

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMÉRI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE

Filière: Hydrauliques

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Présenté pour obtenir le diplôme de master de **Master**

Spécialité : Ouvrages Hydrauliques

Thème

Suivi de deux modes de réalisation de forages d'eau

Réalisé par :

Mlle. ABDELALI Thiziri

Soutenu devant le jury composé de :

<i>NOM et Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Lieu d'exercice</i>	<i>Qualité</i>
<i>Mr. ZAMOUM SAID</i>	<i>MCB</i>	<i>UMMTO</i>	<i>Président</i>
<i>Mr. KHATTAOUI MOHAMMED</i>	<i>PROF</i>	<i>UMMTO</i>	<i>Promoteur</i>
<i>Mme. GADI ROSA</i>	<i>ING</i>	<i>DRE</i>	<i>Co- promotrice</i>
<i>M. BOUMALEK OUALID</i>	<i>MA</i>	<i>UMMTO</i>	<i>Examineur</i>

Date de soutenance : le 23/06/2025



Remerciement

Avant tout, je remercie le Dieu tout-puissant, de tout cœur pour m'avoir guidé, soutenu et donné la force d'aller jusqu'au bout de ce mémoire.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mes chers parents pour leur amour, leurs sacrifices et leur présence à chaque étape de ma vie ont été ma plus grande force.

Merci pour vos prières, votre patience et votre confiance.

Je remercie sincèrement Mr KHETTAOUI Mohammed, mon promoteur et Mme TOUDEFT Rosa, ma Co-promotrice, pour leur aide, leurs conseils et leur accompagnement tout au long de ce travail.

Je remercie également les membres du jury pour le temps qu'ils ont consacré à lire et à évaluer mon mémoire.

Un grand merci à Mr BOUADJLA, du secteur de l'agence nationale des ressources hydraulique de TIZI-OUZOU, pour son Aide, sa disponibilité et le partage de ses connaissances.

Enfin, merci à toutes les personnes qui m'ont aidé, de près ou de loin, dans la réalisation de ce mémoire.

ABDELALI Thiziri



DEDICACE

*Je dédie ce mémoire à tous ceux qui ont
contribués, de près ou de loin, à mon parcours.*

*A ma famille, merci pour votre amour sans
condition, vos prières silencieuses, et votre présence
rassurante à chaque étape de ma vie.
A mes parents, qui sont ma plus grande fierté
et mon pilier.*

*A mon frère et à mes sœurs, pour leur
complicité, leur soutien et tous fousrires
partagés.*

*A mon fiancé, pour sa patience, son écoute, et
sa présence constante à mes côtés, même dans
les moments les plus stressants.*

*A Mélissa, ma seule et fidèle amie, merci pour
ta bienveillance, tes conseils et ton amitié rare.*

*Et à mes amis, merci d'avoir été là, avec vos
encouragements, vos mots simples, vos gestes
incères.*

*Ce mémoire et un bout de moi, mais il porte
aussi un peu de vous tous.*

ABDELALI Thiziri



Introduction générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur les eaux souterraines et les forages

I.1. Introduction	2
I.2. Les eaux souterraines, les nappes, les aquifères.....	2
I.3. Les Types de nappes	2
I.3.1. Nappe libre.....	3
I.3.2. Nappe captive	3
I.3.3. Nappe semi captive	3
I.4. L'importance de l'eau souterraine.....	3
I.5. Problématiques liée à l'exploitation des nappes	4
I.6. Définition d'un forage d'eau	4
I.7. L'objectif de réalisation d'un forage	4
I.8. Les différents types du forage	5
I.9. Exploitation et reconnaissance d'un forage	5
I.9.1. Cartographie.....	5
I.9.2. Méthodes géophysiques	7
I.9.3. Sondage (forages) de reconnaissance	8
I.10. Le choix du site	8
I.11. Les différentes techniques des forages.....	9
I.11.1. Forage par battage (percussion).....	9
I.11.2. Forage rotary.....	10
I.11.3. Forage marteau fond de trou	13
I.11.4. Forage par havage	14
I.11.5. Forage par carottage.....	15
I.11.6. Forage par tarière	16
I.12. Les procédures administratives	16
I.12.1. Le financement de projet	16
I.12.2. Préparation de cahier des charges	17
I.12.3. L'appel d'offres	18
I.12.4. Les critères de choix de l'entreprise de forage	18
I.13. Conclusion.....	19

Chapitre II : Matériels utilisées et les travaux à suivre pour réaliser un

Forage

II.1. Introduction.....	20
II.2. Le fluide de forage et l'hydrochimie de forage	20
II.2.1. Définition de fluide de forage.....	20
II.2.2. Rôle de fluide de forage	20
II.2.3. Propriété des fluides de forage	21
II.3. La boue de forage.....	22
II.3.1. Les fonctions de la boue de forage	22
II.3.2. Types de boues	23
II.4. Air comprimé	25
II.5 Mousse stabilisée	26
II.6. Moyenne d'injection de la boue.....	26
II.7. Circuit de fluide de forage de forage	27
II.8. Matériels utilisée pour réaliser le forage.....	27
II.8.1. Les intervenants humains	28
II.8.2. Les équipements matériels	28
II.8.3. Stocks des matériaux	28
II.8.4. Les outils de forage	28
II.9. Les travaux à suivre.....	30
II.9.1. Installation de la machine	30
II.9.2. Choix de la technique de forage	30
II.9.3. Préparation des fosses à boue	31
II.9.4. Mise en place du tube guide	32
II.9.5. Contrôle de la rectitude et de la verticalité	33
II.9.6. Prélèvement des échantillons	34
II.9.7. Carottage électrique (diagraphie)	34
II.9.7.1. Objectif de la diagraphie électrique	36
II.9.7.2. Principe de fonctionnement	36
II.9.8. Alésage et réalésage	37
II.9.9. La mise en place des équipements du forage	38
II.9.9.1. Mise en place de tubage	38
II.9.9.2. Colonne de captage	40
II.9.9.2.1. La crépine	40
II.9.9.2.2. Différents types des crépines	41
II.9.9.2.3. Ouverture des fentes des crépines	42

II.9.9.3. Massif filtrant	42
II.9.9.3.1. Définition et rôle	42
II.9.9.3.2. Rôle de gravier additionnel	43
II.9.9.3.3. Conditions pour réussir le gravillonnage	43
II.9.9.3.4. Volume de gravier	43
II.9.9.4. La cimentation	44
II.9.10. Développement	45
II.9.10.1. Les méthodes de développement	45
II.9.10.2. Contrôle du développement	50
II.9.10.3. Traitement à l'Hexamétaphosphate	50
II.9.11. Essai de pompage	51
II.9.11.1. Le but des essais de pompage	51
II.9.11.2. Test de l'ouvrage	51
II.9.11.3. Test de la nappe	52
II.9.11.4. Principaux types d'essai de pompage	52
II.9.11.5. Equipement d'observation de base	53
II.10. Conclusion	53

Chapitre III : suivie des cas de réalisation de forage

III.1. Introduction	54
Cas 1 : Réalisation d'un forage par battage	
III.2. Présentation de la zone d'étude	55
III.3. Implantation du forage	56
III.4. Choix de la méthode de réalisation	56
III.5. Installation de chantier	57
III.7. Equipement de forage	58
III.8. La réalisation de forage	60
III.9. Prélèvement des échantillons	60
III.10. Tubage du forage	61
III.10.1. La mise en place de tubage plein et crépine	61
III.10.2. Massif filtrant	62
III.10.3. Cimentation	63
III.11. Le développement	63
III.12. Essai de pompage	64

III.12.1. Essai par palier	64
III.12.2. Essai à longue durée.....	65
III.12.3. Interprétation des résultats.....	66
III.13. L'aménagement du forage	66

CAS 2 : forage en mode rotary

III.14. Présentation de la zone d'étude	68
III.15. L'implantation de forage F ₂ ASSIF BOULMA.....	69
III.16. Le choix de la méthode de réalisation de forage	69
III.17. L'installation du chantier.....	70
III.18. Les bassins à boue	70
III.19. Les étapes de construction de forage.....	71
III.20. Equipement du forage.....	73
III.20.1. Mise en place de tubage plein et crépine	73
III.20.2. Massif filtrant	75
III.20.3. La cimentation.....	75
III.21. Le développement.....	76
III.22. Les essais de pompage.....	77
III.22.1. Choix du protocole des essais	77
III.22.2. Equipements utilisé	77
III.22.3. Déroulement des essais	78
III.22.4. Récapitulatif de résultat des essais.....	78
III.22.5. Analyse et interprétation des résultats.....	80
III.22.6. Aménagement de la tête de forage	80
III.23. Conclusion	82

Figure 1 : Les types de nappes.....	3
Figure 2 : Schéma d'un forage d'eau.....	4
Figure 3 : Les trois types de forage.....	5
Figure 4 : Schéma de sismique réfraction.....	7
Figure 5 : Schéma de sismique réfraction.....	8
Figure 6 : Forage par battage.....	10
Figure7 : Disposition schématique d'un atelier de forage rotary (d'après A.MABILLOT).....	12
Figure 8 : forage au marteau fond de trou taillant Odex.....	14
Figure 9 : Benoto.....	15
Figure 10 : forage par tarière.....	16
Figure 11 : Cycle de fluide de forage.....	20
Figure 12 : La bentonite.....	23
Figure 13 : Circuits de fluides de forage.....	27
Figure 14 : Outils à lame.....	29
Figure 15 : Outil a molettes.....	30
Figure 16 : Fosse a boue.....	32
Figure 17 : L'échantillonnage de sol.....	34
Figure 18 : Diagraphie d'un forage.....	37
Figure 19 : Le tubage.....	40
Figure .20 : Types de crépines.....	41
Figure 21 : Massif filtrant.....	42
Figure 22 : Gravier de filtration.....	44
Figure 23 : La cimentation.....	44
Figure 24 : Piston de développement (ALBERT MABILLOT).....	47
Figure 25 : Développement à Forage ouvert (ALBERT MABILLON).....	48
Figure 26 : Développement à forage fermé (ALBERT MABILLON).....	49
Figure 27 : Développement par lavage au jet (ALBERT MABILLON).....	50
Figure 28 : Sonde piézométriques.....	53
Figure 29 : Kit débitmètre.....	54
Figure 30 : Situation géographique de la commune AIT TOUDEET.....	55
Figure 31 : Localisation de forage de Ait Toudert.....	56
Figure 32 : Installation de la machine de battage (original).....	57

Liste des figures

Figure 33 : La plateforme de forage (original).....	57
Figure 34 : Le trépan (original).....	58
Figure 35 : Le mâte.....	58
Figure 36 : Clapette (original).....	58
Figure 37 : La table de rotation (original).....	59
Figure 38 : Le treuil (original).....	59
Figure 39 : Installation du tube guide (original).....	60
Figure 40 : Prélèvement des échantillons.....	61
Figure 41 : La mise en place de tubage.....	62
Figure 42 : La mise en place de massif filtrant.....	63
Figure 43 : L'aménagement de la tête de forage.....	63
Figure 44 : Développement du forage.....	64
Figure 45 : La courbe caractéristique des essais par paliers.....	65
Figure 46 : La coupe lithologique de forage d'AIT TOUDERT (original).....	67
Figure 47 : Situation géographique de TIZI N TLATHA.....	68
Figure 48 : Localisation de forage ASSIF BOULMA.....	69
Figure 49 : La plateforme de forage (original).....	70
Figure 50 : la machine de rotary.....	70
Figure 51 : Les bassines à boue (Originale).....	71
Figure 52 : La pompe a boue et la bentonite (original).....	72
Figure 53 : Tube en PVC (original).....	74
Figure 54 : La mise en place de tubage (original).....	74
Figure 55 : La mise en place de massif filtrant (original).....	75
Figure 56 : la cimentation (original).....	76
Figure 57 : Le développement de forage (original).....	77
Figure 58 : courbe caractéristique de rabattement en fonction du débit.....	79
Figure 59 : L'aménagement du forage.....	80
Figure 60 : La coupe lithologique de forage ASSIF BOULMA.....	81

La liste des tableaux

Tableau 1 : Les caractéristiques de tubes guide.....	32
Tableau 2 : Coupe lithologique établie à partir le prélèvement des échantillons....	60
Tableau 3 : Programme de tubage.....	61
Tableau 4 : Essai par palier.....	64
Tableau 5 : Essai a longue durée.....	65
Tableau 6 : coupe lithologie du terrain.....	72
Tableau 7 : Récapitulatif des phases de forage.....	73
Tableau 8 : Programme de tubage mise en œuvre.....	74
Tableau 9 : Essai de pompage par palier.....	79
Tableau 10 : Essais de pompage de longue durée.....	80

Liste des abréviations

C.D.C : Cahier des charges

C.C.A.G : Cahier des clauses administratives générales

C.P.C : cahier des prescriptions spéciales

ANRH : Agence nationale des ressources hydrauliques

DRE : La direction de l'hydraulique de la wilaya de TIZI-OUZOU

Résumé

Ce mémoire, est structuré en deux parties principales : une partie théorique présente les notions essentielles sur les eaux souterraines, les types de forages, ainsi que les étapes techniques et administratives nécessaires à leur réalisation.

