expression (4.4) [70].

$$\Delta F_{apa} = \sum [L_D W_{air} \cos\theta + F_{drag} + \Delta F_{area}] - F_{btm} - W_{bit} \quad (4.4)$$

$F_{btm}$  = La pression du fond, qui est une force de compression due à la pression du fluide appliquée sur la surface de la section transversale de la composante inférieure, unités (mn).

$F_{drag}$  = Force de traînée, en (mn),

$L_D$  = Longueur de la corde, en (m),

$W_{air}$  = Poids par pied de la corde dans l'air, en (N/ft),

$W_{bit}$  = Poids sur trépan, en (N).

$\Delta F_{area}$  = Variation de la force due à un changement de surface à la jonction entre deux composants ayant des surfaces de section transversale différentes, telle que la jonction entre la tige de forage et celle de tige lourde, ou entre des tiges lourdes et les masses tiges.

Si la surface du composant inférieur est plus grande, la force est de traction. Si la composante supérieure est plus grande, la force est de compression.

$\sigma_{fl} = \sigma_{fel}$  compression et  $\sigma_{fl}$  est la Fatigue limite [61].

$$\sigma_{fl} = \sigma_{fel} \left( 1 - \frac{F_{ab}}{F_{ay}} \right) \text{ tension} \quad (4.5)$$

$\sigma_{fel}$  = La limite d'endurance à la fatigue est limitée à 35000psi.

$F_{ab}$  = Axial force calculate dusing the buoyancy method,

$F_{ay}$  = Axial yield force

$$F_{ay} = \sigma_{my} A_{eff} \quad (4.6)$$

$F_{ay}$  = Axial yield force,

$\sigma_{my}$  = Minimum yield stress,

$A_{eff}$  = Effective sectional area,

$A_{eff} = A_e - A_i$ ,

$A_e$  = External area of the pipe,

$A_i$  = Internal area of the pipe.

$F_{apa}$  : est définie comme force axiale, telle que déterminée par la méthode de la zone de pression (pressure area méthode), en (mn),

$L_c$ : est la longueur de l'élément composant de la chaîne de travail, en (m),

$A_c$ : est la section transversale des unités composant ( $m^2$ ),

$E$  = Module de Young du composant, en (MPa).

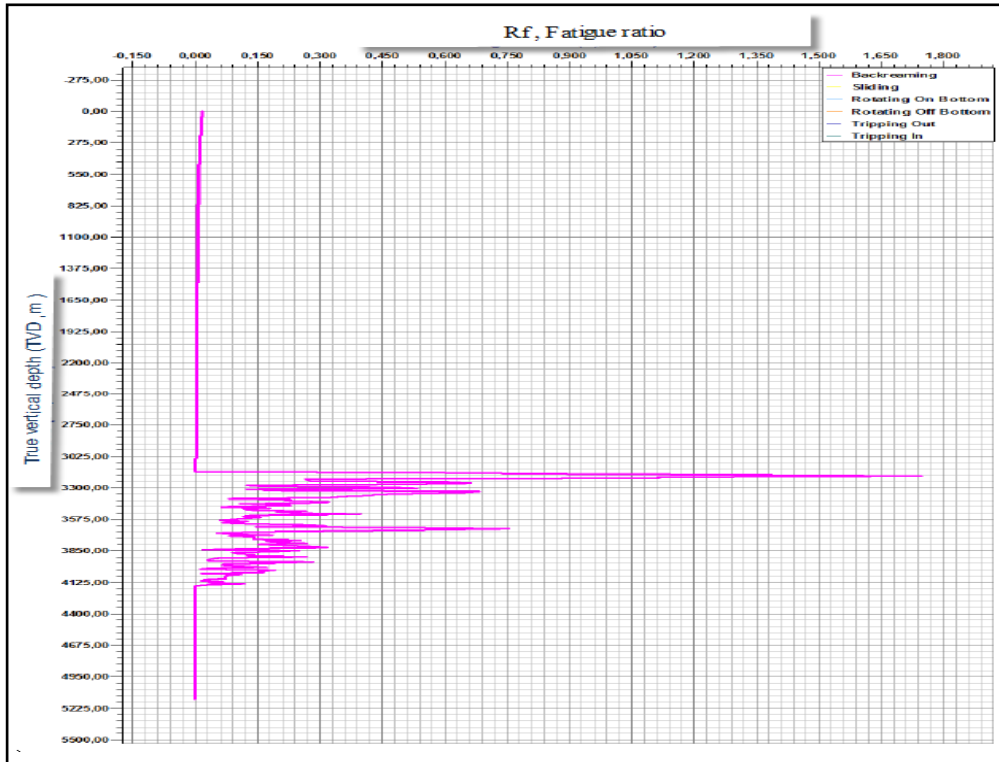


Figure IV.4: Fatigue ratio.

Tableau IV.5: Charges liées aux opérations de back-reaming.

Profondeur (m)	Composant	Pression intérieure (psi)	Pression extérieure (psi)	La force axiale		Couple (Torque) (ft-lbf)	Torsion (Twist) (revs)	flambement sinusoïdal (tonne)	Flambement hélicoïdal (tonne)	B	STF	force latérale (lbf/length)
				Pressure Area (tonne)	Buoyancy (tonne)							
3331	DP	6158	6158	69,52	86,32	4102	0,4	-3,75	-5,31	~	~~~	1934
3322	DP	6142	6142	69,82	86,57	4147	0,4	-5,48	-7,75	~	~~~	611
3313	DP	6123	6123	70,11	86,81	4173	0,4	-6,05	-8,55	~	~~~	354
3304	DP	6105	6105	70,41	87,06	4283	0,4	-10,61	-15	~	~~~	1506
3295	DP	6088	6088	70,7	87,31	4378	0,4	-12,16	-17,2	~	~~~	1304
3286	DP	6075	6075	71	87,57	4408	0,4	-7,91	-11,19	~	~~~	401
3277	DP	6055	6055	71,29	87,81	4436	0,5	-5,26	-7,43	~	~~~	388
3268	DP	6038	6038	71,59	88,06	4536	0,5	-4,78	-6,76	~	~~~	1375
3259	DP	6022	6022	71,88	88,31	4673	0,5	-4,81	-6,8	~	~~~	1866
3250	DP	6006	6006	72,18	88,56	4798	0,5	-11,25	-15,9	~	~~~	1712
3241	DP	5991	5991	72,47	88,81	4855	0,5	-7,74	-10,94	~	~~~	772
3232	DP	5974	5974	72,77	89,06	4904	0,5	-10,57	-14,95	~	~~~	677
3223	DP	5956	5956	73,06	89,31	4953	0,5	-10,29	-14,55	~	~~~	670
3214	DP	5938	5938	71,16	89,55	5171	0,5	-54,55	-77,14	~	~~~F	2978
3204	DP	5921	5921	71,5	89,84	5450	0,5	-54,4	-76,94	~	~~~F	3445
3195	DP	5904	5904	71,85	90,14	5892	0,5	-83,65	-118,29	~	~~~F	5443
3186	DP	5887	5887	72,19	90,42	6232	0,5	-63,67	-90,03	~	~~~F	4191
3177	DP	5870	5870	72,53	90,71	6446	0,6	-39,96	-56,51	~	~~~	2641
3168	DP	5855	5855	72,87	91	6596	0,6	-25,84	-36,54	~	~~~	1841

S= sinusoïdal buckling, T=Torque, et (-) no buckling F= Fatigue DP:Drill pipe, B=buckling et (-) no buckling

**Tableau IV.6:** Les détails de stress pour l'opération de back-reaming.

Profondeur (m)	Composant	Hoop Stress (psi)	Radial Stress (psi)	Torsional Stress (psi)	Shear Stress (psi)	Axial Stress (psi)	Flambage Stress (psi)	Contrainte de flexion (psi)	BSMF	Von Mises Stress (psi)	Von Mises Ratio	Fatigue Ratio
3 331	DP	-6158	-6158,4	5 271,6	893,9	36900	0,0	7703	3952	51599,5	0,491	0,683
3 322	DP	-6142	-6141,8	5 329,1	282,6	37057	0,0	379,1	3960	46505,4	0,443	0,212
3 313	DP	-6123	-6122,6	5 362,3	163,4	37213	0,0	391,5	3969	45682,3	0,435	0,124
3 304	DP	-6105	-6105,1	5 503,8	695,9	37370	0,0	976,7	3977	50376,6	0,480	0,534
3 295	DP	-6088	-6088,0	5 626,3	602,6	37527	0,0	278,4	3985	49865,6	0,475	0,472
3 286	DP	-6075	-6075,2	5 664,0	185,6	37683	0,0	775,2	3993	46579,2	0,444	0,159
3 277	DP	-6055	-6054,8	5 700,5	179,2	37839	0,0	392,0	4002	46351,1	0,441	0,125
3 267	DP	-6038	-6038,1	5 829,7	635,5	37996	0,0	388,2	4010	50455,3	0,481	0,486
3 258	DP	-6022	-6022,2	6 005,0	862,3	38152	0,0	338,5	4018	52573,9	0,501	0,663
3 249	DP	-6006	-6006,2	6 165,8	791,2	38308	0,0	718,4	4026	52156,5	0,497	0,608
3 240	DP	-5991	-5991,2	6 238,4	357,0	38465	0,0	050,7	4034	48723,7	0,464	0,277
3 231	DP	-5974	-5974,1	6 302,0	312,9	38621	0,0	967,6	4043	48801,9	0,465	0,270
3 222	DP	-5956	-5956,3	6 365,0	309,8	38777	0,0	916,9	4051	48911,8	0,466	0,266
3 213	DP	-5938	-5937,6	6 644,9	1 376,5	38934	0,0	217,2	4059	58286,1	0,555	1,12
3 213	DP	-5938	-5937,6	5 377,5	1 243,8	34127	0,0	090,6	3429	54008,2	0,514	1,11
3 204	DP	-5921	-5921,4	5 668,2	1 447,9	34291	0,0	121,6	3437	54288,0	0,517	1,11
3 195	DP	-5904	-5903,9	6 127,5	2 287,8	34457	0,0	546,9	3446	61952,4	0,590	1,75
3 186	DP	-5887	-5887,0	6 481,2	1 761,8	34618	0,0	803,6	3454	57498,1	0,548	1,35
3 177	DP	-5870	-5870,1	6 704,0	1 109,9	34783	0,0	930,0	3462	51934,1	0,495	0,848

DP: Drillpipe

Où:

$\sigma_{VM}$  est Von mises stresses [70],

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_a - \sigma_r)^2 + (\sigma_t - \sigma_r)^2 + (\sigma_a - \sigma_t)^2}{2} + 6[\tau_t^2 + \tau_r^2 + \tau_z^2]} \quad (4.7)$$

La contrainte de Von Mises est calculée sur l'intérieur et l'extérieur de la paroi de la tige de forage. La contrainte maximale calculée pour ces deux endroits est indiquée dans les résultats de l'analyse [61].

