

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR UNIVERSITY – ANNABA



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : de Technologie
Département : Génie Mécanique
Domaine : Sciences et Techniques
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Fabrication Mécanique et Productique

Mémoire
Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**CONCEPTION ET FABRICATION D'UN CORPS D'OUTIL DE FORAGE
A SIX LAMES EN PDC**

Présenté par : Merakha Akram

Encadrant : Pr. BOUCHELAGHEM Abdelaziz Mahmoud

Jury de Soutenance :

LAOUAR Lakhdar	Professeur	Université Badji Mokhtar Annaba	Président
BOUCHELAGHEM Abdelaziz Mahmoud	Professeur	Université Badji Mokhtar Annaba	Encadrant
MEKHILEF Slimane	MCA	Université Badji Mokhtar Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciements

Mes remerciements s'adressent, en premier lieu, à ALLAH le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a données durant cette longue année.

J'adresse aussi les grands remerciements à mon encadreur

Pr. BOUCHELAGHEM Abdelaziz Mahmoud pour tout ce qu'il m'a appris, pour les conseils techniques qu'il m'a prodigués et pour avoir accepté d'encadrer mon travail et aussi pour toute la confiance qu'il a placé en moi pour la réalisation de ce travail.

Je le remercie pour son entière disponibilité et sa précieuse aide.

Mon respect et mes sincères remerciements à tous les membres du jury de soutenance.

Mes remerciements s'adressent à tous les enseignants du Département de Génie Mécanique.

Un grand remerciement à tout le personnel de l'Entreprise ALEMO spécialement à toute l'équipe de son Bureau des Méthodes, section programmation.

Des merci particuliers à Mr. RIGHI Djamel Eddine, à Mr. DJAMA Mohamed Redha et à Mme LAAOUI Sihem de la DRH.

Enfin, mes remerciements vont à ma sœur, à mon frère, HABA Saleh, à ma famille et à mes amis pour leur soutien indéfectible, moral et financier,

que j'ai reçu durant mon cursus universitaire.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :
à mon Père et à ma Mère, sans oublier mes Frères et mes Sœurs;
ainsi qu'à toute ma famille;
à mes Amis et à mes Camarades de Classe;
à tous ceux qui ont été à mes côtés durant les moments difficiles.

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Introduction

Chapitre I : généralités sur le forage

I.	Généralités sur le forage	4
I.1	Définition du forage.....	4
I.2	Historique du forage	4
I.2.1	Exploitation historique de l'eau et des forages	4
I.2.2	Exploitation pétrolière.....	5
I.2.3	Forage pétrolier	7
I.2.4	Prospection géologique en surface	8
I.2.5	Prospection géophysique en profondeur	8
I.2.6	Consommation énergétique et investissements pétroliers.....	9
I.3	Différents types de forage.....	12
I.3.1	Forage par battage	12
I.3.2	Forage par marteau (MFT).....	12
I.3.3	Forage Rotary	13
I.4	Composition d'un forage.....	13
I.4.1	L'installation de forage	14
I.4.2	La garniture de forage	16
I.5	Paramètres de forage	18
I.6	Vibrations du train de tige	19
I.7	Tubage	21

Chapitre II : système de forage

II.	Système de forage	24
II.1	Théorie de coupe et actions géométriques et mécaniques du trépan.....	24
II.1.1	Actions géométriques	24
II.1.2	Actions mécaniques.....	26
II.1.3	Calcul de la poussée et de la vitesse de rotation en rotary	28

Sommaire

II.2	Machine de forage et ses paramètres	30
II.2.1	Le kit AcF PAT 201	32
II.2.2	La sondeuse ROC L8	33
II.3	Outils de forage	35
II.3.1	Evolution et utilisation	36
II.3.2	Types d'outils de forage.....	36
II.3.3	Mode destruction de la roche par les différents types de diamant	42
II.4	Matériaux des outils de forage et spécificités des terrains	43
II.4.1	Matériaux des outils de forage	43

Chapitre III : choix du prototype d'outil de forage

III.	Choix du prototype d'outil de forage.....	50
III.1	Présentation du cahier des charges	50
III.1.1	Cahier des charges technique	50
III.1.2	Cahier des charges fonctionnel	50
III.1.3	Les normes encadrant le CdCF	51
III.1.4	Plan type et grandes orientations du CdCF	51
III.2	Cahier des charges du projet "outil de forage"	52
III.2.1	Contexte et présentation	52
III.2.2	Besoins et contraintes liés au projet	53
III.2.3	Résultats attendus.....	53
III.3	Données techniques	53
III.3.1	Données techniques de la formation, de la matière à détruire et à cisailer	53
III.3.2	Données techniques de l'outil.....	55

Chapitre IV : fabrication de corps de l'outil

IV.	Fabrication de corps de l'outil.....	58
IV.1	Le routage d'usinage	58
IV.2	Récapitulatif.....	69
IV.2.1	Tableau de temps technologiques	69

Sommaire

IV.3 Programme de dressage face 1 ^{ère} , chariotage diamètre extérieur 170 et perçage diamètre 49	69
IV.4 Dessin de définition	75
IV.4.1 Dessin du corps de l'outil.....	75
IV.4.2 Dessin du plaquette PDC.....	76
IV.4.3 Dessin d'outil de forage PDC six lames.....	77

Conclusion

Références

Liste des figures

Chapitre I

Figure I-1 : Evolution de la profondeur d'eau des forages d'exploration en mer en fonction des années [8]	6
Figure I-2 : Processus de forage [24]	14
Figure I-3 : Schéma de principe du circuit boue [7].....	15
Figure I-4 : Quelques éléments de la garniture de forage [26].....	17
Figure I-5 : Composants de la partie inférieure de la garniture [26].....	18
Figure I-6 : Types de trépan [28]	18
Figure I-7 : Application du poids sur l'outil [30].....	19
Figure I-8 : Vibrations du train de tige [31]	21
Figure I-9 : Exemple d'architecture d'un puits	22
Figure I-10 : Détails des cimentations (correcte et défectueuse) au niveau des télescopes .	22

Chapitre II

Figure II-1 : Schéma représentant les différents angles de forage.	25
Figure II-2 : Angles d'arêtes et angle orthogonaux des faces	25
Figure II-3: Interaction outil-pièce et composants de la force de coupe.	28
Figure II-4 : Schéma de principe et réglage de la poussée / rotation [11].....	29
Figure II-5 : Exemple de schéma hydraulique d'une machine de forage et localisation des capteurs.....	31
Figure II-6 : Kit AcF PAT 201 [11]	33
Figure II-7 : Sondeuse ROC L8 [37].....	34
Figure II-8 : fonctionnement du panneau de commande [40]	35
Figure II-9 : Types d'outils de forage	35
Figure II-10 : Nomenclature des différents éléments constituant un outil à molettes [44].....	37
Figure II-11 : Outil TSP [51].....	41
Figure II-12 : Outil imprégné [52]	41
Figure II-13 : Action d'un outil à diamant naturel	42
Figure II-14: Action d'un outil PDC	43
Figure II-15: bit body en acier.....	44
Figure II-16 : Types généraux de destruction de la roche lors de la foration [61].....	47
Figure II-17 : Phase de déformation plastique [61].....	47
Figure II-18: phase de formation des fissures [61]	48
Figure II-19 : phase de propagation des fissures [61]	48

Liste des figures

Chapitre IV

Figure IV-1: Dessin du corps de l'outil.....	75
Figure IV-2 : Dessin du plaquette PDC	76



Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.I-1 : Principe et phases de fonctionnement du Marteau Fond de Trou MFT [11] ... 13

Chapitre II

Tableau II-1 : Paramètres de forage [11]..... 32

Chapitre III

Tableau III-1 : Angle de frottement interne (Φ).....	53
Tableau III-2 : Force de cohésion.....	53
Tableau III-3 : Densité	54
Tableau III-4 : Poids unitaire	54
Tableau III-5 : Porosité	54
Tableau III-6 : Perméabilité	54
Tableau III-7 : Compressibilité	54
Tableau III-8 : Rapport de Poisson	54
Tableau III-9 : Module de Young	55
Tableau III-10 : Dimensions de l'outil	55
Tableau III-11: Dimensions d'une plaquette	55
Tableau III-12 : Fixation	55
Tableau III-13 : Matériaux d'outil	55
Tableau III-14 : Types de boues.....	56
Tableau III-15 : Poussée sur l'outil	56
Tableau III-16 : Distance par minute	56
Tableau III-17 : Couple	56
Tableau III-18 : Vitesse de rotation.....	56

Chapitre IV

Tableau IV-1 : temps technologique sous phase 1	69
Tableau IV-2 : temps technologique sous phase 2	69

Liste des équations

Chapitre II

Équation II-1 : les forces tangentielles et les forces normales	26
Équation II-2 : la vitesse de rotation	29
Équation II-3 : la fréquence de rotation N et vitesse de coupe V_c	29
Équation II-4 : avance par tour	30



Introduction

Générale

Introduction Générale

Introduction générale

Le pétrole est le principal moyen de satisfaire les besoins énergétiques mondiaux et joue un rôle très important dans la planification économique des pays. Le développement de la population, de la société et de la technologie nécessite de l'énergie au quotidien, des véhicules pour assurer la mobilité, des machines pour la production industrielle... etc. Pour récupérer les hydrocarbures, le forage est le seul moyen d'atteindre un gisement et d'en extraire le pétrole au prix de revient le plus bas possible et dans les meilleures conditions de sécurité possibles. Tout d'abord, cela nécessite l'efficacité et la fiabilité du système de forage.

Le forage est une série d'opérations permettant de creuser des trous (puits) pour atteindre de nouvelles zones du sol pouvant contenir des hydrocarbures. La technologie de forage de puits de pétrole nécessite l'utilisation d'équipements complexes de surface et de subsurface ; une table de travail, qui est entraînée en rotation à une vitesse constante par un moteur, transmet l'énergie de rotation de la surface au sous-sol par l'intermédiaire d'une tige de traction, un outil qui pénètre les couches de la terre... etc.

Deux types d'outils de forage sont couramment utilisés sur les chantiers de forage : les outils tricônes avec plaquettes en carbure et les outils avec des arêtes de coupe en diamant dense polycristallin (PDC). Les outils PDC sont apparus à la fin des années 70 et ont capturé la majeure partie du marché. C'est à ce titre que le travail présenté dans ce mémoire traite de la conception et de la fabrication d'un corps d'outil de forage PDC à six lames.

En conception, la tâche ne s'est pas avérée facile, malgré l'utilisation du logiciel de CAO SolidWorks, la tête de forage est une pièce de forme complexe, les surfaces la formant combinent les cylindriques, les coniques et les hélicoïdales. Pour assurer la transmission des grandes charges entre les composants de l'outil, des filetages ronds ont été prévus.

La complexité est d'autant plus importante, pour les têtes de forage, en usinage. Les premiers outils étaient fabriqués par soudage d'éléments coupants séparés. Actuellement, avec le développement des technologies d'usinage avancé, la fabrication de pièces complexes comme les têtes de forage est envisagée sur des machines-outils à cinq axes à structure sérielle (MOSS) ou à structure parallèle (MOSP). Le second type de machine-outil diffère de l'autre par sa capacité à respecter la qualité et surtout à apporter un gain de temps, c'est à dire qu'elle permet un gain en productivité par le fait de mettre en mouvement et fabriquer des pièces de faibles masses.

La mise en œuvre des opérations d'usinage cinq axes dans la fabrication de pièces mécaniques complexes n'est pas une action simple, elle répond la plupart du temps à des stratégies d'usinage réfléchies sur la base de fortes exigences économiques. Traditionnellement, les surfaces similaires, obtenues par les machines cinq axes, sont réalisées par rectification ou électroérosion.

Le savoir-faire à la conception et à la fabrication de ces outils de forage fait que ce produit est à très haute valeur ajoutée.

Introduction Générale

Pour atteindre ces objectifs, des travaux ont été menés dans le cadre de ce projet de fin d'études et le mémoire présenté s'articule sur quatre chapitres qui traitent la Conception et fabrication d'un corps d'outil de forage PDC avec six lames. La conception a été effectuée au moyen du logiciel de CAO SolidWorks et la fabrication au moyen du simulateur d'usinage Cam Works.

Le premier chapitre traite des généralités sur le forage, son historique, l'augmentation des populations et la consommation d'énergie, les investissements des entreprises et des pays dans le domaine des ressources énergétiques minérales. Ce domaine a vu l'explosion des méthodes de forage et le développement de leurs outils, les performances sont perceptibles dans les profondeurs atteintes des puits et aussi dans les matériaux résistants utilisés de forage.

Le deuxième chapitre présente dans ses lignes l'approche de la théorie de coupe et la similitude de son application à l'outil de forage, les angles et les régimes de coupe. Dans ce chapitre, les différents outils de forage, tricônes, PDC, ...etc, sont aussi présentés ainsi que les matériaux utilisés dans la fabrication des outils de forage et les spécificités des sols et des terrains.

Le troisième chapitre décrit l'outil de forage conçu, les détails de ses éléments constitutifs et leur assemblage.

Le quatrième et dernier chapitre présente le routage d'usinage, les contrats des phases de fabrication ainsi que des programmes extrudés de Cam Works.

A la fin de ce projet de fin d'étude une conclusion et des recommandations sont mises en relief pour perfectionner la conception et la fabrication de l'outil de forage, en tenant compte des conditions spécifiques des terrains.

Chapitre I :
Généralités sur le
forage

Chapitre I : Généralités sur le forage

I. Généralités sur le forage

I.1 Définition du forage

Le forage est un ensemble d'opérations qui permettent, par le biais d'un procédé mécanique, de creuser un trou de diamètre centimétrique à décimétrique, généralement vertical et utilisé à des fins scientifiques et /ou économiques.

Ce procédé mécanique correspond à tout un assemblage de matériel, monté sur camion ou bien faisant partie d'un atelier, destiné à réaliser l'objectif de projets bien sûr de pénétrer les sous-sols. Toutes les techniques de forage sont valables pour les deux styles, soit en atelier ou bien sur camion [1].

I.2 Historique du forage

I.2.1 Exploitation historique de l'eau et des forages

L'homme a utilisé l'eau, indispensable à son existence, dès son origine. A la fin de la préhistoire, à l'époque néolithique, il domestiquait déjà l'eau de surface. Des proverbes mentionnant ce fait sont inscrits sur des tablettes de la fin de la préhistoire traduisant les préoccupations pour les eaux et les sources. De grands cataclysmes naturels sont, sans doute, à l'origine des récits relatifs aux phénomènes miraculeux du déluge et du retrait des eaux de la Mer Rouge. La présence de l'eau a favorisé la naissance des grandes civilisations sur les rives de quatre grands fleuves : la vallée inférieure du fleuve Jaune, la vallée du Nil, les rives du Tigre et de l'Euphrate et le bassin de l'Indus. C'est par l'observation des crues du Nil que les premiers Egyptiens imaginèrent le calendrier de trois cent soixante-cinq jours.

Les premiers captages d'eau souterraine par puits ou par galeries sont très anciens. Les Chinois pratiquent depuis plusieurs millénaires la technique des forages, atteignant 1500 m de profondeur, avec des tiges de bambou assemblées. Le plus ancien ouvrage connu en Egypte a été creusé il y a quatre mille ans, il s'agit du puits Joseph, près du Caire, il a atteint environ 100 m de profondeur et a actuellement cet âge. C'est à la même époque que l'oasis de Fezzan-Ghadamès (Lybie) a été irriguée à partir de puits.

En France, le plus ancien puits de Paris date du VIIème siècle, il peut être observé à Saint-Julien-le-Pauvre. Les premiers forages jaillissants, exécutés en 1126 à Villiers-en-Artois, sont à l'origine du terme "puits artésiens". Puis cette technique gagna l'Europe du Sud au XVIème siècle. A citer le puits célèbre d'Orvieto creusé en 1527. En 1841, Georges Mulot fore le puits artésien de Grenelle, qui sera pendant plusieurs années, avec ses 548 m, le plus profond du monde. Ce record sera battu, en 1857, par le forage de Passy atteignant 641 mètres.

Le captage par des galeries très longues, s'étendant sur plusieurs kilomètres - les kanats ou foggaras - était pratiqué en Perse dès cinq cents ans avant notre ère en Egypte. Ils sont connus dans toutes les zones arides : Chine, Afghanistan, Afrique du Nord. Les romains ont construit les premiers aqueducs, captant des sources. Dans la région parisienne, le captage des sources

Chapitre I : Généralités sur le forage

de Rungis et de Cachan, réalisé sous l'empereur Julien au IX^{ème} siècle, alimentait l'aqueduc d'Arcueil [2].

I.2.2 Exploitation pétrolière

Les premiers forages pétroliers, connus aujourd'hui, étaient en Chine vers l'an 347. Les puits pouvaient atteindre une profondeur de 240 mètres et ont été forés à l'aide de trépans attachés à des poteaux de bambou dans l'objectif d'exploiter des puits de sel. Au X^e siècle, de vastes pipelines de bambou relient les puits de pétrole aux sources salées. Les anciennes archives, Chinoises et Japonaises, contiennent de nombreuses allusions à l'utilisation du gaz naturel pour l'éclairage et le chauffage. Le pétrole était connu comme eau brûlante au Japon, au VII^e siècle [3].

Certaines sources affirment qu'à partir du IX^e siècle, des champs de pétrole ont été exploités dans la région moderne de Bakou, en Azerbaïdjan, pour produire du naphta destiné à l'industrie pétrolière. En 1264, l'exploitation de l'huile d'écoulement dans la Perse médiévale a été réfléchi par Marco Polo lors de son voyage à travers Bakou, et il décrit cet endroit comme une fontaine à pétrole et jugeait que plusieurs centaines de bateaux auraient été nécessaires pour transporter celui-ci dans sa totalité. En 1594, des puits de pétrole sont creusés mais à la main à Bakou, en Perse, d'une profondeur maximale de 35 mètres. C'est en 1802 que les frères David et Joseph Ruffner forent un puits de 58 pieds avec une perche à ressort dans la vallée de Kanawha en Virginie-Occidentale pour produire de la saumure. Le forage dure 18 mois [4].

- **Exploitation pétrolière en mer :**

Le développement des forages en mer, qui a existé auparavant, s'est accéléré depuis les années 1990. L'offshore représente aujourd'hui 35% de la production mondiale de pétrole et 19% de la production de gaz [5]. Plus de la moitié des découvertes ont lieu aujourd'hui en offshore, dont un tiers en offshore profond [6].

La Figure I.1 représente l'évolution de la profondeur d'eau des forages d'exploration en mer au cours du temps. Il est aujourd'hui possible de forer au-dessous de 2000 m, voire 3000 m d'eau et d'accéder ainsi aux gisements situés dans le sous-sol au pied des talus continentaux. Enfin, les progrès réalisés dans le domaine des forages dirigés, ou encore des techniques de récupération assistée des hydrocarbures (enhanced oil recovery, EOR) conduisent à une exploitation plus optimisée des champs, améliorant les taux de récupération [7].

Chapitre I : Généralités sur le forage

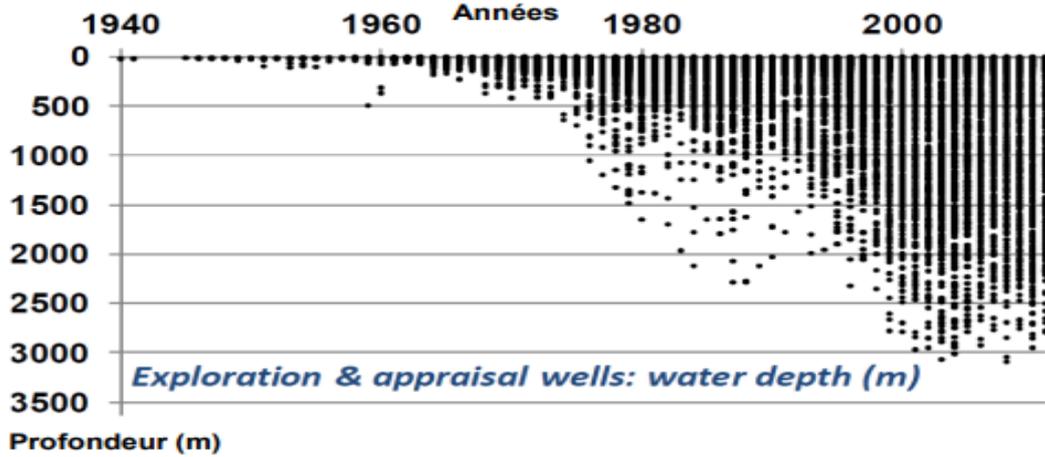
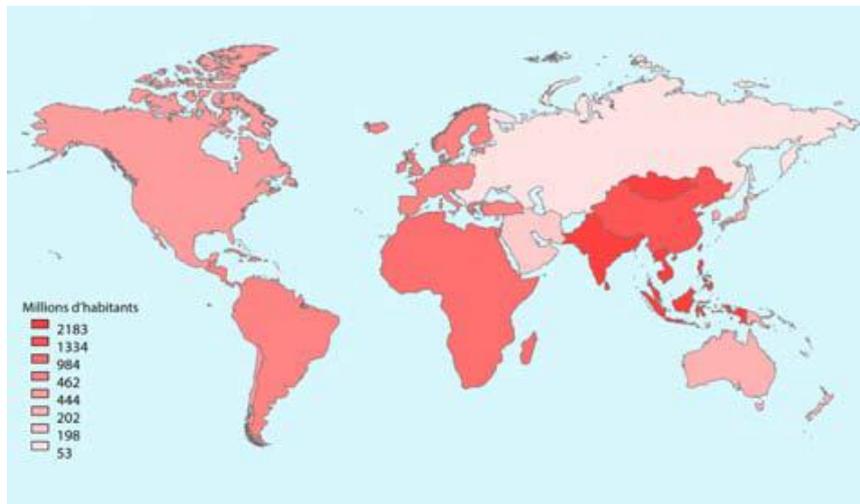
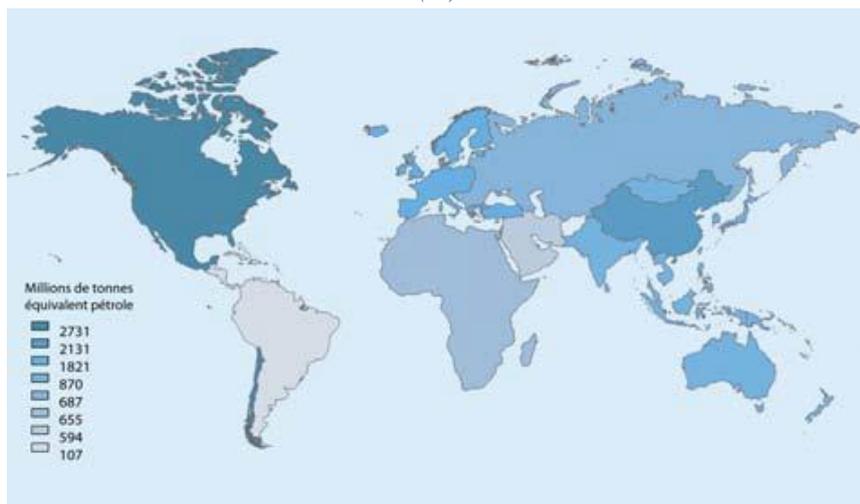


Figure I-1 : Evolution de la profondeur d'eau des forages d'exploration en mer en fonction des années [8]



(A)



(B)

Figure I-2 : Statistique mondiale en 2010 : a - Démographie ; b - Consommation d'énergie primaire [14]

Chapitre I : Généralités sur le forage

I.2.3 Forage pétrolier

- **Premiers forages pétroliers :**

Les premiers forages de pétrole ont été réalisés en Allemagne en 1857. Mais l'opération qui eut un grand retentissement fut celle d'Edwin L. Drake en 1859 en Pennsylvanie pour l'extraction du pétrole à 23m de profondeur [15].

- **Définition du pétrole :**

Du latin Petra et Oléum, soit "huile de pierre", est une huile minérale naturelle utilisée comme source d'énergie (figure I-3). Il est issu d'un mélange variable d'hydrocarbures (molécules composées d'atomes de Carbone et d'Hydrogène) associé à d'autres atomes principalement de soufre, d'Azote et d'oxygène [16].

Le pétrole peut être visqueux ou liquide, et cette différence réside dans la forme de ses composants (liquides, gazeux et parfois solides) qui varie dépendamment de la température et de la pression (figure I-7) [17].



Figure I-3 : pétrole [17]

- **Formation du pétrole :**

La formation du pétrole ne date nullement d'hier, c'est le fruit d'une transformation qui s'est enclenchée il y a des dizaines, voire des centaines de millions d'années, et c'est sur cette période que s'étale la décomposition des organismes qui, en s'accumulant dans des tréfonds marins et en se mélangeant avec les sédiments (argile, sable, sel...etc.) entraînés par les courants, ont donné naissance à une substance appelée Kérogène, qui se retrouve piégée dans des roches-mères. Lorsque cette substance est exposée à des températures et pression élevées, elle subit un craquage thermique, ce qui tend à ne garder que le mélange d'hydrocarbures liquides, appelé pétrole brut [17].

Chapitre I : Généralités sur le forage

I.2.4 Prospection géologique en surface

Les caractéristiques géologiques des gisements pétroliers varient selon l'âge (500 à 400 millions d'années), la profondeur (1 à 10 km) et la température (le pétrole se forme à des températures comprises entre 60 et 150 °C).

Pour identifier les zones pétrolifères potentielles, les géologues tiennent compte des éléments suivants :

- Les propriétés de la roche ;
- Les conditions favorables à la production d'hydrocarbures ;
- La migration et le piégeage à la couche imperméable.

Les géologues cartographient le sous-sol à partir des informations obtenues à partir de la surface en examinant les affleurements et des informations obtenues dans l'air grâce à la photogéologie [18]. Lorsque les géologues découvrent des zones favorables (prospects) depuis la surface, c'est au tour des géophysiciens d'explorer le sous-sol.

I.2.5 Prospection géophysique en profondeur

Les réflexions sismiques sont la principale méthode utilisée par les géophysiciens pour identifier les gisements potentiels :

- Sur terre, les échos partiellement réfléchis par les couches géologiques sont détectés par un réseau de sismomètres par des chocs ou des vibrations acoustiques qui secouent le sol. On obtient ainsi une échographie bidimensionnelle de la structure de couche attendue.