La partie pratique est dédiée à l'étude de deux cas concrets : un forage en mode rotary réaliser dans la commune de THIZI N'THLATHA, et un autre en mode battage effectué à AIT TOUDERT. Ces deux interventions ont été menées dans le but d'améliorer l'approvisionnement en eau potable dans les zones concernées. L'analyse des travaux permet de mieux comprendre les méthodes utilisées et les conditions de réalisation sur le terrain.

Abstract

This thesis, entitled monitoring the implementation of a water Borehole, is divided into two main parts: a theoretical section and a practical section. The theoretical part introduces the basic concepts of groundwater, types of boreholes, and the technical and administrative steps required for their implementation.

The practical part focuses on two case studies: one borehole using the rotary drilling method in the commune of THIZI N'TLATHA, and another using the percussion (battage) method in AIT TOUDERT. Both operations aim to improve access to drinking water in the targeted areas. The analysis of these projects provides better insight into the techniques used and the field conditions encountered.

ملخص

تتكون هذه الأطروحة من جزأين رئيسيين: الجزء النظري يعرض المفاهيم الأساسية حول المياه الجوفية، وأنواع الحفر، بالإضافة إلى الخطوات الفنية والإدارية اللازمة لتحقيقها.

الجزء العملي مخصص لدراسة حالتين ملموستين: حالة حفر في الوضع الدوار تم تنفيذها في مدينة وقد تم تنفيذ هذين التدخلين ايت تودرت، وأخرى في وضع الدرس تم تنفيذها في تيزي نتلاتا بهدف تحسين إمدادات مياه الشرب في المناطق المعنية. يتيح تحليل العمل فهماً أفضل للطرق المستخدمة وشروط التنفيذ في الميدان.

Introduction générale

Introduction générale

« L'eau c'est la vie », cette expression, à la fois simple et universelle, résume l'importance fondamentale de cette ressource pour l'humanité. Présente dans chaque cellule vivante, l'eau est au cœur des équilibres naturels, des activités humaines et du développement économique. Pourtant, malgré son importance vitale, l'accès à l'eau potable reste inégalement réparti dans le monde. Dans de nombreuses régions, notamment en zones rurales, arides ou enclavées, les ressources en eau de surface (rivières, barrages, lacs) sont insuffisantes, imprévisibles ou polluées. Face à cette réalité, les populations se tournent de plus vers les eaux souterraines, considérées comme une ressource fiable, plus stable et mieux protégée contre les variations climatiques.

Les forages d'eau permettent d'accéder à ces réserves invisibles, enfouies dans le sous-sol. Mais capter l'eau souterraine n'est pas une opération simple, cela exige des connaissances techniques, des études hydrogéologiques précises, des équipements spécialisés et un suivi rigoureux du chantier. Chaque forage est un projet en soi, qui doit respecter des étapes bien définies pour garantir à la fois l'efficacité de l'ouvrage et la protection durable de la ressource. C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent mémoire, intitulé « suivi et réalisation d'un forage d'eau ». Il vise à étudier, de manière théorique et pratique, l'ensemble du processus de réalisation d'un forage, depuis les études préalables jusqu'à la mise en exploitation. L'objectif est d'analyser les étapes essentielles, de comprendre les choix techniques à effectuer, et d'illustrer l'ensemble à travers deux cas concrets de forages réalisés sur le terrain.

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres complémentaires

✚ Le premier chapitre traite des généralités sur les eaux souterraines et les forages. Il introduit les concepts d'hydrogéologie, les types de nappes, et les techniques de forage.

✚ Le deuxième chapitre décrit les différentes étapes nécessaires pour réaliser un forage, en détaillant les fluides de forage, les équipements ainsi que les essais et les contrôles de qualité.

✚ Le troisième chapitre présente deux cas pratiques de réalisation de forages, analysés à travers leur contexte géologique, les méthodes employées, les résultats obtenus et les enseignements tirés.

A travers cette étude, il s'agit de mettre en valeur l'importance d'une approche rigoureuse, planifiée et adaptée pour exploiter les eaux souterraines de manière durable, au service des besoins humains tout en respectant l'équilibre des ressources naturelles.

Chapitre I

Généralités sur les eaux souterraines et les forages

Chapitre I : Généralités sur les eaux souterraines et les forages

I.1. Introduction

Aujourd'hui, l'eau souterraine joue un rôle très important dans la vie quotidienne. Elle permet d'alimenter les villes en eau potable, d'irriguer les cultures et de soutenir plusieurs activités économiques. Dans de nombreuses régions, surtout là où les rivières ou les barrages sont rares ou peu fiables, c'est souvent la seule source d'eau disponible toute l'année. Pour accéder à cette eau cachée sous la terre, on utilise des forages. Il s'agit d'ouvrages qui permettent de puiser l'eau en profondeur, mais pour réussir un forage, il faut d'abord bien connaître le terrain, comprendre comment circule l'eau sous terre, et savoir jusqu'à quel niveau il est possible de pomper sans risquer d'assécher la nappe.

Dans ce chapitre on a donné une vision d'ensemble sur les nappes et les forages. Nous avons expliqué pourquoi on les utilise, dans quels cas ils sont nécessaires, et comment ils sont réalisés. Nous verrons aussi quelles précautions il faut prendre pour éviter les problèmes et garantir un bon fonctionnement du forage sur le long terme.

I.2. Les eaux souterraines, les nappes, les aquifères

Les eaux souterraines regroupent l'ensemble des réserves d'eau qui se trouve dans le sous-sol. L'eau est stockée dans des zones appelées aquifères. Composée de roches poreuses ou fissurées. L'eau peut s'accumuler dans des espaces vides pour former des nappes qui occupent tout ou partie de l'aquifères.

La profondeur des nappes est variable, les plus profonds peuvent se trouver à plusieurs centaines de mètres sous la surface.

Les nappes phréatiques sont celles qui se trouvent près de la principale source d'approvisionnement des nappes souterraines elles proviennent des précipitations efficaces c'est-à-dire la partie des précipitations qui n'est pas reprise par le ruissellement ou l'évapotranspiration, l'infiltration entretient par son action un flux constant qui alimente les nappes. [1]

I.3. Les Types de nappes

I.3.1. Nappe libre

La formation aquifère n'est pas saturé sur toute son épaisseur, il existe entre la surface de la nappe et la surface du sol, ou la base de formation argileuse supérieure lorsqu'elle existe, une zone de terrain non saturé contenant de l'air. Le niveau de la nappe est appelée niveau piézométrique. L'ensemble des niveaux piézométriques mesurés en différents points à une date donnée détermine la surface piézométrique. Elle représentée par les courbes d'égal niveau piézométrique ou courbes hydro isohypses. La surface

Chapitre I : Généralités sur les eaux souterraines et les forages

piézométrique représente la limite supérieure de l'aquifères, c'est la limite hydrodynamique. Dans le cas d'une nappe libre le niveau statique se trouve toujours sous le niveau du sol.

I.3.2. Nappe captive

La formation aquifère est saturée sur toute son épaisseur, elle est limitée vers le haut par une couche imperméable ou semi perméable. Le niveau statique est virtuel tant qu'un forage ou un piézomètre n'a pas atteint l'aquifère. Elle se trouve toujours ou dessus de la base de la couche imperméable supérieure. Le forage est dite artésien lorsque le niveau statique se trouve ou trouve ou dessus de sol, le forage est dit artésien Jaillissant, il s'écoule naturellement sans pompage.

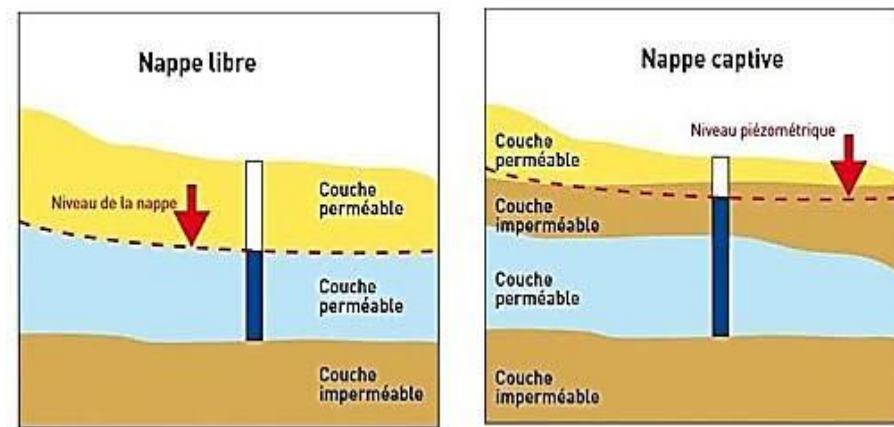


Figure 1 : Les types de nappes

I.3.3. Nappe semi captive

D'après G.CASTANY, le toit ou les substratums (ou les deux) de l'aquifères sont souvent constitué par une formation hydrogéologique semi-perméable. Celle-ci permet dans certaines conditions hydrodynamiques favorables des échanges d'eau avec l'aquifère superposé ou sous-jacent. Ce phénomène appelée drainante, implique un aquifère de nappe

I.4. L'importance de l'eau souterraine

Les eaux souterraines ont plusieurs points positifs par rapport aux eaux de surface.

- Elles sont mieux protégées contre la pollution.
- Leurs qualités restent stables sur une longue période
- Elles se dégradent très lentement en cas de pollution
- Leurs températures ne changent pas
- Il n'Ya pas de perte d'eau à cause de l'évaporation

Chapitre I : Généralités sur les eaux souterraines et les forages

- Elles nécessitent moins de traitement avant d'être consommées.

I.5. Problématiques liées à l'exploitation des nappes

- Une fois polluées, elles sont très difficiles à nettoyer.
- Il peut y avoir des conflits entre les différents usages des terres (industrie, agriculture, irrigation) car tous ont besoin d'eau souterraine.
 - Il est difficile d'évaluer la quantité d'eau pouvant être utilisée sur le long terme.
 - Les niveaux d'eau ne sont pas faciles à mesurer avec précision.
 - Dans les zones proches de la mer l'eau salée peut s'infiltrer et rendre l'eau impropre à la consommation.

I.6. Définition d'un forage d'eau

Un forage d'eau est une installation qui permet de pomper les eaux souterraines à la différence d'un puits qui n'est profonde que de quelques mètres, un forage permet d'atteindre l'eau stockée dans l'aquifère. Il s'agit de la roche dans laquelle se trouvent les nappes phréatiques et qui se situe à plusieurs dizaines de mètres sous le sol. Un forage est donc une installation complexe qui doit être réalisée par des professionnels.