$\sigma_{VM}$ : Von mises stresses,

$\sigma_a$ : axial stress,

$\sigma_r$ : radial stress,

$\sigma_t$ : tangential (hoop) stress,

$\tau_t$ : tangential shear stress,

$\tau_r$ : radial shear stress,

$\tau_z$ : longitudinal stress.

•  $\sigma_a$  est la contrainte axiale (tension+flexion+flambage):

$$\sigma_a = \frac{F_{apa}}{A_c} + \sigma_{bend} + \sigma_{buck} \quad (4.8)$$

$\sigma_{flamb}$  = Contrainte de flambage sur la paroi de la tige de forage en (Psi),

$\sigma_{flexext}$  = Contrainte de flambage sur la paroi de la tige de forage,

$F_{apa}$  = Force axiale déterminée par la méthode de la zone de pression, en (mn),

$\sigma_a$  = Contrainte axiale à l'extérieur de la paroi de la tige de forage,

$A_c$  est la section transversale des unités composant (m<sup>2</sup>).

Contrainte de cisaillement transversale (Transverse Shear Stress)

$$\sigma_{so} = \sigma_{st} = \frac{2F_N}{A_c} \quad (4.9)$$

**Tableau IV.7: l'opération de back-reaming 5 1/2" drill pipe grade S 135.**

Profondeur (m)	Composant	Pression intérieure (psi)	Pression extérieure (psi)	Axial Force		Drag (tonne)	Torque (ft-lbf)	Twist (revs)	Flambement sinusoïdal (tonne)	Flambement Hélicoïdal (tonne)	B	STF	Contact Force (lbf/length)
				Pressure Force Area (tonne)	Buoyancy (tonne)								
3330	DP	6155,46	6155,46	69,56	86,35	0,00	3388,9	0,4	-3,61	-5,10	~	~	1118
3321	DP	6138,65	6138,65	69,86	86,60	0,00	3421,6	0,4	-5,62	-7,95	~	~	429
3312	DP	6121,78	6121,78	70,15	86,85	0,00	3443,1	0,4	-6,06	-8,56	~	~	275
3303	DP	6103,9	6103,9	70,45	87,10	0,00	3523,1	0,4	-12,70	-	~	~	1075
3293	DP	6086,72	6086,72	70,74	87,35	0,00	3629,5	0,4	-13,09	-	~	~	1436
3284	DP	6072,97	6072,97	71,04	87,60	0,00	3642,4	0,4	-7,14	-	~	~	158
3275	DP	6053,25	6053,25	71,33	87,84	0,00	3659,4	0,4	-5,26	-7,44	~	~	213
3266,	DP	6036,49	6036,49	71,63	88,09	0,00	3763,2	0,4	-4,59	-6,49	~	~	1400
3257	DP	6020,08	6020,08	71,92	88,34	0,00	3905,6	0,5	-12,78	-	~	~	1928
3248	DP	6003,63	6003,63	72,22	88,59	0,00	3980,9	0,5	-9,44	-	~	~	1011
3239	DP	6987,64	5987,64	72,51	88,84	0,00	3982,3	0,5	-7,65	-	~	~	0
3230	DP	6971,79	5971,79	72,81	89,10	0,00	3983,6	0,5	-10,50	-	~	~	0
3230	DP	6971,79	5971,79	67,01	89,10	0,00	3983,6	0,5	-26,58	-	~	~	0
3221	DP	6955,73	5955,73	67,35	89,37	0,00	3061,4	0,5	-26,46	-	~	~	841
3212	DP	6935,73	5935,73	67,68	89,63	0,00	3246,5	0,5	-99,24	-	~	~	2027
3203	DP	6919,99	5919,99	68,01	89,91	0,00	4556,8	0,5	-100,06	-	~	~	3409
3193	DP	6902,02	5902,02	68,35	90,18	0,00	5022,1	0,5	-167,38	-	~	~	5121
3184	DP	6885,13	5885,13	68,68	90,45	0,00	5426,5	0,5	-102,07	-	~	~	4448
3175	DP	5868,24	5868,24	69,02	90,72	0,00	5648,8	0,5	-74,74	-	~	~	2436
3166	DP	5852,06	5852,06	69,35	90,99	0,00	5749,9	0,5	-39,48	-	~	~	1099

S= sinusoidal buckling, T=Torque, et (-) no buckling F=Fatigue DP: Drillpipe, B=buckling et (-) no buckling

L'utilisation d'une tige de forage 5 1/2" d'un poids nominal de 21,90lb/ft de grade S135 dans le trou tubé et d'une tige de forage 5" d'un poids nominal de 19,50lb/ft de grade G105 peut réduire la fatigue du cycle des charges en traction et en torsion [62]. Le tableau IV.7 illustre la diminution du nombre de tiges soumis à une rupture par fatigue.

**Allongement total de la BHA:**

La comparaison des tableaux (IV.8) et (IV.4), montre clairement que la tige de forage S135 possède des caractéristiques mécaniques plus appropriée que celles de la classe G105. Ceci est confirmé par la longueur totale de la BHA dans le fond du trou, qui a été réduit de 0,8 m comme illustré au tableau IV.8.

**Tableau IV.8: Synthèses des charges**

Opération de forage	STF	B	Torsion à la table de rotation (ft/lbf)	Couple total (Totale torque) (rev)s	Couple total sans (bit torque (revs))	Poids Mesuré (ton)	Allongement de la garniture (m)	Axial stress=0	
								Distance from surface (m)	Distance From Bit (m)
Back-reaming	F	-	6419.5	3.3	3.1	199.74	11.63	4791	356
Max Overpull: 80.77 tonnes Overpull at bit 11.00 tonnes					Torque at Bit 200 Ft-lbf				
S=sinusoidal, H=helical, L=lockup Stress, T=Torque, B=buckling et (-) no buckling									

**4-Conclusion:**

La fatigue des tiges de forage 5" d'un poids nominal de 19,50 lb/ft de grade G 105 de 3214 m à 3186 m peut résulter de l'effet combiné de la tension axiale, de la torsion et de la flexion alternée répétée due à la rotation de la tige de forage au niveau des régions de dog legs. A cet effet, l'intensité du dog-leg (dog leg severity), la charge de traction et le couple sont les points les plus importants à prendre en compte dans les opérations de back-reaming. Ainsi, l'utilisation de tiges de forage mixtes de classe G105 premium 5 1/2" dans le trou tubé et 5" dans le découvert a une certaine limite en raison des charges axiales pour cette section de forage qui a exigé l'utilisation de tiges de forage plus résistantes de classe S135 de poids 21,90 lb/ft, pour supporter les charges opérationnelles.

**D'un autre côté, l'étude a montré aussi que, lors du back-reaming:**

- Toutes les contraintes sont appliquées sur le train de tiges: contraintes axiales dues à la tension, contraintes de flexion dues à la courbure de la garniture en fonction de la tortuosité du puits, et contraintes de torsion dues à la rotation,
- Le contact du train de tiges et des composants BHA, avec les parois du puits, font augmenter les contraintes de friction causées par les forces latérales,
- Les forces latérales excessives, induites par le back-reaming ainsi que les manœuvres incorrectes, peuvent entraîner une usure accélérée du tubage et du BHA, et induire des situations indésirables telles que des twists offs,
- Enfin, le back-reaming peut réduire considérablement la durée de vie du train de tiges en raison de l'action des contraintes dues à la torsion et la tension dans un dog-leg, particulièrement lorsque les dog-legs sont peu profonds et sévères.

**IV.1.2- Amélioration de la durée de vie de la tige de forage**

**Deuxième Etude:**

Présentation de la zone d'étude 2; Ouest El Merk.

**Synthèse géologique et géodynamique:**

Le forage d'exploration WEMNS est situé dans le périmètre El Haiad, au niveau du bloc 208. Ce prospect est localisé à l'Ouest du gisement d'huile et de gaz à condensât EMN/EKT et au Nord Est du gisement d'huile et de gaz à condensât de MLSE [69]. Comme le montre le tableau IV.9.

**Tableau IV.9: Coordonnées d'implantation.**

Géographiques		UTM,Fuseau32	
Longitude	08° 00'02,25"E	X	Y
Latitude	30° 16'59,00"N	403 882m	3 350 313m

### **1- Forage de la section 8"½ dans la région de la Zone Ouest El Merk:**

Cet intervalle est suspecté d'être l'un des défis majeurs à relever lors du forage de cette section. De plus les formations du Trias ont montré une tendance à l'affaissement pour toute la phase 8"½.

#### **Les conditions du trou sont:**

- La température, qui peut dépasser 150° C,
- La Pressions peut être > à 7500 Psi. (51,71 MPa).