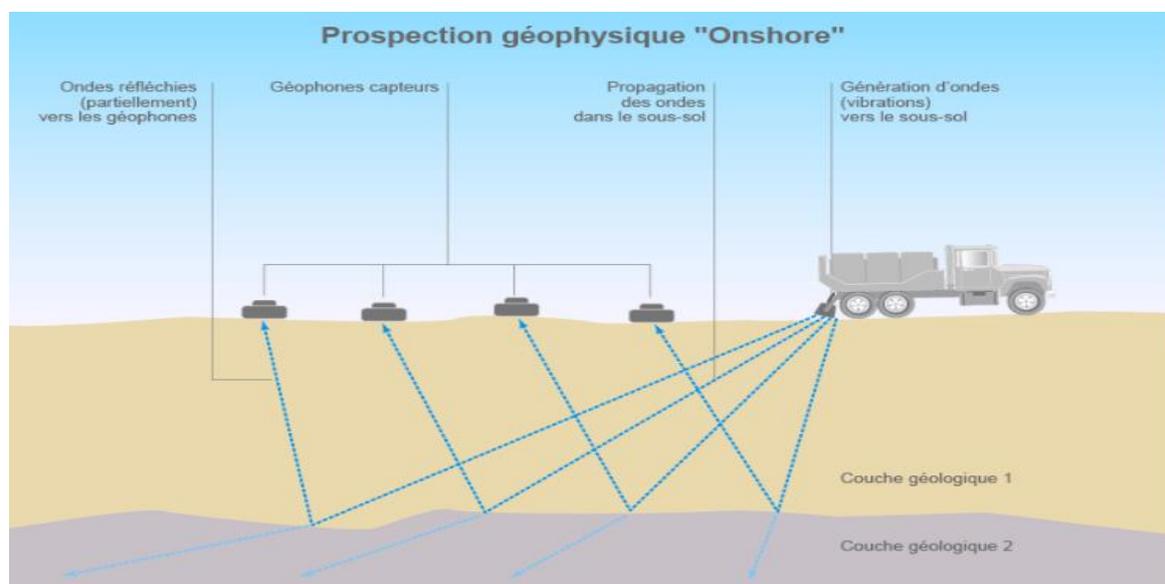


Figure I-4 : Prospection géophysique « on shore »

- En mer (offshore), on produit l'onde sismique par air comprimé à haute pression et on recueille les échos sur des hydrophones flottants (flûtes), la couche d'eau étant considérée comme homogène.

Chapitre I : Généralités sur le forage

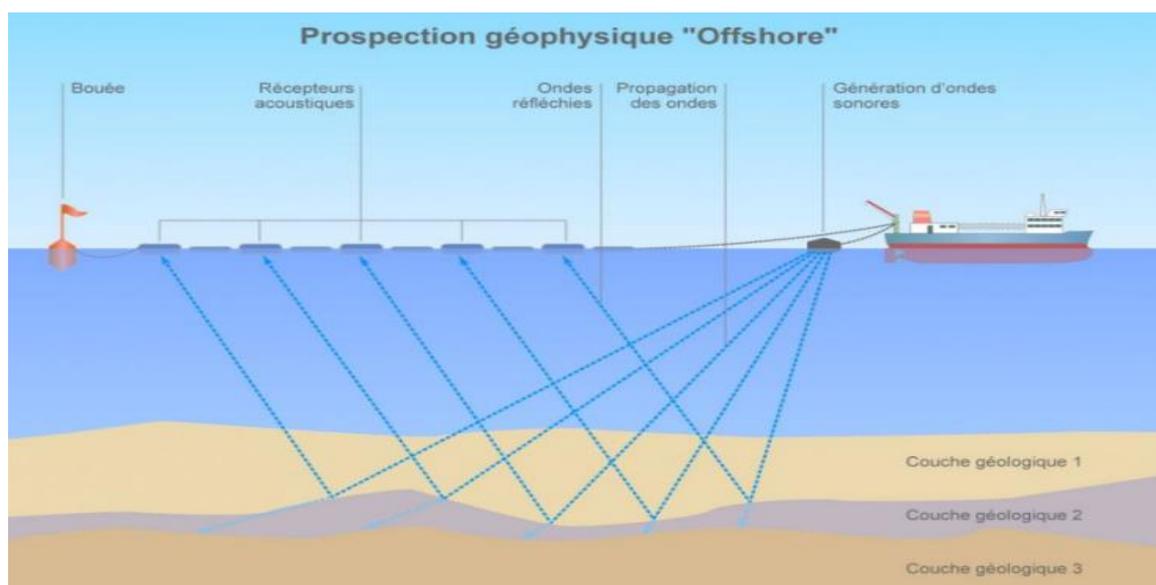


Figure I-5 : prospection géophysique « offshore »

Après la prospection, le forage est la seule méthode pour confirmer la présence d'hydrocarbures et définir ainsi :

- La qualité de l'effluent du puits (saturation en gaz, en eau) ;
- La perméabilité du réservoir ;
- La production potentielle et la quantité.

I.2.6 Consommation énergétique et investissements pétroliers

La population mondiale compte en 2012 plus de 7 milliards d'habitants et atteindra un nombre de 9 milliards en 2050 [12]. L'évolution de la consommation d'énergie primaire est logiquement liée à celle de la démographie mondiale (figure I-2). À titre d'exemple, la Chine qui représente un peu moins de 20% de la population mondiale, a eu une consommation supérieure à 2 milliards de tonnes équivalent pétrole en 2010, soit plus d'un quart de la consommation mondiale. Ainsi, la demande en énergie des pays émergents motive les efforts d'innovation au niveau de l'excavation des sols pour la prospection de matières premières ou pour l'exploitation de la géothermie. Cette dynamique d'innovation a été d'autant plus accentuée que la rentabilité des forages de plus en plus profonds est devenue intéressante pour les compagnies d'hydrocarbures à partir du milieu des années 80 [13].

A titre indicatif, les investissements pétroliers mondiaux ont atteint 561 milliards de \$ en 2011 et 623 milliards de \$ en 2012. La part consacrée à la prospection/exploration est estimée à environ 20% (en moyenne, 5% pour l'observation à la surface et 15% à l'étude des profondeurs) de ces investissements, soit près de 100 milliards de \$ par an. Ce montant est considérable pour une activité à haut risque technique, dépendant fortement des cours du baril. Le risque d'échec est important. Un forage d'exploration représente généralement 60% du budget d'exploration selon IFP Energies nouvelles. Il est évalué entre 3 et 5 millions d'euros en exploration onshore et entre 8 et 20 millions d'euros en offshore et dure en moyenne entre un et quatre mois. Certains sont très profonds et peuvent coûter jusqu'à 100 millions d'euros par puits [19].

Chapitre I : Généralités sur le forage

Grace à ces importants investissements, la technologie de forage a été développée. Ainsi les profondeurs des horizons géologiques explorés et exploités ne cessent d'augmenter (figure I-1). Il n'est plus rare en effet de réaliser des forages à des profondeurs supérieures à 4500 m, dans des conditions que l'on qualifie de haute pression haute température (HPHT) (figures I-7). Au-delà de la profondeur, les contextes de forage se sont étendus à des environnements plus complexes d'un point de vue structural et stratigraphique : zones faillées, zones de chevauchement,... etc [6]. Les coûts des forages augmentent en fonction de la profondeur du puits et de la nature du chantier (Figure I-8) [21].

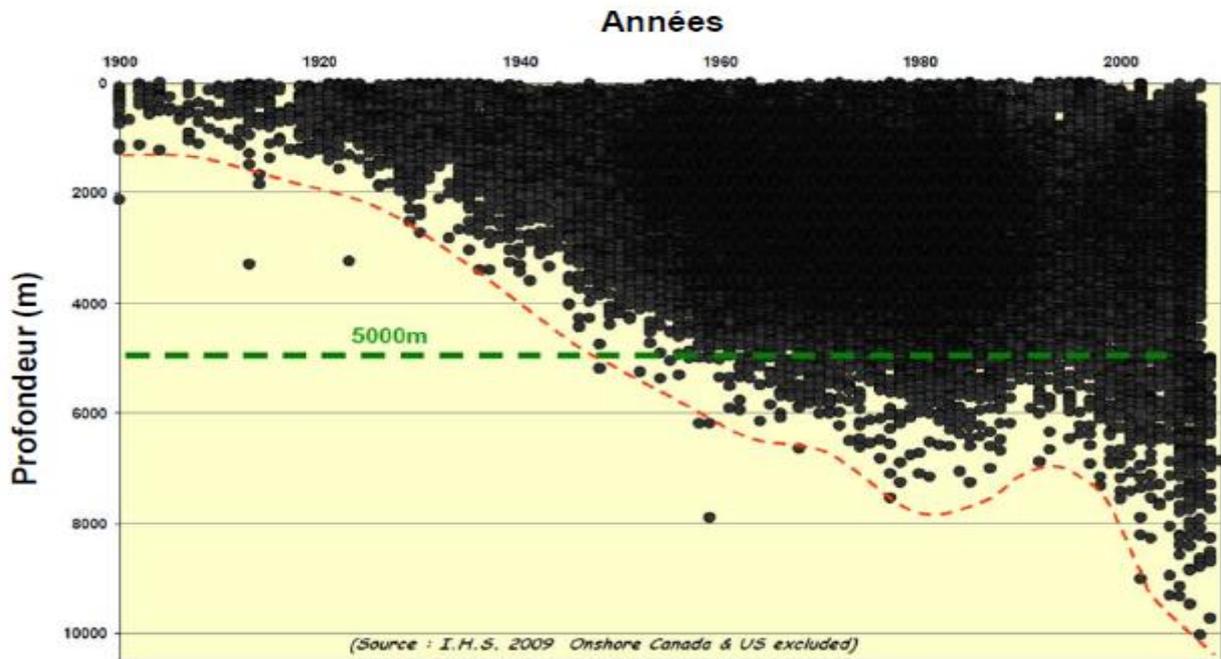


Figure I-6 : Evolution de la profondeur des puits d'exploration d'hydrocarbures en fonction des années [20]

Chapitre I : Généralités sur le forage

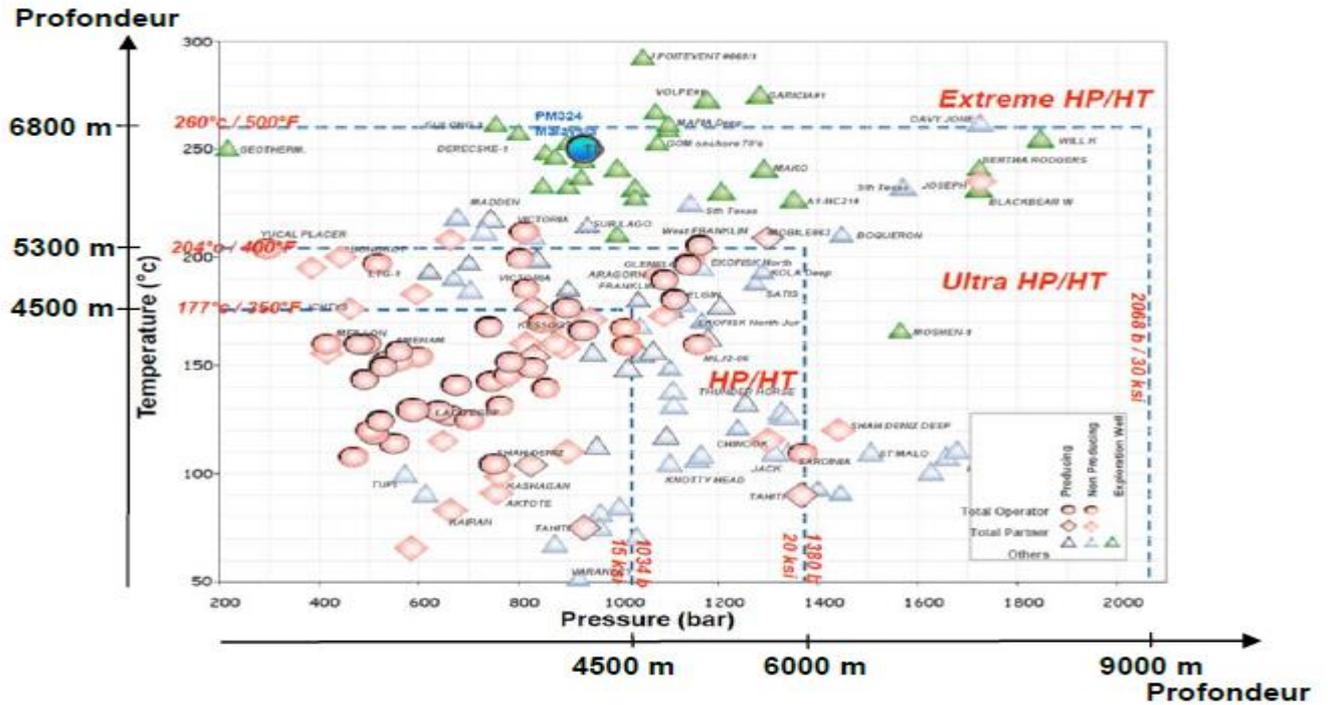


Figure I-7 : Limites actuelles des pressions et températures opérées en exploration et en exploitation pétrolière [20]

Les profondeurs correspondantes indiquées ont été calculées en considérant un gradient géothermique moyen de 3,6°C/100m et un gradient litho statique de 2,3 bars/10m [20].

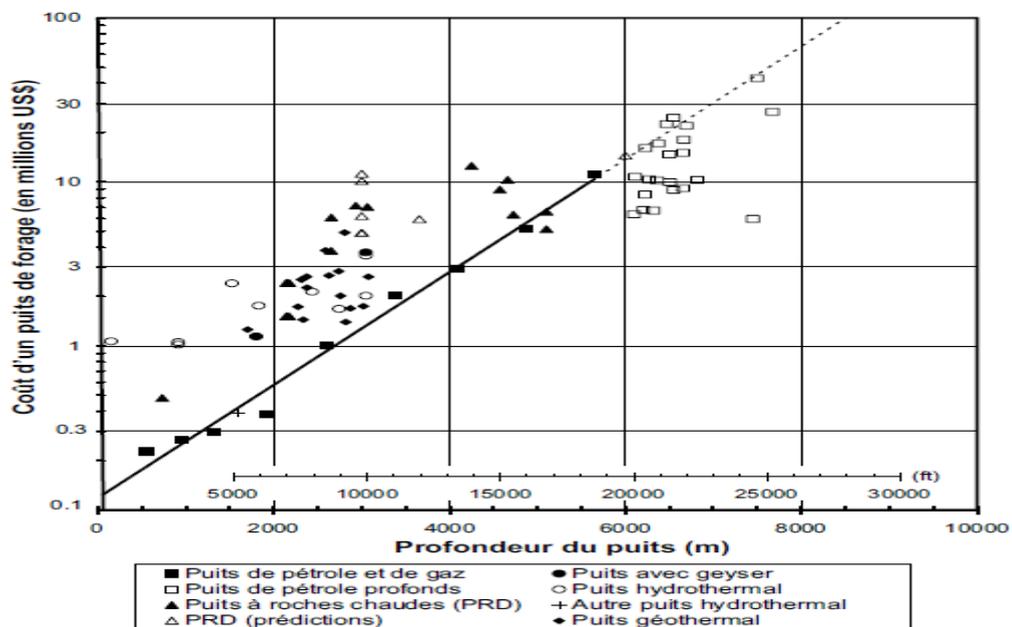


Figure I-8 : Coût d'un forage en fonction de la profondeur du puits et de la nature du chantier pour l'année 2003 [21]

Chapitre I : Généralités sur le forage

I.3 Différents types de forage

Plusieurs techniques de forages ont été développées en fonction du type d'ouvrage recherché et du contexte géologique. Nous présentons trois techniques courantes de forage.

I.3.1 Forage par battage

Le forage par battage est la technique la plus ancienne, simple de conception, elle présente un intérêt surtout dans les terrains sédimentaires [9] [10].

- **Principe de fonctionnement :**

Technique très ancienne, la perforation s'effectue à l'aide d'un câble muni à sa base d'un outil appelé trépan de forme soit mono lame, bilame ou cruciforme, de diamètre variant entre 300 à 1200 mm (figure I.2). Cet outil est suffisamment lourd (de 400kg à 3 tonnes) pour qu'il puisse donner au câble une extension parfaite et pour minimiser tant que possible les déviations du trou. L'avancement de l'outil est régi par des mouvements de percussions qui lui sont transmis par le câble. Cette technique de forage nécessite une injection de l'eau, depuis le début de la pénétration jusqu'à la rencontre de la première venue d'eau, et ceci pour refroidir et lubrifier l'outil qui s'échauffe au cours de sa traversée des formations géologiques [1].

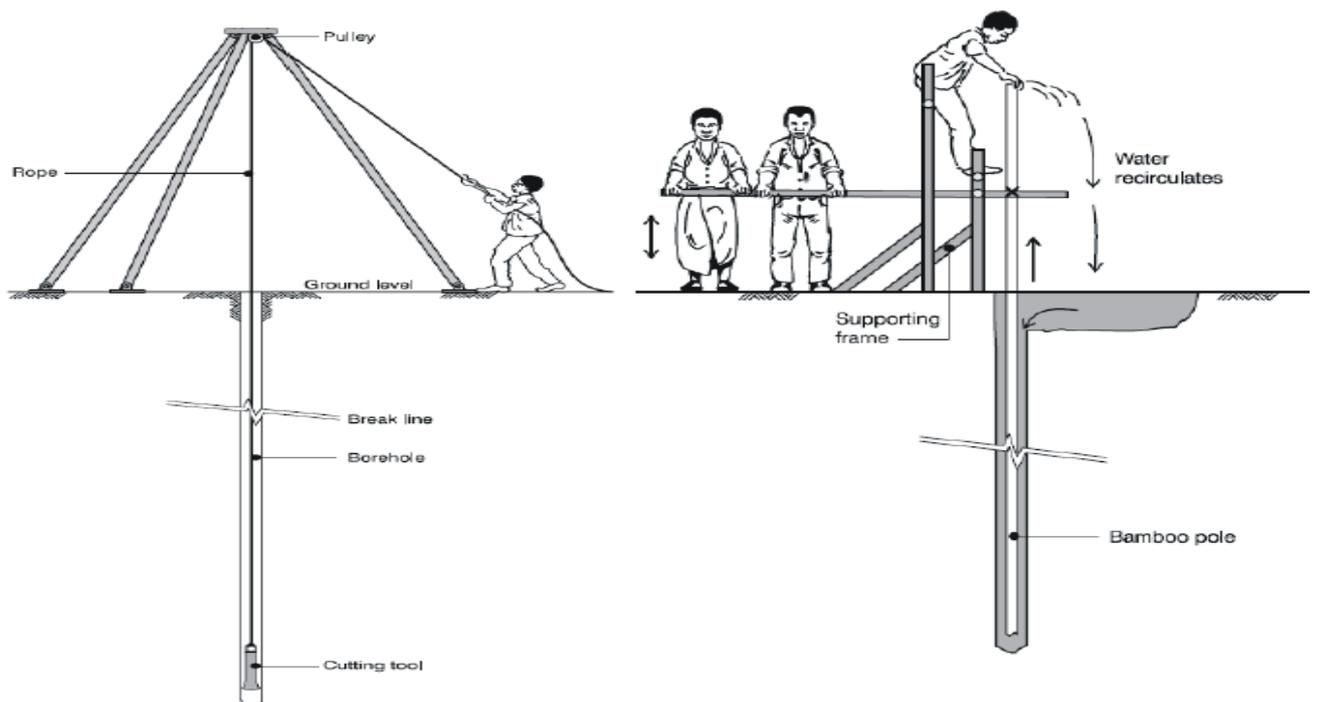


Figure I.9: Principe de la technique de forage au battage [1]

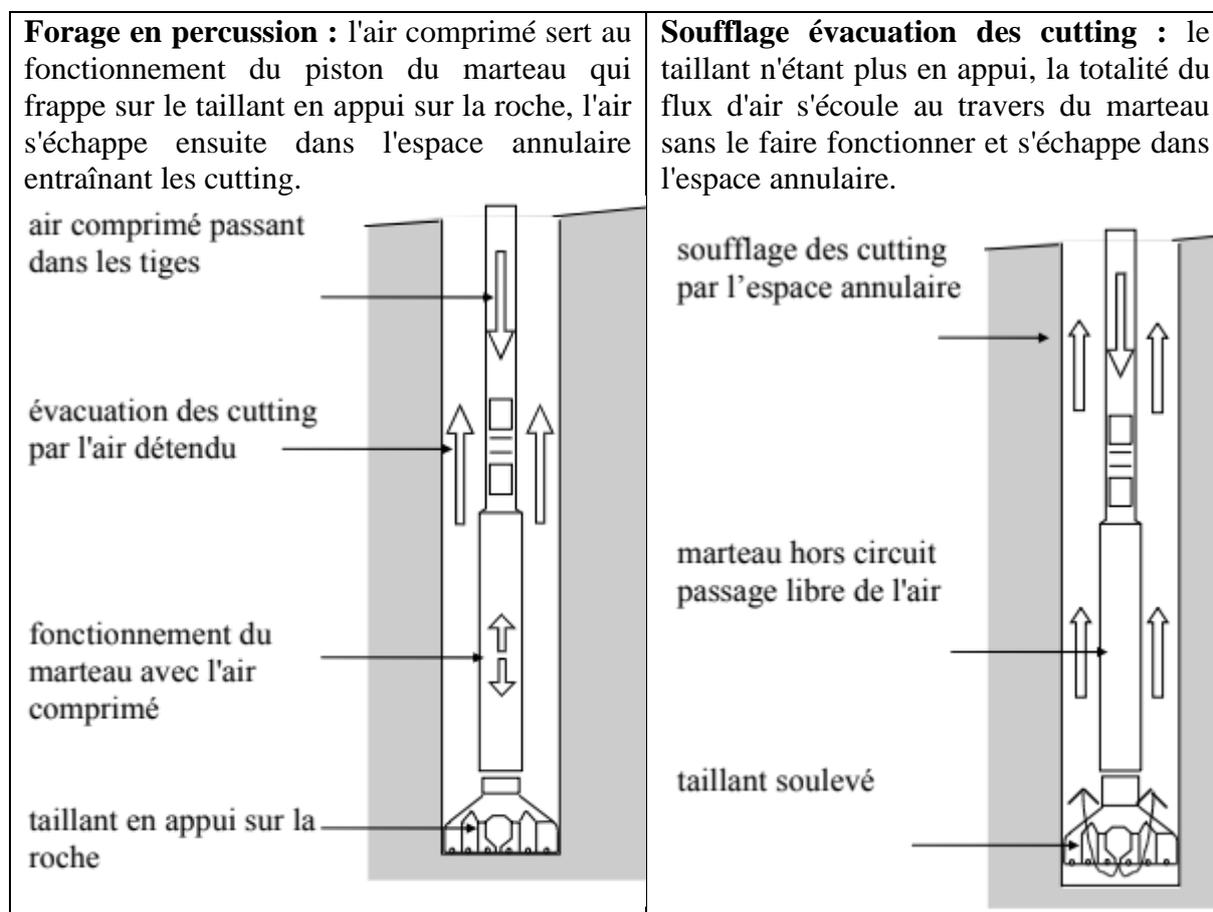
I.3.2 Forage par marteau (MFT)

Cette technique permet de traverser des terrains durs comme le rocher (granites) ou sédimentaires consolidées (grès, calcaires). Un taillant à boutons en carbure de tungstène, fixé directement sur un marteau pneumatique, est mis en rotation et percussion pour casser et broyer la roche du terrain foré. Le marteau fonctionne comme un marteau piqueur, à l'air comprimé qui est délivré par un compresseur en plus de la machine de forage. Le flux d'air permet de

Chapitre I : Généralités sur le forage

remonter les débris de roches, appelés aussi "les cutting du terrain". On distingue 2 phases, la percussion et le soufflage [11].

Tableau I.I-1 : Principe et phases de fonctionnement du Marteau Fond de Trou MFT [11]



I.3.3 Forage Rotary

Face à la complexité des puits forés aujourd'hui, 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 [22]. La plupart des forages pétroliers actuels sont forés suivant la technique dite "rotary" qui est apparue dans les années 30 [23].

I.4 Composition d'un forage

Un forage est un système complexe formé d'un ensemble de systèmes, il est composé essentiellement de deux parties (figure I-10) :

- L'installation de forage ;
- La garniture.

Ces parties sont donc constituées de plusieurs systèmes.

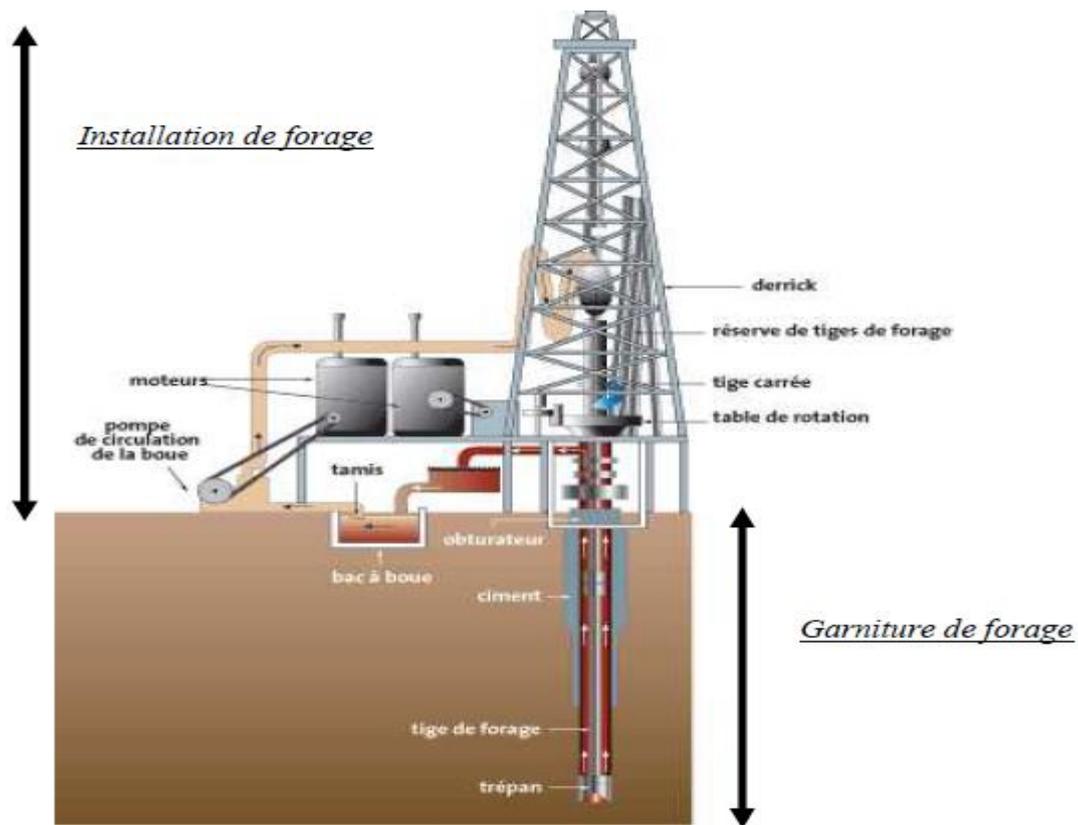


Figure I-10 : Processus de forage [24]

I.4.1 L'installation de forage

L'installation de forage est la partie située à la surface du sol. Elle comprend une tour, appelée derrick ou mât, sur laquelle sont situés les équipements de levage et de plancher qui permettent la manutention, le vissage et dévissage des tiges et le changement de l'outil (trépan) [25].