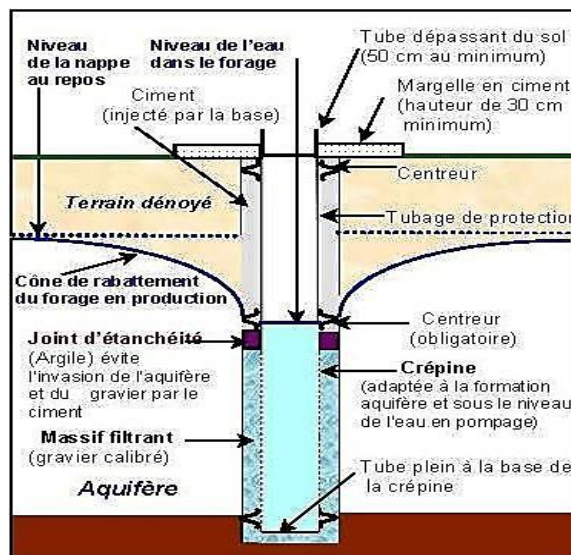


Figure 2 : Schéma d'un forage d'eau

I.7. L'objectif de réalisation d'un forage

La réalisation d'un forage répond avant tout à un besoin :

- ✓ La production de l'eau pour la consommation humaine et animale.
- ✓ L'irrigation des cultures.
- ✓ Mesurer les quantités et les qualités de l'eau souterraines.
- ✓ Capturer des eaux chaudes naturelles pour des usages médicaux ou touristiques.
- ✓ Traiter et limiter l'intrusion d'eau salée ou de substratums polluantes.

Chapitre I : Généralités sur les eaux souterraines et les forages

✓ Conserver des hydrocarbures ou du CO_2 pour des raisons environnementales et industrielles.

I.8. Les différents types de forage

- **Forage vertical** : Ce type de forage consiste à creuser un puits de manière perpendiculaire au sol, en visant directement la zone du gisement ou la ressources est supposé être présent en profondeur.

- **Forage dévié** : permet d'atteindre plusieurs cibles à partir d'un même site de forage en modifiant l'angle du puits. Cela réduit le nombre de sites nécessaires en surface et facilite l'exploitation en utilisant les infrastructures déjà en place.

- **Forage horizontale** : Cette technique permet d'accéder à plusieurs points souterrains depuis un seul site de forage. Elle optimise la surface de contact avec le réservoir, ce qui diminue le nombre de forage requis pour extraire les ressources.

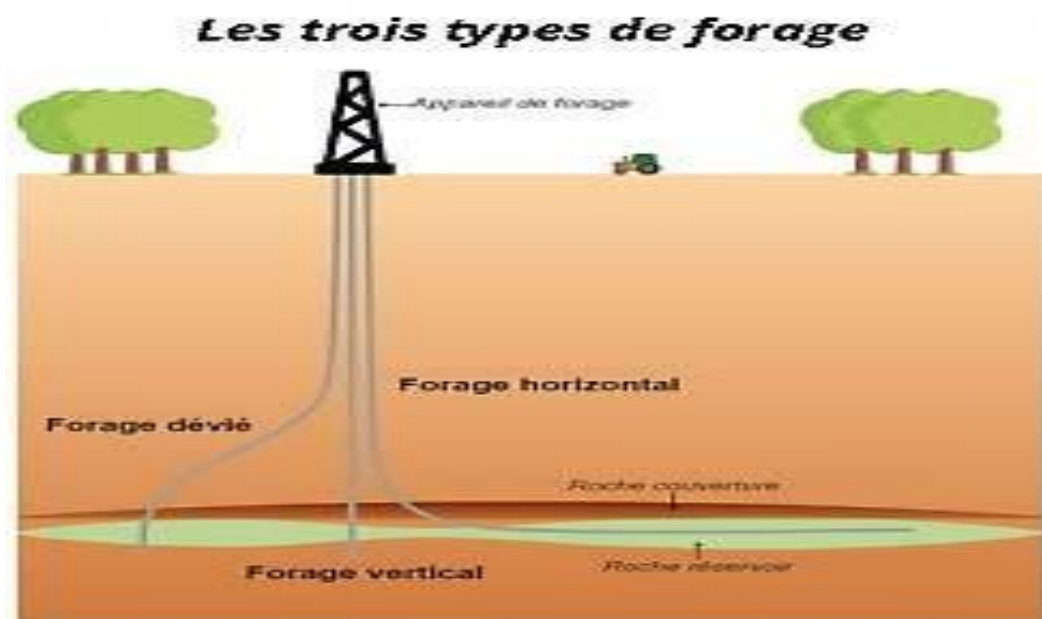


Figure 3 : Les trois types de forage

I.9. Exploitation et reconnaissance d'un forage

I.9.1. Cartographie

L'utilisation de la cartographie géologique et hydrogéologique permet de disposer d'informations concernant les caractéristiques (nature et qualités) des aquifères et des différentes formations où ces informations sont en particulier.

- L'endroit et l'étendue de l'aquifère.
- Le type de nappe.
- La structure de l'aquifère.

Chapitre I : Généralités sur les eaux souterraines et les forages

- La structure des limites : toit et substratum.
- La liaison et les relations avec les écoulements de surface.

I.9.1.1. Cartes hydrogéologiques

Les études géologiques et structurales permettent d'élaborer des cartes et des coupes hydrogéologiques ces dernières résultent de la superposition de données géologiques et d'informations sur l'écoulement souterraines, telles que la surface piézométrique, la zone d'alimentation le drainage et les pertes d'eau en surface ou on profondeur.

I.9.1.2. Cartes structurelles

Les cartes structurelles dont leur but et de présenter les formations perméables (réservoir) son élaborées par les synthèses des données géologiques, des conditions aux limites et des paramètres hydrodynamiques (perméabilité, pente, vitesse, gradient hydraulique) ce type de cartes permet d'établir :

- La carte isophase (l'égale altitude)
- La carte isobathe (l'égale profondeur)
- La carte isobathe (L'égale épaisseur de l'aquifères)

I.9.1.3. Cartes piézométriques

Les cartes piézométriques illustrent la répartition spatiale de la charge hydrauliques en mesurant les niveaux piézométriques, elles permettent de visualisation le sens de l'écoulement souterraine à travers des lignes de courant les dômes indiquant des zones d'alimentation, tandis que les dépressions signalent des zones de captage. Le gradient hydrauliques est proportionnel au débit d'écoulement et inversement proportionnel a la perméabilité de la nappe. Les variations du gradient, peuvent être causées par des changements de perméabilité, d'épaisseur de nappe ou de débit.

I.9.1.4. Photos aériennes

La photographie aérienne fournit des informations précieuses qui ne sont pas toujours visibles directement sur le terrain. Elle permet d'identifier des éléments comme les failles géologiques et les anciens lits des rivières. C'est également un outil efficace pour analyser les fractures naturelles, qui apparaissent sous forme de lignes visibles sur les images aériennes. En plus, ces photos aériennes sont essentielles pour déterminer les meilleurs emplacements pour le forage d'exploitation des ressources en eau souterraines.

I.9.1.5. Télédétection

Grace aux images satellites, la télédétection permet d'analyser et de traiter numériquement des données pour mieux organiser l'information. Elle facilite la reconstitution de documents à différentes échelles et l'identification de structure géologiques de matériaux de structures géologique, de matériaux de surface et surface et de zones humides. [2]

I.9.2. Méthodes géophysiques

Les méthodes géophysiques consistent à effectuer depuis la surface du sol, des mesures de paramètres physiques dont l'interprétation permet d'imaginer la nature, la structure et les caractéristiques du sous-sol :

Les méthodes recherchées par ces méthodes sont :

- L'épaisseur et la nature de recouvrement
- La présence et la nature des zones fissurées
- L'existence des fractures
- La profondeur du substratum
- La localisation et les caractéristiques de l'aquifère

I.9.2.1. Prospection par sismique de réfraction

Le principe de la sismique de réfraction est qu'un ébranlement à la surface de sol, se propage dans le sol en s'amortissant à la façon d'une onde sonore. La sismique de réfraction consiste à étudier la propagation ondes élastiques (ondes longitudinales). Leurs temps d'arrivée, mesurée en différents sismographes ou géophones (récepteurs des ondes sonores) disposée le long d'un profil, sont par la suite portées en graphique en fonction des distances de ces géophones si ou point d'explosion E (point d'ébranlement : point d'impact).

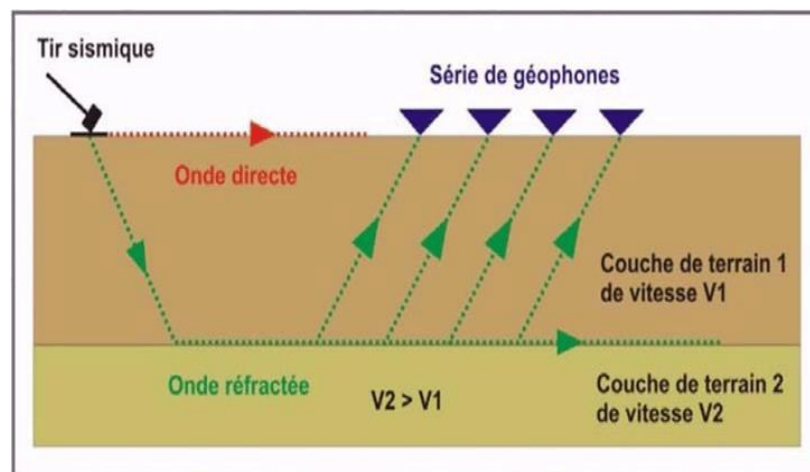


Figure 4 : Schéma de sismique réfraction

I.9.2.2. Prospection électriques

La prospection électrique permet d'étudier les variations latérales et verticales de la résistivité apparente du sous-sol ρ_a . Pour cela, l'on voie dans le sol, grâce à des électrodes A et B, un courant d'intensité I , puis on mesure la différence de potentiel ΔV

Produit l'effet d'ohm, entre deux électrodes de références M et N (dispositif quadripôle)

En appliquant la loi d'ohm.

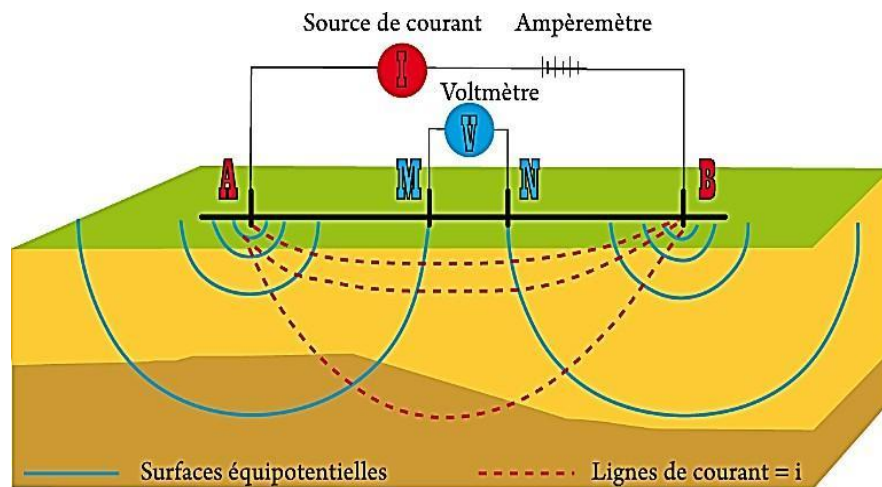


Figure 5: Schéma de sismique réfraction

I.9.3. Sondage (forages) de reconnaissance

Les sondages de reconnaissances sont des puits de petits diamètres de l'ordre de 6 à 8 cm dont leur réalisation et équipement est similaire à ceux des forages d'exploitation.

Les sondages (forages) de reconnaissances permettent de vérifier les hypothèses émises et apportent des informations indispensables (investigation, mesures et essais, prélèvement d'échantillons d'eau et de sol, observation périodiques) comme il permet d'effectuer des diagaphies et des essais de pompage. [3]

I.10. Le choix du site

Pour réussir un forage il est crucial de bien choisir son emplacement, pour identifier l'emplacement idéal plusieurs critères doivent être pris en compte :

- A. Etude géologique : Il est important d'analyser la composition du sol et des couches souterraines avec l'aide d'expert.
- B. Profondeur de la nappe phréatique : Des études hydrogéologiques permettent de connaître le niveau de l'eau souterraine disponible.
- C. Facteurs climatique et hydrologiques : L'étude de la précipitation et des cours d'eau voisins aide à évaluer la disponibilité de l'eau.