**Tableau IV.10:** Geothermal Gradient Data [60].

Température Ambient	Température profondeur	Gradient de Temperature
26.667° C	150° C à 5420m	4.17° C/100m

**Tableau IV.11:** Résumé de la section d'étude 8"½ [69].

Phase	Profondeur de la section (m)	Longueur de la section (m)	ID (in)	Rift (in)	Hole Diameter (in)	Coefficient of friction
Casing	2926m	2926m	8,535	8,500	9,625	0,25
Open Hole	5420m	2494m	8,500	8,500	8,500	0,30

### **2- Évaluation de la fatigue des tiges de forage et du risque de lock-up dans un puits à trajectoire tortueuse.**

#### **Méthodologie:**

Cette étude illustre pratiquement l'avantage qu'offre l'utilisation des tiges de forage en aluminium, qui se caractérisent par un rapport résistance/poids plus élevé que les tiges de forage en acier, en raison d'un poids spécifique plus léger, malgré une limite élastique réduite. Ce qui permet de diminuer le couple et les charges de frottement, tout en conservant une bonne résistance aux charges axiales, torsionnelles et latérales. Dans ce contexte, la présente étude met l'accent sur la possibilité d'utiliser la tige de forage en aluminium 2024 dans les trains de tiges de forage plutôt que la tige de forage en acier afin de réduire la rupture par fatigue, augmenter les charges de flambement et minimiser le couple de rotation.

#### **Résultats:**

L'étude a mis en évidence l'impact de la trajectoire du puits via la tortuosité, comme le montre le tableau IV.12, où le dog leg varie de 8 à 11,71°/30m entre 3051m et 3131m. Cela conduit à un problème de fatigue, ainsi que des charges, représentés dans le tableau IV.13.

**Tableau IV.12:** Degré de sévérité du dog- leg pour une tige de forage en acier.

Profondeur (m)	Tortuosité TVD (m)	Dog-leg Sévérité (°/30m)
3051	3049	8.00
3058	3057	8.28
3060	3058	8.90
3067	3066	9.93
3077	3074	10.94
3087	3083	11.71
3095	3091	11.15

3096	3091	10.27
3105	3099	9.241
3113	3107	3.511
3114	3107	3.253
3122	3115	4.05
3123	3115	9.917
3131	3122	10.88

**Tableau IV.13:** Synthèse des charges sur le train de tiges en acier.

Operations de forage	Défaillance dû aux Contraintes (Stress Failure)	Flambement (Buckling Limits)			Torque
		Sinusoidal	hélicoïdal	Lockup	couple
Operation	Fatigue				
Tripper la garniture (Tripping in)		-	-		
Tripper la garniture (Tripping out)		-	-		
Forage (Rotating on bottom)		-	-		
Forage (Rotating of bottom)	Fatigue	-	-		

(-): There is no Load on steel drill pipe No buckling  
Cas de tige de forage en acier:  
Pour un WOB maximum, pendant la rotation en présence de flambement, il a été constaté que:  
- La tige commence à se déformer en mode sinusoïdal pour une force de flambement critique de 36,08 tonnes à partir de 3693 m,  
- Le début du flambement hélicoïdal est établi au moment du flambement critique: 40.15 tonnes À partir de 2909m,  
- Overpull Margin (tripping out): 49.36 tonne at 90 % of yield,  
- Les frottements en montée (pick-up drag): 18.30.31 tonne,  
- Les frottements en descente (Slack-off drag): 13.11 tonne.

Les résultats les plus marquants qui ressortent de cette partie de travail, sont les suivants: La force latérale dans la région de dog legs, (25203,09 N) est nettement supérieure à la valeur recommandée par l'API, et qui est de 8825.98 N (0.9tonne), comme indiqué dans le tableau IV.14

**Tableau IV.14:** Side force for steel drill pipe

True Vertical Depth (m)	Side force (N)
3051	20986
3059	23634
3068	25203
3077	22261
3085	13435
3093	5982
3101	14513
3109	24516
3117	15396
3124	774



3131	1657
3138	1353
3146	3893
3153	9139
3160	10512
3167	2245
3173	4432

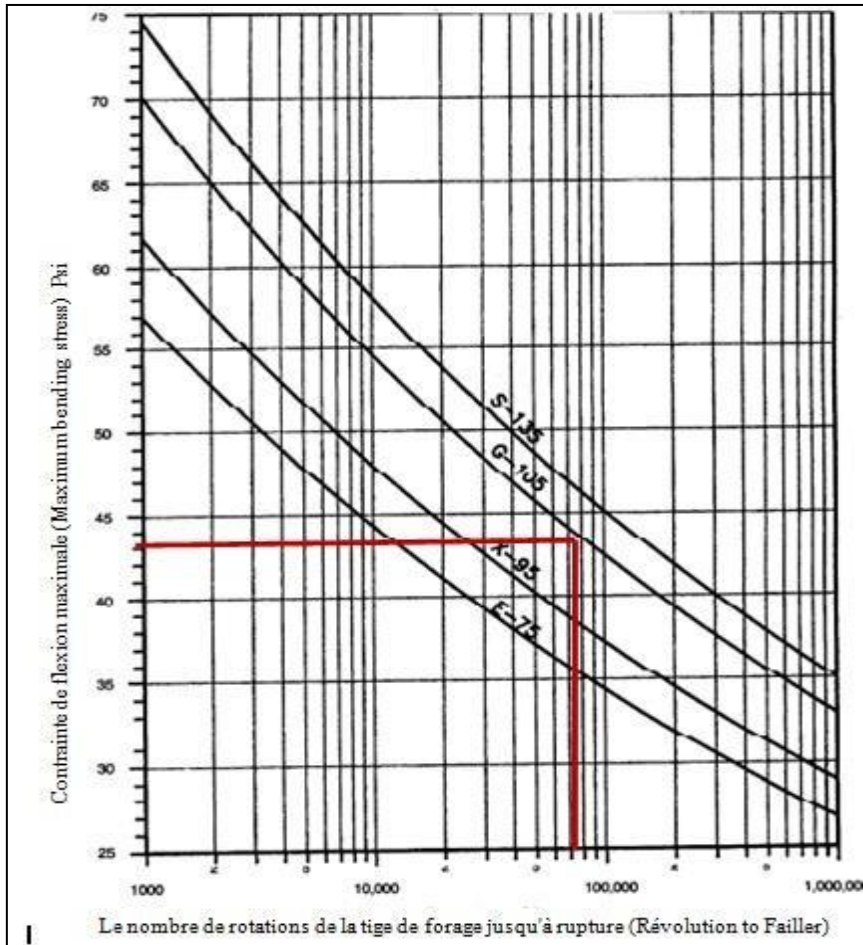
Cette condition anormale, mentionnée ci-dessus, qui entraîne l'apparition de forces latérales indésirables par rapport à la tendance normale, montre un changement périodique des valeurs des forces de flexion pendant la rotation sur le fond, en raison de l'augmentation de la force latérale dans la région des dog-leg, comme le montre le tableau IV.15.

**Tableau IV.15:** Les contraintes pour un train de tiges en acier pendant le forage.

Measured Depth (m)	Component Type	Fatigue Failure	Flambement (psi)	flexion (psi)	BSMF	Von Mises (psi)	Von Mises ratio	Fatigue ratio
3 052	DrillPipe	F	-	37036,7	2,938	69452,0	0,661	2,365
3 061	DrillPipe	F	-	36553,8	2,927	68519,5	0,653	2,331
3 070	DrillPipe	F	-	38173,6	2,916	69273,2	0,66	2,431
3 079	DrillPipe	F	-	36813,9	2,905	67471,1	0,643	2,341
3 088	DrillPipe	F	-	31435,3	2,895	62362,0	0,594	1,996
3 098	DrillPipe		-	13776,4	2,884	48485,6	0,462	0,873
3 107	DrillPipe	F	-	33211,8	2,874	63211,5	0,602	2,103
3 116	DrillPipe	F	-	43569,4	2,864	71767,4	0,683	2,755
3 125	DrillPipe	F	-	40334,1	2,855	68309,2	0,651	2,547
3 134	DrillPipe		-	11485,7	2,845	44913,9	0,428	0,724
3 143	DrillPipe		-	6680,3	2,835	41716,6	0,397	0,421
3 152	DrillPipe		-	5177,8	2,826	40698,5	0,388	0,326
3 161	DrillPipe		-	11811,8	2,817	44811,1	0,427	0,742
3 171	DrillPipe	F	-	20743,9	2,807	51144,4	0,487	1,302
3 180	DrillPipe	F	-	23014,4	2,798	52620,8	0,501	1,443
3 189	DrillPipe		-	17713,1	2,789	48178,9	0,459	1,109
3 198	DrillPipe		-	5476,3	2,78	39741,0	0,378	0,343

BSMF: Bending Stress Magnification Factor (-):There is no Load on steel drill pipe

Une contrainte de flexion maximale supérieure à 43569,4 psi (43,56 kpi) était imposée à la tige de forage entre 3052 et 3198 m qui est au-delà de la fatigue d'endurance limite qui est d'environ 20000 psi. En conséquence, le nombre maximum de rotations jusqu'à la rupture de cette tige de forage se situe entre  $10000 < N < 100000$  selon la courbe (S-N) (figure IV.5) de sorte que les contraintes appliquées au train de tiges sont concentrées ici, causant le plus de dommages de fatigue où l'on voit clairement que le rapport de fatigue a atteint une valeur maximale de 2,75 avec une force de contact latérale élevée, qui est supérieure à 8896 N (2000lb) à une vitesse de rotation de 150 tr/min.



**Figure IV.5:** Courbe montrant le nombre de rotations de la tige de forage en fonction des contraintes de flexion exercées jusqu'à rupture (Minimum Failure limits for API drill pipe Non corrosive Service)

Afin de prendre une décision appropriée concernant le problème de flambement, un nouvel indice de gravité de flambement (BSI) est proposé afin de quantifier la gravité du flambement pour les tiges conventionnelles. Cet indice est basé sur la contrainte de flexion et sa résistance à la fatigue correspondante ainsi qu'à la force latérale de contact et la contrainte de Von Mises, ce dernier varie de 1 (risque faible) à 4 (risque sévère), comme le montre le tableau V.16.