- **Le système de suspension :**

La tâche dédiée au système de suspension réside dans les déplacements du processus de forage (montée, descente) et dans le contrôle du poids appliqué sur l'outil. Il dispose d'un derrick, pouvant présenter une hauteur de plus de 80 mètres, un crochet et un treuil motorisé. Le derrick représente le point culminant de la plateforme. C'est une tour métallique qui soutient une tige au bout de laquelle se situe le trépan. La tige est rallongée au fur et à mesure que le trépan opère (figure I-10) [24].

- **Le système de rotation :**

Pour faire tourner l'outil, on visse au sommet des tiges, de forme cylindrique, une autre de section carrée ou hexagonale, appelée tige d'entraînement, et on l'introduit dans un moyeu appelé table de rotation. La section carrée est entraînée par la table de rotation. Ce système permet de transmettre le mouvement de rotation de la table à la tige d'entraînement, ainsi le mouvement de translation s'effectue sans risque de frottement sur les côtés et donc d'usure. La table sert aussi de calage de la garniture de forage lors de la manœuvre dans le puits [17].

- **Le système hydraulique :**

Chapitre I : Généralités sur le forage

Il assure la circulation de la boue de forage et il est associé à une station de pompage servant au traitement du fluide de forage : la boue est en effet un mélange d'eau, d'argile et d'additifs. Une injection continue de boue dans le puits s'effectue pendant toute la durée du forage.

Les pompes à boue aspirent la boue des bassins par l'intermédiaire d'un tuyau flexible placé à l'intérieur du train de tiges et remontant par l'espace annulaire compris entre les tiges et le puits. La circulation de la boue contribue à la lubrification des pièces en mouvement, à leur refroidissement et à l'excavation par évacuation vers la surface des fragments de roches arrachés par le trépan ; mais aussi à l'équilibre hydrostatique du puits et éventuellement à la rotation du trépan au travers d'une turbine. Enfin, la boue est d'une grande utilité pendant l'opération de forage car son analyse fournit des éléments sur la nature géologique des milieux traversés [25].

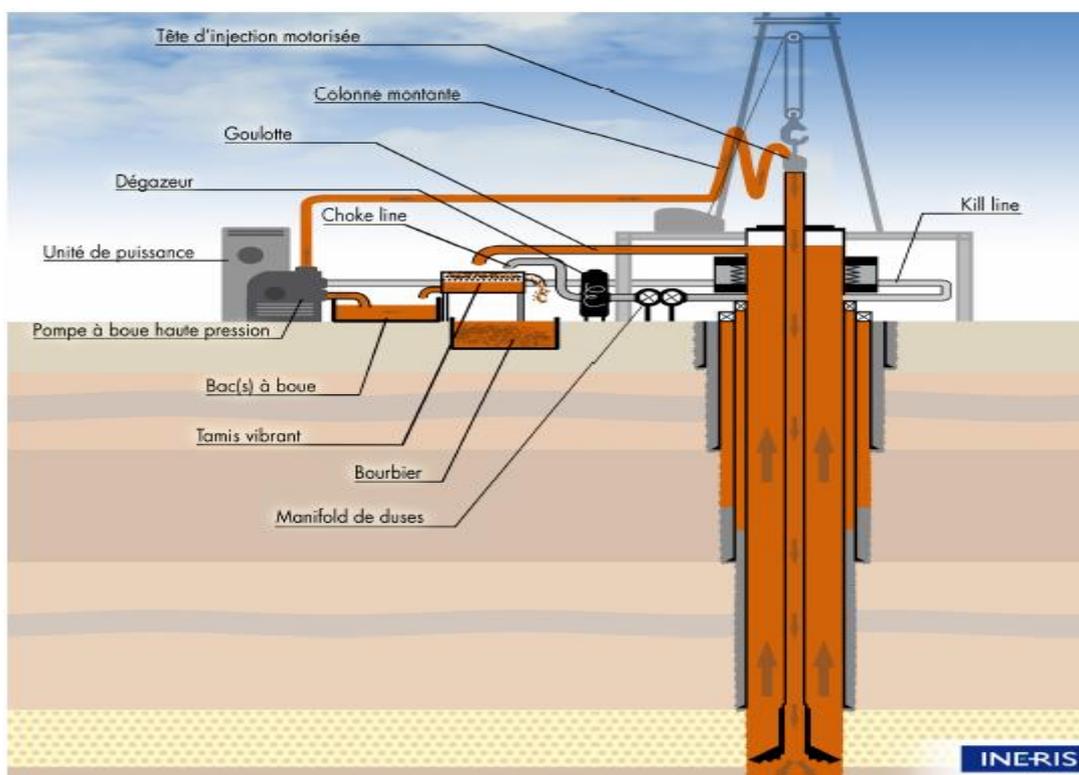


Figure I-11 : Schéma de principe du circuit boue [7]

- **Le système d'alimentation :**

Les moteurs électriques ou hydrauliques sont les sources d'alimentation les plus fréquentes dans l'industrie pétrolière. L'énergie produite est transmise sous forme électrique ou mécanique vers les différents constituants de l'installation : pompe de rotation, treuil, et table de rotation [24].

- **Le système de contrôle du puits :**

Chapitre I : Généralités sur le forage

Il sert à détecter et gérer les apparitions soudaines des fluides sous pression ; ces irrptions, connues sous le nom de kick, peuvent être extrêmement violentes [25].

I.4.2 La garniture de forage

La garniture, désignée aussi par arbre de forage en raison de la mécanique de liaison qu'elle établit entre la motorisation rotative en surface (*table de forage*) et le trépan, correspond à la partie opérative dans le puits. Elle effectue plusieurs tâches dont la transmission de l'énergie nécessaire à la désagrégation de la roche, le guide et le contrôle de la trajectoire du puits, la transmission de la force de poussée ainsi que la circulation du fluide. Elle est constituée essentiellement des masses tiges (*Drill Collars*) et des trains de tiges (*Drill pipes*). A cela se greffent des accessoires tels que les stabilisateurs des masses tiges, les amortisseurs de choc, les systèmes de mesures, ...etc [24].

- **Un outil de forage :**

A l'extrémité basse de la garniture, on trouve l'outil. Il est entraîné en rotation et permet la progression de la garniture par son action directe sur le front de taille. On distingue deux types d'outils, à molettes (tricônes) et monoblocs (diamant, PDC).

- **Des masses-tiges (*Drill Collars, DC*) :**

Il s'agit d'une série de tubes massifs en acier dont le rôle est d'assurer une poussée suffisante sur l'outil. Par conséquent, pendant la phase de forage, le train de masses-tiges est en partie, voire en totalité, en état de compression.

- **Un train de tiges (*Drill Pipes, DP*) :**

C'est la partie la plus longue de la garniture ; elle est constituée d'une série importante de tubes minces d'acier qui s'étendent jusqu'à la surface et dont le rôle est de transmettre le couple vers l'outil et de soutenir plus ou moins le train de masses tiges. Chaque tige est munie à ses extrémités de renflements appelés *tool-joint* (TJ) servant pour le vissage des tiges entre elles et comme points d'appui du train de tiges sur la paroi de puits. En conditions normales, on s'arrange pour que le train de tiges soit en traction afin d'éviter son flambement car celui-ci favorise l'apparition de forces de contacts très élevées entre tiges et parois de puits. Ce train de tiges comporte parfois (cas du forage dirigé ou du forage horizontal) une série supplémentaire de tiges lourdes (*Heavy weight Drill Pipe, HWDP*) plus épaisses placées souvent juste après les masses tiges. Ces tiges lourdes ont pour but de réduire les risques de flambement des tiges.

Chapitre I : Généralités sur le forage



Figure I-12 : Quelques éléments de la garniture de forage [26]

Parmi les éléments complémentaires, on trouve :

- **Le système de déviation :**

Ce système comporte le plus souvent des stabilisateurs et/ou des moteurs fonds du trou (PDM). Les stabilisateurs sont des tubes d'une longueur souvent de 2m et dotés sur leur pourtour de lames droites ou spiralées (figure 1.2). Leur rôle essentiel est de contrôler la direction de forage en jouant sur leur nombre et leurs positions. On distingue deux types de stabilisateurs : ceux à diamètre fixe et ceux à diamètre variable pouvant être actionnés hydrauliquement ou mécaniquement à partir de la surface. Les moteurs fond du trou (PDM) sont incorporés dans la partie inférieure de certaines garnitures afin de permettre la rotation de l'outil de forage indépendamment de la rotation du train de tiges. Ce procédé est généralement utilisé pour amorcer des déviations ou pour faire des corrections de trajectoire (mode *sliding*).

- **Les appareils de mesures (MWD) :**

Ce sont des appareils embarqués avec la garniture afin de mesurer l'évolution des certains paramètres comme l'inclinaison et l'azimut en fonction de la profondeur forée.

- **Les raccords :**

Ce sont des pièces mécaniques servant à raccorder les différents composants de la garniture (PDM/DC, DC/HWDP, HWDP/DP, Etc.). Elles sont généralement de petite taille afin de ne pas encombrer la garniture [26].

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

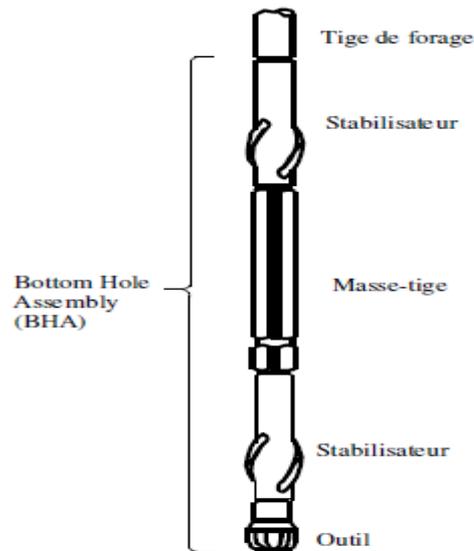


Figure I-13 : Composants de la partie inférieure de la garniture [26]

- **Le trépan :**

Une variété de trépan existe, présentant des géométries spécifiques. Les trépan sont conçus pour forer une certaine gamme de roches et sont choisis en fonction des puits à réaliser. Il existe deux catégories :

- Les trépan tricônes ;
- Les trépan monobloc de type PDC (diamants synthétiques polycristalline).

Les trépan tricônes sont principalement composés d'acier ou de carbure de tungstène. Tandis que les monoblocs de type PDC sont composés de diamants ou de diamants synthétiques. La grande différence entre ces deux familles de trépan réside dans leurs façons d'arracher la roche [27].



Figure I-14 : Types de trépan [28]

I.5 Paramètres de forage

Les paramètres de forage sont les différents facteurs mécaniques et hydrauliques (les grandeurs physiques) agissant sur la vitesse de progression (ROP : Rate of Penetration) le ROP correspond à la profondeur forée par heure (mètres /heures). L'optimisation de la vitesse de progression est

Chapitre I : Généralités sur le forage

un aspect très important dans l'analyse du processus de forage, car elle est directement liée au temps passé sur une installation sur terre ou marine.

- **Le poids sur l'outil WOB (Weight on Bit) :**

Ce paramètre désigne la force appliquée par la garniture sur l'outil suivant son axe de révolution. Cette force dépend du poids propre de la garniture, de la poussée d'Archimède due au fluide de forage et de la tension du câble de soutien de la garniture, en surface. Les grandeurs usuelles de WOB s'étendent typiquement entre 10 kN et 103 kN [29].

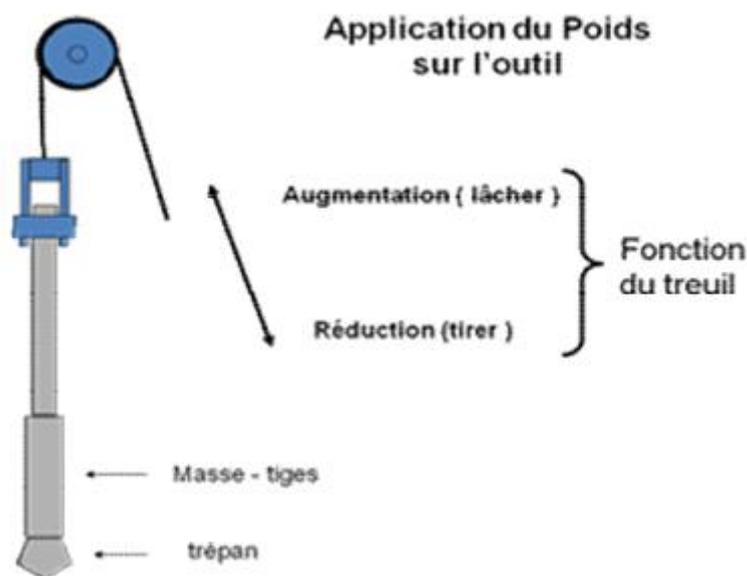


Figure I-15 : Application du poids sur l'outil [30]

- **La vitesse de rotation :**

Le choix de la vitesse de rotation dépend de celui du WOB. En surface, elle peut être précisément contrôlée mais elle peut être différente de la vitesse de rotation du trépan. Les vitesses de rotation usuelles se situent entre 60 et 250 RPM (tours/min).

- **Le couple exercé sur l'outil TOB (Torque On Bit) :**

Ce paramètre correspond au couple transmis par la garniture au trépan suivant son axe de révolution. Compte tenu des frottements du train de tiges contre la paroi du puits, ce couple est nettement inférieur à celui mesuré en surface. Ainsi, le couple *TOB* représente les effets combinés du couple réactif et des forces de frottement non linéaires sur la longueur du BHA.

I.6 Vibrations du train de tige

Des faits des paramètres dynamiques de forage et des résistances du sol, le phénomène de vibrations est récurrent au cours des opérations de forage pétrolier, il constitue la cause majeure de la fatigue des systèmes de forage.

Chapitre I : Généralités sur le forage

Les vibrations de la garniture sont décomposées selon trois modes : axial, de torsion et latéral. Généralement, les trois types de vibrations se produisent simultanément durant le processus de forage et dans certains cas il est difficile de les identifier séparément. Les vibrations les plus sévères se produisent au niveau du BHA (Bottom Hole Assembly - figure I-13). Elles sont responsables de la réduction de la vitesse du forage et donc de l'augmentation des coûts.

- **Vibrations latérales :**

Ce sont des vibrations pour lesquelles le mouvement se fait perpendiculairement à l'axe des trains de tiges. Le phénomène de "précession", qui est le changement graduel d'orientation de l'axe de rotation, peut se déclencher lorsque l'amplitude de ces vibrations devient considérable. Ce phénomène se produit lorsque les tiges voient leur centre s'écarter de l'axe du puits, et qu'en plus de tourner sur elles-mêmes (rotation propre), elles tournent autour du puits (précession).

- **Vibrations axiales :**

Le mouvement se fait selon l'axe du train de tiges. Ces vibrations peuvent dégénérer dans certaines conditions en "rebond de l'outil" ou "bit-bounce". Il s'agit d'un phénomène de rebonds successifs de l'outil de forage avec séparation périodique à l'interface outil-roche, phénomène propre à la coupe discontinue. Le phénomène de bit-bounce se manifeste préférentiellement lorsqu'il y a accord entre la vitesse de rotation et une fréquence propre axiale du train de tiges. Le bit-bounce peut engendrer le "Bouncing" de surface, c'est à dire, l'entrée en résonance du système de suspension de la garniture en surface provoquant ainsi un mouvement alternatif en translation de forte amplitude.

- **Vibrations de torsion :**

Les vibrations de torsion se manifestent sous la forme d'un phénomène d'adhérence et de glissement, appelé "stick-slip". Le phénomène de Stick-Slip, associé aux vibrations de torsion, provoque des arrêts cycliques de l'outil sur des périodes pouvant représenter jusqu'à cinquante pour cent du temps de forage. Pendant ces périodes d'arrêt, les tiges, entraînées en rotation depuis la surface, sont mises en torsion grâce à leur élasticité propre. L'outil ne redémarrera que lorsque le couple au fond sera supérieur au couple de frottement statique. La détente des tiges provoque alors une forte accélération favorisée par le fait que le couple de frottement dynamique est inférieur au couple statique. La vitesse de rotation instantanée peut atteindre le triple, voire plus, de la vitesse de surface. Ceci permet une relaxation de la garniture. Le couple au fond passe alors en dessous du couple de frottement dynamique, ce qui arrête à nouveau la rotation de l'outil.

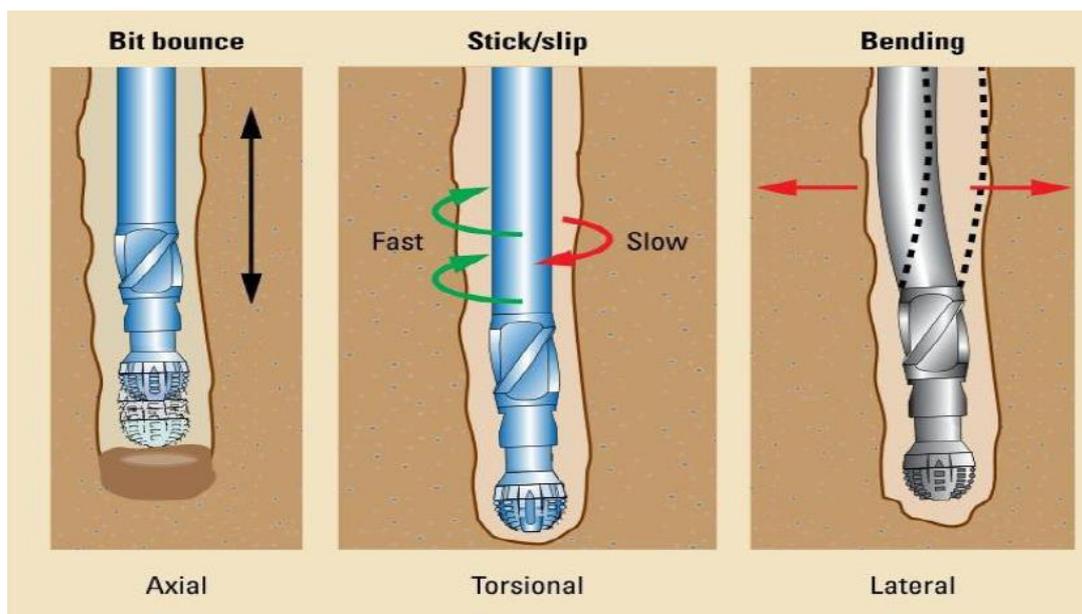


Figure I-16 : Vibrations du train de tige [31]

I.7 Tubage

Tout programme de forage est développé selon les normes de base correspondantes aux différentes couches de sol ou différentes formations à parcourir, citons :

- Le type et la pression de la formation envisagée ;
- La localisation de l'aquifère ou du terrain perméable et poreux ;
- La dépollution formelle des zones sensibles aux hydrocarbures ;
- La localisation et l'identification des zones pouvant présenter des risques de problèmes techniques.

Toutes ces conditions ont permis le développement de procédures et d'outils de planification assez performants pour exécuter "en douceur" avant et après l'opération. Le forage d'un puits passe généralement par plusieurs étapes (figure I-17). Le passage d'une étape à l'autre entraîne une diminution du diamètre du puits qui devient de plus en plus petit. Le forage est complété, à la profondeur prévue et à un stade donné, l'ensemble de la garniture est ramené en surface pour le changement d'outil et pour le lancement de l'étape de l'équipement du fond (BHA).

Mais avant le lancement de la nouvelle étape, la phase déjà forée doit être tubée et cimentée. Le tubage consiste à faire passer des tuyaux en acier (casing) dans le puits pour le renforcement au fur et à mesure que le forage progresse. Cette opération est très importante dans la construction d'un puits de forage, elle prépare l'infrastructure de production après atteinte de la cible. L'opération revêt un caractère très dangereux en raison des faibles jeux des trous de tubage, de l'impossibilité pratique de faire tourner la colonne de tubage et les possibilités de chutes à travers le seul tube d'ajout. Le tubage est réalisé d'une étape de forage à une autre étape de forage surface. A la fin de la descente et à chaque étape, il est bouclé directement par injection du fluide par l'intérieur du tube et retour par l'annulaire. Le collage est obtenu par le dépôt du ciment dans l'annulaire. La qualité de la cimentation dépend de la façon dont le ciment

Chapitre I : Généralités sur le forage

s'écoule dans l'annulaire et l'adhérence est assurée par une épaisseur adéquate de l'anneau de ciment. Le corps du tuyau et la paroi du puits sont étanches et résistants. Une bonne architecture du tubage dépend de la prise en compte du tubage lui-même et surtout d'un dégagement adéquat des parois du puits (figures I.17 et I.18).

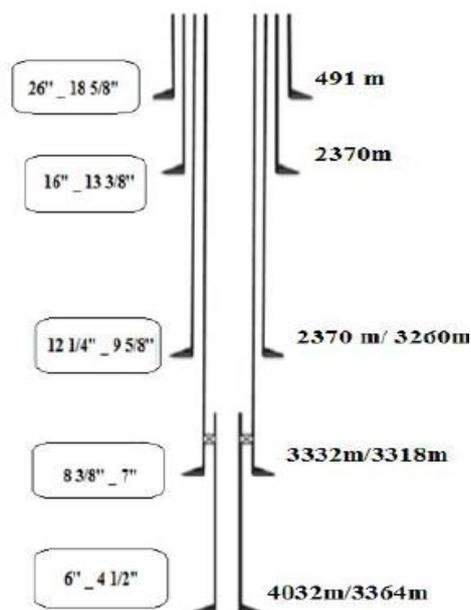


Figure I-17 : Exemple d'architecture d'un puits

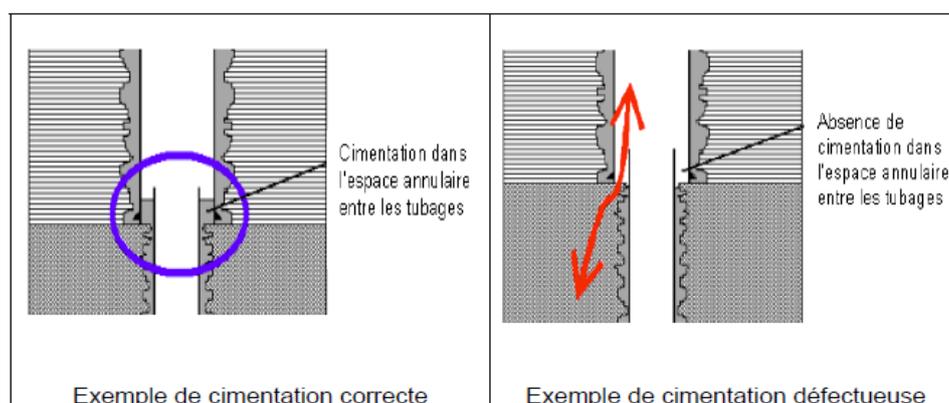


Figure I-18 : Détails des cimentations (correcte et déficiente) au niveau des télescopes dans l'espace annulaire entre les tubages [32]

Il existe plusieurs méthodes de cimentation :

- Cimentation par les tiges ;
- Cimentation par le tube ancré ;
- Cimentation par le tube suspendu ;
- Cimentation par canne dans l'annulaire.

Les trois premières méthodes de cimentation s'appliquent uniquement pour les forages en gros diamètres et relativement profonds. La quatrième est utilisée pour les forages de moins de 50 mètres.

Chapitre II :
Système de forage

II. Système de forage

II.1 Théorie de coupe et actions géométriques et mécaniques du trépan

II.1.1 Actions géométriques

Dans la littérature du forage, en particulier celle du forage rotary à outil PDC (en diamant synthétique poly cristallin), l'accent est surtout mis sur l'importance de trois angles caractérisant les têtes de forage et les pastilles PDC, il s'agit de :

1. L'angle de coupe W_c (back rake angle) ;
2. L'angle de dépouille W_d (clearance angle) ;
3. L'angle latéral W_s (side rake angle).

Comme en théorie de coupe, ces angles sont formés par les faces d'attaque et de dépouilles de la partie active, ils conditionnent donc la forme de la partie coupante de l'outil ou de la plaquette. Pour exécuter la coupe ou le cisaillement demandé, plusieurs conditions doivent être réunies parmi lesquelles il y a la forme, c'est à dire la géométrie de l'outil, et aussi la nature du matériau de coupe.

- **L'angle de coupe W_c :**

C'est l'angle entre la face de coupe de la pastille et la normale à la surface de l'outil. Si l'angle de coupe diminue (inclinaison postérieure), l'action coupante devient plus efficace. C'est-à-dire qu'avec le même poids sur l'outil, une coupe plus profonde sera faite avec une inclinaison postérieure moins accentuée. L'angle de coupe W_c est généralement compris entre 10-15° suivant les fabricants.

- **L'angle de dépouille W_d :**

C'est l'angle entre la face arrière de la pastille et le fond de saignée creusée. Il est normalement égal à l'angle de coupe, mais l'apparition d'usure sur le PDC entraîne sa réduction jusqu'à une valeur nulle. Il résulte alors un accroissement de l'effort normal F_n et une réduction des performances de l'outil.

- **L'angle latéral W_s :**

C'est l'angle qui détermine l'inclinaison de la pastille par rapport à sa trajectoire de coupe, il représente l'angle de direction de l'arête de coupe. Il réside dans le fait que les copeaux des roches sont poussés non seulement suivant la direction de coupe mais aussi vers les parois du forage.