Chapitre I : Généralités sur les eaux souterraines et les forages

D. Eloignement des ressources de pollution : Le site ne doit pas être proche d'industries, de décharges ou d'autres sources de contamination.

E. Accessibilité et réglementation : La proximité des routes et des infrastructures facilite les travaux de forage et l'exploitation du puits et il est essentiel de respecter les lois en vigueur et l'obtenir l'autorisation avant de forer.

I.11. Les différentes techniques des forages

I.11.1. forage par battage (percussion)

Le forage par battage est la plus ancienne méthode employée sur les chantiers de forage, ce procédé était utilisé par les chinois il ya 4000 ans. La méthode consiste à soulever un outil lourd (trépan) et à le laisser retomber sur le terrain à traverser. La hauteur et la fréquence de chute varient selon la dureté des forages.

On distingue deux types de battage au treuil et le battage au câble. Cette dernière méthode est la plus courante. Le trépan est suspendu à un câble qui est alternativement tendu et relâché. les mouvements sont rapides et le travail de l'outil se fait plus par un effet de martèlement du à l'énergie cinétique que par un effet de poids comme pour le battage au treuil. Un émerillon permet au trépan de pivoter automatiquement sur lui-même à chaque coup. Le trou est nettoyé au fur et à mesure de l'avancement par descente d'une soupape permettant de remonter les débris (cuttings). Ce procédé permet de réaliser des forages sans utilisation d'eau ou de boue. [4]

Avantage

- C'est un procédé simple et relativement peu coûteux (investissement généralement plus faible que pour les autres procédés de forage).
- Il n'y a pas de fluide de forage (boues) et pas de risques de pollution de la nappe.
- Le trépan peut être rechargé, reforgé et affuté sur le chantier.
- C'est une méthode bien adaptée pour les forages de moyenne profondeur.
- Les résultats sont très bons dans les terrains fissurés (pas de perte).

Inconvénients

- Vitesse d'avancement assez faible.
- Méthode peu adaptée à dans les terrains plastiques ou bouillant dans lesquelles le tubage à l'avancement est nécessaire.
- Il est impératif de remonter l'outil régulièrement afin de nettoyer le trou (perte de temps)
- Il y a des difficultés pour équilibrer des venues d'eau artésiennes jaillissantes.



Figure 6 : Forage par battage.

I.11.2. Forage rotary

Le forage rotary est le procédé le plus couramment utilisé, il a notamment fait ses preuves dans le domaine de la recherche pétrolière.

Un outil (trépan) monté au bout d'une ligne de sonde (tiges vissées les unes aux autres) est animé d'un mouvement de rotation de vitesse variable et d'un mouvement de translation verticale sous l'effet d'une partie du poids de la ligne de sonde ou d'une pression hydraulique. Le mouvement de rotation est imprimé au train de tiges et à l'outil par un moteur situé sur la machine de forage en tête de puits. Les tiges sont creuses et permettent l'injection de boue au fond du forage.

Les outils utilisés en rotation sont des trépanes de plusieurs types en fonction de la dureté des terrains rencontrés (outils à lames, outils à pastilles, molettes ou tricône, outils diamantés ou à carbures métalliques).

Au dessus du trépan, on peut placer une ou plusieurs masses-tiges très lourdes qui accentuent la pression verticale sur l'outil et favorisent la pénétration et la rectitude du trou.

Toutefois, le forage au rotary nécessite l'emploi d'un fluide de forage préparé sur le chantier, injecté en continu sous pression dans les tiges creuses de la ligne de sonde, sortant

Chapitre I : Généralités sur les eaux souterraines et les forages

Au niveau d'évents sur l'outil, et remontant à la surface dans l'espace annulaire (entre les tiges et les parois du trou). ce fluide de forage peut être :

- De l'eau claire
- Une boue à la bentonite (type d'argile)
- Une boue à base de polymères d'origine synthétique, biodégradables.

Avantages

- La profondeur atteinte peut être considérables (plusieurs milliers de mètres en recherche pétrolière).
- La vitesse d'avancement en terrains tendres est importante et peut atteindre 100 m à 150m par jour.
- Ce système permet un bon contrôle des paramètres de forage (poids de l'outil, vitesse de rotation, qualité de la boue, débit d'injection de la boue) en fonction des terrains à traverser.
- Le forage au rotary entraîne une consolidation des parois en terrains meubles par dépôt d'un cake.

Inconvénients

Nécessite d'un fluide de forage, donc d'un approvisionnement du chantier en eau.

- Colmatage possible des formations aquifère par la boue à la bentonite
- Nécessité de bien suivre la formation, puis l'évacuation du cake
- Mélange des cuttings
- Risque d'éboulement en cas d'arrêt de la foration sans nettoyage du trou. [4]

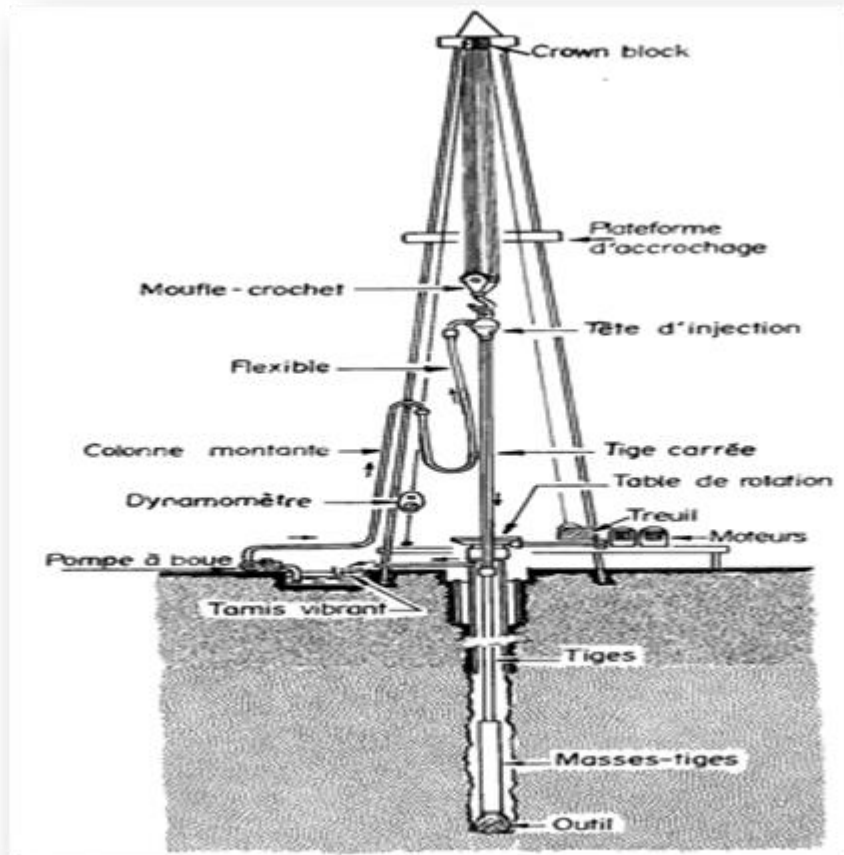


Figure 7 : Disposition schématique d'un atelier de forage rotatif (d'après A.MABILLOT)

I.11.2.1. Paramètres de forage rotatif

Pour obtenir un rendement optimal dans un atelier de forage rotatif, il est essentiel de porter une attention particulière aux trois paramètres suivants :

- La charge appliquée sur l'outil : l'avancement de l'outil dépend directement du poids qui lui est appliqué, lequel augmente progressivement avec l'ajout des tiges, toutefois cette charge doit être contrôlée car une surcharge peut entraîner une usure rapide des lames et des dents. Le contrôle de poids est assuré à l'aide d'un dynamomètre mesurant la tension d'un câble, ce qui permet de connaître le poids total suspendu au crochet.
- La vitesse de rotation : les équipements de forage rotatif sont généralement dotés d'un indicateur permettant de lire la vitesse de rotation de la table. Dans les terrains durs, une vitesse réduite est recommandée tandis que dans les terrains plus tendres, une vitesse plus élevée peut être utilisée. Cette vitesse, qui dépend des moteurs et du rapport des transmissions, doit être vérifiée à l'aide d'un appareil de contrôle.

Chapitre I : Généralités sur les eaux souterraines et les forages

▪ Le débit des pompes : le débit nécessaire pour évacuer efficacement les cuttings (débris de forage) doit atteindre au minimum $60 \text{ m}^3/\text{min}$. la puissance de la pompe et de son moteur sera définie en fonction du volume total de fluide requis pour atteindre la profondeur de forage prévue, en tenant compte des pertes de charge, de la viscosité de la boue et des dimensions des tiges. [5]

I.11.3. Forage marteau fond de trou

Cette techniques permet de traverser des terrains durs. Le principe repose sur : un taillant à boutons, un marteau pneumatique, est mis en place en rotation et percussion pour casser et broyer la roche du terrain. Le marteau fonctionne comme un marteau piquer, à l'air comprimé à haute pression (10à25 bars) qui est délivré par un compresseur, et permettant de remonter les cuttings. Cette technique est surtout utilisée dans les formations dures car elle permet une vitesse de perforation plus élevée que celles obtenus avec les autres techniques.

I.11.3.1. Le marteau fond de trou classique

Un marteau pneumatique équipé de taillants est fixé à la base d'un train de tiges et animé en percussion par envoi d'air comprimé dans la ligne de sonde, d'où le nom de (marteau fond de trou). Plus la pression de service d'air comprimé est élevée, moins on aura de risques de coincements. La plupart des marteau fond de trou peuvent travailler à des pressions comprises entre 4 et 18 bars.

Avantage

- Avancement rapide.
- Profondeur couramment atteinte de l'ordre de 150m.
- Bonne observation des cuttings (coupe géologique) et des zones productrices d'eau (suivi hydrogéologique).

Inconvénients

- Procédé peu adapté dans les terrains non consolidés ou plastiques.
- Profondeur fonction des caractéristiques du compresseur. Il est recommandé d'avoir un compresseur très puissant lorsqu'on travaille sous l'importante hauteur d'eau.

I.11.3.2. Le système Odex en terrains non cohérents

Cette méthode est basée sur le principe d'une percussion sans rotation. Elle met en œuvre un taillant pilote avec aléteur excentrique qui permet de forer des trous d'un diamètre légèrement supérieur au diamètre extérieure des tubes. Le tubage est ainsi enfoncé progressivement à la suite de l'aléteur sous l'effet de son propre poids et de

Chapitre I : Généralités sur les eaux souterraines et les forages

l'énergie de percussion du marteau. Les tubes sont solidarités entre eux soit par soudure, soit par filetage. Le taillant excentrique se déploie par rotation dans le sens des aiguilles d'une montre, une rotation en sens inverse en fin de forage permet son repli et la remontée de la garniture. Comme en forage au marteau fond de trou classique, l'évacuation des cutting est là aussi assurée par la remontée de l'air, ici entre tiges et tube.

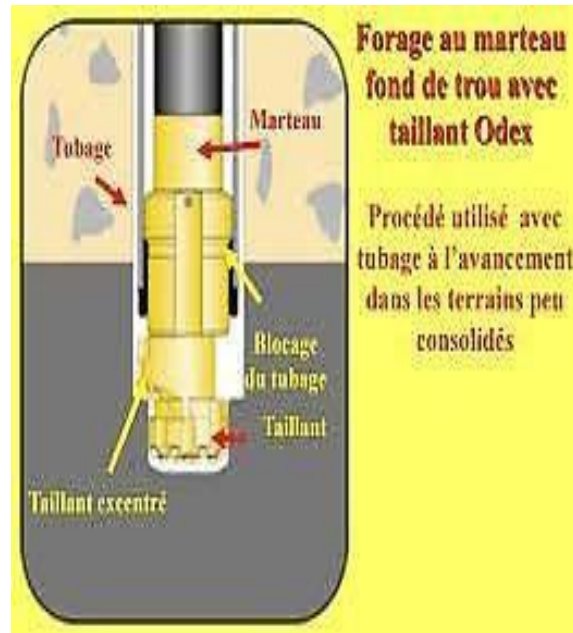


Figure 8 : forage au marteau fond de trou taillant Odex.