**Tableau IV.16:** Indice de gravité de flambement (Buckling Severity Index (BSI)) [71].

BSI	Force du contact (Side force)	Von Mises	Le nombre de cycles jusqu'à la rupture
1 Risque Faible (Low Risk)			$N > 1,000,000$
2 Risque moyen (Medium Risk)			$100,000 < N < 1,000,000$
3 Risque élevé (High Risk)			$10,000 < N < 100,000$
4 Risque severe (Sever Risk)	$> 0.9$ tonf	$> 0.8 \times Y_{ied}$	$N < 100,000$

La solution proposée, dans ce contexte, consiste à remplacer les tiges de forage en acier par des tiges de forage en aluminium plus légères dans la colonne de tiges de forage tout en conservant la même section de trou et les mêmes joints de raccordement faite en acier, Tableau IV.17.

**Tableau IV.17:** Spécifications de chaque train de forage.

Phase	Train de tiges (G105)	Train de tiges mixte (G105-AL2024-S135)		
	Grade G105	Grade G105	Grade AL2024	Grade S135
Hole diameter (8''1/2) 0,127 m				
Depth (m)	5420	600	150	2988.5
Limite d'élasticité (Mpa)	724	724	359	931
Résistance à la traction (Mpa)	931	931	467	1138
Module d'Young (Mpa)	206842.71	206842.71	88763	206842.71
La fatigue limite d'endurance (Mpa)	137.89	137.89	160	137.89

Une analyse du couple de torsion et de la trainée, a été effectuée au moyen du logiciel Décision space well engineering, afin de définir le nombre optimal de joints (Aluminium drill pipe, ADP), le long du train de tiges, pour minimiser la friction, réduire la compression sur la trajectoire du puits et fixer en même temps, la profondeur maximale, que peut atteindre un train en présence de tiges en aluminium, sans aucune défaillance. On trouvera dans le tableau IV.18, une analyse des contraintes exercées le long du train mixte.

**Tableau IV.18:** les contraintes pour un train de tiges mixte, pendant le forage

Drill Pipe Depth (m)	Fatigue Failure	Stress Failure	Buckling Failure	Torque Failure	Bending Stress (MPa)	Bending Stress Magnification Factor	Von Mises Stress (MPa)	Von Mises Ratio	Fatigue Ratio
3055	-	-	-	-	59.840	8.322	197.121	0.548	0.476
3063	-	-	-	-	64.80	8.252	197.328	0.549	0.514
3071	-	-	-	-	63.97	8.182	193.693	0.539	0.506
3080	-	-	-	-	62.128	8.113	189.572	0.527	0.49
3088	-	-	-	-	29.847	8.044	169.362	0.471	0.235
3096	-	-	-	-	31.521	7.976	169.138	0.471	0.247
3105	-	-	-	-	34.177	7.91	169.420	0.471	0.267
3113	-	-	-	-	66.716	7.843	186.974	0.52	0.52
3121	-	-	-	-	71.696	7.777	187.474	0.522	0.558
3130	-	-	-	-	29.234	7.712	160.525	0.447	0.227

(-): There is no Load on steel drill pipe.

Pour un WOB maximum, pendant la rotation en présence de flambement, il a été constaté que:

- La tige commence à se déformer en mode sinusoïdal pour une force de flambement critique de 36,07 tonnes à partir de 3694m.
- Le début du flambement hélicoïdal est établi au moment du flambement critique : 37,237 tonnes à partir de 3 005,2m.
- Over pull Margin (tripping out): 35.52 tonne at 90% of yield. Les frottements en montée (pick-up drag): 27.31tonne. Les frottements en descente (Slack-off Drag): 16.42 tonne

On peut donc conclure, qu'en se basant sur le poids sur trépan, qui est d'environ 9t, la rupture par fatigue, a été réduite drastiquement et limitée seulement dans la zone de transition, entre la tige de forage en aluminium et celle en acier. Ce résultat est confirmé par le graphique de tension effective en fonction de la distance le long du train de tiges. Par conséquent, il est évident que toutes les courbes de manœuvres ne dépassent pas la courbe de tension limite figure IV.6, la tige de forage est située dans une plage sécuritaire.

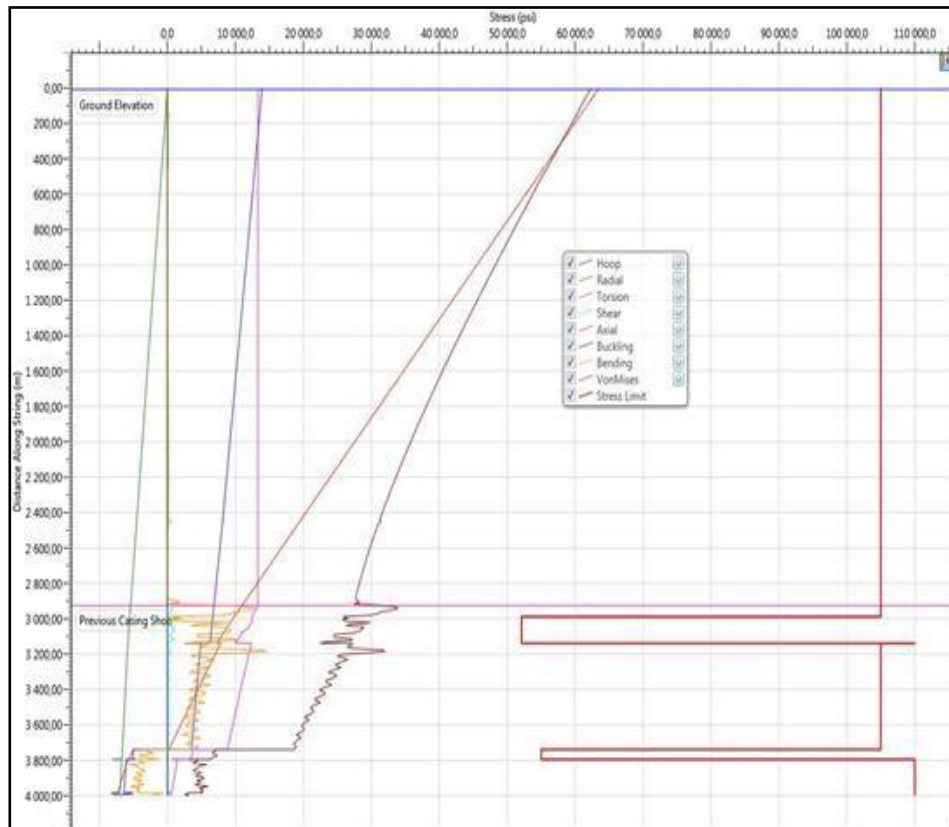


Figure IV.6: Les contraintes pour un train de forage mixte pendant le forage.

Les résultats obtenus ci-dessus montrent que la contrainte de flexion maximale supérieure à 71.696 psi, imposée dans le train de tiges mixtes ne dépasse pas la fatigue d'endurance limite. En conséquence, le train de forage ne développe pas de dommages de fatigue, ce qui a été confirmé par la valeur du rapport de fatigue qui a atteint une valeur maximale de 0,56. Avec une force de contact latérale inférieure à 8896 N (2000lb-0.9tonf).

### 3- Conclusion

Les résultats montrent que la contrainte de Von Mises ratio est maximale est égale à 0,549 (tableau IV.18) elle est inférieure à 1, donc La Contrainte de Von Mises [70] est bien inférieure à la limite d'élasticité du matériau. Cela veut dire que la garniture résiste bien à la traction.

Il a été constaté que les tiges de forage en acier G105, de diamètre 5" et de poids spécifique, 29lb/ft, s'est dégradée sous l'effet de la fatigue pendant les opérations de forage causées par des déviations non planifiées et les rotation dans des régions dangereuses, caractérisée par des dog-leg où la sévérité dépasse les 10°/30m; induit d'importantes contraintes de flexion alternées dans les tige de forage environ 45337 psi (312,58 Mpa), dépassant la limite d'endurance de fatigue d'environ 20000 psi (138 Mpa) avec une force de contact latérale élevée, qui est supérieure à 8896 N (2000lb). donc ces contraintes, sont supérieure à celles, qui se manifestent au sein d'un train de tiges mixte avec des contraintes de flexion supérieure à 10298 psi (72MPa) qui ne dépasse pas leur limite d'endurance de fatigue avec force de contact latérale inférieure d'environ 6774 N, soit moins de 8896 N (2000lb).

On peut alors émettre l'hypothèse que les tiges de forage en alliage AL 2024, sont des outils puissants de réduction du couple et de frottement pour les puits très tortueux, et qu'elles peuvent résoudre, bon nombre de problèmes rencontrés pendant le forage, entre autre, la **réduction de l'usure et l'amélioration de la durée de vie de ces tiges**. En conséquence, il n'y a donc aucun danger d'exploiter des tiges de forage en aluminium, particulièrement en présence d'intervalles sinueux.

## IV.2. Analyse des coûts

### Les coûts de maintenance:

Les coûts de maintenance représentent l'ensemble des dépenses engagées pour maintenir en état de fonctionnement un système complexe. Bien souvent ils sont associés à des exigences de fonctionnement en termes de sécurité, de fiabilité ou encore de disponibilité [64].

L'analyse des coûts permet au responsable de la politique de maintenance d'effectuer ses choix principaux [64]:

- Etablissement d'un budget prévisionnel annuel,
- Suivi des dépenses et respect du budget,
- Niveau de maintenance préventive à mettre en œuvre,
- Vérification de l'efficacité des actions de maintenance,
- Renouvellement du matériel.

La décomposition des coûts de maintenance est schématisée dans la Figure IV.7.