L'inclinaison latérale est étudiée de façon à ce que tous les cutters ou pastilles soient en position de travail en même temps et toujours avec un maximum de surface d'attaque. Étant donné que chaque cutter a un angle différent selon sa position sur la face de l'outil, cet angle peut être défini par calcul.

En résumé, on peut dire que l'inclinaison latérale des pastilles PDC a un effet positif sur le travail des pastilles en améliorant les performances de l'outil, car cette inclinaison permet un bon nettoyage des pastilles sans gêner la génération des copeaux.

Chapitre II : Système de forage

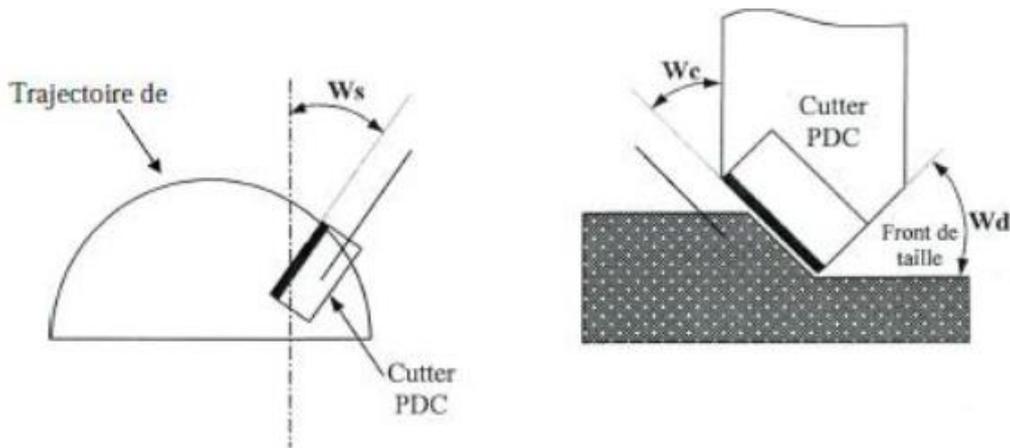


Figure II-1 : Schéma représentant les différents angles de forage.

En théorie de coupe, en dehors des angles principaux qui participent directement à la coupe et plus exactement au cisaillement, d'autres angles dans les mêmes plans de références sont non moins importants dans la réalisation de la fonction cisaillement. Il s'agit surtout des angles d'arêtes (figure II-2) tels :

- Angle de direction d'arête χ_r : mesuré dans P_r entre P_s et P_f ;
- Angle d'inclinaison d'arête λ_s : mesuré dans P_s entre l'arête et P_r ;
- Angle de direction complémentaire ψ_r : mesuré dans P_r tel que $\psi_r + \chi_r = \pi/2$;
- Angle de pointe ε_r : mesuré dans P_r entre l'arête principale S et l'arête secondaire S' .

Ainsi que d'autres angles composés ou formés tels :

- Angle de formation du copeau qui englobe l'angle d'attaque ;
- Angle de cisaillement, formé par le plan de cisaillement et la surface cisailée.

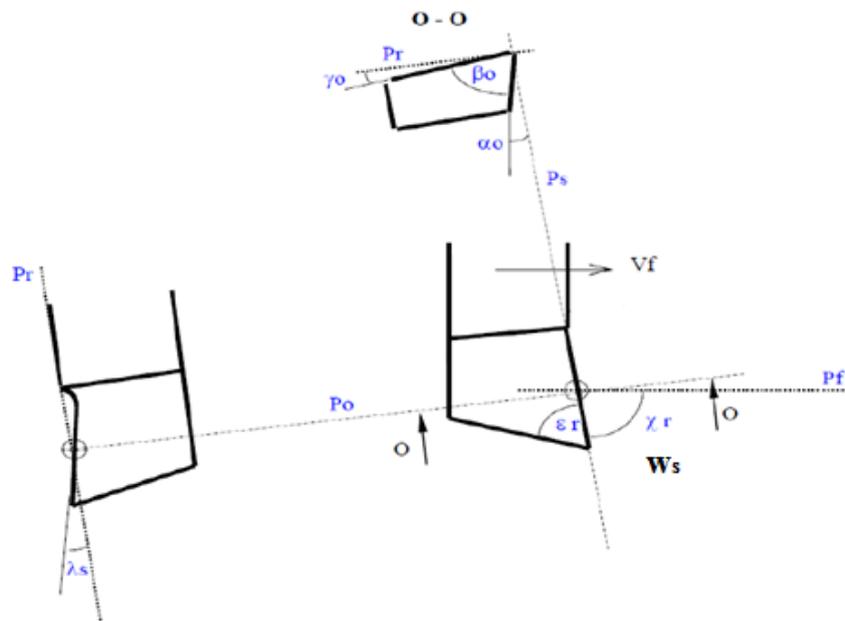


Figure II-2 : Angles d'arêtes et angle orthogonaux des faces

Chapitre II : Système de forage

En définitif, les angles caractéristiques indiqués dans les techniques de forage sont les mêmes que les angles principaux, définis en théorie de coupe ; il s'agit des angles orthogonaux des faces.

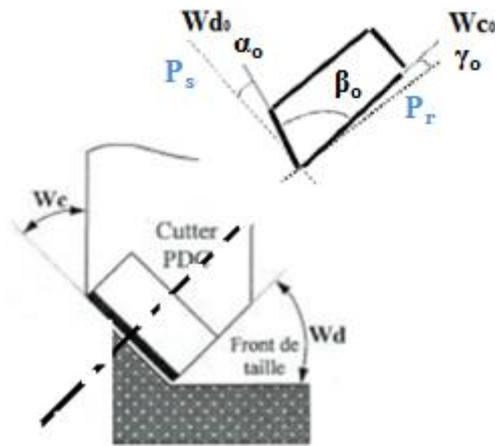


Figure II-3 : Principaux angles orthogonaux des faces d'outil de forage.

- Angle orthogonal de dépouille α_o : Angle mesuré dans P_o entre P_s et la face de dépouille $A\alpha$, son équivalent est l'angle Wd_o (figure II-3) ;
- Angle orthogonal de coupe γ_o : Angle mesuré dans P_o entre P_r et la face de coupe $A\gamma$, son équivalent est Wc_o (figure II-3) ;
- Angle de direction de l'arête χ_r : Angle mesuré dans P_r entre P_s et P_f , son équivalent est Ws (figure II-2) ;
- Angle orthogonal de taillant β_o : Angle mesuré dans P_o tel que $\alpha_o + \beta_o + \gamma_o = \pi/2$.

II.1.2 Actions mécaniques

En forage rotary, la force F se décompose en deux composantes : la composante de coupe F_C et la composante de frottement F_f .

La force de coupe F_C est composée, quant à elle, d'une composante normale F_{CN} et d'une composante tangentielle F_{CS} (figure II-3).

L'existence de frottement lors de l'interaction entre le trépan et la roche (figure II-4) relie les composantes F_{fN} et F_{fS} par :

$$F_{fS} = \mu * F_{fN} \text{ où } \mu \text{ désigne le coefficient de frottement.}$$

Partant de ces décompositions (Detournay, 1990) :

Équation II-1 : les forces tangentielles et les forces normales

- Les forces tangentielles $F_S = F_{CS} + F_{fC}$;
- Les forces normales $F_N = F_{CN} + F_{fN}$.

Chapitre II : Système de forage

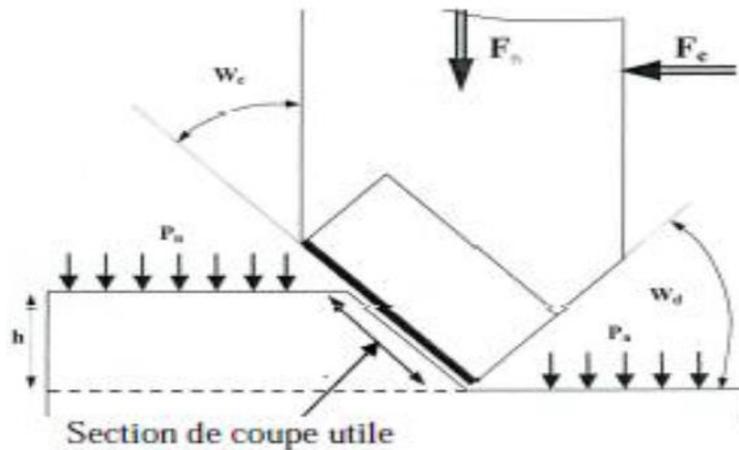


Figure II-3 : Schéma des différents efforts appliqués sur le cutter

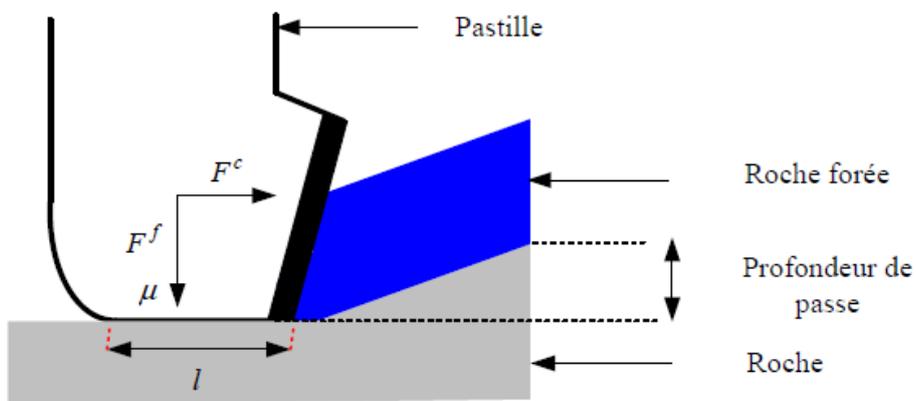


Figure II-4 : Interaction pastille - roche

En coupe des métaux, la force de coupe F_c se décompose en trois composantes (figure II-5) :

- Composante axiale ;
- Composante radiale ;
- Composante tangentielle.

- **Composante axiale F_a (F_x) :**

La composante F_a de la force de coupe est dans la même direction que le mouvement d'avance (M_f), elle est égale à la résistance du métal à usiner dans la direction de l'avance et des forces de frottement. En conception des machines-outils, sa détermination est nécessaire dans le calcul de la rigidité de l'appui l'organe terminal (broche) et du mécanisme des avances de la machine.

- **Composante radiale F_r (F_y) :**

Chapitre II : Système de forage

La composante F_r de la force de coupe est dans la même direction que le mouvement de profondeur (M_a), elle peut être la cause du fléchissement de l'axe des broches, source de vibrations non souhaitées.

- **Composante tangentielle F_t (F_z) :**

La composante F_t est dans la même direction que le mouvement de coupe (M_c), elle est la principale et la plus importante, au point où elle est souvent assimilée à la force de coupe. Elle est constituée de la somme des actions des forces de résistance du métal : rupture, déformation du copeau, frottement... etc.

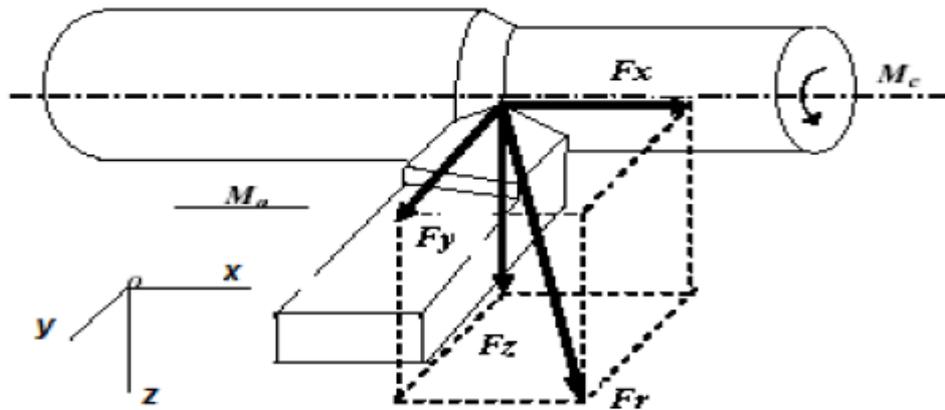


Figure II-3: Interaction outil-pièce et composants de la force de coupe.

II.1.3 Calcul de la poussée et de la vitesse de rotation en rotary

Conformément à la norme EN ISO 22475-1, en forage en rotation, les paramètres enregistrés sont les pressions hydrauliques de poussée p , de couple P_{CR} et de retenue P_R , la pression du fluide d'injection P_F et l'avance A de l'outil, la vitesse de rotation de la tête VR ainsi que le débit du fluide QI . Certains de ces paramètres nécessitent une mise à l'échelle afin de disposer de mesures représentatives de l'action de l'outil [33].

- **Poussée sur l'outil :**

En forage Rotary, la poussée théorique minimum sur un tricône est de l'ordre de 450 kg par pouce du diamètre de l'outil et de 225 kg pour un trilame.

Soit pour un trilame de 6'' (150 mm), une poussée minimum de 1350 kg et de 2700 kg pour un tricône de même taille.

- **Vitesse de rotation :**

C'est la vitesse d'un point situé sur la périphérie de l'outil (vitesse tangentielle), c'est à dire le temps que met ce point à parcourir une certaine distance. Pour calculer le nombre de tours par minute la formule est la suivante :

Chapitre II : Système de forage

Équation II-2 : la vitesse de rotation

Rotation par minutes (tours/mn) = Distance par minute / $\pi * d$

Ou d = diamètre de l'outil en mètres.

En forage rotary, la vitesse tangentielle minimale doit être de 60 mètres par minutes. La vitesse de rotation, quant à elle est de 127 tours/minutes.

- **Couple**

Pour un forage rotary, le couple minimum conseillé est de 2000 N.m par pouce de diamètre d'outil utilisé. Un coefficient de sécurité de 1,33 est appliqué. Soit pour un outil de 150 mm (6'') un couple de 16 kN.m [11].

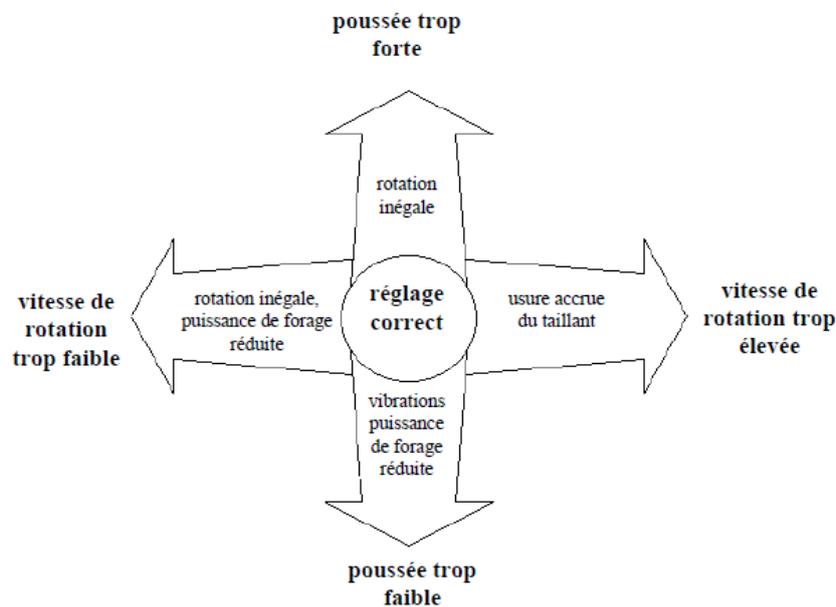


Figure II-4 : Schéma de principe et réglage de la poussée / rotation [11]

- **Fréquence de rotation N et vitesse de coupe V_c :**

En coupe des métaux, la vitesse de rotation, exprimée généralement par la lettre N , se calcule à partir du diamètre de la partie de la pièce à usiner et de la **vitesse de coupe** par la formule :

Équation II-3 : la fréquence de rotation N et vitesse de coupe V_c

$$N = 1000 * V_c / (\pi * D)$$

ou N : vitesse de rotation en (tr/min)

V_c : vitesse de coupe (m/min)

D : diamètre (mm)

- **Avance par tour et vitesse d'avance V_f :**

Chapitre II : Système de forage

L'avance par tour, exprimée généralement par la lettre f , permet le calcul de la vitesse d'avance (V_f). La vitesse d'avance est donnée par la formule :

Équation II-4 : avance par tour

$$V_f = N * f$$

L'avance par tour a une incidence sur l'état de surface, appelée aussi rugosité. Pour obtenir un bon état de surface, il est nécessaire de réduire cette avance. À ce stade, l'outil utilisé a lui aussi son importance. Cette avance a aussi une incidence directe sur le temps de travail. Plus cette avance sera importante, plus court sera le temps de travail. Avec ces deux contraintes, il faut faire un choix et trouver un compromis entre la qualité de la finition et le temps de travail.

- **Profondeur de passe a_p :**

La **profondeur de passe**, exprimée généralement par a_p , n'entre que peu en considération dans le calcul de la **vitesse de coupe**. Mais son choix est important pour les travaux de finition.

II.2 Machine de forage et ses paramètres

Lors de la réalisation d'un forage par une machine hydraulique adéquatement instrumentée, certains des paramètres de son fonctionnement, et aux moyens de capteurs, peuvent être enregistrés avec pour objectif de garder un historique de l'évolution du comportement de la machine au cours du forage (figure II-7). Ces paramètres sont une image quantitative de ce que le sondeur aperçoit de façon qualitative pendant son travail. Ils peuvent indiquer des contrastes, liés à la façon dont le forage avance, qui permettent de déterminer des limites entre les couches de terrain, ainsi que des passages de sols indurés, c'est à dire de sols durs et compacts aux sols mous et vice-versa [34].

Chapitre II : Système de forage

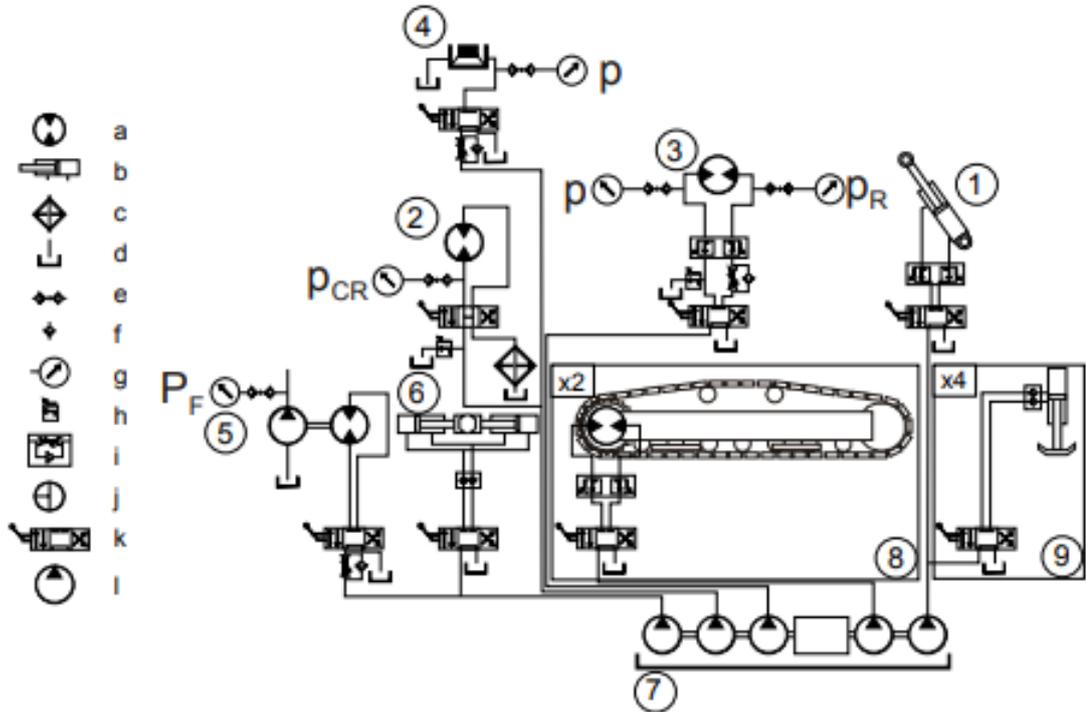


Figure II-5 : Exemple de schéma hydraulique d'une machine de forage et localisation des capteurs.

- | | | |
|------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| 1 : vérin mat | 4 : marteau | 7 : groupe hydraulique |
| 2 : moteur de rotation | 5 : pompe de fluide de forage | 8 : chenille |
| 3 : moteur d'avance | 6 : mors du frein de tige | 9 : vérin de stabilisation |

Chapitre II : Système de forage

Tableau II-1 : Paramètres de forage [11]

Paramètres de forage	Valeurs guides	
	Rotary	MFT
Poussée sur l'outil trilame tricône taillant	par pouce de ϕ d'outil 225 kg min. 450 kg min.	100-200 kg
Rotation (en rotation/minute)	10-150 rpm	25-50 rpm
Couple	2000 N-m par pouce de ϕ d'outil coefficient de 1,33 en plus à appliquer	
Vitesse du fluide min. max.	boue de forage 0,35 m/s 1,5 m/s	air (pure) 15 m/s 25 m/s
Pression du fluide (en bars) min. pour un forage de 4'' max.	boue 1 bar fonction du ϕ	air 12 bars fonction du ϕ

II.2.1 Le kit AcF PAT 201

La machine, de conception très simple, est une perceuse rotative composée d'un bâti et d'un moteur (figure II-8). Une pompe de compression des boues et des petits compresseurs légers sont nécessaires pour le développement du forage. Le principal avantage de cette machine est sa conception légère et mobile, ce qui permet de percer des trous dans des zones isolées sans déplacement d'un équipement complet très lourd. Un pick-up classique ou un petit camion plateau suffit pour le transporter des terrains aux sites. L'ensemble du kit peut être transporté par avion léger [11].

- **Mise œuvre :**

La mise en œuvre, très simple de ce type de forage, permet aux équipes locales d'acquérir une autonomie technique très rapidement. Les forages sont équipés de pompes manuelles ou parfois immergée de 4'' en fonction des besoins et du débit. La profondeur d'investigation est environ de 45 à 60 mètres dans toutes les formations non consolidées type sable, argile et petits graviers. Pour les profondeurs au-delà de 60 mètres, la machine est limitée par la configuration de son train de tige dans sa version standard (60 mètres), par son système de treuil manuel de relevage et le débit de la pompe à boue. Il est conseillé de rester dans cette gamme de profondeur d'utilisation de la machine, malgré l'existence de l'option 80 mètres). La puissance de foration étant donnée par le poids de tiges au-dessus de l'outil, elle est limitée par les terrains de surface indurés comme la carapace latéritique (durcie, propre aux sols des régions tropicales) par exemple [11].

Chapitre II : Système de forage

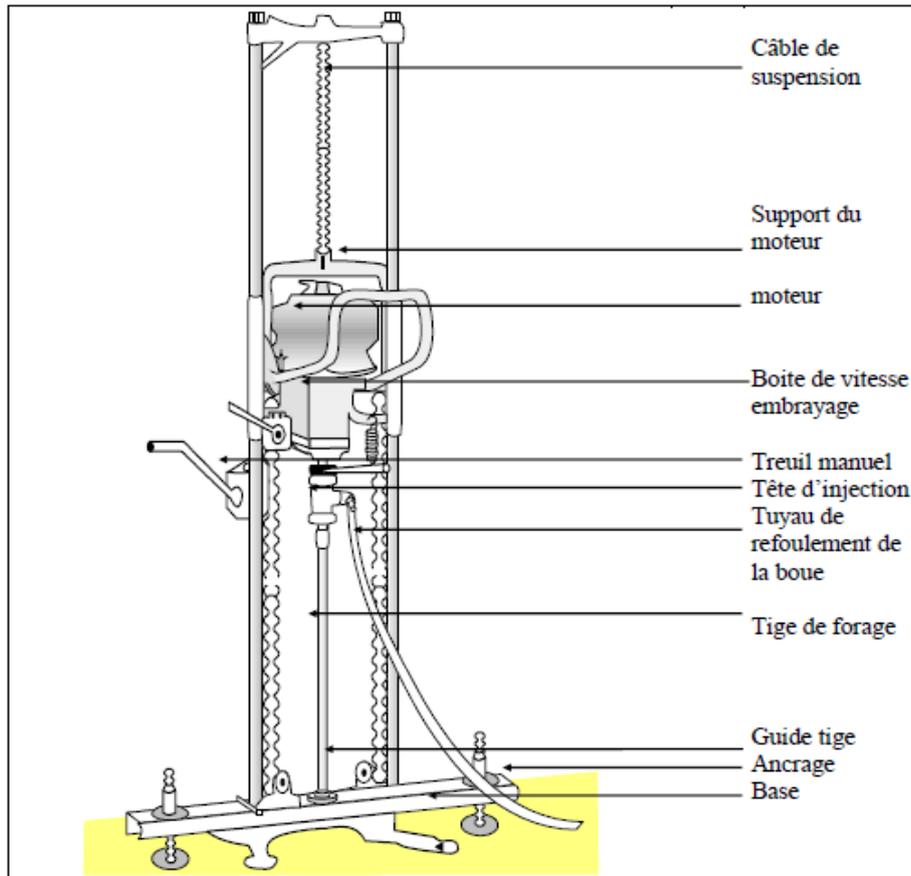


Figure II-6 : Kit AcF PAT 201 [11]

II.2.2 La sondeuse ROC L8

- **Description de la machine :**

L'engin de forage Roc L 8 est un engin hydraulique qui fonctionne en diesel conçus pour le forage en surface, telles que carrières et sites d'installation. Le mode roto percutant, est appliqué dans ce type de machine. [36]

La Machine est composée d'un bâti, d'une tête de rotation hydraulique, d'une unité hydraulique, et d'une unité de pompage. A cela, s'ajoute un compresseur d'air pour travailler en marteau fond de trou. [37]

Chapitre II : Système de forage

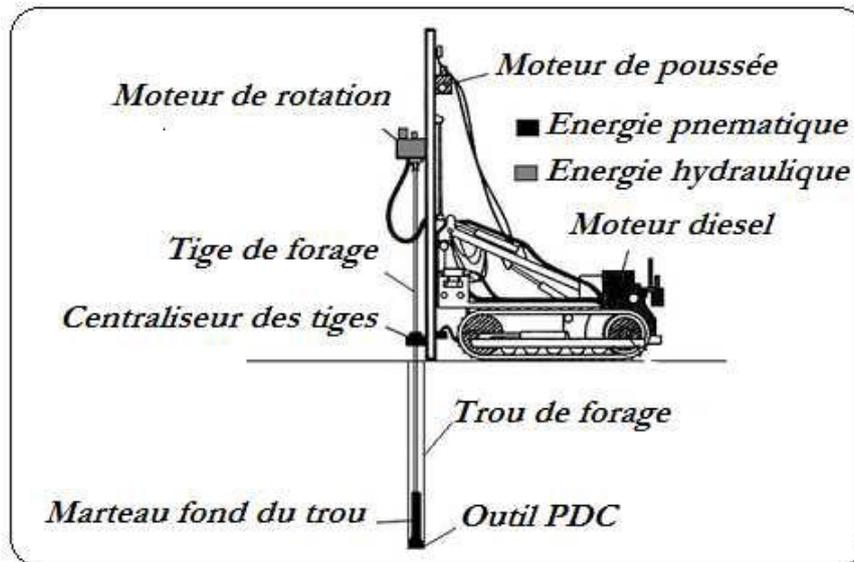


Figure II-7 : Sondeuse ROC L8 [37]

- **Mise œuvre :**

La foreuse fonctionne grâce à un circuit hydraulique qui alimente un moteur hydraulique pour la rotation du train de tiges ; un vérin hydraulique sert à monter et à descendre les tiges, il délivre la poussée sur l'outil. Ce vérin agit sur la tête de rotation qui est mobile le long du portique par l'intermédiaire d'une chaîne. La machine est pilotée par un panneau de commandes (figure II-10) [36].