Avantage

L'Odex est très utile pour isoler des nappes d'eau supérieures, plus sensibles aux pollutions.

Inconvénients

Il arrive que l'excentrique se coince, il est alors souvent nécessaire de remonter l'outil en arrachant tout le tubage. [4]

I.11.4. Forage par havage

Le forage par havage, est plus connu sous le nom de procédé Benoto : dans ce type de forage par curage ou havage, les tubages pénètrent dans la formation sous l'effet de leur propre poids ou sous l'action de vérins hydraulique. Une benne preneuse (vide) progressivement l'intérieur du tubage tant que celui-ci se trouve au-dessus du niveau statique. Au niveau statique, l'emploi d'une soupape est recommandé.

En présence d'éléments grossiers ou de blocs, l'utilisation d'un trépan tombant en chute libre permet de briser l'obstacle. Il est également possible d'utiliser des vibreurs hydrauliques pour faciliter la descente ou l'arrachage des tubages.

Chapitre I : Généralités sur les eaux souterraines et les forages

Avantages

- Avancement rapide à faible profondeur dans des formations meubles, notamment alluvionnaires (en l'absence d'éléments grossiers).
- Réalisation d'ouvrage en gros diamètre.
- Réalisation d'ouvrages en gros diamètre.

Inconvénients

- Méthode inadaptée au terrain dur
- Frottement des tubages mis en place à l'avancement
- Difficulté pour arracher les tubages de soutènement après la mise en place de la crépine et du massif filtrant. [4]



Figure 9 : Benoto

I.11.5. Forage par carottage

Le carottage est une opération consistant à prélever au moyen d'appareils divers appelés carottiers, un cylindre de quelques centimètres de diamètre et de longueur variable (carotte) dans les sols, des sédiments (carotte de sédiments), des roches. Cette technique est destinée à récupérer la formation en place sans destruction. Dans l'hydrogéologie le forage par carottage n'est pas une méthode de forage proprement dit, mais il est employé au cours des forages ordinaires (rotary, MFT, etc.).

I.11.5.1. But de forage carottage

- Extraire des échantillons de roche en vue de définir la nature, la position, l'épaisseur et l'étendue des couches qu'on désire exploiter (roche réservoir).

Chapitre I : Généralités sur les eaux souterraines et les forages

- Extraire de l'eau d'un terrain présumé d'être aquifère. En remontant au jour des échantillons prélevés dans la roche magasin, on pourra décider d'exploiter ou non, telle ou telle couche après examen et analyse des éléments extraits.
- Fournir des échantillons pour l'analyse au laboratoire, on détermine les propriétés de réservoir (granulométrie, perméabilité, porosité etc.).

I.11.6. Forage par tarière

On peut également réaliser un forage par la tarière mécanique, lorsque les formations sont meubles (sols meubles, sables, alluvions etc.) les tarières hélicoïdales continues forent rapidement dans les argiles et les terrains non consolidés à faible profondeur et à vites lente. [6]



Figure 10 : forage par tarière

I.12. Les procédures administratives

I.12.1. Le financement de projet

Le financement de projet désigne un mode de financement à long terme utilisé pour les infrastructures et les projets industriels. Il repose principalement sur les flux de trésorerie prévisionnels générés par le projet, plutôt que sur la solidité financière des promoteurs. En général, la structure de ce type de financement comprend plusieurs éléments.

Ce type d'opération fait intervenir divers investisseurs, appelés « sponsors », ainsi que des groupements bancaires ou autres institutions financières appelés « syndicats », qui octroient les crédits nécessaires.

La finance y joue un rôle capital, notamment par

Chapitre I : Généralités sur les eaux souterraines et les forages

- La mobilisation de ressources financières internes ou externes à l'institution.
- Le soutien à la réalisation de projets utiles et innovants, qui contribuent à la croissance.
 - Le financement permet de libérer de l'argent qui était bloqué, que se soit à l'intérieur ou à l'extérieur de l'entreprise.
 - Il aide à réaliser des projets nouveaux ou mis de côté ce qui peut augmenter les revenus du pays.
 - Il permet à l'entreprise d'acheter ou de remplacer du matériel ou des équipements.
 - Le financement est une solution rapide pour aider une entreprise en difficulté à sortir d'un manque d'argent.
 - Il aide l'entreprise à garder assez d'argent disponible pour éviter la faillite ou la fermeture, cela lui permet aussi de payer ses dettes à temps ou de transformer des biens en argent liquide sans perdre beaucoup.

I.12.2. préparation de cahier des charges

Le cahier des charges (CDC) est un document important qui doit être respecté pendant un projet, il aide le maître d'ouvrage à expliquer clairement ce qu'il attend du maître d'œuvre, avec des conséquences si ces attentes ne sont pas respectées. Ce document décrit précisément les besoins que le prestataire doit satisfaire et organise les relations entre toutes les personnes impliquées dans le projet. L'administration prépare ce document avant de finaliser tout accord, et elle doit informer tous les candidats des règles générales. Avant chaque appel d'offres, y compris ceux pour des méthodes spécifiques, l'administration rédige le cahier des charges et s'assure de l'envoyer à tous les candidats concernés.

I.12.2.1. Cahier des clauses administratives générales (C.C.A.G)

Il s'agit d'un document de référence qui énonce l'ensemble des règles administratives générales applicables aux marchés publics portant sur les travaux, les fournitures, les études ou encore les prestations de services. Ces règles sont fixées par voie réglementaire à travers un décret exécutif. Elles permettent d'encadrer la relation entre l'administration comme une mairie ou un ministère et l'entreprise qui va réaliser le projet.

I.12.2.1. Cahier des prescriptions communes (C.P.C)

Ce cahier contient des règles techniques de base qui s'appliquent à un type particulier de projet, par exemple tous les projets de constructions de routes ou tous les projets d'études techniques peuvent avoir un même ensemble des règles techniques. Ce cahier permet donc d'avoir une base commune et claire pour tous les intervenants dans un domaine spécifique.

I.12.2.2. Cahier des prescriptions spéciales (C.P.S)

Est un document qui est préparé spécialement pour chaque marché, il contient tous les détails spécifiques du projet : ce qu'il faut faire exactement, les matériaux à utiliser, les délais à respecter, le lieu des travaux, les critères de sélection des offres, comment se passe le concours ou l'appel d'offres, et les conditions particulières liées à ce projet. Le C.P.C complète donc les deux autres cahiers (C.C.A.G et CPC) en apportant des précisions adaptées au projet en question.

I.12.3. L'appel d'offres

L'appel d'offres est une procédure permettant de solliciter les propositions de plusieurs soumissionnaires en concurrence afin d'attribuer un marché, sans passer par une phase de négociation, le marché est alors attribué au candidat ayant présenté l'offre la plus avantageuse d'un point de vue économique, selon des critères de sélection objectifs définis à l'avance au moment du lancement de la procédure (conformément au décret présidentiel n° -15-247 du 16 septembre 2015).

On distingue deux formes d'appels d'offres :

✓ Les appels d'offres publics : ils doivent respecter des règles strictes, généralement définies par le pays dans lequel ils sont lancés.

✓ Les appels d'offres privés : utilisés depuis de nombreuses années, ils sont courants dans divers secteurs économiques, notamment dans le domaine du e-commerce, où l'on met en œuvre des stratégies digitales efficaces afin d'améliorer l'expérience client.

L'appel d'offres peut être national ou international ou les deux à la fois, il se subdivise en cinq catégories :

- L'appel d'offres ouvert.
- L'appel d'offres restreint.
- L'appel d'offres avec exigences de capacités minimales.
- L'appel d'offres de présélection.
- Le concours.

I.12.4. Les critères de choix de l'entreprise de forage

Le législateur a voulu encadrer le processus de sélection des entreprises de forage en se basant sur plusieurs types de critères. Il ne s'agit pas seulement de choisir l'offre la moins chère, mais aussi de prendre en compte la qualité du service, la nature des travaux à réaliser, et la durée d'exécution il est donc important d'évaluer l'entreprise selon des critères financiers, économiques, commerciaux comme le précise l'article 78 du décret

Chapitre I : Généralités sur les eaux souterraines et les forages

présidentiel N° 15/247. Les critères de choix doivent être en lien direct avec l'objet du marché, être équitables et clairement définis dans le cahier des charges, l'objectif est de permettre à l'acheteur public de sélectionner l'offre la plus avantageuse sur le plan économique.

I.12.4.1. Critères techniques

L'offre technique occupe une place essentielle dans les marchés publics, en effet si elle est jugée non conforme l'offre financière correspondante n'est même pas examinée, cette offre regroupe tous les éléments du cahier des charges ainsi que les informations permettant du soumissionnaire notamment ses moyens, son expérience et sa capacité à exécuter efficacement le projet demandé.

I.12.4.2. Critères financières

Le candidat doit fournir une déclaration qui prouve qu'il comprend bien les conditions de l'accord et qu'il accepte la difficulté qui peut survenir, de plus il doit rédiger un autre document dans lequel il s'engage à réaliser le projet selon les règles établies. Ce document doit inclure le cahier des charges et les montants précis, il doit également comporter un tableau des prix unitaires accompagné d'une phrase détaillant le cout total pour la réalisation du projet, les formes de la lettre d'engagement et de la déclaration de soumission sont fixées par le ministère des finances.

I.12.4.3. Délai de réalisation

C'est la période fixée lors de la conclusion du marché public, elle commence à la date à laquelle l'entrepreneur reçoit l'ordre de commencer les travaux.

Les délais sont importants dans les marchés publics, car des retards peuvent survenir dans la mise en œuvre, cela nécessite une approbation pour le paiement au contractant, en tenant compte des retards effectifs rencontrés par l'entreprise. [7]

I.13. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases concernant les nappes souterraines et les forages et les différents types de nappes, telles que les nappes libres et captives, en mettant en évidence leur rôle fondamental dans l'approvisionnement en eau.

Nous avons ensuite abordé les techniques de forage, qui permettent d'atteindre les nappes pour en extraire l'eau. Ces techniques nécessitent une bonne connaissance du sol, du matériel adapté et le respect de normes précises.

Enfin nous avons souligné l'importance des procédures administratives à suivre avant toute opération de forage. Elles assurent le respect de la réglementation en vigueur, la protection de l'environnement et une gestion responsable de la ressource.

Chapitre II

Matériels utilisées et les travaux à suivre pour réaliser un forage

II. 1. Introduction

La réalisation d'un forage est un processus qui se fait en plusieurs étapes bien précises. Avant d'arriver à l'eau ou au sol recherché, il faut suivre une méthode rigoureuse pour assurer la sécurité, la qualité et l'efficacité des travaux, ce chapitre explique de façon détaillée les différentes étapes à suivre, depuis la préparation du terrain jusqu'au nettoyage final. Il présente aussi les outils utilisés, les techniques choisies selon le type de sol, ainsi que les contrôles nécessaires à chaque phase. L'objectif est de donner une vue d'ensemble claire et complète sur le déroulement des travaux de forage.