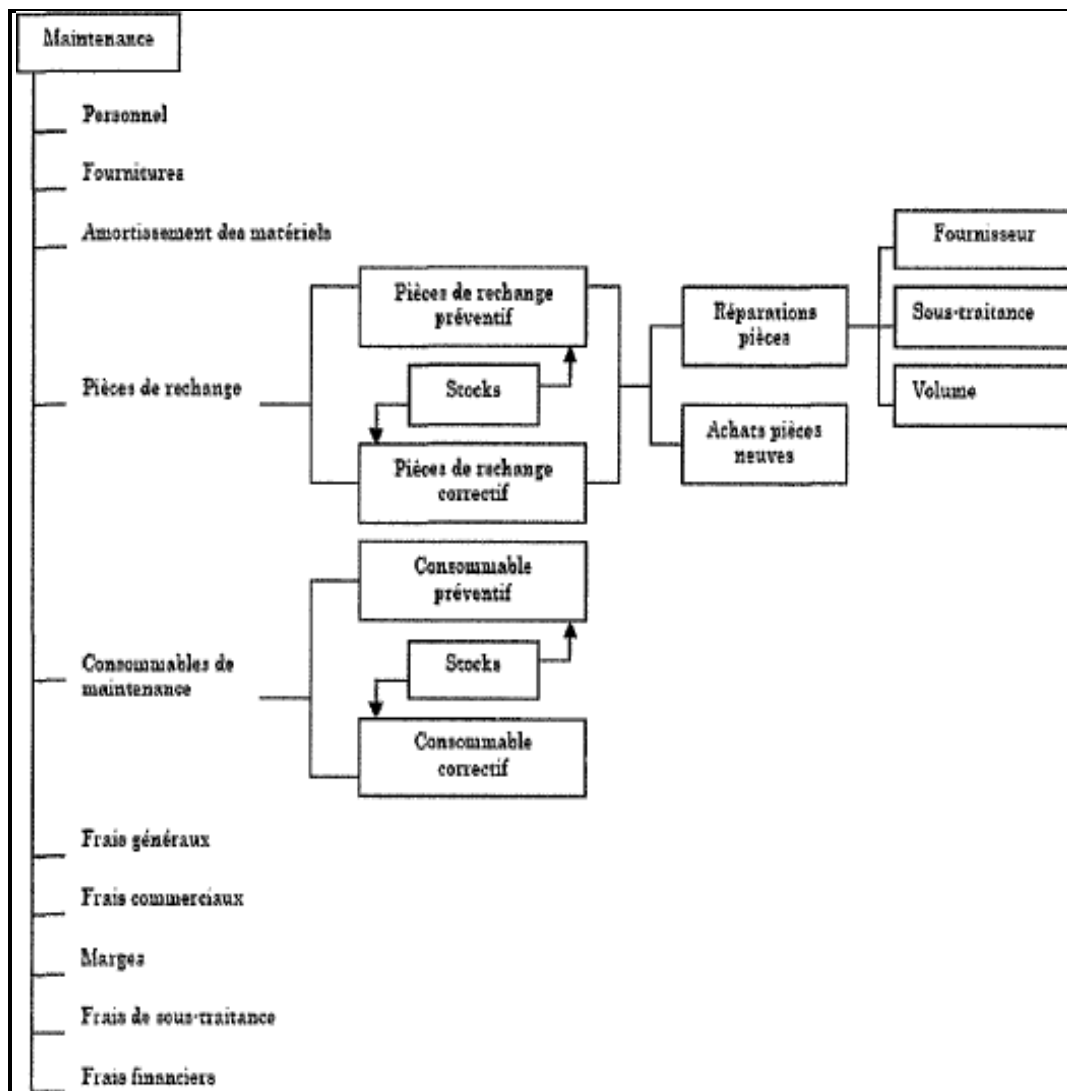


Figure IV.7: Décomposition des coûts de maintenance [64].

Partant de ce graphique, les dépenses relatives à la maintenance peuvent être associées à deux catégories: les coûts directs de maintenance et les coûts indirects de maintenance [64].

### **1- Les coûts directs de maintenance (Cm):**

Ils peuvent se rapporter à une intervention corrective (*Cmc*), préventive (*Cmp*) ou externalisée (*Cme*). Les coûts directs de maintenance (*Cm*) sont constitués des éléments suivants [64]:

- 1) Coûts de main d'œuvre,
- 2) Frais généraux du service maintenance,
- 3) Coûts de possession des stocks, des outillages et des machines,
- 4) Consommation de matières, de fournitures, de produits utilisés,
- 5) Consommation des pièces de rechange,
- 6) Coûts des contrats de maintenance,
- 7) Coûts des travaux sous-traités.

### **Coûts demain d'œuvre:**

Les couts de main d'oeuvre correspondent au produit «**temps passés × taux horaire de maintenance**».

$$C_{mo} = MTTR \times r_1 \quad (4.10)$$

Les temps passés sont saisis par les techniciens de maintenance sur les bons de travail. Le taux horaire de maintenance exprimé en (la monnaie du pays concerné/heure) est fourni par la comptabilité. Ce taux est évidemment fonction de la qualification de l'intervenant, mais également de la politique sociale de l'entreprise. Ceci explique que ce taux varie pour un même technicien employé dans des structures différentes [64].

Il est alors possible de regrouper les **coûts directs** de maintenance en 4 rubriques [64]:

- C<sub>mo</sub>*: dépenses de main d'œuvre,
- C<sub>f</sub>*: dépenses fixes du service maintenance,
- C<sub>PDR</sub>*: dépenses de pièces de rechange,
- C<sub>e</sub>*: dépenses externalisées.

$$C_m = C_{mo} + C_f + C_{PDR} + C_e \quad (4.11)$$

### **2- Les coûts d'indisponibilité (Ci):**

Les coûts indirects de maintenance peuvent aussi être nommés coûts indirects de disponibilité ou coûts indirects d'arrêt de production. Ces coûts intègrent toutes les conséquences économiques induites par l'arrêt d'un équipement requis [64]:

- 1) Perte de production *C<sub>p</sub>*,
- 2) Coûts de la main d'œuvre de production,
- 3) Coûts des arrêts induits,
- 4) Coûts des rebuts, de la non-qualité et des délais non tenus,
- 5) Frais de redémarrage de production,
- 6) Coûts induits en cas d'accident corporel.

### **Perte de production:**

Il est évident que, pendant l'arrêt d'une ligne de production, non seulement les produits non fabriqués ne peuvent être commercialisés, mais plus encore, ils sont vendus par la concurrence. Il est possible d'estimer les pertes de production par [64]: «**temps d'indisponibilité (Ti) × taux horaire de non production (r)** ».

$$C_p = T_i \times r_2 \quad (4.12)$$

*T<sub>i</sub>* est le temps de l'indisponibilité relevé pendant une période où l'équipement défaillant est requis. Le taux horaire, exprimé en (la monnaie du pays concerné / heure), est déterminé pour l'équipement considéré. Il dépend majoritairement de la criticité de l'équipement à l'intérieur de l'ensemble du système de production [64].

### 3- Les coûts de défaillance ( $C_d$ ):

Les coûts de défaillance résultent des coûts directs et indirects d'une ou d'un cumul de défaillances relatives à un équipement [64].

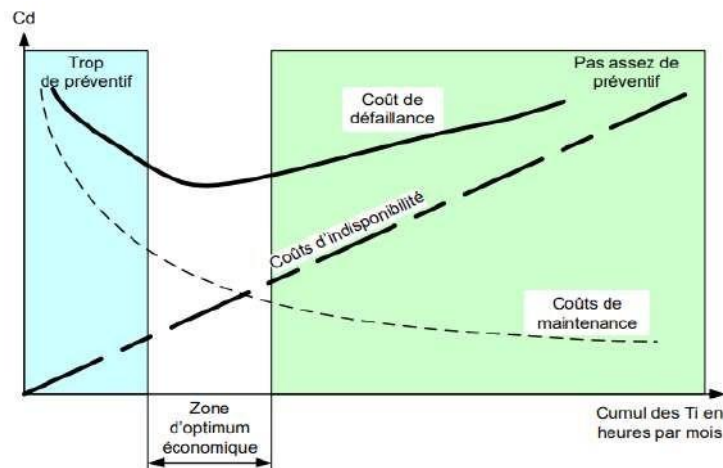
$$C_d = C_m + C_i \quad (4.13)$$

$C_d$ : Coûts de défaillance: résultant des coûts directs et indirects d'une ou d'un cumul de défaillances relatives à un équipement.

$C_m$ : Coûts directs de maintenance: de manière simple, ce sont les pièces de rechange et la main d'œuvre.

$C_i$ : Coûts d'indisponibilité: c'est le cumul de toutes les conséquences indirectes induites par l'indisponibilité propre d'un équipement.

La **figure IV.8**, montre que les coûts directs et indirects de maintenance varient dans des sens opposés, dans la mesure où la diminution des temps d'indisponibilité est le résultat d'une maintenance préventive plus importante et plus efficace [64].



**Figure IV.8:** Evolution des coûts de défaillance [64].

La **figure IV.8** met en évidence la linéarité des coûts d'indisponibilité. Une maintenance préventive peu développée entraîne des coûts indirects, dus aux arrêts de production, trop importants. Inversement, trop de préventif entraîne des coûts directs, dus à des investissements humains et matériels, trop importants [64].

Cependant le graphique montre également qu'il existe un optimum au niveau des coûts de défaillance. L'objectif est donc d'optimiser le plan de maintenance préventive en cherchant un équilibre entre les coûts directs et indirects et donc, entre la disponibilité des équipements et les coûts de maintenance [64].

### 4. Conclusion:

Pour assurer la fonction maintenance, il faut savoir analyser les défaillances rencontrées, c'est-à-dire avoir un retour d'expérience complet et fidèle permettant de trouver la cause première de la défaillance. Il faut être capable de juger si la défaillance est due à la fiabilité intrinsèque d'un composant (c'est-à-dire à sa conception) ou si elle provient d'un non-respect des conditions d'utilisation de maintenance ou d'une erreur humaine.