Le Marteau pneumatique est alimenté par un compresseur, 0 - 25 bars. L'air comprimé utilisé pour le marteau doit être en permanence chargé en huile avec un lubrificateur, placé entre le compresseur et la vanne d'admission d'air.

La pression hydraulique donnée est de 250 bars maximums, elle est réglée à l'entrée du panneau de contrôle par une vis de réglage. La pression de rotation est réglée en marche automatique par une autre vis [36], [38], [39].

Chapitre II : Système de forage

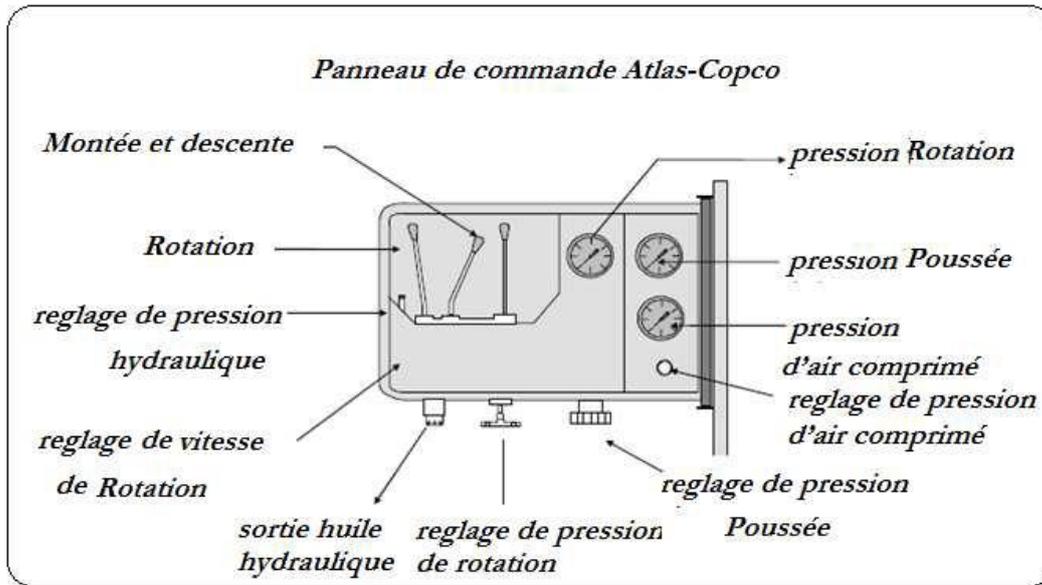


Figure II-8 : fonctionnement du panneau de commande [40]

II.3 Outils de forage

Le trépan est monté à l'extrémité d'un train de tiges. C'est un outil qui sert à tailler et détruire la roche. Il existe différents types de trépan, chaque type étant choisi pour une opération de forage spécifique, en fonction de la nature de la formation (plus ou moins dure) et de la résistance mécanique des terrains (forabilité, stabilité des parois, comportement des argiles...). La mécanique de l'outil de forage influence directement la vitesse de progression ROP.



Figure II-9 : Types d'outils de forage

Chapitre II : Système de forage

II.3.1 Evolution et utilisation

Deux familles d'outils de forage sont couramment utilisées : les outils tricônes à inserts en carbure et les outils à taillants en Poly cristallin Diamant Compact (PDC). Les outils tricônes sont associés à l'invention du forage par rotation au début du XXe siècle. Cette technique succéda à celle du forage par battage, vieille de plus de 2000 ans qui utilise le mouvement périodique vertical d'un outil dans le sol créant ainsi un trou par enfoncement de celui-ci. Les outils PDC ont fait leur apparition à la fin des années 70 et représentaient 2% de la part de marché en 1982. En 1990, cette part a progressé jusqu'à atteindre 20%, puis plus de 60% en 2010. En 2020, les outils PDC représenteront plus de 80% de part de marché, grâce aux nouveaux progrès réalisés sur la performance des matériaux diamantés [41].

II.3.2 Types d'outils de forage

II.3.2.1 Les outils à molettes.

En 1909, H.R. Hugues introduit les outils roulants dans le forage rotatif. Il existe plusieurs types d'outils à rouleaux dont les deux principaux sont le double cône et le triple cône.

- **Les tricônes :**

Les outils tricônes, utilisés dans les formations rocheuses relativement dures, possèdent trois molettes coniques composées de plaquettes en carbure de tungstène à liant cobalt (WC-Co) et montées sur un corps moulé aussi en carbure cimenté. La rotation de la garniture engendre le roulement des molettes et provoque le mécanisme d'excavation par les multiples poinçonnements des plaquettes dans la roche [39], [42] [43].

Chapitre II : Système de forage

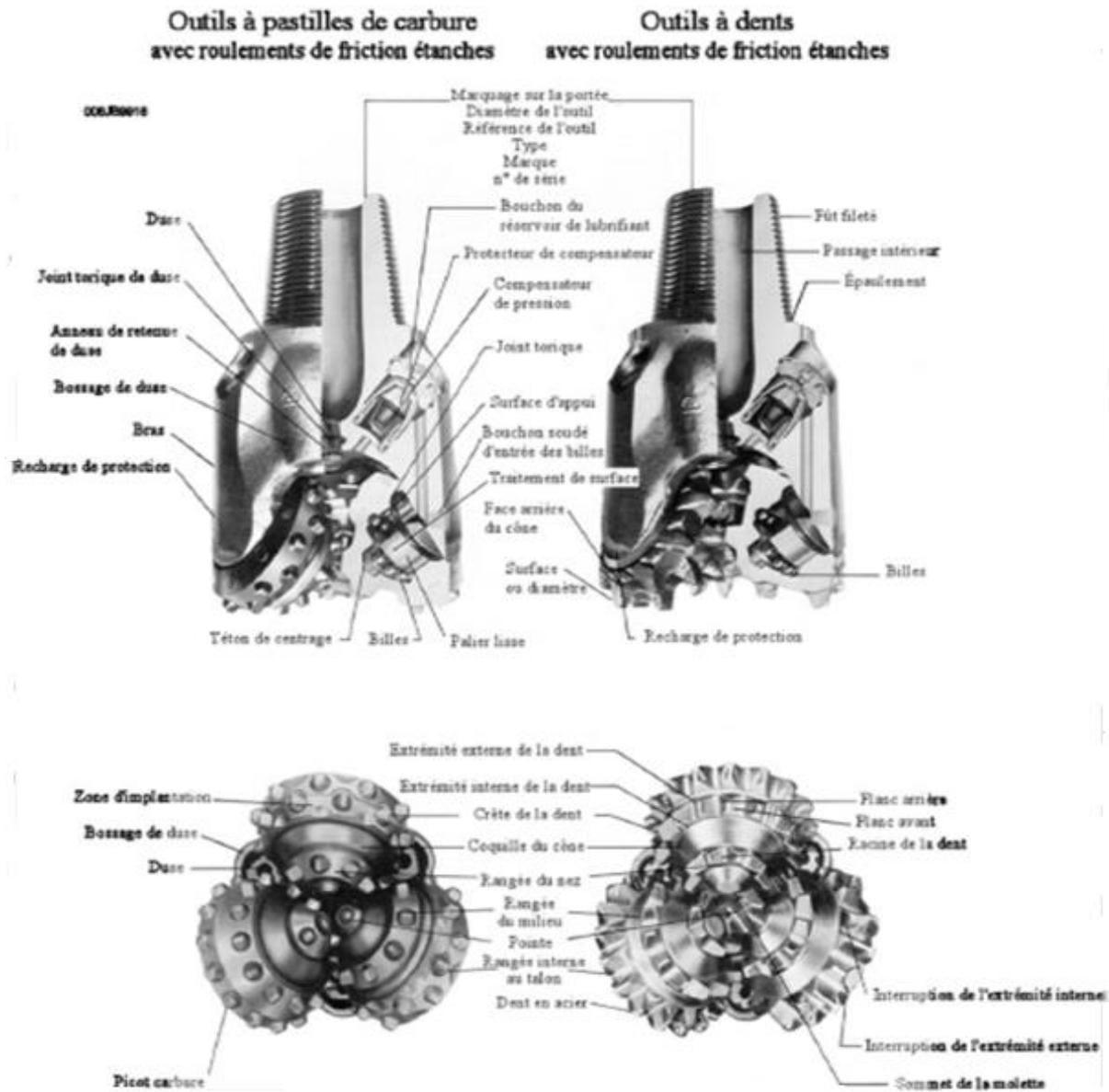


Figure II-10 : Nomenclature des différents éléments constituant un outil à molettes [44]

- **Performances des outils à molettes :**

Les outils à molettes ont permis d'améliorer les performances de forage dans les formations dures, là où les outils à dents ne pouvaient forer que quelques mètres avec une vitesse d'avancement faible. Les plaquettes en carbure et les paliers de friction ont permis d'appliquer des poids de plus en plus importants sur l'outil et d'augmenter la durée de vie des outils dans les formations. A titre indicatif, la durée de vie de ces outils est pratiquement trois fois plus longue que celle des outils à dents et à roulements à rouleaux) [45].

- **Mode de travail :**

La pénétration des dents ou des picots (formes en relief) dans la formation provoque l'éclatement de la roche. Plus le terrain est tendre, plus la dent devra être longue pour produire

Chapitre II : Système de forage

le meilleur avancement ; l'outil produit une série de petits cratères résultant de la pression exercée par chaque dent sur le front de taille.

L'arrachage du copeau de terrain est obtenu par ripage de la molette sur elle-même. Ces deux effets sont complémentaires. Ils sont privilégiés l'un par rapport à l'autre suivant la dureté de la roche à broyer. Cependant, les outils tricônes ont toujours un intérêt économique pour la réalisation de puits de faibles profondeurs mais aussi pour le forage de terrains durs (granite, pyrite, etc...) [43] [46].

II.3.2.2 Outils monoblocs

Il existe deux types d'outils diamantés, diamant naturel ou diamant synthétique (PDC Diamant Poly cristallin Compact et TSP : diamant Poly cristallin Thermiquement Stable).

- **Les outils en diamant naturel :**

Ils ne sont pas fabriqués en série c'est de la fabrication artisanale.

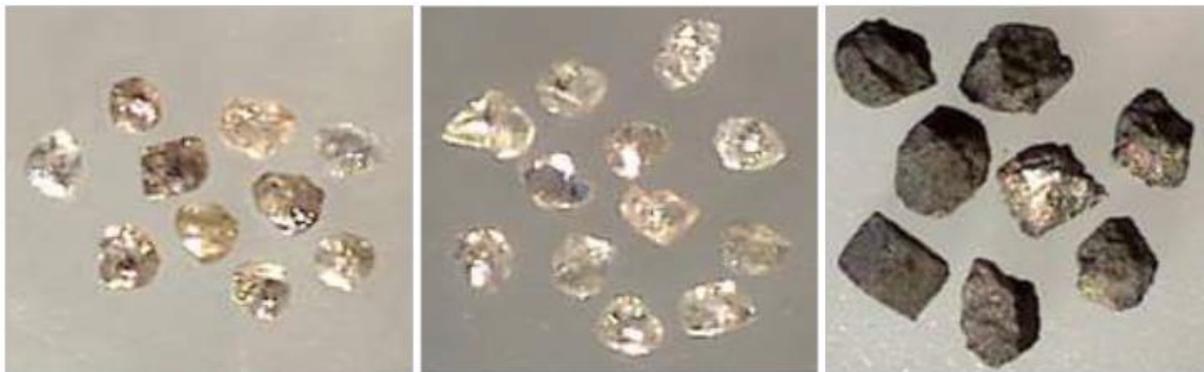


Figure II-13 : Diamants naturels et synthétiques

- **Principe de fabrication [47] :**

1. On procède d'abord à la fabrication au tour du moule en graphite ;
2. A l'intérieur de ce moule, on trace la position de chaque diamant et des lignes d'eau (canaux d'irrigation) ;
3. Chaque emplacement de diamant est creusé à l'aide d'une petite fraise ;
4. Les canaux d'irrigation, appelés aussi lignes d'eau, sont représentés en relief dans le moule par des pierres en graphite ou en sable ;
5. On procède ensuite à la mise en place des diamants, un par un, dans chaque logement, où ils sont maintenus en place par une légère couche de colle ;
6. Après mise en place d'une monture en acier (Steel Blank), le moule est rempli de carbure de tungstène (dont le point de fusion est de 3600 °C) auquel on ajoute un "liant" à base de cuivre et de nickel dont la composition reste le secret de chaque fabricant. Le point de fusion du liant se situe entre 400 °C et 1400 °C selon sa composition et varie selon la dureté de la matrice que l'on veut obtenir ;

Chapitre II : Système de forage

7. Après mise en place de la monture en acier et compression de la poudre de carbure de tungstène, l'ensemble est placé dans un four à induction. Sous l'action de la chaleur le liant devenu liquide pénètre parfaitement entre les grains de carbure et autour des diamants. Puis en se refroidissant, l'ensemble se solidifie ;
8. On ajoute un raccord fileté API en acier au carbone (API) sur la monture en acier qui elle est en acier doux (pour éviter la trempe et la carburation dans le moule en graphite lors du passage au four) le raccordement se fait par filetage et soudure.

- **Les outils PDC :**

Les outils PDC comportent des taillants formés d'un cylindre en carbure de tungstène - cobalt surmonté d'une partie en diamant polycristallin. Les taillants PDC sont brasés, côté carbure cémenté, sur la tête de forage. Ils permettent d'obtenir des vitesses d'avance plus importantes, relativement aux inserts, en travaillant par cisaillement dans la roche avec des profondeurs de passe millimétriques [48] [49] [42].

La raison de cette évolution rapide de l'utilisation sur les chantiers des outils à taillants PDC s'explique par leur mode d'excavation beaucoup plus efficace que celui des tricônes et aux améliorations apportées aux taillants afin de supporter les conditions thermomécaniques rencontrées lors de forages profonds [39].

Chapitre II : Système de forage

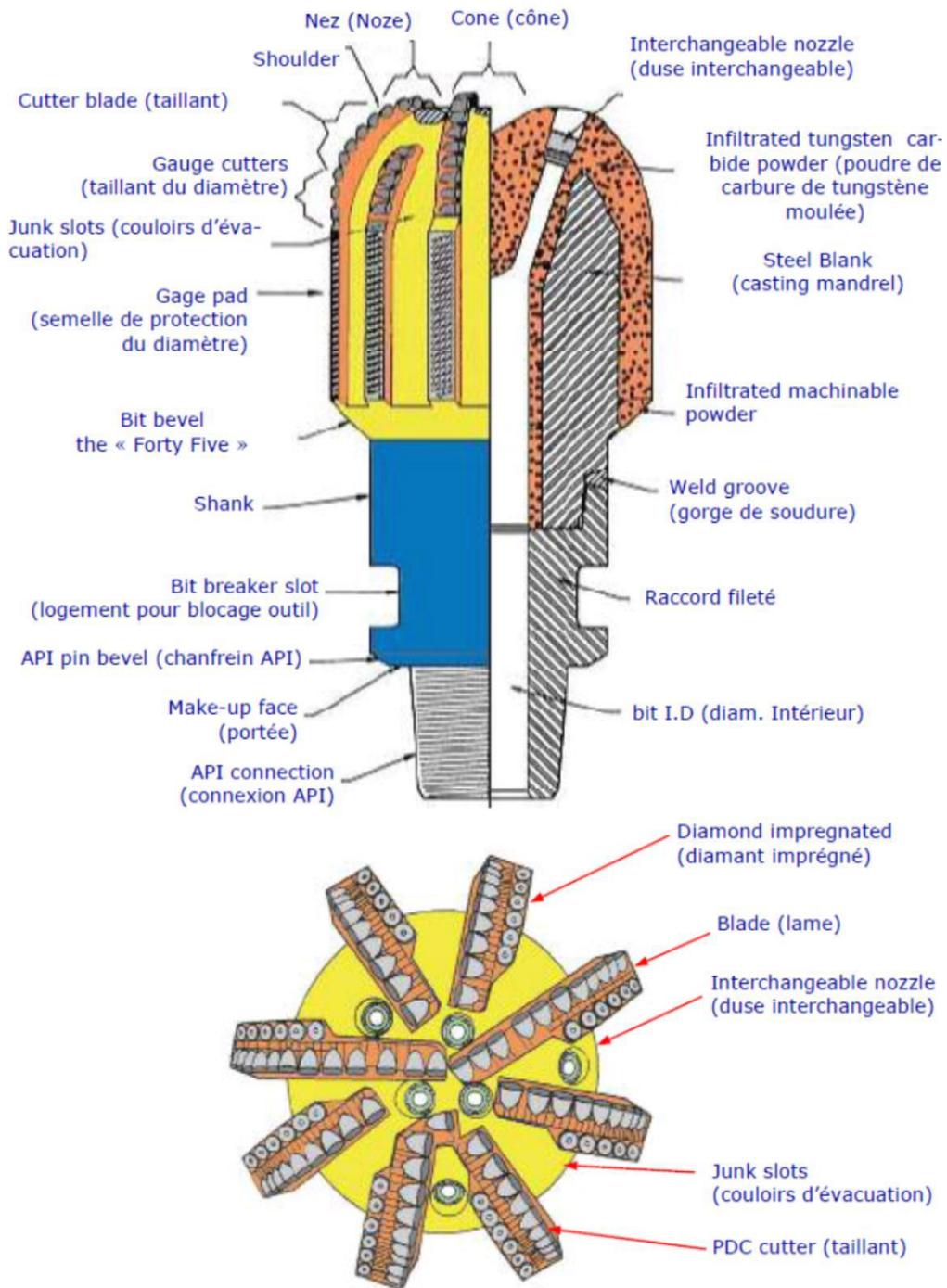


Figure II-14 : Outil en PDC

- **Les outils TSP :**

L'action du TSP dépend de l'orientation et de la hauteur d'exposition du taillant. Il combine le mécanisme de destruction des PDC et des diamants naturels. Lorsque l'outil est conçu pour forer des formations tendres, le TSP cisaille la roche. Dans les formations dures, il laboure la roche de la même manière que le diamant naturel. Quel que soit le type de diamant utilisé, la friction entre les taillants et la formation produit beaucoup de chaleur ; le débit de circulation doit être important pour refroidir correctement l'outil et éviter de détruire les diamants [50].



Figure II-11 : Outil TSP [51]

- **Les outils imprégnés :**

Le corps est composé d'une matrice en carbure de tungstène imprégné de diamants synthétiques à l'intérieur. La structure abrasive est résistante aux hautes pressions et températures, et par conséquent ces outils sont utilisés dans les formations très dures à faible forabilité et haute abrasivité. Au fur et à mesure de l'usure de la matrice, les diamants exposés se déchaussent et de nouveaux taillants apparaissent. En raison de la petite taille des diamants synthétiques imprégnés, la vitesse d'avancement obtenu par cet outil est très faible [52].



Figure II-12 : Outil imprégné [52]

Chapitre II : Système de forage

- **Les outils hybrides :**

Le terme "hybride" vient d'une combinaison de la technologie des taillants PDC et du diamant naturel montés sur un même outil. Un élément secondaire de carbure de tungstène imprégné de diamant est placé derrière la dent en PDC. Ces seconds éléments sont généralement appelés "imprégnés". Chaque imprégné va de pair avec un PDC spécifique situé à un endroit critique, potentiellement exposé à l'usure. On trouve des outils hybrides aussi bien sur les corps en acier que sur les matrices. Dans les deux cas, les imprégnés contiennent de nombreux petits diamants naturels sur la face exposée au contact de la formation durant les sévères conditions de forage.

II.3.3 Mode destruction de la roche par les différents types de diamant

- **Le diamant naturel :**

Il agit par abrasion en creusant un sillon autant par fracturation que par cisaillement, il laboure la roche. L'effort d'écrasement a autant d'importance que l'effort tangent. Il sera nécessaire d'appliquer un poids et une vitesse de rotation relativement élevés pour forer. Le handicap du diamant naturel est la faible dimension des pierres utilisées. La profondeur de l'entaille produite dans la roche est très faible (de l'ordre de 0.1 mm). Cela limite l'utilisation du diamant naturel aux terrains les plus durs et abrasifs. Les vitesses d'avancement obtenues seront donc relativement faibles (de 2 à 5 m/h) [50].

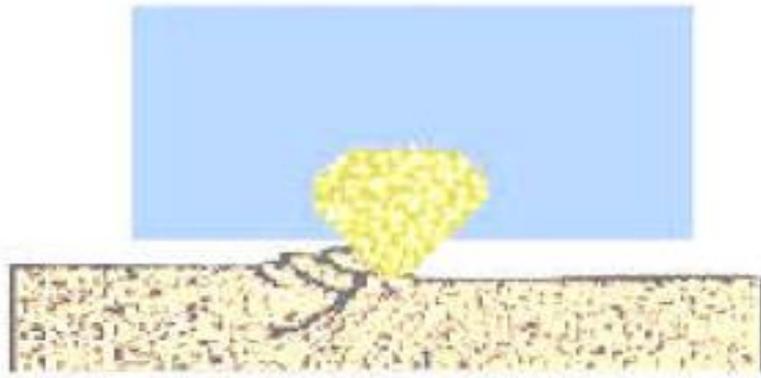


Figure II-13 : Action d'un outil à diamant naturel

- **Le Diamant Poly cristallin Compact (PDC) :**

Ils travaillent à la façon de l'outil d'une machine en cisillant la roche. La mise en action de l'élément de coupe nécessite en premier un effort d'écrasement entraînant la pénétration dans la formation. Les taillants soulèvent les copeaux de roche formés ce qui contribue à un meilleur nettoyage du front de taille, donc évite le bourrage de l'outil et permet d'obtenir une vitesse d'avancement maximale (dans les formations plastiques, l'avancement est plus limité par le nettoyage du front de taille que par la destruction de la roche). Dans les formations tendres, c'est le mécanisme qui demande le moins d'énergie pour détruire la roche mais qui produit le plus de couple. Des vitesses d'avancement élevées sont obtenues avec des poids sur l'outil beaucoup plus faibles qu'avec les autres types d'outils [50].

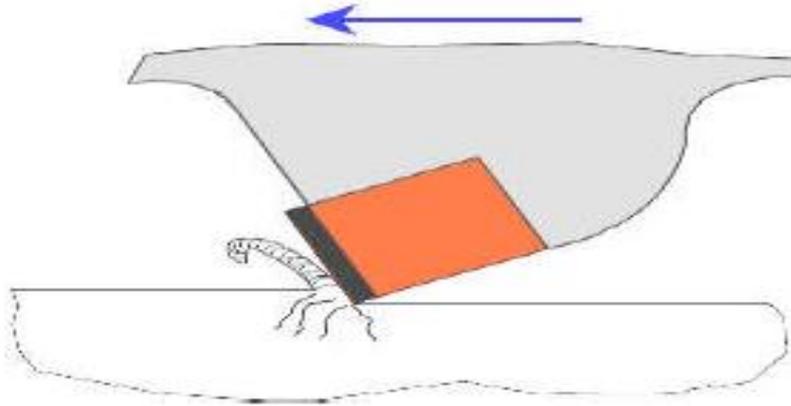


Figure II-14: Action d'un outil PDC

- **Le diamant Poly cristallin Thermiquement Stable (TSP) :**

L'action du TSP dépend de l'orientation et de la hauteur d'exposition du taillant. Il combine le mécanisme de destruction des PDC et des diamants naturels. Lorsque l'outil est conçu pour forer des formations tendres, le TSP cisaille la roche. Dans les formations dures, il laboure la roche de la même manière que le diamant naturel. Quel que soit le type de diamant utilisé, la friction entre les taillants et la formation produit beaucoup de chaleur ; le débit de circulation du mélange eau doit être important pour refroidir correctement l'outil et éviter de détruire les diamants [50].

II.4 Matériaux des outils de forage et spécificités des terrains

II.4.1 Matériaux des outils de forage

II.4.1.1 Le corps d'outil (bit body)

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

- Servir de support pour les dents et la fixation de ceux-ci ;
- Accepter les contraintes mécaniques sous les conditions d'opérations de fond ;
- Diriger et contrôler le courant de boue pour le nettoyage et le refroidissement des dents ;
- Permettre la connexion à la garniture de forage.

Deux types de corps existent : le corps en acier et le corps à matrice (corps fritté). Chacun possède ses caractéristiques et ses avantages propres, ainsi que ses limites. Ils doivent être conçus avant la sélection pour une application spécifique.

- **Corps en acier :**

Le corps en acier supporte d'avantages les contraintes de forage (poids, torque) que le corps à matrice. Il est généralement utilisé quand le concepteur veut maximiser les faces d'attaque pour favoriser la vitesse de pénétration. Cependant, les hauteurs peuvent être limitées par les contraintes mécaniques du corps. Des calculs sont réalisés pour maximiser les contraintes sur

Chapitre II : Système de forage

la lame pour une hauteur donnée et des programmes de tests de fatigue vérifient les contraintes adéquates.