II.2. Le fluide de forage et l'hydrochimie de forage

II.2.1. Définition de fluide de forage

Le fluide de forage est un système composé de différents contentent en suspension d'autres additifs minéraux et organiques (argiles, polymères, tensioactifs, déblais, ciments) le fluide est préparé dans des bacs à boues il est injecté à l'intérieur des tiges jusqu'à l'outil d'où il remonte dans l'annulaire chargé des déblais formés au front de taille. A la sortie du puits il subit différents traitements tamisage, dilution, ajout de produits de façon à éliminer les déblais transportés et à réajuster ses caractéristiques Physico-chimiques à leurs valeurs initiales. [11]

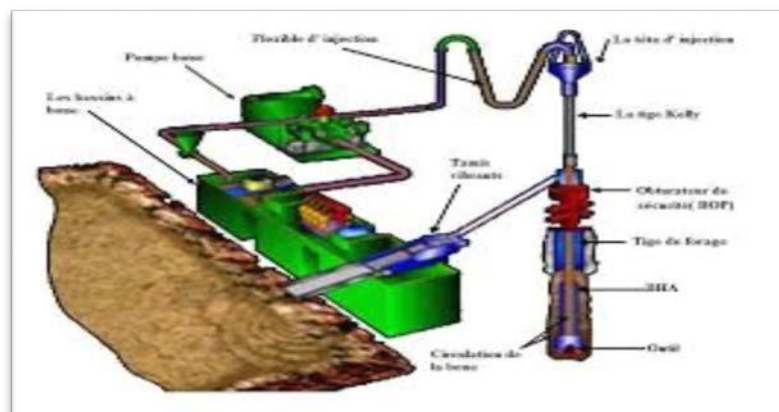


Figure 11 : Cycle de fluide de forage

II.2.2. Rôle de fluide de forage

Les principaux rôles de fluides de forage sont :

- ❖ La consolidation et le soutènement des parois de forage par le dépôt de cake sur les parois.
- ❖ La remontée au jour des sédiments broyés (cuttings)
- ❖ Le maintien des cuttings en suspension (très important dans le cas où il se produit un arrêt de circulation).

- ❖ Le refroidissement des outils de forage et de carottage, ainsi que leur lubrification (graissage) et leur nettoyage pour éviter leur usure.
- ❖ L'augmentation (par le jet) de l'action par abrasive de l'outil de forage sur le terrain (car le fluide sorte des trous du trépan à forte pression).
- ❖ La facilité et le contrôle des opérations de mise en place du gravier et de cimentation.
- ❖ La protection contre le gonflement ou l'affouillement (creusage) de certaines couches traversées.

II.2.3. Propriété des fluides de forage

- Les caractéristiques idéales d'une boue sont :
- Viscosité=40à45 secondes mesurée par le viscosimètre de MARSH.
- Densité de 0.9à2.4.
- Filtra=8cm³
- Ph de 7à9.
- Teneur en sable=0.5%

a. Poids volumique (Densité) :

C'est le rapport du poids d'un corps à son volume dans des conditions définies de température et pression. Le poids volumique s'exprime en N/m³ ou Kg/l. la densité de fluide de forage varie de 0.9 à2.4, elle est mesurée avec un densimètre sur chantier de forage.

La pression hydrostatique exercée par la boue de forage est donnée par l'expression suivante :

$$P_{HYD} = \frac{D \cdot H}{10}$$

P_{HYD} : pression de la formation (kg /cm²).

H : profondeur de forage (m).

D : Densité de la boue. [9]

b. Viscosité :

Une viscosité appropriée permet d'avoir un outil bien dégagé ainsi qu'une bonne remontée et un dépôt rapide des débris de forage. De plus, elle permet de réduire les pertes de charge dans le train de sonde. On peut mesurer la viscosité d'une boue avec un viscomètre MARSH sur le chantier ou le viscomètre STOMER en laboratoire.

c. Filtrat

:

Chapitre II : Matériels utilisés et les travaux à suivre pour réaliser un Forage

Dans une formation perméable, la boue a tendance à laisser passer de l'eau au travers de la paroi (filtrat) et à déposer une couche d'argile (cake) sur cette dernière. Dans tous les cas, la nature du cake et du filtrat sera fonction de la composition initiale de la boue.

Si le filtrat est trop grand les parois ne sont pas tenues et des éboulements risquent de se produire, si le filtrat est très faible la boue risque de colmater l'aquifère.

d. PH :

Le pH permet d'apprécier l'acidité ou l'alcalinité de la boue de forage, si le pH est compris entre 0 et 5, la solution est acide, entre 6 et 8 elle est neutre, au-delà de 8 elle est basique. La mesure de pH est importante car elle révèle la contamination par le ciment ou par l'eau de la couche aquifère si sa valeur est supérieure à 10 ou 11. Par contre si elle est inférieure à 7, les risques de floculation sont à redouter. La mesure de PH doit être faite sur le filtrat.

e. Teneur en sable :

Il est évident que la présence de sable dans la boue est néfaste à cause de son caractère abrasif (problèmes d'usure des tubes, flexibles, pompes, etc.), il augmente la densité de la boue et risque en cas de dépôts importants sur le fond, de bloquer la garniture. On estime généralement que la teneur maximale admissible de sable dans une boue est de 5%, On peut le mesurer à un élutriomètre.

f. Thixotropie :

La thixotropie est la faculté, par un mélange à base de produit de suspension, de passer de l'état solide (gel) à l'état liquide sous l'action d'une agitation et de revenir à l'état initial lorsque l'agitation cesse. Il faut donc maintenir la circulation dans un forage même si la ligne de sonde ne tourne pas, pour éviter que la boue ne se solidifie en bloquant l'outil. [8]

II.3. La boue de forage

Les boues de forage sont des suspensions d'argile dans l'eau, auxquelles on peut ajouter des substances en poudre et des produits chimiques liquides (c'est un mélange colloïdal et non une solution). On laisse la suspension s'hydrater plusieurs jours, puis on la dilue à la demande.

II.3.1. Les fonctions de la boue de forage

Les fonctions de la boue sont les suivantes :

- Consolider les parois du forage par le dépôt du cake sur la formation.
- Remonter au jour les sédiments broyés cuttings au fond du trou par l'outil.
- Maintenir les cuttings en suspension s'il se produit un arrêt de circulation.
- Lubrifier et refroidir les outils de forage ou de carottage.

- Augmenter par le jet à la sortie des événements de l'outil, l'action abrasive de celui-ci sur le terrain en cours de forage.
- Faciliter et contrôler les opérations de mise en place du gravier additionnel est de cimentation.
- Equilibrer la pression hydrostatique des couches aquifères rencontrées afin de juguler les jaillissements intempestifs des forages artésiens. [10]

II.3.2. Types de boues

Ils existent trois types de boues de forage :

II.3.2.1. Boue à la bentonite

La bentonite c'est variété d'argile très fine, la dimension des particules est inférieure à 1 μm et de densité de 2.6. À l'hydratation le volume devient 12 à 15 fois et parfois 30 fois plus grandes. Un gramme de bentonite dispersé dans l'eau offre 4 à 5 m^2 de surface de contact. [11]



Figure 12 : La bentonite

1) Types de boue bentonite :

On distingue plusieurs types de bentonites :

- Les bentonites calciques naturelles.
- Les bentonites sodiques naturelles qui gonflent plus que bentonites calciques naturelles.
- Les bentonites permutées qui sont des bentonites calciques transformée en bentonites sodiques par ajout de carbonate de soude.
- Les bentonites calciques activée qui sont bentonites permuté, dopées par ajout de polymères améliorent leur gonflement de 10 à 20 fois. [8]

II .3.2.2. Boue à l'huile émulsionnée

Dans les terrains ayant la propriété, en s'hydratant d'augmenter considérablement de volume à tel point que l'outil risque de se bloquer au fond du trou, ce qui occasionner de grosses pertes de temps pour tenter de la dégager par des instrumentations délicates. Dans ce cas il est conseillé d'ajouter à la boue du silicate ou de la chaux ou de l'amidon dont ces matières ayant également la propriété de réduire l'hydratation, autrement l'emploi de la boue à l'huile qui est également indiqué. [11]

II.3 .2.3. Boue polymère

C'est une substance formée par l'union bout à bout de deux molécules ou plus de la même qualité de chaîne dans un autre composant d'éléments et de proportions analogues, mais à plus haut poids moléculaire et à propriétés physiques différents. Les polymères peuvent être utilisés directement en tant que boue ou comme additif aux boues et sont subdivisées en polymères naturels et polymères artificiels. Ils présentent des avantages suivants :

- ✓ Forage avec une pression réduite en fond de trou
- ✓ Pertes de fluide contrôlées sans nécessité d'avoir un cake épais.
- ✓ Couple et frottements réduits.
- ✓ Les échantillons ne sont pas souillés par le fluide. [8]

II.3.2.4 : les Ions majeurs

La composition minérale de la plupart des eaux est principalement constituée de sept ions, souvent appelés les majeurs, on distingue :

- ✓ Les cations : calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), potassium (K^+).
- ✓ Les ions : chlorure (Cl^-), sulfate (SO_4^{2-}), bicarbonate (HCO_3^-)).

1. Calcium et magnésium :

Le calcium Ca^{2+} et le magnésium Mg^{2+} sont présents dans les roches cristallines et les roches sédimentaires, ils sont très solubles et sont donc largement présentés dans la plupart des eaux.

2. Sodium :

Le sodium (Na^+) est un cation très abondant sur terre, on le trouve dans les roches cristallines et dans les roches sédimentaires comme les sables, les argiles et les évaporites. L'halite (évaporite Na Cl) connue comme le sel de cuisine, est particulièrement soluble dans l'eau. Toutefois le sodium est en général peu présent dans les roches carbonatées. Il est

également à noter que les argiles peuvent être enrichies en sodium (Na^+) par un processus d'échange de bases.

3. Potassium (K^+) :

Le potassium est relativement abondant sur terre, mais reste peu présent dans les eaux, cela s'explique par sa forte capacité d'adsorption et de recombinaison dans les sols, notamment dans les argiles. Ses principales sources sont les roches cristallines (mais à partir de minéraux moins altérables que ceux libérant du sodium), les évaporites (comme la sylvinite KCl) et les argiles.

4. Sulfate :

Les sources de sulfates dans les eaux sont multiples, d'origine naturelles, ils proviennent de l'eau de pluie (par évaporation de l'eau de mer, avec des concentrations de 1 à 20 mg /l), ainsi que de la dissolution de roches sédimentaires évaporitiques, notamment le gypse (CaSO_4) et plus rarement de roches magmatiques (comme la galène, la blende ou la pyrite).

5. Chlorure :

Le chlore (Cl^-) est naturellement présent en faible quantité sur terre, sa principale source dans les eaux est la dissolution de roches en milieu marin et incomplètement lessivées, ainsi que la présence d'évaporites. L'infiltration d'eau de mer (riche en chlorure) est les processus d'évaporation dans les bassins endoréiques sont également des sources de chlorures. Le rôle de roches cristallines dans la minéralisation en chlorures reste cependant limité. [9]

II.4. Air comprimé

L'emploi de l'air comprimé comme fluide de forage présente un certain nombre d'avantage :

- Plus grande vitesse de pénétration dans la roche dure.
- Réduction du poids sur l'outil.
- Grande capacité de dégagement des débris de forage.
- Forage facilité dans les formations gonflantes.
- Faibles besoins d'eau. [8]

II.4.1. Air comprimé pour forage au rotary

Pour évacuer efficacement les cuttings, on utilise une grande vitesse de remonté de l'air : de 915 à 1520 m/min, ce qui permet d'avoir un forage bien dégagé et propre. En cours de forage le volume d'air sera ajusté pour maintenir une vitesse annulaire nécessaire à la bonne remonté des cuttings. En effet la vitesse annulaire peut être altérée s'il se produit une érosion

Chapitre II : Matériels utilisés et les travaux à suivre pour réaliser un Forage

des parois (provoquant l'augmentation de volume de trou), on devra alors faire face à cette demande supplémentaire d'air pour maintenir la vitesse de remonté nécessaire. En présence de venues d'eau dans le forage, une boue se forme par le mélange d'eau avec cuttings, ce qui réduit l'espace annulaire et augmente la pression engendrant la fracture des formations tendres.

Une bonne méthode pour vérifier que le circuit d'air est suffisant pour remonter les cuttings, consiste à contrôler le temps nécessaire de remontée de cuttings, ce temps ne devrait pas excéder 6 à 7 secondes pour 30m de trou, si l'on utilise de l'air humide ce temps sera à majorer de 30 à 40%.

II.4.2. Air comprimé pour marteau fond de trou

Plus la pression de service d'air comprimé est élevée avec un marteau fond de trou, moins on aura de risques de coincement, la plupart des marteau fond de trou peuvent travailler à des pressions comprises entre 4 et 18 bars.