### IV.3. Plan de maintenance

#### **Définition:**

Le plan de maintenance est un ensemble structuré et documenté de tâches qui comprennent les activités, les instructions, les ressources et la durée nécessaire pour exécuter la maintenance.

#### **Plan de maintenance des équipements tubulaires au niveau de l'ENTP [7]:**

Pour prendre en charge la maintenance, la fabrication et l'entretien de l'ensemble de ses équipements tubulaires à chaque fin de puits, l'Entreprise Nationale des Travaux aux Puits (ENTP) a créé l'Unité Tubulaire (UET) et mis en place un plan de maintenance.

L'UET a été créée en 1975 pour prendre en charge le besoin de l'Entreprise en matière de **Contrôle Non Destructif (CND)** des équipements tubulaires et des organes des appareils de forage, selon les Normes API et spécifications des Clients, de la **Fabrication et Réparation** des équipements tubulaires selon la Norme API 7-1, du **Rechargements** des stabilisateurs en Carbone de Tungstène, de la Gestion du matériel tubulaire des appareils de forage (Drill-Pipe, Drill-Collar, Pup-Joint et DP HWT).

**L'UET est La Première Unité certifiée ISO 9001-1994 en 2001 dans le secteur des Hydrocarbures.**

#### **Application du Plan de Maintenance des Equipements Tubulaires:**

Mise en place, diffusion et application de toutes les procédures et instructions conformément aux normes ISO [7].

Le Plan comprend les activités suivantes:

- L'inspection,
- La réparation,
- La fabrication d'équipements tubulaires.

Pour la mise en place et l'application de ce Plan, l'ENTP dispose actuellement d'une infrastructure considérable, étalée sur une surface globale de plus de 74 hectares, composée principalement par quatre (04) ateliers:

- Atelier CND (Contrôle Non Destructif),
- Atelier Fabrication Pétrolière,
- Atelier Rechargement Stabilisateurs,
- Atelier CNC (Machine d'usinage CNC (par « Computer Numerical Control »)).

Ainsi que des bureaux, des magasins d'ateliers, d'espace de travail non couvert et d'un parc de stockage d'une capacité de 40 000 Unités.

#### **Activités:**

Les activités réalisées dans le cadre de ce Plan de Maintenance, sont:

##### **1- Contrôles Non Destructifs (CND):**

Les contrôles en atelier ou sur sites des clients (chantiers) des Equipements Tubulaires (Garniture de forage, Casing, Tubing, etc...) et des Organes d'Appareils (Mats, Substructures, Matériel de levage, etc...) [7].

##### **Les Méthodes d'Inspection:**

- Contrôles visuels,
- Contrôles dimensionnels,
- Contrôles par Ultra-Son,



- Controles Electromagnétiques (EMI),
- Controles par Particules Magnétiques (MPI) [7].

### **Matériel contrôlé :**

- Plus de 46 800 Tiges de forage de diamètre 2''7/8 à 5''1/2,
- Plus de 11 800 Masse-tiges,
- Plus de 40 300 autre matériel de forage.

**Les Inspecteurs sont qualifiés et certifiés par un organisme extérieur et de renommée internationale.**

### **2- Fabrication Pétrolière**

- Réparation des filetages pétroliers selon les normes API 7-1 & 5 CT:

- Usinage plus de 15 600 filetages API.

- Fabrication des produits courts:

- Réductions,
- Baskets Sub, etc...

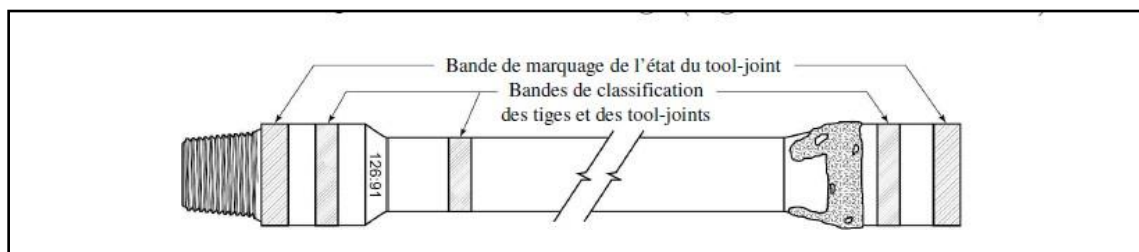
### **3- Rechargement des Stabilisateurs & Matériels de Repechage**

- Rechargement et Réparation plus de 540 Stabilisateurs de diamètre 6'' à 26''.

**Les Soudeurs sont homologués selon les mormes API-1104 et ASME-IX.**

En forage, on utilise le plus souvent des tiges usagées. Il faut donc les contrôler au niveau de l'Unité Tubulaire et les classer pour tenir compte de leur état d'usure. La classification des tiges se fait en termes de réduction par usure de leur dimension et de l'existence de dommages observables ainsi que des traces de corrosion à la surface.

Les normes API RP 7G et API RP 7G-2 fournissent un système de marquage par bandes de couleur sur les tiges pour les classer. Le même système est recommandé pour les raccords de tige (Figure. IV.9).



**Figure IV.9:** Bande de marquage pour classer les tiges de forage (adapté d'API RP 7 G) [26].

Les tiges de forage de classe 1 sont dans un état neuf. Lorsque les tiges sont mises en service au forage, leur épaisseur sera progressivement réduite. Cette réduction de la section entraîne une réduction de leur limite d'élasticité.

Si l'état de la tige atteint une certaine limite (ou si elle présente une fissure), elle est rebutée. Elle est marquée d'une bande rouge et elle ne peut plus être réutilisée en forage.

## **CONCLUSION GENERALE**

Avec l'augmentation des difficultés au cours des opérations de forages profonds, Il est indispensable que les équipements de forage, soient aptes à résister à toutes les contraintes qui pourront surgir le long de ces opérations.

A cet effet nous avons réalisé les études suivantes sur la fiabilité des équipements de forage et l'amélioration de la durée de vie des trains de sonde:

### **1- Fiabilité des équipements de forage:**

Au niveau du chapitre deux, nous avons effectué un travail ayant pour objet l'amélioration de la fiabilité et la disponibilité des équipements de forage au niveau de l'appareil ENTP (TP 127).

A cet effet nous avons effectué une étude critique, afin de classer les équipements de l'appareil selon leur criticité, et avons opté particulièrement pour les méthodes d'analyse utilisées en fiabilité à savoir la méthode: «ABC», l'analyse par «l'AMDEC » et « ISHIKAWA »

Afin de réaliser une bonne étude de fiabilité, le nombre de défaillances de chaque organe a été relevé à partir du dossier historique de chaque équipement.

En utilisant ces méthodes d'analyse on a pu sélectionner parmi cinq équipements l'organe à prendre en considération dans notre étude, tableau II.8.

L'analyse des résultats présentée dans l'étude montre que l'équipement le plus critique est le treuil de forage, qui doit être pris en charge par le service Maintenance.

La recherche des causes de défaillance a été facilitée par l'emploi de la méthode connue dite des cinq (5) M (ou méthode Ishikawa ou causes-effets).

Les résultats de l'analyse montrent que l'élément le plus critique au niveau du treuil de forage est le système de freinage et notamment ses patins de frein, qui influent négativement sur la disponibilité et le bon fonctionnement de ce treuil type OIL WELL 840 E.

Le diagnostic de cet organe, par les méthodes « ABC » et « AMDEC » nous a permis de déterminer l'élément défectueux et nous proposons dans ce cas, qu'il faut assurer une maintenance corrective pour éliminer toutes les causes entraînant l'arrêt de production et une maintenance préventive basée sur des contrôles et des inspections périodiques, avec un suivi rigoureux de cet organe sensible afin d'augmenter sa durée de vie et éviter l'arrêt de l'appareil de forage et une perte de production importante et coûteuse pour l'Entreprise.

### **2- Fiabilité des tiges de forage:**

Au niveau du chapitre trois et dans le cadre de la fiabilité du train de sonde, nous avons utilisé la loi de survie pour le calcul de la fiabilité des tiges de forage 5''1/2 sur un appareil ENTP:

L'appareil est doté de 500 tiges de forage de diamètre 5''1/2 conformément aux exigences des clients et notamment SONATRACH pour le forage des puits d'hydrocarbures profonds.

L'expérience a montré que quand la courbe, représentant le taux de défaillance a la même allure que la courbe en baignoire (Figure III.24); donc composée de trois phases:

- La première phase définit la période de jeunesse, caractérisée par une décroissance rapide du taux de défaillance. Cette décroissance s'explique par l'élimination progressive de défauts dus aux processus de conception ou de fabrication mal maîtrisé ou à un lot de mauvaises tiges ou abimées par de mauvaises manipulations,
- La deuxième phase définit la période de vie utile généralement très longue. Le taux de défaillance est approximativement constant. Les pannes sont dites aléatoires, Leur apparition n'est pas liée à l'âge du composant mais à d'autres mécanismes d'endommagement,

- La dernière phase est la période de vieillissement, elle est caractérisée par une augmentation progressive du taux de défaillance avec l'âge des tiges. Ceci est expliqué par des phénomènes de vieillissement tels que l'usure, l'érosion, etc.

Le comportement en baignoire du taux de défaillance est signe d'un fonctionnement plus ou moins normal des tiges de forage au niveau de l'ENTP.

Les tiges rebutées sont déclassées et signalées avec bande rouge sur le corps des tiges et retirées de l'activité de forage.

### **3- Amélioration de la durée de vie des trains de sonde**

La réalisation de forage profond au-delà de quelques kilomètres (6000 m), le volume des travaux aux puits et les consommations de pièces, d'équipements, d'outils et de matériaux, croissent énormément. Il est indispensable que le train de sonde résiste à toutes les contraintes qui surgissent au cours des travaux aux puits.