L'utilisation de l'acier représente également un avantage pour les outils de grands diamètres en évitant les problèmes complexes de fabrication des corps à matrice. L'inconvénient majeur du corps en acier est qu'il est moins résistant à l'érosion que l'outil matrice et par conséquent plus susceptible d'être endommagé par les fluides de forage abrasifs. Pour combattre ceci, la technique de renforcement (hard facing) peut être appliquée aux sections les plus exposées de l'outil.



Figure II-15: bit body en acier

- **Corps à matrice :**

Les corps à matrice sont fabriqués par les procédés de moulage, dans lequel un composé de poudres de carbure de tungstène est coulé avec un liant autour d'une partie en acier (blank steel). Le liant enrobe et fixe les particules de carbure. De plus le processus facilite une adhésion métallurgique entre les croix de la matrice et l'intérieur du blank steel. Une matrice à poudre de carbure de tungstène fournit des propriétés de surface excellentes avec une capacité exceptionnelle à résister à l'érosion par les fluides. Le phénomène d'érosion est causé par la perte de l'alliage servant de liant qui lui est tendre ; ce qui défait alors les grains de poudre de carbure de tungstène de la matrice. Les outils à matrice sont préférés dans les applications où la boue de forage est hautement chargée en solides, où encore lorsqu'une grande puissance hydraulique appliquée à l'outil est risquée, ainsi que dans les cas où la durée du forage est longue pour des raisons économiques.

Les outils en diamant naturel, bien que classés comme outils de coupe, forent avec une action de meulage et ne cisailent pas la formation. L'action de coupe des outils joue un rôle clé dans l'énergie nécessaire pour forer une formation donnée. Cette caractéristique est généralement présentée en terme "d'énergie spécifique" qui est définie comme l'énergie exigée pour couper un volume unitaire de formation. Un outil qui brise la roche directement par cisaillement plutôt que d'utiliser la charge compressive, dépense une énergie spécifique inférieure. Ce qui donne

Chapitre II : Système de forage

au PDC une action de coupe, plus efficace. En règle générale, la résistance au cisaillement est approximativement la moitié de la résistance compressive.

II.4.1.2 Spécificités des terrains

Les caractéristiques mécaniques des roches interviennent différemment dans le contexte du forage, on peut définir deux classes de propriétés, celle qui concerne la roche et celle qui explique l'effet des forces extérieurs sur la roche.

- **La dureté :**

La dureté d'une roche, sur un chantier de forage, traduit en fait pour l'opérateur la résistance que celle-ci offre à l'avancement de l'outil et ceci de façon tout à fait empirique. Il existe cependant une définition de la dureté des roches : celle de l'échelle de Mohs [53], telle que chaque minéral de roche soit rayé par le minéral de roche de degré supérieur. Dans cette échelle, le quartz qui est l'une des roches les plus dures que l'on rencontre effectivement dans les forages, sa présence indique l'abrasivité de la roche, il est au degré 7 de dureté alors que le diamant a le degré 10, degré le plus élevé [53] [54].

La dureté suivant Mohs traduit une résistance de la roche à la pénétration, par rayage. Il est rare qu'un outil réel détruise la roche uniquement par rayage (sauf parfois avec l'emploi d'outils en diamant). Il est rare également qu'une roche soit pratiquement composée d'un seul minéral, la notion de rayage devient beaucoup plus compliquée dans le cas de roches constituées de plusieurs minéraux de dureté différentes [55].

- **La résistance en compression :**

C'est la résistance de la roche à un effort de compression uni axial, qui reste libre d'effort dans le plan perpendiculaire, peut être déterminée au niveau de laboratoire à partir d'un essai de compression simple. [56] [57].

- **Abrasivité :**

L'abrasivité est le pourcentage de silice dans la roche. Le caractère abrasif d'une roche n'intervient pas dans le processus de pénétration d'un élément d'outil dans la roche, mais intervient par le fait des modifications par usure, dans le temps, des caractéristiques géométriques ou mécaniques de celui-ci [53] [58].

Cette usure peut se produire de deux façons : si la dureté minéralogique des éléments constituant la roche est plus grande que la dureté des éléments de l'outil il y aura destruction volumétrique de ceux-ci ; si la dureté des éléments de roche est plus faible que celle des éléments de l'outil, il y aura usure superficielle par frottement. L'usure par frottement dépend de la valeur du coefficient de frottement de la roche au contact de l'outil [53] [57] [61].

- **La résistance à la pénétration statique :**

La dureté d'une roche, considérée comme résistante à la pénétration statique d'un poinçon, est donc très intéressante en tant que propriété liée aux conditions de destruction de ce matériau par forage [56].

- **La résistance à la pénétration dynamique :**

Comme l'outil, assimilé à un ensemble de poinçon, se déplace de façon continue au fond du trou, de telle sorte qu'en chacune de ses positions, son contact sous charge avec la roche ne se fait que pendant une durée finie, on peut penser à priori que la résistance à la pénétration de l'outil dans la roche est fonction de la vitesse de ses déplacements [53] [55].

- **La résistance à l'écrasement :**

La pénétration statique d'un poinçon dans une roche s'accompagne d'un écrasement des éléments de roche situés sous le poinçon. On est ainsi amené à penser que la résistance critique de la roche à la pénétration statique est égale à la résistance d'écrasement, c'est à dire à la compression, et que l'on peut mesurer cette résistance par des essais mécaniques sur éprouvettes [53].

Si l'on procède effectivement à des mesures de résistance à l'écrasement, par exemple sur éprouvettes cylindriques, au moyen d'une presse, et que l'on classe diverses roches par résistances à l'écrasement croissantes, on obtient une bonne corrélation avec le classement obtenu avec des essais de résistance à la pénétration statique d'un poinçon. Les roches qui possèdent des résistances critiques à l'écrasement sont également celles qui présentent les plus grandes résistances critiques à la pénétration [55].

Cependant, il n'est pas possible de relier d'une façon formelle ces deux caractéristiques. La raison est essentiellement la suivante : le contact sous charge du poinçon avec la roche engendre au voisinage de la surface de contact de celle-ci un régime de contraintes triaxiale, alors que l'essai d'écrasement d'éprouvettes cylindriques ne fait intervenir que les contraintes uni-axiales. Du fait des différences qui existent entre les paramètres élastiques des différentes roches, il ne peut y avoir de relations formelles entre ces deux régimes de compression [58] [60].

II.4.1.3 Mécanisme de rupture du rocher pendant le forage

Les types généraux de rupture de la roche lors du forage par méthode mécanique, y compris le forage par percussion, le forage rotatif et le forage par percussion rotative, sont de trois types [61] [60] :

- Percussion-pénétration ;
- Rouleau sous pression ;
- Coupe.

Chapitre II : Système de forage

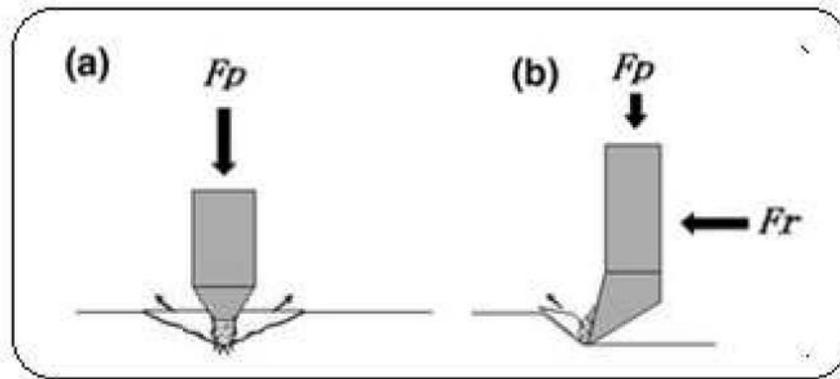


Figure II-16 : Types généraux de destruction de la roche lors de la foration [61]

L'outil pénètre et brise la surface de la roche par une force statique (poussée) (F_p) ou une force d'impact (percussion). La figure II-19 (a) présente la destruction de la roche par une série de coups de chocs perpendiculaire à la surface de contact de la roche ; tandis que la figure II-19 (b) présente un autre type de destruction par l'action du couple poussée et rotation engendrant un effort parallèle (tangential) à la surface de contact de la roche. C'est le processus basique de la rupture de la roche par une méthode mécanique [62].

II.4.1.4 Les phases de pénétration de l'outil dans la roche

Le processus de pénétration de l'outil dans la surface de la roche peut être divisé en trois phases comme suit :

- 1. Zone écrasée (concassée) :** Lorsque la pointe de l'outil commence à entailler la surface de la roche, la contrainte augmente avec l'augmentation de la pression de pénétration et le matériau entre en phase de déformée plastique. À la surface de contact, des irrégularités sont immédiatement formées et une zone de noyau en poudre de matériau concassée se développe sous l'insert de l'outil. Le noyau écrasé comprend de nombreuses microfissures qui pulvérisent la roche en poudre de particules extrêmement petites. Le noyau écrasé transmet le composant de la force principale dans la roche [61] [63].

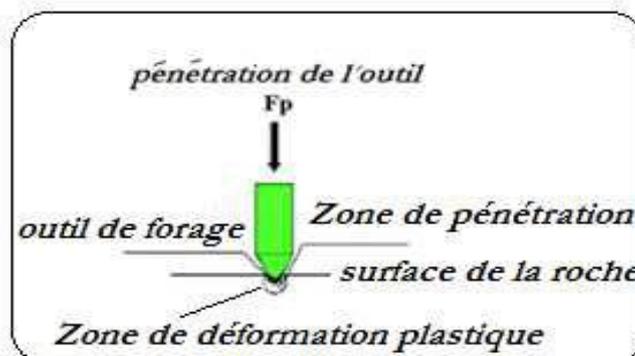


Figure II-17 : Phase de déformation plastique [61]

- 2. Formation des fissures :** Les microfissures se développent progressivement à l'intérieur de la roche. Le placement des fissures majeures dépend de la forme de l'insert. Généralement,

Chapitre II : Système de forage

la progression des fissures majeures se développent dans une zone sphérique située juste à l'extérieur de la zone de contact, pointant vers le bas et loin de la surface [61].

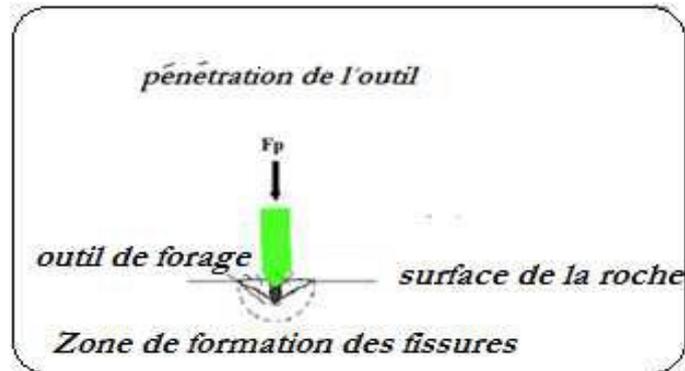


Figure II-18: phase de formation des fissures [61]

- 3. Propagation des fissures :** Une fois que la barrière d'énergie a été surmontée, la propagation spontanée et rapide suit. À une profondeur inférieure à la dimension de contact, la force de traction est inférieure à celle nécessaire pour maintenir la croissance, de sorte que la fissure devient encore stable. Les fissures sont alors "bien développée" [61]

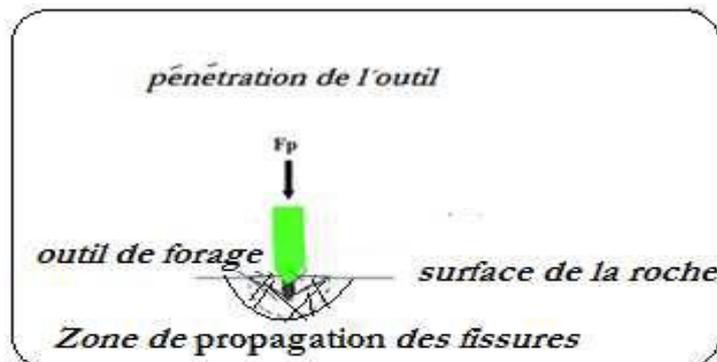


Figure II-19 : phase de propagation des fissures [61]

Chapitre III :
Choix du
prototype d'outil
de forage

III. Choix du prototype d'outil de forage

III.1 Présentation du cahier des charges

Un cahier des charges, régulièrement appelé CDC et souvent abrégé en CdC, est un document (PDF, Word..) qui permet d'expliquer toutes les spécificités, les attentes et les contraintes d'un projet. En d'autres termes, un cahier des charges est un élément essentiel de la conception d'un projet, il va établir une description fonctionnelle des différents éléments pour que les différentes parties prenantes du projet soit sur la même longueur d'ondes.

On distingue parfois **cahier des charge technique** (CdCT) et **cahier des charges fonctionnel** (abrégé CdCF).

III.1.1 Cahier des charges technique

Le cahier des charge technique CdCT s'intéresse particulièrement aux exigences et contraintes techniques du produit. Il peut toutefois n'être que la partie technique d'un cahier des charges plus global, qui énumère les contraintes de différents types :

- Économiques ;
- Industrielles ;
- Environnementales ;
- Matérielles...

III.1.2 Cahier des charges fonctionnel

Le cahier des charges fonctionnel se focalise sur les besoins fonctionnels et la manière dont la solution y répond. C'est un document qui présente de manière détaillée et structurée les spécifications, les services à rendre, les contraintes d'un produit. Il est mis en œuvre par les process :

- **D'étude d'opportunité :**

L'étude d'opportunité consiste à étudier le contexte du projet et à définir les principaux besoins pour vérifier s'ils sont en phase avec les attentes de l'utilisateur. Elle permet d'évaluer rapidement la viabilité du projet.

- **D'étude de faisabilité :**

L'étude de faisabilité vise à évaluer la viabilité du projet sur plusieurs plans, notamment :

- Économique ;
- Technique ;
- Organisationnel.

Elle permet d'estimer et d'anticiper les coûts, les délais et le ROI (retour sur investissement) probable du projet. On y ajoute généralement des études de scénario afin de prévenir les risques et menaces éventuels.

Chapitre III : Choix du prototype d'outil de forage

- **D'Analyse Fonctionnelle du Besoin (AFB) :**

L'analyse fonctionnelle vise à déterminer les « fonctions de service » du produit, en amont de sa réalisation. Pour ce faire :

- Elle examine les points de vue des différentes parties concernées ;
- Elle se projette dans la durée, prenant en considération les différentes étapes du cycle de vie : mise en place en amont, usage du produit, maintenance, entretien, fin de vie... ;
- Elle n'exprime pas les moyens à mettre en oeuvre, mais plutôt les résultats recherchés.

- **D'Expression Fonctionnelle du Besoin (EFB) :**

L'expression fonctionnelle du besoin exploite les résultats de l'AFB afin de :

- Structurer rigoureusement et logiquement l'information pour aider à la prise de décision ;
- Permettre la création d'un produit performant et parfaitement adapté aux emplois et aux services voulus ;
- Servir de référence du besoin du client durant la réalisation du produit ou service.

Elle se structure généralement en quatre grandes parties :

- La définition globale du besoin ;
- La consolidation des besoins et la définition des éléments stratégiques ;
- La définition des principes et concepts retenus ;
- La description des contraintes à respecter et des fonctions de service à assurer.

III.1.3 Les normes encadrant le CdCF

Historiquement, c'est la norme AFNOR NF X50-151 qui a longtemps servi de modèle de cahier des charges fonctionnel, pour les projets de type industriel. Elle a été remplacée en février 2013 par la norme NF EN 16271 qui décrit non seulement la mise en œuvre du Cahier des Charges Fonctionnel, mais aussi celle de l'Analyse Fonctionnelle et de l'Expression Fonctionnelle du Besoin. Elle fixe aussi les exigences auxquelles doivent se soumettre tous les acteurs du projet.

III.1.4 Plan type et grandes orientations du CdCF

III.1.4.1 Présentation générale du problème

1. **Projet** : Présentation du projet, de ses finalités, de son possible retour sur investissement ;
2. **Contexte** : Situation générale de l'organisation, autres projets en cours, études éventuelles menées sur le sujet (ou des sujets similaires), prestations attendues, parties concernées par le projet, confidentialité... ;
3. **Énoncé du besoin** : Services rendus par le produit pour l'utilisateur final ;
4. **Environnement du produit** : Personnes, équipements, matériaux, contraintes de l'environnement, caractéristiques de chaque élément ;

Chapitre III : Choix du prototype d'outil de forage

III.1.4.2 Expression fonctionnelle du besoin

1. **Fonctions de service et de contrainte** : Fonctions de services principales, fonctions complémentaires (améliorant ou simplifiant le service rendu), contraintes pouvant entraver la liberté du réalisateur du produit ;
2. **Critères d'appréciation** : Souligner les critères déterminants pour l'évaluation des propositions ;
3. **Niveaux des critères d'appréciation et ce qui les caractérise** : Bien définir, d'une part, les niveaux indispensables et, d'autre part, les niveaux voulus mais révisables ;

III.1.4.3 3. Cadre de réponse

Cette partie encadre la manière dont les réponses au besoin devront être formulées.

1. **Pour chaque fonction** : Solution proposée par le fournisseur, niveau atteint pour chaque critère d'appréciation, modalités de contrôle., part du prix attribué à chaque fonction ;
2. **Pour l'ensemble du produit** : Définir le prix de la réalisation de base, lister les options et variantes éventuellement proposées, les mesures prises pour se soumettre aux contraintes et leur impact économique, les outils liées à la mise en place et à la maintenance, décomposition en sous-ensembles, prévisions et perspectives de fiabilité et d'évolution ;

Un CDC est établi de la sorte :

1. Contexte et présentation du projet ;
2. Besoins et contraintes liés au projet ;
3. Résultats attendus.

III.2 Cahier des charges du projet "outil de forage"

III.2.1 Contexte et présentation

L'outil de forage ou trépan s'est considérablement développé depuis son apparition, il y a les outils à lames, les outils à molettes à double cônes et à triple cône, les outils à taillants multiples.

L'outil de forage est issu de l'industrie pétrolière (pétrole et gaz), il est aussi utilisé dans d'autres domaines d'activité tels que forage d'eau, géothermie, génie civil, géotechnique.

Les performances des outils de forage sont étroitement liées aux moyens développés et avancés de Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur (CFAO) et surtout aux performances des nouveaux matériaux composés et revêtus (matériaux diamantés), innovés en métallurgie des poudres.

L'outil de forage sert à tailler et à détruire la roche. Ces fonctions sont réalisées par différents types d'outils, chaque type étant choisi pour une opération de forage spécifique, dépendant de la nature du sol (couches variées, plus ou moins dures) et de la résistance mécanique des terrains (forabilité, stabilité des parois, comportement des argiles...).

Actuellement, l'outil à taillant PDC (Diamant Poly cristallin Compact) est le plus utilisé dans les chantiers des forages. Cette utilisation s'explique par leur mode d'excavation beaucoup plus

Chapitre III : Choix du prototype d'outil de forage

efficace que celui des tricônes et aussi par les améliorations apportées aux taillants afin de supporter les conditions thermomécaniques rencontrées lors de forages profonds.

III.2.2 Besoins et contraintes liés au projet

Les outils PDC existent depuis la fin des années 70. Leurs parts du marché ont progressé de la sorte : 2% en 1982 ; 20% en 1990 ; 60% en 2010 ; plus de 80% en 2020.

L'outil PDC est constitué d'un corps en acier fortement allié comportant des taillants formés de cylindres (plaquettes rondes) en carbure de tungstène (WC) - cobalt (Co) revêtus d'un côté de couches en diamant poly cristallin. Les plaquettes en carbure revêtu sont brasées, par le côté carbure cimenté, sur la tête de forage. Le WC-Co revêtu au diamant poly cristallin est choisi par son aptitude à travailler (cisailier et défoncer les roches) avec des vitesses d'avance plus importantes, par rapport à d'autres types de plaquettes. Ils permettent de travailler par cisaillement et par destruction de la roche et supportent convenablement les conditions thermomécaniques rencontrées lors des forages profonds. Ils se distinguent donc par une qualité supérieure de forage et par une efficacité les rendant bon marché (moindre coût) au mètre de forage.

III.2.3 Résultats attendus

Pour toutes ces raisons, l'outil à taillant en PDC (Diamant Poly cristallin Compact) est choisi en projet d'étude afin de développer les aspects liés à la conception et aux dessins utilisant le logiciel SolidWorks, ainsi que ceux liés à la fabrication en utilisant le logiciel CamWorks.

III.3 Données techniques

III.3.1 Données techniques de la formation, de la matière à détruire et à cisailier

- **Angle de frottement interne :**

Tableau III-1 : Angle de frottement interne (Φ)

Roche	30°
Sable	30-40°
Argile	20°

- **Force de cohésion :**

Tableau III-2 : Force de cohésion

Roche	10 KPa
Argile	10-20 KPa

- **Densité :**

Chapitre III : Choix du prototype d'outil de forage

Tableau III-3 : Densité

Sol sableux	1800 Kg/m ³
Sol argileux	1900 Kg/m ³
Roche	3000 Kg/m ³

- Poids unitaire (γ) $\gamma = m \cdot g$:

Tableau III-4 : Poids unitaire

Roche	25.5 KN/m ³
Sol de sableux	16 KN/m ³
Sol argileux	18 KN/m ³

- Porosité :

Tableau III-5 : Porosité

Sable	20 – 35 %
Argile	33 – 66 %
Roche	10 – 40 %

- Perméabilité :

Tableau III-6 : Perméabilité

Sables limoneux, sables fins	10 ⁻⁶ – 10 ⁻⁵ cm/sec
Sables, limons sableux, sables argileux	10 ⁻⁶ – 10 ⁻⁴ cm/sec
Argile	10 ⁻⁹ – 10 ⁻⁶ cm/sec

- Compressibilité (C_c) :

Tableau III-7 : Compressibilité

Argile	0.3 – 0.075
Argile limoneux	0.15 – 0.075
Argile sableux	0.075

- Rapport de poisson :

Tableau III-8 : Rapport de Poisson

Sol sableux	0.25 – 0.4
-------------	------------

- Module de Young :

Chapitre III : Choix du prototype d'outil de forage

Tableau III-9 : Module de Young

Sol argileux	10 – 200 MPa
Argile dur	6 – 14 MPa

III.3.2 Données techniques de l'outil

- **Dimensions de l'outil :**

Tableau III-10 : Dimensions de l'outil

Hauteur	444 mm
Longueur	228 mm
Largeur	228 mm
Nombre de lame	6

- **Dimensions des plaquettes ou des pastilles :**

Tableau III-11: Dimensions d'une plaquette

Diamètre	12 mm
Longueur	20 mm
Angle	45°
Nombre de plaquette	36

- **Fixations :**

Tableau III-12 : Fixation

Outil avec tige	Filetage rond conicité 5.86x2.5
Corps et tête	Filetage rond Rd 140x2.5
Tête et plaquettes	Abrasion

- **Matériaux :**

Tableau III-13 : Matériaux d'outil

Tête	X36CrMo17
Corp	X36CrMo17
Plaquette	(WC+Co) / revêtu en diamant Poly cristallin Compact (PDC)

Chapitre III : Choix du prototype d'outil de forage

- **Boue (lubrificateur) :**

Tableau III-14 : Types de boues

Types de boues	Pression	Vitesse de fluide
Boues aqueuses	2.25 bar minimum	0.35 m/s – 1.5 m/s
Boues non aqueuses	2.25 bar minimum	0.35 m/s – 1.5 m/s
Fluides synthétiques	2.25 bar minimum	0.35 m/s – 1.5 m/s

- **Poussée sur l'outil :**

Tableau III-15 : Poussée sur l'outil

2025 Kg/pouce minimum	4050 Kg/pouce maximum
-----------------------	-----------------------

- **Distance par minute :**

Tableau III-16 : Distance par minute

90 m/min

- **Couple :**

Tableau III-17 : Couple

2000 Nm par pouce de diamètre d'outil

- **Vitesse de rotation :**

Tableau III-18 : Vitesse de rotation

127 tr/min

Chapitre IV :
Fabrication du
corps de l'outil

IV. Fabrication de corps de l'outil

L'outil est constitué de trois parties :

- Partie de fixation à la tige de forage ;
- Partie corps d'outil ;
- Partie tête de l'outil.