Le choix de la puissance du compresseur dépend de la consommation d'air comprimé estimée pendant le forage et pendant le soufflage. [14]

II.5 Mousse stabilisée

La mousse est un mélange de composée liquides (eau et produits) et gazeux (air), les solutions moussantes sont parfois accompagnées de polymères ou de bentonite pour augmenter sa densité et améliorer ses qualités de viscosité et la stabilisation des parois. Ce type de fluide est utilisé :

✚ Dans un forage rotary lorsque l'emploi de la boue est rendu difficile par la nature des terrains, une fracturation trop importante, ou une alimentation en eau insuffisante.

✚ Dans un forage à l'air en présence d'une érosion excessive des parois de forage, lorsqu'on rencontre des gonflements argileux, ou enfin lorsque l'évacuation des cuttings est rendue difficile par la présence de venues d'eau.

✚ Dans un forage ODEX. [8]

II.6. Moyenne d'injection de la boue de forage [13]

Nous avons utilisé la formule suivante pour déterminer le débit injecté de la boue de forage :

$$Q = 5 D^2$$

Avec :

- Q : débit d'injecter la boue (gallon /minute)
- D : diamètre de l'outil de forage
- 1 gallon américain = 3.785 litre.

II.7. Circuit de fluide de forage

La circulation de fluides dans le forage s'opère en deux modes.

II.7.1. Circulation normale

Dans le circuit normale le fluide se refoule dans le train de tiges à partir de la pompe à boue (à partir de compresseur s'il s'agit de l'air comprimé), circulant de haut en bas pour sortir au fond du forage à travers les trous de l'outil de forage (trépan), se mélange avec le cutting, puis le mélange fluide-cutting remonte, dans l'espace annulaire (espace entre les parois de forage et les parois de tubage) pour rejoindre la fosse à boue ou s'effectue l'échantillonnage, l'analyse, le traitement, l'ajustement et la décantation puis de nouveau il sera aspiré par la pompe à boue pour qu'il sera refoulé vers le train de tiges et ainsi de suite.

II.7.2. Circulation inverse

Dans la circulation inverse le fluide se refoule dans l'espace annulaire et le mélange fluide cutting remonte dans le train de tige en entrant par les trous se trouvant au fond du trépan. [12]

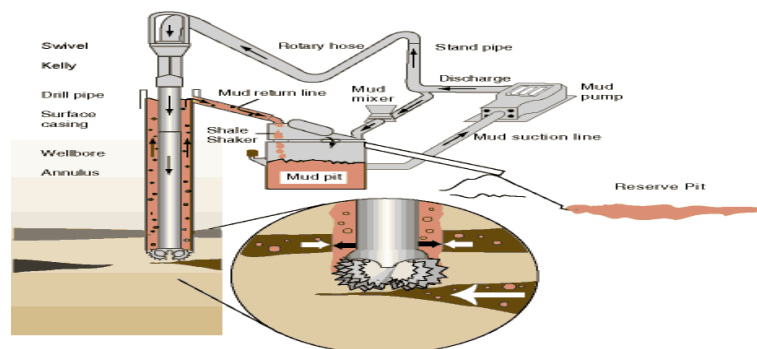


Figure 13 : Circuits de fluides de forage.

II.8. Matériels utilisée pour réaliser le forage

II.8.1. Les intervenants humains

Le succès des opérations de fonçage repose dans une large mesure sur l'expertise et l'expérience des intervenants. Parmi les postes principaux que l'on retrouve sur un chantier, nous avons :

- ❖ Chef de chantier : responsable global des opérations sur site.
- ❖ Chef de poste : supervise les activités spécifiques dans une zone donnée.

- ❖ Sondeur : chargé d'effectuer des mesures et d'analyser le terrain.
- ❖ Accrocheur : gère l'accrochage des outils utilisés.
- ❖ Ouvrier de plancher : assure les travaux de finition et de préparation.
- ❖ Mécanicien : gère l'entretien et la réparation des équipements.
- ❖ Chauffeur : Responsable du transport des matériaux et de l'équipe.

II.8.2. Les équipements matériels

Les équipements nécessaires pour le fonçage incluent :

- La foreuse : équipement principal utilisé pour le forage, permettant d'atteindre les profondeurs nécessaires.
 - Les accessoires : une variété d'outils comme des tiges, masses, clés, chaînes, et raccord qui facilitent le travail de forage.
 - L'équipement de test : comprend des tubes pour l'eau et l'air, ainsi que des flexibles et vannes pour différentes configurations de test.
 - Citerne d'eau : essentiel pour alimenter les opérations, en particulier dans des zones nécessitant un contrôle de la poussière ou des procédures de refroidissement.

II.8.3. Stocks des matériaux

Les matériaux utilisés sur le chantier incluent :

- Bentonite : utilisé pour stabiliser les parois des forages.
- Ciment : pour les travaux de scellement et de fixation.
- Gravier : souvent utilisé en tant que matériau de drainage ou de remblai.
- Eau : nécessaire pour diverses applications, notamment pour faciliter le forage et pour le nettoyage.

II.8.4. Les outils de forage

II.8.4.1. Outils à lames

On distingue trois principaux types d'outils à lames :

- Queue de poisson (Fishtail) : équipée de deux lames.
- Trois ailes (three wings) : outils à trois lames.
- Pilote : composé de plusieurs étages de diamètres différents.

Ces outils fonctionnent par un mouvement de rotation, semblable à celui d'une fraise qui découpe du métal, en produisant des copeaux dans le sol, ils sont principalement utilisés dans les terrains sédimentaires compacts, caractérisé par une structure fine et une faible dureté.

Avantage :

- Cout faible.
- Possibilité de reformage d'affutage.
- Bon pouvoir de coupe.

Inconvénients :

- Peu adaptés aux terrains durs.
- Peu utilisés par les foreurs malgré leurs avantages.
- Provoquent des vibrations importantes qui se transmettant jusqu'à la machine.
- Moins universels que les outils à molettes.

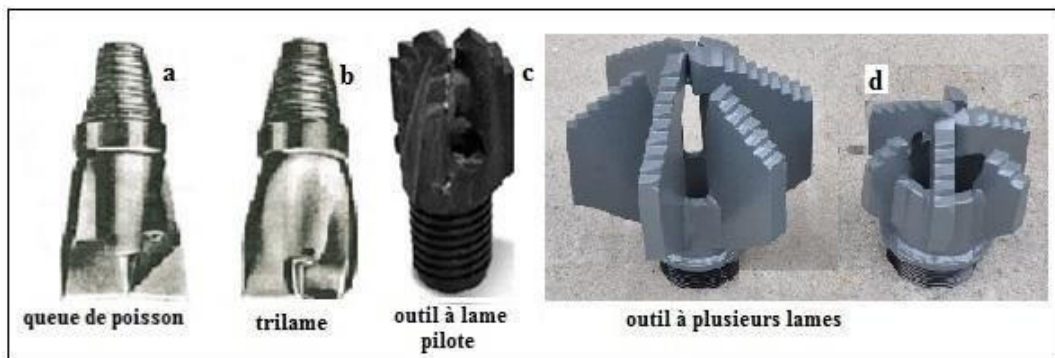


Figure 14 : Outils à lame

II.8.4.2. Outlie a molettes (rocks bits)

Les tricônes ou quadricônes sont des outils de forage équipés de trois ou quatre molettes montées horizontalement ou avec une légère inclinaison, fixées sur des roulements solides à billes ou à galets, comme les outils a là mais ils possèdent un montage rapide avec un système de verrouillage par clé et un joint parfaitement étanche.

La forme des dents varie selon le type de sol, long et espacées pour les terrains tendres, courts, fines et serrées pour les terrains durs.

Ces outils fragmentant la roche par écrasement et éclatement. Des orifices calibrés appelés « dusses » renforcent cette action grâce à de puissants jets de fluide.

Avantage :

- ✓ Montage rapide et sécurisée.
- ✓ Bonne étanchéité.
- ✓ Adaptabilité au terrain.
- ✓ Efficacités de forage élevé.
- ✓ Dents conçues pour optimiser la fragmentation du sol

- ✓ Action mécaniques (écrasement/ éclatement) renforcé par des jets de fluide puissants.
- ✓ Capacité à désagréger efficacement la roche même dans les conditions difficiles. [21]

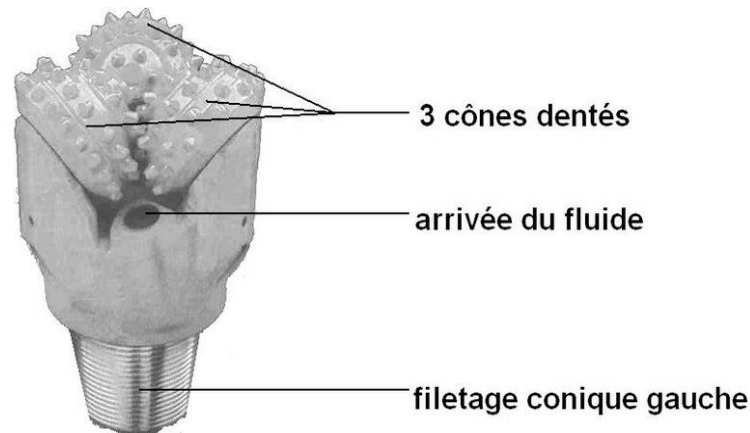


Figure 15 : Outil a molettes.

II.9. Les travaux à suivre

II.9.1. Installation de la machine

L'installation de la machine débute par le positionnement précis de la foreuse sur le point de forage, avec un contrôle strict de la verticalité et du nivellement. Les stabilisateurs sont déployés pour fixer l'engin, tandis que les éléments annexes tels que les tubes de forages, les tubages, les cuves d'eau, les groupes électrogènes et les compresseurs sont implantés stratégiquement autour de la plateforme. La zone est ensuite sécurisée par des barrières, et l'ensemble des équipements est soumis à une série de tests fonctionnels avant le début des opérations de forage. [16]

II.9.2. Choix de la technique de forage

Pour réaliser un forage d'eau, plusieurs techniques peuvent être utilisées. Le choix d'une méthode repose sur une analyse technico-économique visant à garantir une opération rapide, efficace et au moindre coût. L'objectif principal est d'atteindre le niveau souhaité du forage dans les meilleurs délais. Au-delà de cet aspect, il est essentiel de capter une ressource précise en quantité et qualité optimales. Cela impose de choisir une technique qui assure une bonne isolation des horizons parasites par des cimentations adaptées, de plus le forage proprement dit ne doit pas altérer le niveau aquifère ciblé. Chaque méthode possède ses avantages et ses limites, et notre sélection dépendra de ces éléments.

Le choix de la technique de forage repose sur plusieurs critères :

- Nature et propriétés du terrain (dureté, fissures, etc.).
- Profondeur à atteindre.
- Diamètre du tubage correspondant à la profondeur finale désirée.

- Délais d'exécution exigés par le maître d'ouvrage.
- Accessibilité et logistique d'approvisionnement du site.
- Vitesse de progression de l'outil de forage.

II.9.3. Préparation des fosses à boue

Lors d'un forage rotatif, il est nécessaire de mettre en place deux fosses fonctionnant en circuit fermé :

- Une fosse de décantation pour récupérer la boue remontée du forage et permettre la séparation des débris.
- Une fosse de pompage pour recevoir la boue décantée avant de la réinjecter dans le forage.

Ces fosses servent de réserve pour le fluide de forage, facilitent son recyclage et doivent être régulièrement curées pour enlever les sédiments accumulés. Lorsque les fosses sont creusées dans un dol meuble, il est indispensable de tapisser les parois (avec du plastique, de l'argile ou du ciment) afin d'éviter les infiltrations d'eau et les effondrements. Le flux de boue doit circuler lentement et de façon régulier pour permettre une bonne décantation et faciliter la collecte des déblais. Des bassins supplémentaires de décantation peuvent être ajoutés si nécessaire, le circuit classique comprend généralement deux bassins et deux canaux (voir la figure 9). Le premier canal doit être suffisamment long (plus de 2 mètres) pour que la fosse soit placée en dehors de la zone de travail (abri, station de pompage) afin d'éviter tout affaissement du sol, les dimensions typiques des canaux sont de 0.20*0.20m, et le deuxième canal doit être placé dans l'axe du premier pour optimiser la décantation.