A cet effet, la récolte de données relatives à la plupart des modes de défaillance et la durée de vie des principaux équipements utilisés dans le forage des puits; est considérée comme un outil important dans l'aide à la décision en approvisionnement de matériels et à l'ordonnancement des tâches de maintenance, ce qui se répercute favorablement sur l'efficacité des travaux et les opérations de forage.

Le but de ce travail est de réaliser un examen complet de la plupart des modes de défaillance qui se produisent dans le train de sonde au cours du processus de forage de la phase 8''1/2 dans le champ de Berkine, tout en expliquant les principales causes de ces défaillances, afin de gérer et d'éviter les risques et d'obtenir de meilleures performances de forage.

Il vise également à vérifier que l'utilisation de nouvelles tiges de forage fabriquées à partir de matières en alliage d'aluminium traitées en surface par oxydation de micro arcs (MAO). Ce procédé confère au revêtement des propriétés supérieures et permet d'améliorer la qualité de la surface des pièces soumises au travail de friction (frottement), ou exposées à des flux de solides ou de liquides chargés de particules abrasives, et permet d'améliorer:

- La résistance à la traction et la capacité de la couche superficielle à résister à la formation de fissures,
- La résistance à l'usure abrasive et érosive,
- La résistance au frottement (obtenir des revêtements d'une épaisseur de 50 $\mu$  à 150 $\mu$  pour une résistance à l'usure et 200 $\mu$  à 600 $\mu$  pour une résistance à l'érosion),
- La résistance à la corrosion,
- La résistance à l'usure, le prolongement de la vie des pièces importantes est de 1,5 à 4,5 fois supérieure,

La démarche de ce travail a été précédemment présentée en deux axes, sur lesquels se fonde notre conclusion:

Le premier axe porte sur l'évaluation de la dangerosité des contraintes engendrées par les charges de traction et de torsion qui affectent le train de tiges pendant l'opération de back\_reaming. De ce fait, une meilleure compréhension de la répartition des contraintes le long du train, permettra d'optimiser la conception du train de sonde, ce qui contribuerait à l'amélioration de sa durée de vie.

Nous avons défini que plus la profondeur de forage augmente, plus la trajectoire du puits devient complexe et le dépassement de la valeur maximale acceptable de la sévérité du dog-leg engendrera une défaillance prématurée de la garniture.

Dans cette situation, il faudra aléser ou reforer avec une garniture plus rigide pour obtenir une

courbure plus douce à cet endroit du puits. Si l'alésage ou le reforage ne donnent pas de résultat, il est nécessaire de reboucher le puits dans la zone où le dog leg est trop important et d'amorcer plus haut une nouvelle trajectoire avec une garniture de forage plus rigide.

Donc, il est nécessaire de connaître l'influence des changements de trajectoire (tortuosité) sur les aptitudes de la garniture de forage. La fatigue des tiges de forage 5" d'un poids nominal de 19,5 lb/ft de grade G 105 de 3214 m à 3186 m peut résulter de l'effet combiné de la tension axiale, de la torsion et de la flexion alternée répétée due à la rotation de la tige de forage au niveau des régions des dog-legs.

L'effet du dog-leg, la charge de traction et le couple sont les points les plus importants à prendre en compte dans les opérations de back-reaming. Car la résistance du corps de la tige de forage aux efforts combinés est limitée par sa limite de tension. Ainsi, l'utilisation de tiges de forage mixtes de classe G105 premium 5"1/2" dans le trou tubé et 5" dans le découvert, a une certaine limite en raison des charges axiales pour cette section de forage qui a imposé l'utilisation de tiges de forage plus résistantes de classe S135 de poids 21,90 lb/ft, pour supporter les charges opérationnelles.

D'autre part, l'étude a montré que, lors du back-reaming:

- Toutes les contraintes du train de tiges ont été appliquées: contraintes axiales dues à la tension, contraintes de flexion dues à la courbure de la garniture en fonction de la tortuosité du puits, et contraintes de torsion dues à la rotation.
- Le contact du train de tiges et des composants BHA, avec le puits, font augmenter dans ces conditions de contraintes, la friction causée par la tension et la rotation, et donc les forces latérales.
- Les forces latérales excessives, induites par le back-reaming ainsi que les manœuvres incorrectes, peuvent entraîner une usure accélérée du tubage, du BHA, et engendrer des situations indésirables telles que des twists offs.
- Enfin, le back-reaming peut réduire considérablement la durée de vie du train de tiges de forage par fatigue, en raison de l'action des contraintes dues à: la torsion et la tension dans un dog-leg, particulièrement lorsque les dog-legs, sont peu profonds et sévères.

De plus, les dog-legs doivent être limités dans les parties tubées sinon il se produira une usure importante des tubages (casings) résultant des forces latérales de contact des tool joints et de la rigidité de la garniture de fond utilisée pour forer sous le dog-leg, donc une bonne modélisation du comportement mécanique de la garniture de forage dans le trou à trajectoire variable permet d'une part de prévoir correctement les efforts et couple en surface et ensuite d'optimiser le choix de la trajectoire afin de réduire au maximum la taille de l'installation de forage et de réduire ainsi le coût global du forage.

Le deuxième axe a abordé le risque associé au problème de fatigue du train de tiges de forage sous charge dynamique dans un puits à trajectoire tortueuse, et se concentre principalement sur la possibilité de réduire la fatigue et d'améliorer la résistance au flambage et de réduire le couple dans la mesure du possible.

La possibilité d'utiliser des tiges de forage en alliage d'aluminium 2024, traitées en surface (ST) par oxydation de micro arcs (OMA) a été aussi abordé, en examinant la possibilité de les utiliser pour des puits profonds, tout en respectant l'efficacité et l'intégrité du train de tiges, ce dernier a permis d'étudier plus en détail les problèmes liés à la tortuosité de la trajectoire qui génère des charges de couple et de frottement sur le train de tiges pendant le forage, engendrant des forces latérales, axiales et de torsion au fur et à mesure que le trépan avance dans le puits.

Les résultats montrent que la contrainte de Von Mises ratio est maximale est égale à 0,549 (tableau IV.18) elle est inférieure à 1, donc La Contrainte de Von Mises est bien inférieure à la limite d'élasticité du matériau. Cela veut dire que la garniture résiste bien à la traction.

Il a été constaté que les tiges de forage en acier G105, de diamètre 5" et de poids spécifique, 29lb/ft, s'est dégradée sous l'effet de la fatigue pendant les opérations de forage causées par des déviations non planifiées et les rotations dans des régions dangereuses, caractérisées par des dog-leg où la sévérité dépasse les 10°/30m; induit d'importantes contraintes de flexion alternées dans les tige de forage environ 45337 psi (312,58 Mpa), dépassant la limite d'endurance de fatigue d'environ 20000 psi (138 Mpa) avec une force de contact latérale élevée, qui est supérieure à 8896 N (2000lb). donc ces contraintes , sont supérieures à celles, qui se manifestent au sein d'un train de tiges mixte avec des contraintes de flexion supérieure à 10298 psi (72MPa) qui ne dépasse pas leur limite d'endurance de fatigue avec force de contact latérale inférieure d'environ 6774 N, soit moins de 8896 N (2000lb).

On peut alors émettre l'hypothèse que les tiges de forage en alliage AL 2024, sont des outils puissants de réduction du couple et de frottement pour les puits très tortueux, et qu'elles peuvent résoudre, bon nombre de problèmes rencontrés pendant le forage, entre autre, la **réduction de l'usure et l'amélioration de la durée de vie de ces tiges.**

**En conséquence,** il n'y a donc aucun danger d'exploiter et d'utiliser des tiges de forage en aluminium AL 2024, particulièrement en présence d'intervalles tortueux.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Ressources\\_et\\_consommation\\_mondiales](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ressources_et_consommation_mondiales).
- [2] Documentations de l'entreprise ENTP.
- [3] J.P. Bernhard. Cours de forage, tome I, édition - historique et principe du forage-standard.A.P.I. 1955.
- [4] Hermann, P., 1986. Sondage de reconnaissance hydrogéologique: Méthode du marteau fond-de-trou ; exécution et surveillance (Manuels et méthodes) (French Edition) Paperback – January 1.
- [5] Thèse de Doctorat Présentée par Mme BELKACEM LALLIA "Evaluation et moyens d'amélioration de la réserve mécanique et de la durée de vie du tubage destinés aux puits de forage profonds" UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, Année Universitaire : 2021/2022.
- [6] Malti. H., 2010. Histoire secrète du pétrole algérien. Paris, 258 p.
- [7] [www.entp.com](http://www.entp.com).
- [8] TAIBI MOHAMED, maintenance industrielle, réparation et montage des machines et des équipements du pétrole, du gaz et de la pétrochimie, édition: n°4112, (<https://ensti-annaba.dz/bib/maintenance-industrielle-reparation-et-montage-des-machines-et-des-equipements-du-petrole-du-gaz-et-de-la-petrochimie>).
- [9] MICHEL RIDOUX ; AMDEC-Moyen, technique de l'ingénieur; AG4220, Auteur(s), Date de publication : 10 juil. 1999.
- [10] Nouh-Seridi-mémoire-de-la-fin-d'étude "Utilisation d'outils au service de la maintenance d'un Treuil de forage OILWELL 840 E", UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA - Année Universitaire 2016-2017.
- [11] Mémoire final nour.i.pdf: Mémoire: appareil de forage, étude et dimensionnement, cas: champs Hassi Messaoud. Université Kasdi Merbah – Ouargla– Année 2012/2013.
- [12] Cours du Professeur khelif Rabia (Management de la Maintenance), Université BADJI Mokhtar, ANNABA.
- [13] A.Slimani, M. Daddou (2004), Sonatrach, Division forage, département formation, Modul M1, Mars, 92 p.
- [14] Ahmadi, R., 2011. Techniques de forage Chapitre I: Sécurité de forage. View project Methods of Pore Pressure Detection in west Algerian basin View project.
- [15] L. Mohammed. Etude et maintenance des équipements d'obturation de puits pétroliers, Université M'hamed bougara Boumerdes, 2007.
- [16] Metrot, Cours sur les boues des forages. Edition Tome III page 137.1962.
- [17] polycopi FMD 2013 (1).pdf: Pr. Ahmed BELLAOUAR M.A. Salima BELEULMI UNIVERSITE Constantine 1 "FIABILITE MAINTENABILITE DISPONIBILITE", Année Académique 2013-2014.
- [18] J.Foucher.Pratique de l'AMDEC, Edition,"Dunod", Paris, 2000.
- [19] D.richet. Maintenance basée sur la fiabilité: un outil pour la certification, Ed.Masson.1996
- [20] C. Mahfoud. Etude et maintenance de treuil de forage OIL WELL 840E. Mémoire de Master, Universté Hassiba Benbouali Chlef, 2012.
- [21] PFE-cor1-boumed-janv12.pdf "Impact de la fiabilité sur les équipements industriels", Année Universitaire: 2012-2013 (<http://dSPACE.univ-tlemcen.dz/>).
- [22] Mast.Gm.Negadi Ali.pdf "LA MAINTENANCE DES EQUIPEMENTS DE FORAGE (CAS TP127 HASSIMESSAOUD), UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMEN, Année Universitaire 2013-2014.
- [23] Sous traitance & Externalisation : lcsi\_cahier\_FR\_externalisation-maintenance\_2010.pdf.
- [24] Akowanou, J., 2009. Modélisation tridimensionnelle du flambage des tiges dans les puits de forage à trajectoire complexe ; Thèse de Doctorat, Géosciences et Ressources Naturelles, Paris.