IV.1 Le routage d'usinage

- **Phase 100**

Op. n°1 : Contrôle du brut

- **Phase 200**

S/Ph 210

Op. n°1 : Dressage face 1 Ø 170

Op. n°2 : Chariotage diamètre extérieur

Op. n°3 : Centrage face 1 Ø 170

Op. n°4 : Perçage face 1 Ø 170

Op. n°5 : Alésage face 1 Ø 170

Op. n°6 : Filetage rond intérieur face 1 Ø 170 [Rd 140x6 à gauche sans jeu]

S/Ph 220

Op. n°1 : Dressage face 2 Ø 170

Op. n°2 : Chariotage diamètre extérieur

Op. n°3 : Filetage Rd $\Phi 77 / \Phi 95,7 * 6$ à gauche sans jeu [conicité 5.86°]

- **Phase 300**

OP N°1 : Contrôle final de la pièce

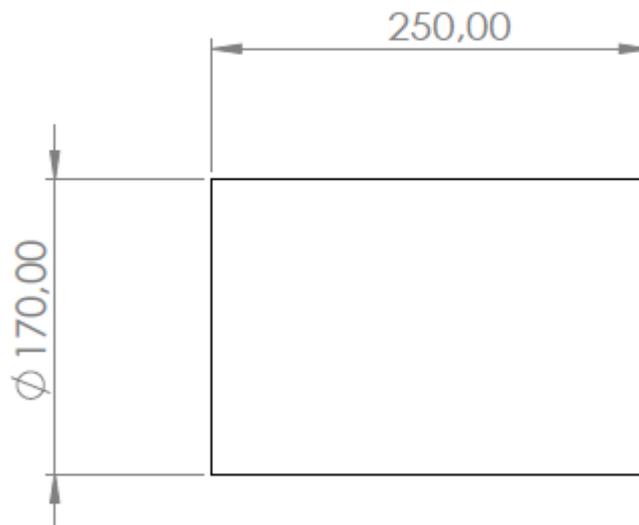
Chapitre IV : Fabrication du corps de l'outil

CONTRAT DE PHASE PHASE N 100		1/10
	PIECE : Corps d'outil	
	MATIERE : X36MoCr17	
	PROGRAMME : Petite série	

DESIGNATION : atelier de contrôle

MACHINE :

N°	Opérations	OUTILS	Paramètre de coupe				
			V _c	f	a _p	N	T _t
1	Contrôle du brut	Table + Vés Pied à coulisse	/	/	/	/	/



--	--	--	--	--	--

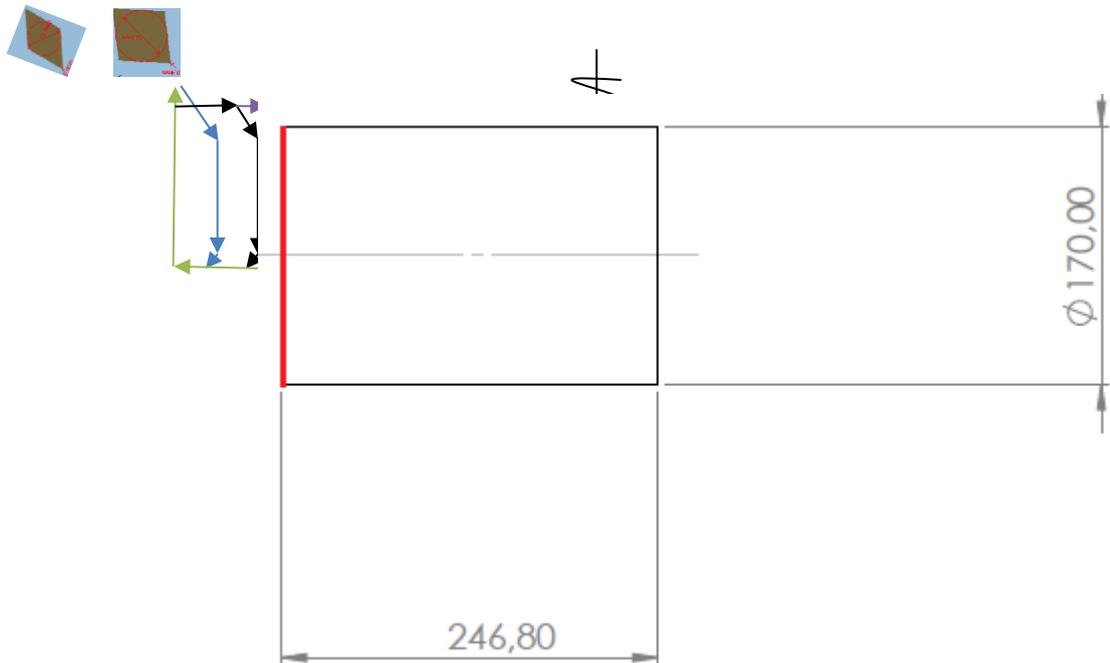
Chapitre IV : Fabrication du corps de l'outil

CONTRAT DE PHASE		2/10
PHASE N 200	PIECE : corps d'outil	
S/Ph 210	MATIERE : X36MoCr17	
	PROGRAMME : Petite série	

DESIGNATION : Dressage

MACHINE : centre d'usinage tour

N°	Opérations	OUTILS	Paramètre de coupe				
			V _c	f	a _p	N	T _t
1	Dressage ébauche 1re face Ø 170	0.4x80° Rhombique	117	0.2	/	219	1.9
2	Dressage finition 1er face Ø 170	0.4x55° Rhombique	117	0.1	/	219	0.33



V _c : vitesse de coupe (m\mn)	f: vitesse d'avance (mm/tr)	N : fréquence de rotation (tr\min)	a _p : profondeur de passe (mm)	T _t : temps technologique (min)
--	-----------------------------	------------------------------------	---	--

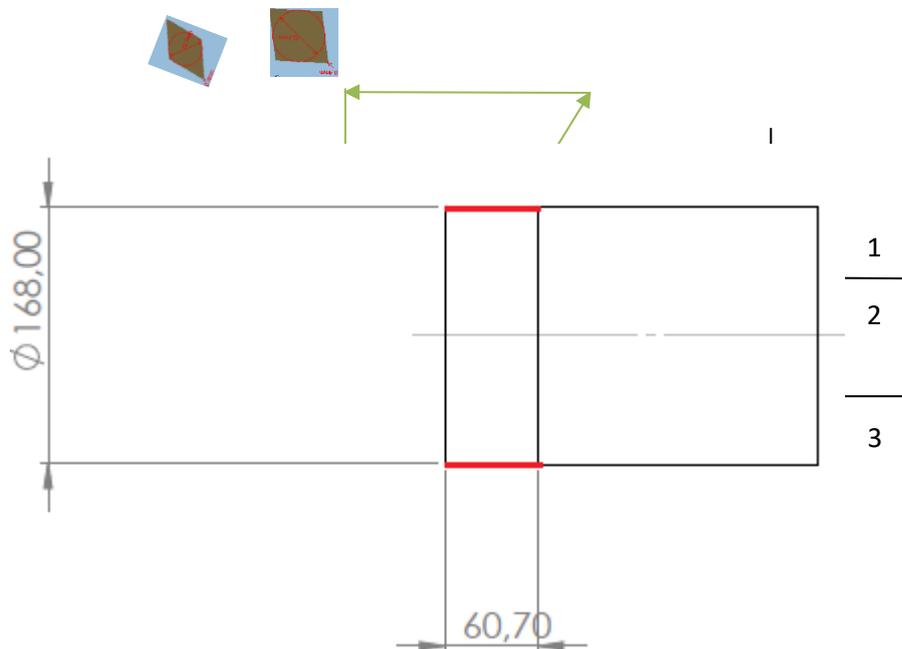
Chapitre IV : Fabrication du corps de l'outil

CONTRAT DE PHASE PHASE N 200 S/Ph 210	PIECE : corps d'outil MATIERE : X36MoCr17 PROGRAMME : Petite série	3/10
--	--	------

DESIGNATION : Chariotage

MACHINE : centre d'usinage tour

N°	Opérations	OUTILS	Paramètre de coupe				
			Vc	f	ap	N	Tt
3	Chariotage ébauche diamètre extérieur	0.4x80° Rhombique	117	0.2	/	219	1.9
4	Chariotage finition diamètre extérieur	0.4x55° Rhombique	117	0.1	/	219	0.33



Vc : vitesse de coupe (m\mn)	f : L'avance (m\tr)	N ; La fréquence de rotation (tr\mm)	ap : la profondeur de passe (mm)	Tt : temps technologique (min)
------------------------------	---------------------	--------------------------------------	----------------------------------	--------------------------------

Chapitre IV : Fabrication du corps de l'outil

CONTRAT DE PHASE							
PHASE N 200 S/Ph 210		PIECE : corps d'outil		4/10			
		MATIERE : X36MoCr17					
		PROGRAMME : Petite série					
DESIGNATION : Perçage							
MACHINE : centre d'usinage tour							
N°	Opérations	OUTILS	Paramètre de coupe				
			Vc	f	ap	N	Tt
5	Centrage 1er face Ø 170	6MM X 60DEG HSS CENTERDRILL	2679	0.1	/	5018	0.9
6	Perçage 1er face Ø 170	49x118°foret	2679	0.1	/	5018	0.9
				4			
Vc : vitesse de coupe (m\mn)	f : L'avance en (m\tr)	N : fréquence de rotation tr\mm	ap : la profondeur de passe (mm)	Tt : le temps technologique (min)			

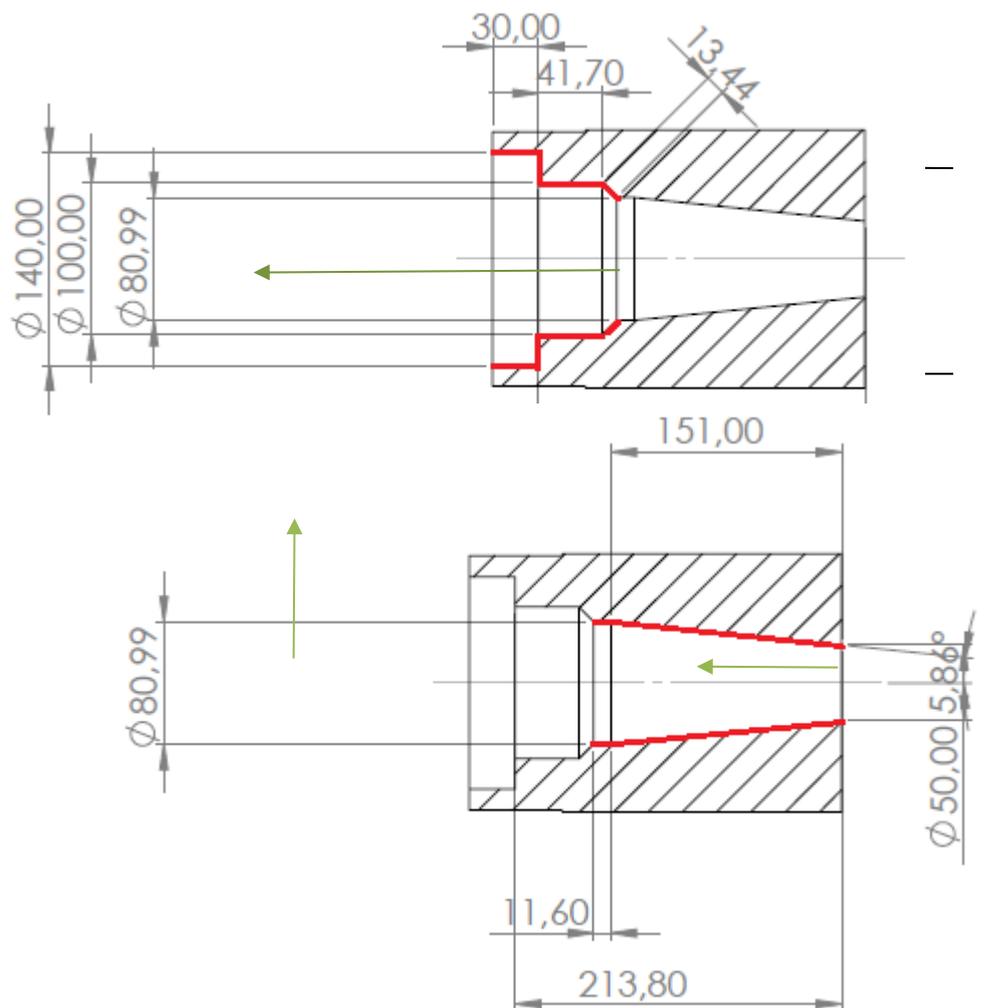
Chapitre IV : Fabrication du corps de l'outil

CONTRAT DE PHASE		5/10
PHASE N 200	PIECE : corps d'outil	
S/Ph 210	MATIERE : X36MoCr17	
	PROGRAMME : Petite série	

DESIGNATION : Alésage

MACHINE : centre d'usinage tour

N°	Opérations	OUTILS	Paramètre de coupe				
			Vc	f	ap	N	Tt
7	Alésage ébauche la 1re face Ø 170	0.4x80° Rhombique	117	0.2	/	219	1.9
8	Alésage finition de la 1er face Ø 170	0.4x55° Rhombique	117	0.1	/	219	0.33



Vc : vitesse de coupe (m\mn)	f : L'avance (m\tr)	N : fréquence de rotation (tr\mm)	ap : profondeur de passe (mm)	Tt : le temps technologique (min)
------------------------------	---------------------	-----------------------------------	-------------------------------	-----------------------------------

Chapitre IV : Fabrication du corps de l'outil

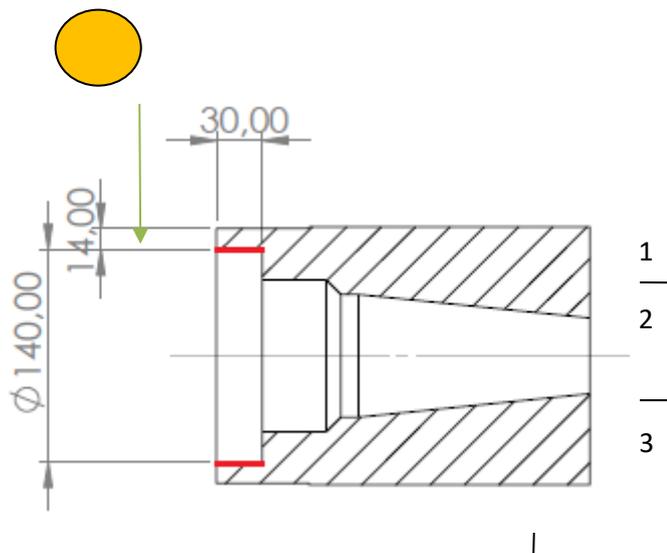
CONTRAT DE PHASE		
PHASE N 200 S/Ph 210	PIECE : corps d'outil	6/10
	MATIERE : X36MoCr17	
	PROGRAMME : Petite série	

DESIGNATION : Filetage

MACHINE : centre d'usinage tour

N°	Opérations	OUTILS	Paramètre de coupe				
			Vc	f	ap	N	Tt
9	Filetage intérieur rond 1er face Ø 170	Outil special filetage rond	119	0.2	/	221	1.9

Rd 140x6 à gauche sans jeu



Vc : vitesse de coupe (m\mn)	f : L'avance (m\tr)	N : La fréquence de rotation (tr\mm)	ap : profondeur de passe (mm)	Tt : le temps technologique (min)
------------------------------	---------------------	--------------------------------------	-------------------------------	-----------------------------------

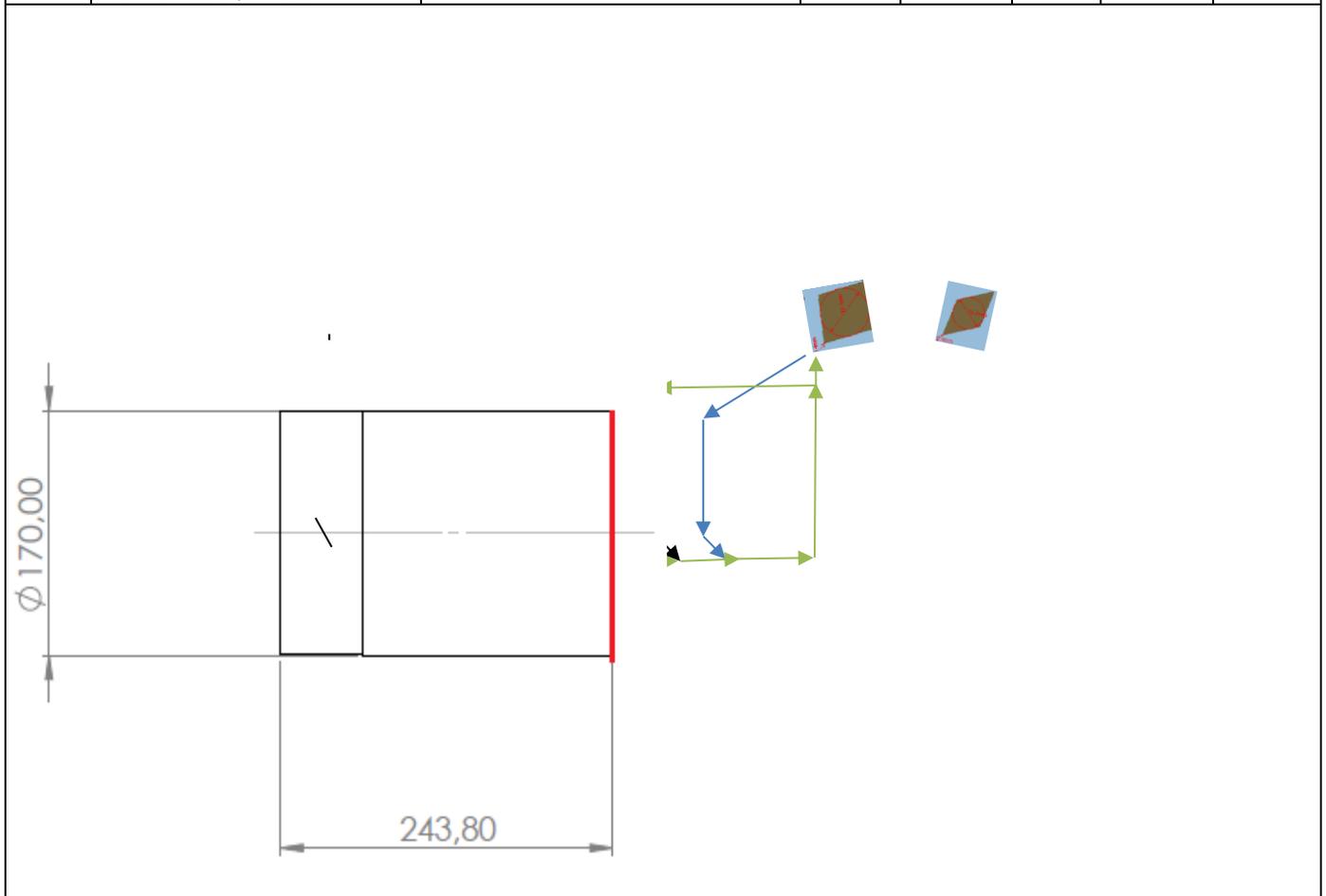
Chapitre IV : Fabrication du corps de l'outil

CONTRAT DE PHASE		7/10
PHASE N 200	PIECE : corps d'outil	
S/PH 220	MATIERE : X36MoCr17	
	PROGRAMME : Petite série	

DESIGNATION : dressage

MACHINE : centre d'usinage tour

N°	Opérations	OUTILS	Paramètre de coupe				
			V _c	f	a _p	N	T _t
1	Dressage ébauche 2eme face Ø 170	0.4x80° Rhombique	117	0.2	/	219	1.9
2	Dressage finition 2eme face Ø 170	0.4x55° Rhombique	117	0.1	/	219	0.33



V _c : vitesse de coupe (m\mn)	f : L'avance (m\tr)	N : La fréquence de rotation (tr\mm)	a _p : profondeur de passe (mm)	T _t : le temps technologique (min)
--	---------------------	--------------------------------------	---	---

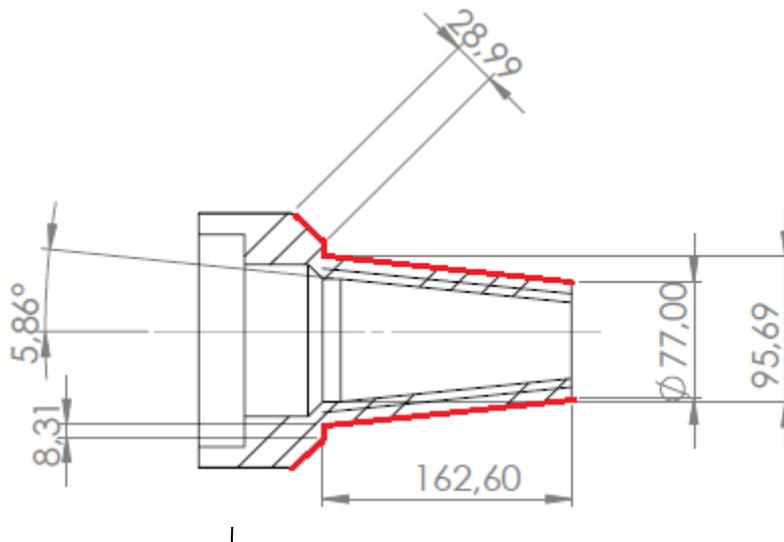
Chapitre IV : Fabrication du corps de l'outil

CONTRAT DE PHASE		8/10
PHASE N 200	PIECE : corps d'outil	
S/Ph 220	MATIERE : X36MoCr17	
	PROGRAMME : Petite série	

DESIGNATION : Chariotage

MACHINE : centre d'usinage tour

N°	Opérations	OUTILS	Paramètre de coupe				
			V _c	f	a _p	N	T _t
3	Chariotage ébauche diamètre extérieur	0.4x80° Rhombique	117	0.2	/	219	26
4	Chariotage finition diamètre extérieur	0.4x55° Rhombique	117	0.1	/	219	1.9



V _c : vitesse de coupe (m\mn)	f : L'avance (m\tr)	N : fréquence de rotation (tr\mm)	a _p : profondeur de passe (mm)	T _t : temps technologique (min)
--	---------------------	-----------------------------------	---	--

Chapitre IV : Fabrication du corps de l'outil

CONTRAT DE PHASE							
PHASE N 200		PIECE : corps d'outil			9/10		
S/Ph N 220		MATIERE : X36MoCr17					
		PROGRAMME : Petite série					
DESIGNATION : filetage							
MACHINE : centre d'usinage tour							
N°	Opérations	OUTILS	Paramètre de coupe				
			Vc	f	ap	N	Tt
5	Filetage extérieur rond 1er face Ø 170	Outil special filetage rond	119	0.2	/	221	2.6
<p><i>Rd $\frac{\phi 77}{\phi 95.7} \times 6$ à gauche sans jeu</i></p> <div style="text-align: center;"> <p>The drawing illustrates the cutting process for a thread on a workpiece. The workpiece has a diameter of 77.00 mm at the cutting point and a total length of 162.60 mm. The tool is positioned to cut a thread with a pitch of 6 mm. A yellow circle is drawn to the right of the drawing.</p> </div>							
Vc : vitesse de coupe (m\mn)	f : L'avance (m\tr)	N : fréquence de rotation (tr\mm)	ap : profondeur de passe (mm)	Tt : temps technologique (min)			

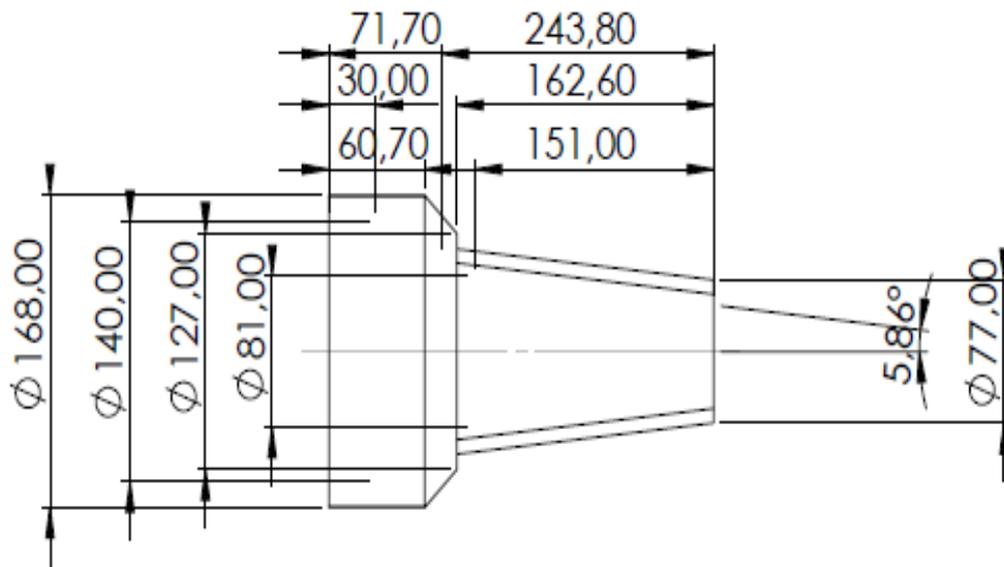
Chapitre IV : Fabrication du corps de l'outil

CONTRAT DE PHASE		10/10
PHASE N 200	PIECE : corps d'outil	
S/Ph N 220	MATIERE : X36MoCr17	
	PROGRAMME : Petite série	

DESIGNATION : atelier de contrôle

MACHINE :

N°	Opérations	OUTILS	Paramètre de coupe				
			V _c	f	a _p	N	T _t
6	Contrôle pièce	Table + vés Pied a coulisse	/	/	/	/	/



--	--	--	--	--

Chapitre IV : Fabrication du corps de l'outil

IV.2 Récapitulatif

IV.2.1 Tableau de temps technologiques

- **Sous phase 1**

Tableau IV-1 : temps technologique sous phase 1

Op	Op1	Op2	Op3	Op4	Op5	Op6	Op7	Op8	Op9	S/Ph 1
Tt(min)	1.2	0.67	0.93	0.91	0.16	19.0	10	3.7	4.6	17.14

- **Sous phase 2**

Tableau IV-2 : temps technologique sous phase 2

Op	Op1	Op2	Op3	Op4	Op5	S/Ph 2
Tt(min)	1.19	0.62	3.87	1.74	1.05	8.84

- **Temps Technologique de fabrication de la pièce**

$$T_t = T_{S/Ph1} + T_{S/Ph2} = 17.14 + 8.84 = \mathbf{25.98 \text{ min}}$$

IV.3 Programme de dressage face 1^{ère}, chariotage diamètre extérieur 170 et perçage diamètre 49

N1 (CNMG 431 80DEG SQR HOLDER)

N2 T0101

N3 B90.

N4 G00 G96 S548 M03

N5 (Ébauche face 1 \varnothing 170)

N6 G54 G00 Z248.654 M08

N7 X176.707

N8 G99 G01 X170. Z245.3 F.409

N9 X-.8

N10 X-1.507 Z245.654

N11 G00 Z248.654

Chapitre IV : Fabrication du corps de l'outil

N12 X170.707

N13 Z244.654

N14 G01 X170. Z244.3

N15 X-.8

N16 X-1.507 Z244.654

N17 G00 Z249.5

N18 X176.

N19 X508. Z127. M09

N20 M01

N21 (DNMG 431 80DEG SQR HOLDER)

N22 T0303

N23 B90.

N24 G00 G96 S548 M03

N25 (Finition face1 \varnothing 170)

N26 G54 G00 Z247.154 M08

N27 X175.907

N28 G01 X169.2 Z243.8 F.409

N29 X-.8

N30 X-1.507 Z244.154

N31 G00 X176.

N32 X508. Z127. M09

N33 M01

N34 (CNMG 431 80DEG SQR HOLDER)

N35 T0101

N36 B90.

N37 G00 G96 S548 M03

Chapitre IV : Fabrication du corps de l'outil

N38 (Ébauche chariotage 1)

N39 G54 G00 Z247.154 M08

N40 X175.707

N41 G01 X169. Z243.8 F.409

N42 Z182.7

N43 X169.2

N44 X169.907 Z183.054

N45 G00 X175.907

N46 X508. Z127. M09

N47 M01

N48 (DNMG 431 80DEG SQR HOLDER)

N49 T0303

N50 B90.

N51 G00 G96 S548 M03

N52 (Finition chariotage 1)

N53 G54 G00 Z246.754 M08

N54 X174.707

N55 G01 X168. Z243.4 F.409

N56 Z182.7

N57 X168.2

N58 X168.907 Z183.054

N59 G00 X174.907

N60 X508. Z127. M09

N61 M01

N62 (6MM X 60DEG HSS CENTERDRILL)

Chapitre IV : Fabrication du corps de l'outil

N63 T0505

N64 B0

N65 G00 G97 S26426 M03

N66 (Foret à centrer 1 face 1^{ère} Ø 170)

N67 G54 G00 Z246.8 M08

N68 X0

N69 G74 Z241.8 F1611.

N70 X508. M09

N71 Z127.

N72 M01

N73 (49.0mm JOBBER DRILL)

N74 T0707

N75 B0

N76 G00 G97 S2082 M03

N77 (perçage 1 face 1^{ère} Ø 170)

N78 G54 G00 Z249.169 M08

N79 X0

N80 G97 S2082

N81 Z246.169

N82 G98 G01 Z238.169 F343.9

N83 G00 Z246.169

N84 Z241.169

N85 G01 Z233.169

N86 G00 Z246.169

N87 Z236.169

N88 G01 Z228.169

Chapitre IV : Fabrication du corps de l'outil

N89 G00 Z246.169

N90 Z231.169

N91 G01 Z223.169

N92 G00 Z246.169

N93 Z226.169

N94 G01 Z218.169

N95 G00 Z246.169

N96 Z221.169

N97 G01 Z213.169

N98 G00 Z246.169

N99 Z216.169

N100 G01 Z208.169

N101 G00 Z246.169

N102 Z211.169

N103 G01 Z203.169

N104 G00 Z246.169

N105 Z206.169

N106 G01 Z198.169

N107 G00 Z246.169

N108 Z201.169

N109 G01 Z193.169

N110 G00 Z246.169

N111 Z196.169

N112 G01 Z188.169

N113 G00 Z246.169

N114 Z191.169

N115 G01 Z183.169

N116 G00 Z246.169

N117 Z186.169

Chapitre IV : Fabrication du corps de l'outil

N118 G01 Z178.169

N119 G00 Z246.169

N120 Z181.169

N121 G01 Z173.169

N122 G00 Z246.169

N123 Z176.169

N124 G01 Z168.169

N125 G00 Z246.169

N126 Z171.169

N127 G01 Z163.169

N128 G00 Z246.169

N129 Z166.169

N130 G01 Z158.169

N131 G00 Z246.169

N132 Z161.169

N133 G01 Z153.169

N134 G00 Z246.169

Chapitre IV : Fabrication du corps de l'outil

IV.4 Dessin de définition

IV.4.1 Dessin du corps de l'outil

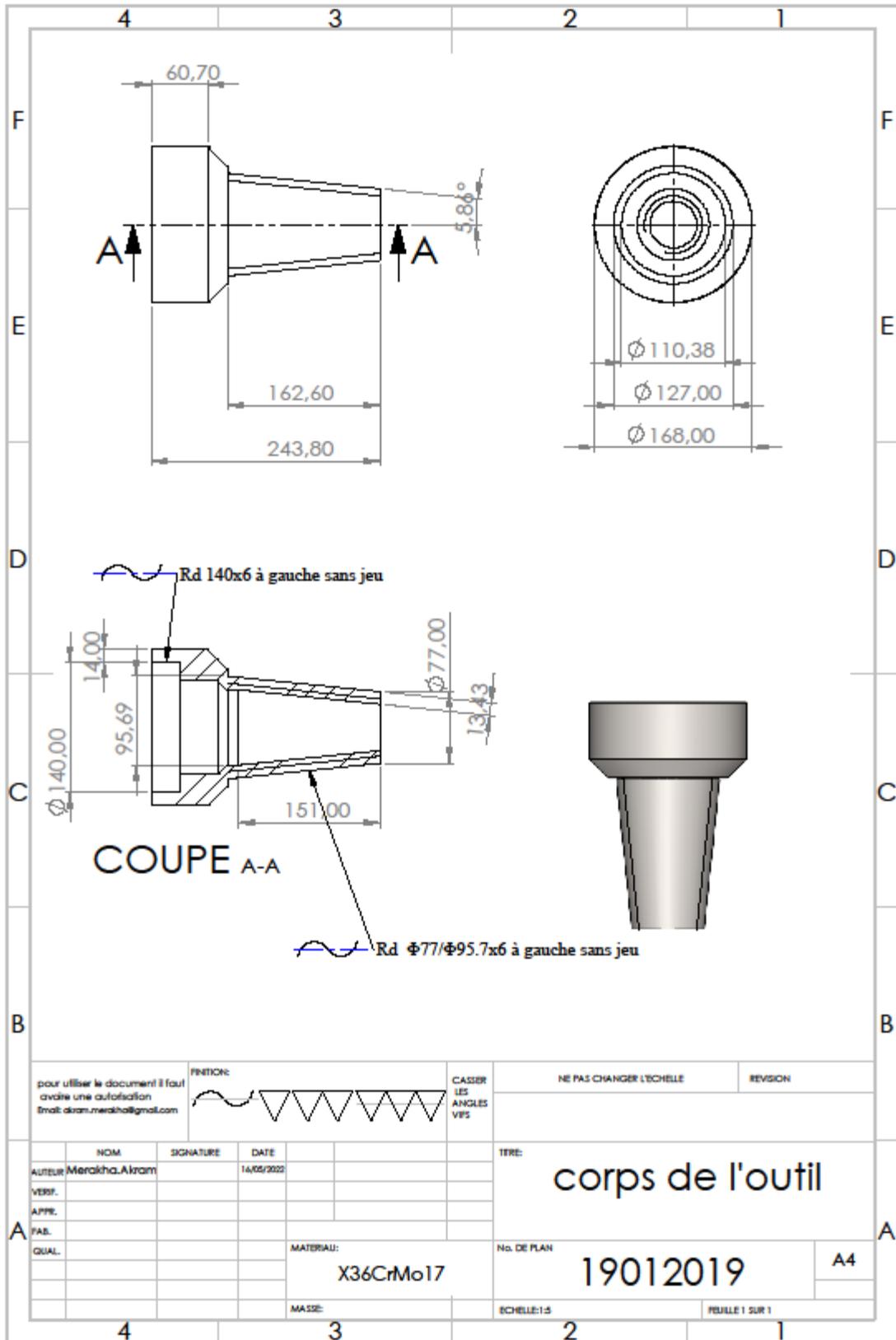


Figure IV-1: Dessin du corps de l'outil

Chapitre IV : Fabrication du corps de l'outil

IV.4.2 Dessin du plaquette PDC

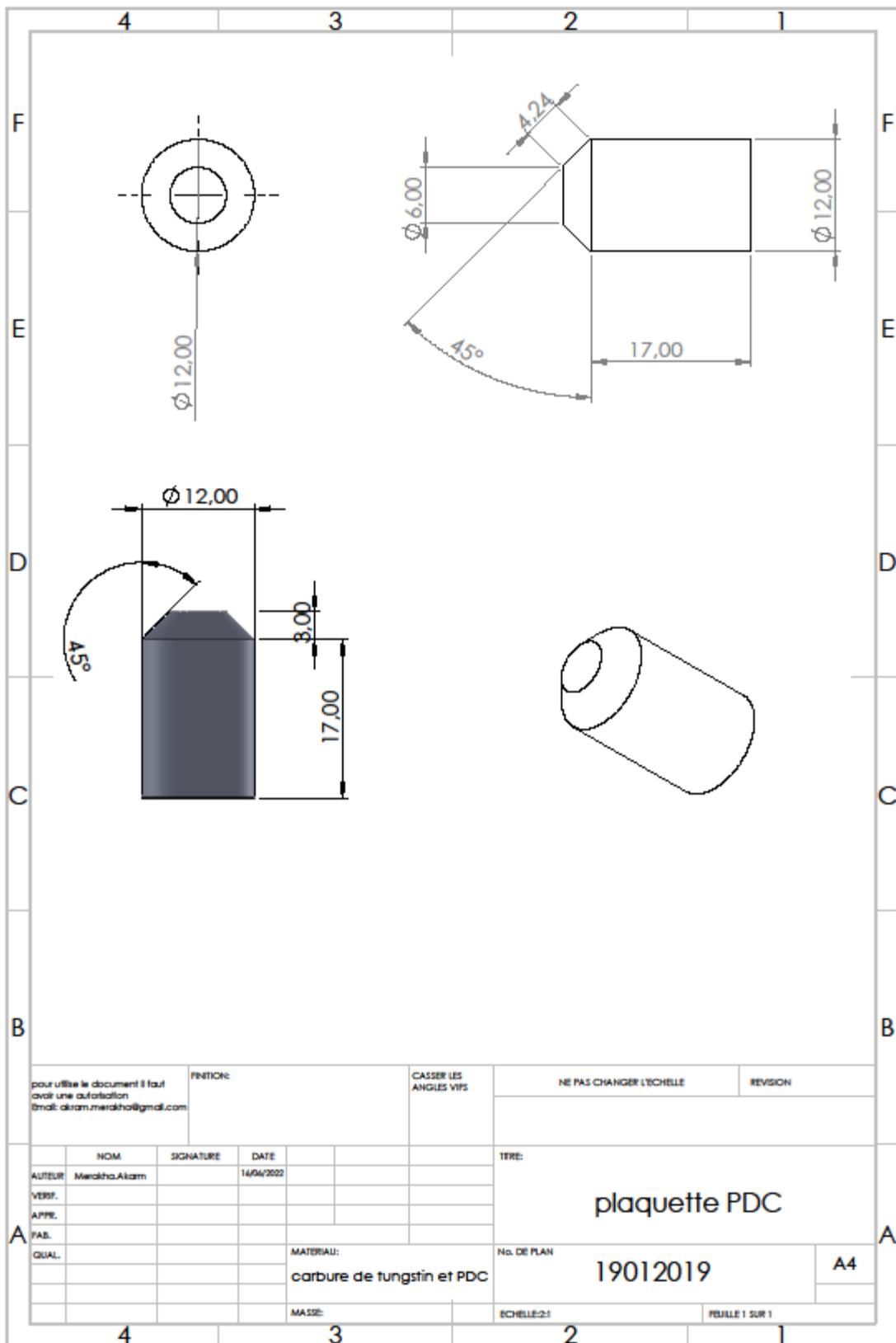
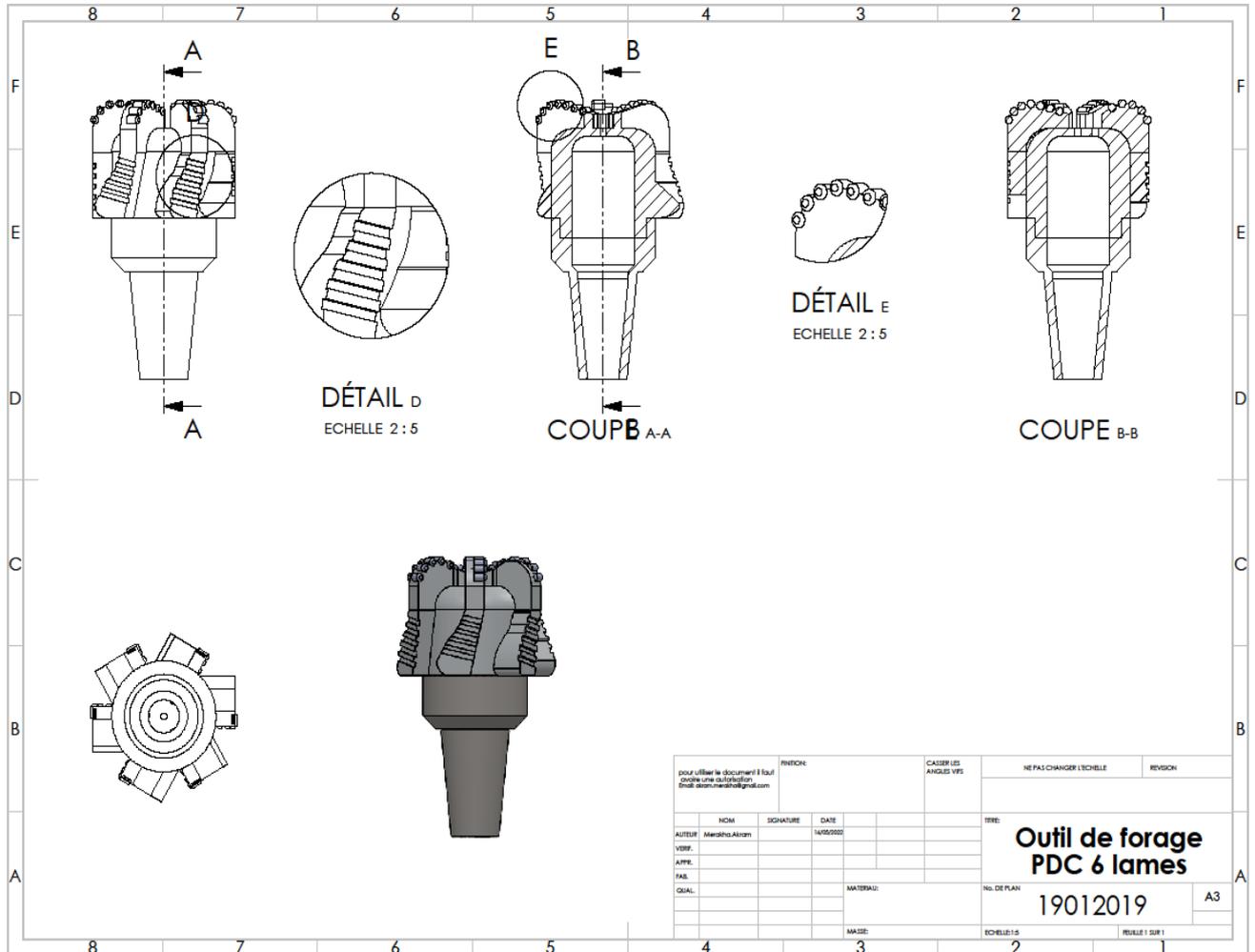


Figure IV-2: Dessin du plaquette PDC

Chapitre IV : Fabrication du corps de l'outil

IV.4.3 Dessin d'outil de forage PDC six lames



*Conclusion
Générale et
perspectives*

Conclusion et perspectives

Conclusion et perspectives

Le projet de conception et d'étude de fabrication du prototype d'outil de forage, six lames à pastilles en PDC, très comparable à une forêt massive par la géométrie et le matériau de coupe, m'a permis de consolider mon apprentissage dans la spécialité Fabrication Mécanique et Productive en particulier dans le domaine de la CFAO.

La complexité de l'outil de forage par les formes de ses parties constituées de surfaces cylindriques, coniques, hélicoïdales (spiro-coniques) et filetages ronds. Ces surfaces combinées étaient réalisées, conventionnellement et par truchement (c.à.d. forme rapprochée à celle de la conception), au moyen de fraises modulaires. Le développement des M.O multiaxiaux (4 axes et 5 axes) nous permettent actuellement de réaliser conformément à la conception de formes complexes.

Le couplage de la conception et de la fabrication m'a contraint à traiter, en premier, le sujet par l'utilisation du logiciel de CAO SolidWorks et en second, le logiciel de FAO CamWorks qui est compatible au premier. J'ai utilisé le logiciel de FAO qui nous a proposé des opérations associées à des générateurs de trajectoires étagées d'usinage conformément au dessin conçu par mes soins au moyen du logiciel SolidWorks. Tout comme le logiciel de CAO, le logiciel de FAO m'a obligé de passer par une phase d'apprentissage de génération de trajectoires à 4 et 5 axes.

La simulation complète de la tête de forage m'a posé une difficulté majeure due à la longueur limitée de la partie active de l'outil, me contraignant à la réaliser par parties et par faces.

A juste titre, l'optimisation de stratégies d'usinages de la tête de forage (ébauche et finition), en ajustant les différents paramètres des générateurs de trajectoires avec efficacité en termes de temps d'usinage et d'état de surface, est à inscrire en perspective de ce travail.

L'autre partie de ce projet, non étudiée et reléguée en perspective, est du domaine de la métallurgie, elle concerne la fabrication des pastilles de coupe des roches. Ces pastilles sont revêtues en Diamant Poly cristallin Compact (PDC) avec un substrat en carbures de Tungstène (WC). Elles sont fabriquées par frittage et par dépôt physique en phase vapeur (PVD) ou par dépôt chimique en phase vapeur (CVD). Après fabrication, les pastilles sont brasées dans les logements conçus dans le corps de la tête de forage.

*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques

- [1] MOUNIR AMAR. « Technique de forage principe et matériels ». Rapport bibliographique. Université Chouaib Doukkali 13/07/2007 page 8
- [2] comite français d'histoire de la géologie (COFRHIGEO) séance du 27/02/1991
- COMITÉ FRANÇAIS D'HISTOIRE DE LA GÉOLOGIE (COFRHIGEO) (séance du 27 février 1991
- [3] ASTM International - Standards Worldwide [archive], sur www.astm.org
- [4] History of the Oil Industry [archive], sur www.sjvgeology.org
- [5] BEALL, J, FERETTI, A., rapport du CESE, De la gestion préventive des risques environnementaux : la sécurité des plateformes pétrolières en mer, 2012.
- [6] Bergerot, J.L., Technologie Forage – Puits HPHT, conférence GEP-AFTP, Paris, 8 février 2012.
- [7] rapport d'étude contexte et aspects fondamentaux du forage et de l'exploitation des puits d'hydrocarbures 06/05/2015 page 11
- [8] LUDO, B. Deepwater drilling way forward, Journées annuelles des hydrocarbures, 23-24/10/2013.
- [9] B.a. KENNEDY, (1990)", Surface Mining, " 2e edition. Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME) Baltimore, Maryland (Flider Eugene USA)
- [10] R. TEALE (1965), "The concept of Specific Energy in Rock Drilling". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, vol. 2, page 57-73, 1965
- [11] ACF le forage 2004 page 8
- [12] OEC 2010 OECD/IEA map energy indicators, 2010
- [13] MALIK YAHIAOUI. « Comportement tribologique de diamants polycristallins et de carbures cémentés WC-Co avec traitements de graduation Application aux inserts et taillants d'outils pour le forage de formations rocheuses fortement abrasives ». Thèse. Université de Toulouse 21/06/2013
- [14] UNP 2011 World population to reach 10 billion by 2100 if fertility in all countries converges to replacement level. United Nations Press Release Embargoed - New York Times, 2011.
- [15] MEHDI METAICHE. Forage techniques et procédés. Université Bouira, Octobre 2013 page 1
- [17] DYHIA OUMESSAOUD. « Elaboration et caractérisation d'un matériau composite en carbure de tungstène-alliage utilisé dans la fabrication des outils de forage ». Mémoire. Université de Mouloud Mammeri 2018 page 3-17

Références bibliographiques

[19] IFP Energies nouvelles

[20] BERGEROT, J.L., Technologie Forage – Puits HPHT, conférence GEP-AFTP, Paris, 8 février 2012.

[21] C. AUGUSTINE, J. W. TESTER et B. ANDERSON. A comparison of geothermal with oil and gas well drilling costs. In Thirty-first workshop on geothermal reservoir engineering, 2006.

[22] STEPHANE MENAND. « Principes évolutions et avancées technologiques en forage mines ». ParisTech 30/11/2010

[23] GILLES PELFRENE. « Rôle du processus de forabilité des roches dans les vibrations de torsion des systèmes de forage pétrolier ». Thèse. L'école nationale supérieure des mines de paris 20/12/2010 page 25

[24] AMADOU ABDOULAYE BA. « Contribution à la surveillance d'un processus de forage pétrolier ». Thèse. L'école nationale supérieure d'arts et métiers 31/03/2010 page 8

[25] FARAG ABDULGALIL. « Commande non linéaire dans les systèmes de forage pétrolier : contribution à la suppression du phénomène de « STICK-SLIP » ». Thèse. Université de paris XI UFR scientifique d'Orsay 28/02/2006 page 7

[26] ABDESSELAM BLAIDE. « Modélisation tridimensionnelle du comportement mécanique de la garniture de forage dans les puits à trajectoire complexes ». Thèse. L'école des mines paris 27/09/2005 page 3

[27] KRIKIB AMIN « Commande d'un système de forage pétroliers en vue de la réduction des vibrations de torsion ». Projet de fin d'étude. Université de Jijel 2018 page 15

[28] M BRIOUA : « Etude des instabilités dans une tige de forage pétrolier influence du frottement visqueux ».

[29] L.VAN DEN STEEN. « Suppressing stick slip induced drill string oscillation: hyperstability approach. PhD thésis », Université of Twente, 1997.

[30] MOUSSAMRI HANAFI et CHETOUANI FODIL. « Analyse de processus de fabrication et de fonctionnement d'un outil de forage (Steel Body, Matrix Body) ». Mémoire de fin d'étude. Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou 2018 page 21

[31] DHAKER EZZEDDINE. « *Modélisation du comportement dynamique d'un train de tiges de forage pétrolier : application aux vibrations latérales* ». Thèse. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2013.

[32] Guide d'application de l'arrêté interministériel du 11/9/2003 relatif à la rubrique 1.1.0 de la nomenclature eau : sondage, forage, puits, ouvrage souterrain non domestique

[33] CEN. 2006

Références bibliographiques

- [34] Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur – Champs-sur-Marne 2018
- [35] Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2010 -Grenoble 7-9 juillet 2010
- [36] Atlas-Copco reference (2012) « Blasthole Drilling in Open Pit Mining». third edition
- [37] KHALED RAIS. « Recherche du régime rationnel de fonctionnement des installations de forage (Cas de la mine de Djebel-Onk) ». Thèse. Université 20 aout1955 Skikda. 2018. Page 14
- [38] Atlas Copco (2009) « Surface drilling, third. (Reference Booklets (CD) from Atlas Copco Rock Drills AB,) »
- [39] F. VIALLET (1970). « Statistique et recherche appliquée ». Edition Cholard et associées Paris
- [40] P. R. JOHANN, A. F. MARTINI, A. MAUL, and J. P. P. NUNES (2012) «Reservoir geophysics in Brazilian pre-salt oilfields » 12th International Congress. Brazil.
- [41] Rehm, W.A. and McClendon, M.T. (1971). « Measurement of formation pressure from drilling Data». SPE 3601. New Orleans: SPE Annual Fall Meeting.
- [42] R. A. CUNNINGHAM (1960) «Laboratory Studies of the Effect of Rotary Speed on Rock-bit Performance and Drilling Cost», American Petroleum Institute
- [43] FRALEY. S. OOM, M. TERRIEN. B. & Date, J. Z., (2006). «Design of experiments via Taguchi methods: orthogonal arrays. The Michigan chemical process dynamic and controls open text Book», Michigan USA.
- [44] F. GRONDIN. « Outils de forage ». ENSPM Formation Industrie - Forage • Production • Gisement. 2009.
- [45] NACEF.A. « Modélisation de la vitesse d'avancement d'un outil de forage ». Mémoire. Université Hmed Bougera Boumerdes, faculté d'hydrocarbure et de la chimie, 2015.
- [46] STEPHANE VIVIER (2002) « Stratégies d'optimisation par la méthode des Plans d'Expériences, et Application aux dispositifs électrotechniques modélisés par Eléments Finis ». Thèse.
- [47] ENSPM. « Les outils de forage ». Formation Industrie. 1999
- [48] JOHNSON SCREEN JOSEPH. S. DEVEINNY «migration of hazardous wastes» JOHNSON SCREEN (1986) «Groundwater and Wells». « Second Edition» JOHNSON SCREEN.

Références bibliographiques

- [49] MONTGOMERY. D.C. (1991). «Design and analysis of experiments». JOHN WILEY. and Sons, New York
- [50] A. SLIMANI. « Module M1 ». Formation JDF. 2004.
- [51] F. GRONDIN. « Outils de forage ». ENSPM Formation Industrie - Forage • Production • Gisement. 2009.
- [52] PIOTRO BORYCZKO. « Drill bit selection and optimization in exploration well 6507/6-4A in the Nord land Ridge Area», Master's thesis, university of Stavanger, faculty of science and technology, 2012.
- [54] J. C. JAEGER. N. G. W. COOK (1969) «Fundamentals of Rock Mechanics». Methuen & Co Ltd, Society for Mining Metallurgy and Exploration Inc. Littleton Colorado.
- [55] VIVEK. K .PRAIAPATI, B. Tech « Modeling of Rock Failure under PDC Cutter Based on Lab Experiments». Willy USA.
- [56] R. FEENSTRA. (1989) « Status of Polycrystalline Diamond-Compact Bits» PDC (polycrystalline Diamond Compact) Bit Research at Sandia National Laboratories Sandia National Laboratories, United States. Department of Energy. Office of Scientific and Technical Information Publisher Sandia National Laboratories. 1989
- [57] M. G. BINGHAM. (1965) « A New Approach to Interpreting Rock Drill ability», Petroleum Publishing Company USA
- [58] J. F. BRETT. AI (1990). «Bit Whirl a New Theory of PDC Bit Failure» SPE Drilling Engineering, vol. 5. Page 275 281.
- [59] PILLET (1994). « Optimisation de la maîtrisé statistique des procédés par une méthode de filtrage d'ordre».
- [60] BILGIN.N. SHARIAR.K Bilgin N. (1986). «Evaluation of indirect methods used in determination of some mechanical properties of rocks and coal seams». First National Rock Mechanics Congress Oct. 1986. Ankara, Turkey. Page. 86-97 (In Turkish).
- [61] Dahl F et al (2011) «Classification of properties influencing the drillability of rock, based on the NTNU/SINTEF test method. Tunn Undergr Space Technol». 28(2012). Page 150–158
- [63] Bourgoyne A.T. Jr., Young F.S., (1988) "A Multiple Regression Approach to Optimal Drilling and Abnormal Pressure Detection". (Society of Petroleum Engineers Journal Volume 14)
-

Références bibliographiques

[16] Fossiles: formation du pétrole

<https://www.connaissancedesenergies.org/fichepedagogique/formation-du-petrole>

[18] pétrolière

<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/prospection-exploration-gaziere>

[53] <https://www.osmre.gov/resources/blasting/btm/Module4.pdf>

[62] BILIM. N., (2011). Determination of drillability of some natural stones and their association with rock properties. <http://www.academicjournals.org/SRE>