- [25] Belaid, A., 2011. Modélisation tridimensionnelle du comportement mécanique de la garniture de forage dans les puits à trajectoires complexes : application à la prédiction des frottements garniture-puits, <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00579916>.
- [26] IFP Training, 2006. La garniture de forage, ENSPM Formation Industrie.
- [27] Parc appareils de forage opérant pour le compte de SONATRACH, 2018.
- [28] ISO TC 67/SC 4 N N Petroleum and natural gas industries-Drilling and production equipment-Part 1: Drill stem design and operating limits Élément introductif-Élément central-Partie 1: Titre de la partie, Petroleum and natural gas industries, 2004.
- [29] Dhaker, E., 2017. Modélisation du comportement dynamique d'un train de tiges de forage pétrolier: application aux vibrations latérales. Thèse de Doctorat, MINES Paris Tech Centre de Géosciences.
- [30] Belaid, A., 2011. Modélisation tridimensionnelle du comportement mécanique de la garniture de forage dans les puits à trajectoires complexes : application à la prédiction des frottements garniture-puits, Thèse de Doctorat, Centre de Géotechnique et d'Exploitation du Sous-sol - Ecole des Mines de Paris.
- [31] Grant Prideco. 2003. Drill Pipe Combined Torsion-Tension To Yield Pipe Tubes.
- [32] Ferjani, M., 2007. Intégration des phénomènes dynamiques dans l'analyse en fatigue des garnitures de forages, Thèse de Doctorat, Matériaux. Ecole Polytechnique X, Français.
- [33] Zakaria e El, M., 2011. Etude du comportement dynamique des trains de tiges de forage pétrolier, rapport d'option, Centre de Géosciences, mines Paris tech.
- [34] Jansen J.D., vanden Steen L., 1995. Active damping of self-excited torsional vibrations in oil well drill strings *Journal of Sound and Vibration*, 179 (4) (1995), pp.647-668.
- [35] Zamudio, C.A., Tlustý, J.L., 1987, Dareing, D.W. Self-Excited vibrations in drill strings. In *Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Dallas, TX, USA, 27–30 September 1987; Society of Petroleum Engineers: Richardson, TX, USA.
- [36] Dykstra, M.W., Chen, D.C-K., 1996. Drill string component mass imbalance: a major source of down hole vibrations, *SPE Drill. Complet.* Vol 11. 234–241. DOI:10.2118/29350-pa.
- [37] Tafreshi, A., Dover, W.D., 1993. Stress analysis of drill string threaded connections using the finite element method, *Int. J. Fatigue*. 15 429–438, University of Manchester.
- [38] Aldred, W.D., Sheppard, M.C., 1992. Drill string Vibrations: A New Generation Mechanism and Control Strategies. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers Washington, D.C.
- [39] Slimani, A., Daddou, M., 2015. Inspection des équipements de forage, Sonatrach, Division forage, département formation, 20p.
- [40] Birades, M., 1988. Static and dynamic three-dimensional bottom hole assembly computer models, *SPE Drill. Eng.* vol 3, p 160–166.
- [41] Al-Hiddabi, S.A., Samanta, B., Seibi, A., 2003. Non-linear control of torsional and bending vibrations of oil well drill strings, *J. Sound Vib.* vol 265, p 401–415 (August 2003 *Journal of Sound and Vibration* 265(2):401-415).
- [42] Allen, M.B. 1987. BHA lateral vibrations: case studies and evaluation of important parameters, in: *SPE/IADC Drill. Conf.*, Society of Petroleum Engineers.
- [43] DAO, Ngoc Ha., 016. Modélisation de la fatigue des systèmes de forage de puits à trajectoire complexe. Paris: l'École nationale supérieure des mines de Paris.
- [44] de Moraes, L.Savi, A. (2019) 'Drill-string vibration analysis considering an axial-torsional-lateral non smooth model', *Journal of Sound and Vibration*, 438. doi:10.1016/j.jsv.2018.08.054.
- [45] Vaziri, V., Kapitaniak, M., Wiercigroch, M., (2018) 'Suppression of drill-string stick-slip vibration by sliding mode control: Numerical and experimental studies', *European Journal of*



Applied Mathematics, 29(5).doi:0.1017/S0956792518000232.

[46] Nogueira, B. F., Ritto, T. G., (2018) 'Stochastic torsional stability of an oil drill-string', *Meccanica*, 53(11–12).doi: 10.1007/s11012-018-0859-6.

[47] Ulf, U. J., Di Meglio, F., Shor, R. J., (2018) 'Avoiding stick slip vibrations in drilling through startup trajectory design', *Journal of Process Control*, 70. doi:10.1016/j.jprocont.2018.07.019.

[48] Aarsnes, U. J. F. and Shor, R. J. (2018) 'Torsional vibrations with bit off bottom: Modeling, characterization and field data validation', *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 163.doi: 10.1016/j.petrol.2017.11.024.

[49] Gupta, S.K. and Wahi, P., (2018) 'Tuned dynamics stabilizes an idealized regenerative axial-torsional model of rotary drilling', *Journal of Sound and Vibration*, 412.doi: 10.1016/j.jsv.2017.08.044.

[50] Lu, C., Wu, M., (2018) 'Torsional vibration control of drill-string systems with time-varying measurement delays', *Information Sciences*, 467.doi:10.1016/j.ins.2018.07.073.

[51] Real, F. F., Lobo, D. M., Ritto, T. G., Pinto, F. A.N.C., (2018) 'Experimental analysis of stick-slip in drilling dynamics in a laboratory test-rig', *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 170. doi: 10.1016/j.petrol.2018.07.008.

[52] Qiu, H., Yang, J., Butt, S. (2018) 'Investigation on bit stick-slip vibration with random friction coefficients', *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 164.doi:10.1016/j.petrol.2018.01.037.

[53] Bakhtiari-Nejad, F. and Hosseinzadeh, A. (2017) 'Non linear dynamic stability analysis of the coupled axial-torsional motion of the rotary drilling considering the effect of axial rigid-body dynamics', *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 88.doi: 10.1016/j.ijnonlinmec.2016.10.011.

[54] Tian, J., Yang, Y. and Yang, L. (2017) 'Vibration characteristics analysis and experimental study of horizontal drill string with well bore random friction force', *Archive of Applied Mechanics*, 87(9).doi: 10.1007/s00419-017-1262-9.

[55] Gelfgat, M. Y. *et al.* (2009) 'IPTC 13758 Aluminium Pipes — A Viable Solution to Boost Drilling and Completion Technology', 15546 (December), pp.7–9.

[56] Menand, S. (2010) '2000-2010: Principales évolutions et avancées technologiques enforage', *Pétrole & gaz informations*, (ISSN1622-1036), p.Num 1806, pp38–41,4 p.

[57] S.Zeroug, N. Bounoua, R. Lounissi, Document sonatrach/schlumberger, alger. wec.La geologie pétrolier de l'Algerie, Well Evaluation Conference Algeria (WEC) (2007).

[58] Mohamed B., Farouq S., 2013. Evaluation quantitative et qualitative d'un réservoir Cas du réservoir TAGI–SIF Fatima Bassin de Berkine (Algerie Oriental).

[59] Documentation de «SONATRACH» "Fiche puit, Menzel Ladjmet East (MLE), SH/FOR.

[60] Documentation de «SONATRACH»: "Fiche puit, Ouest ElMerk (WEM), SH/FOR.

[61] Decision Software. EDT\_5000.1.14 Software system.Land mark products (2014).

[62] Hovda S., (2018) 'Semi-analytical model of the axial movements of an oil-well drill string in deviated wellbores', *Journal of Sound and Vibration*, 433. doi:10.1016/j.jsv.2018.07.016.

[63] ZEMALI SALAH Eddine ET BENNADJI BOUBAKEUR "Etude de la fiabilité et maintenance d'une pompe à boue de forage d'un chantier pétrolier", Université Kasdi Merbah Ouargla - Année 2012/2013.

[64] M. Jérémy Llaurens, Mise en place d'un plan de maintenance préventive, Thèse de docteur, Université Joseph Fourier, France, 2011.

[65] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Boue\\_de\\_forage](https://fr.wikipedia.org/wiki/Boue_de_forage)