La capacité du bac d'aspiration doit correspondre environ au volume de boue produit pendant le forage et la capacité de fosse de décantation doit être au minimum trois fois le volume du forage.

Le dimensionnement des fosses dépend de la profondeur du forage, une méthode de calcul approximative proposée par E. Drouard et J.M Vouillamoz et la suivante :

Volume totale des fosses = 3* volume du forage.

a. Fosse de décantation :

- Largeur = $(\text{volume du forage (litre)} * 0.57)^{1/3}$;
- Longueur = $1.25 * \text{largeur (m)}$;
- Profondeur = $0.85 * \text{largeur (m)}$;

b. Fosse de pompage :

- Largeur = $(\text{volume du forage (litre)} * 0.57)^{1/3}$;

- Longueur = $1.25 \times$ largeur (m) ;
- Profondeur = $0.85 \times$ largeur (m)

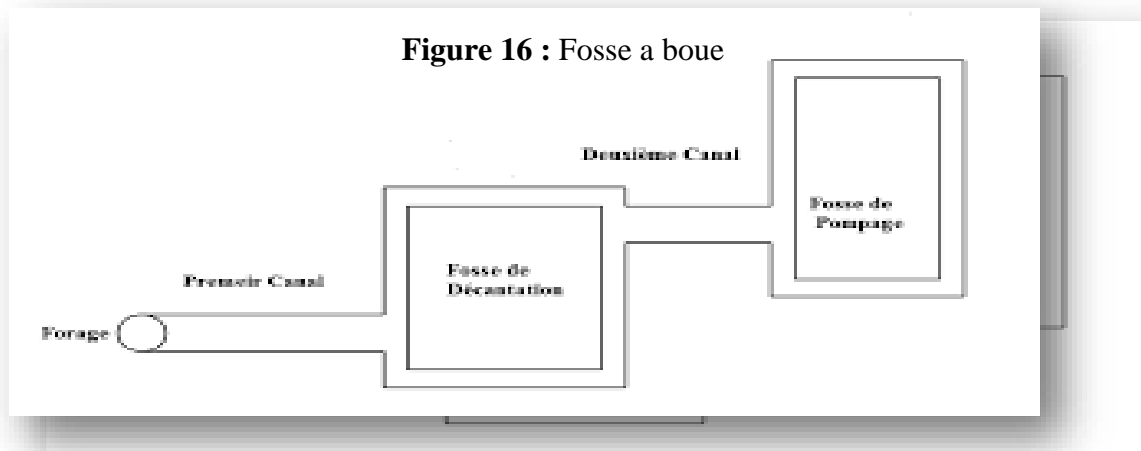


Figure 16 : Fosse a boue

II.9.4. Mise en place du tube guide

Le tubage consiste à introduire une colonne de tubes dans un puits pour renforcer sa paroi et permettre ensuite son cimentation. C'est une opération où l'on descend un tube spécial dont le diamètre est presque égal à celui du trou de forage (laissant un petit espace tout autour). Le tubage doit être solide pour résister aux tractions et pression pendant sa descente, mais aussi aux frottements contre les parois du puits. Les tubes utilisés sont appelés (casings) sont normalisés par l'API (American petroleum Institute) et leurs diamètres varient entre $4''^{1/2}$ pouces et $20''$ pouces. Le choix du tubage dépend du débit attendu et des efforts mécaniques (traction, flambage, etc.) qu'il devra supporter.

□ Les matériaux utilisés pour les tubes sont : acier noir non galvanisé, acier recouvert d'un film plastique, acier inoxydable, acier non chrome-aluminium, NRS, et pvc (pour le forage peu profond comme en hydraulique).

Principales caractéristiques des tubes de tubage :

Tableau 1 : Les caractéristiques de tubes guide

Longueur	Environ 9 mètres.
Épaisseur	De 2 à 11 mm pour l'acier, et 4 à 10 mm pour le pvc.
Diamètre	De 100 à 2500 mm pour l'acier, et de 160 à 315 mm pour le pvc.
Raccordement	Par soudeur ou vissage.

Remarque importante :

La descente du tubage est une étape délicate, surtout dans les forages inclinés, car le risque de blocage est élevé. Il faut agir rapidement pour éviter que les parois du puits ne s'effondrent. Le diamètre et la position des tubes doivent être choisis en fonction de la nature du sol et du risque d'arrivée de fluides depuis le réservoir. Avant de poursuivre le forage ou si la paroi du puits devient instable, il est essentiel de poser le tubage, puis de réaliser des tests pour s'assurer de la qualité du forage.

II.9.5. Contrôle de la rectitude et de la verticalité

Quand on descend un tubage, qu'on installe une colonne de tubes rigides ou une pompe immergée dans un forage qui n'est pas droit, cela devient compliqué, c'est pourquoi il est important de vérifier que le forage est bien vertical et de repérer les déviations pour pouvoir corriger le problème. Le bon fonctionnement d'une pompe immergée dans un forage penché peut être perturbé à cause de pertes de charge (perte d'énergie dans l'eau qui circule), on considère qu'une déviation de 0.25% est négligeable, par contre si elle atteint 0.5% ou plus elle devient importante et peut poser problème.

Pour contrôler la verticalité du forage on mesure la géométrie et les déviations à l'aide de différents outils :

- *Borehole Geometry Tools (BGT)* : appareil pour mesurer la forme du forage.
- *Pendage-mètre (comme le Diplog, HDT...)* : outil pour mesurer l'inclinaison.
- *Inclinomètre* : pour vérifier l'angle du forage.
- *Guidance continuos Tool (GCT)* : outil pour suivre en continu la trajectoire du forage.

Ces mesures permettent d'avoir plusieurs informations utiles :

- Vérifier si le trou est devenu ovale.
- Connaitre le volume du trou.

Chapitre II : Matériels utilisés et les travaux à suivre pour réaliser un Forage

- Estimer le volume de ciment nécessaire pour le forage.
- Avoir des indications sur la direction générale du forage.

II.9.6. Calculer la profondeur verticale exacte. Prélèvement des échantillons

II.9.6.1 échantillons (Cuttings)

L'échantillonnage consiste à prélever des petits morceaux de terrain appelés (Cuttings) à chaque mètre pendant le forage, jusqu'à la fin du trou. Ensuite, on analyse ces morceaux pour créer un 'log' stratigraphique à établir une courbe granulométrique (répartition des tailles de grains) pour mieux comprendre le sol et déterminer quel type de gravier ou de sable il faudra ajouter pour une bonne exploitation. Quand le forage est réalisé avec de la boue, les échantillons remontés à la surface contiennent souvent beaucoup de cette boue, ce qui rend leur nettoyage délicat mais indispensable. En revanche d'autres méthodes de forage sans boue (comme le forage à l'air ou marteau fond de trou) donnent des échantillons beaucoup plus propres et donc plus représentatifs du sol réellement traversé. [17]



Figure 17 : L'échantillonnage de sol

II.9.6.2. Carottage

Le carottage consiste à découper un échantillon cylindrique du sol appelé (carotte) à l'aide d'une couronne à dents (souvent en acier ou enrobée de carbure de tungstène, voire de diamants) la carotte est ensuite remontée à la surface avec beaucoup de soin pour éviter de l'abîmer en touchant les parois du forage.

Le carottage mécanique permet de connaître :

- La nature du terrain
- La position des différentes couches.
- Leur épaisseur et leur étendue.

I.9.6.2.1. Types de carottiers

a. Carottier simple

Le carottier simple est un tube utilisé pour prélever des échantillons de sol ou de roche. Il a généralement une longueur standard de 500, 1500 ou 3000 mm. Ce type de carottier est directement monté sur la tête de forage et est adapté aux formations géologiques dures et homogènes. Il permet de récupérer des échantillons continus mais peut entraîner un certain degré de perturbation du sol ou de la roche.

b. Carottier double

Le carottier double est composé de deux tubes concentriques : un tube extérieur et un tube intérieur, généralement d'une longueur de 1500 à 3000 mm. Le tube intérieur est monté sur roulement, ce qui lui permet de rester fixe pendant que le tube extérieur tourne. L'injection de fluide de forage se fait entre les deux tubes. Ce système réduit le frottement et les perturbations sur l'échantillon, garantissant une meilleure qualité de carotte.

L'échantillon récupéré avec un carottier double est dit (non remanié) car il reste intact dans le tube intérieur. Ainsi, la carotte ne subit aucun contact avec le fluide de forage, ce qui diminue fortement les risques d'altération ou de détérioration de l'échantillon.

II.9.6.3. Évaluation de la perméabilité

Plusieurs méthodes permettent de déterminer la perméabilité des couches aquifères rencontrées lors d'un forage d'eau. Ces méthodes incluent :

- Essais en laboratoire : réaliser en utilisant des perméamétries, soit à charge constante, soit à charge variable, pour simuler les conditions d'écoulement dans les échantillons.
- Mesures sur le terrain (in situ) : le test de Lugeon est fréquemment utilisé pour estimer la capacité d'une roche à laisser circuler l'eau. Cette méthode consiste à injecter de l'eau à pression constante dans une section isolée du forage. On mesure ensuite le débit injecté à différents niveaux de pression pendant une durée déterminée.
- Méthode empirique : on peut également utiliser des formules basées sur la granulométrie des sols, comme celles d'Hazan ou Slichter, en se référant à la courbe de distribution des grains.
- Calculs basés sur la transmissivité : la perméabilité peut aussi être déduite à partir de la transmissivité obtenue lors d'essais de pompage.

II.9.7. Carottage électrique (diagraphie)

Le carottage électrique, aussi appelé diagraphie ou « well logging », est une méthode géophysique utilisée pour analyser en détail les caractéristiques des informations géologiques traversées par un forage. Cette technique repose sur l'utilisation de sondes spécifiques introduits dans le trou de forage, permettent de mesurer des propriétés physiques du sous-sol.

II.9.7.1. Objectif de la diagraphie électrique

Cette méthode permet d'obtenir un profil vertical du sous-sol en mesurant des propriétés physiques qui varient en fonction de la nature des roches rencontrées. Cela aide à :

- Identifier les couches géologiques et leur nature (argile, sable, calcaire, etc.).
- Repérer les zones aquifères et estimer leur capacité à contenir ou transmettre l'eau.
- Détecter les niveaux imperméables ou les discontinuités géologiques.
- Conduire une interprétation structurale et stratigraphie du site.

II.9.7.2. Principe de fonctionnement

La diagraphie électrique repose sur la mesure de plusieurs paramètres physiques à différentes profondeurs du forage. Les principaux types de mesures sont :

1. Potentiel spontané (Ps)

Ce paramètre résulte de la différence de potentiel électrique naturelle qui se crée entre les fluides de forage et les formations traversées, il donne une minéralogie des terrains, notamment la présence de couches argileuse ou perméables, il permet aussi d'identifier les interfaces entre couches géologiques différentes.

2. Résistivité électrique

Cette mesure indique la capacité des formations souterraines à résister au passage d'un courant électrique. Les roches saturées en eau douce ont généralement une faible résistivité, tandis que celles contenant moins d'eau ou de l'eau salée ont une résistivité plus élevée. Cette mesure est cruciale pour :

- Estimer la porosité des formations.
- Identifier les zones aquifères potentielles.
- Différencier les formations perméables (gravier, sable, calcaire fissuré) des formations imperméables (argile, schiste).

3. Radioactivité naturelle (gamma ray)

Cette mesure est à détecter les éléments naturellement radioactifs présents dans les roches, comme le potassium, l'uranium ou le thorium. Les argiles sont souvent plus radioactives que les autres types de roches. Le log Gamma Ray permet donc de :

- Localiser les niveaux argileux.
- Distinguer les formations grossières (perméables) des formations (imperméables).
- Appuyer la corrélation entre différentes coupes géologiques.

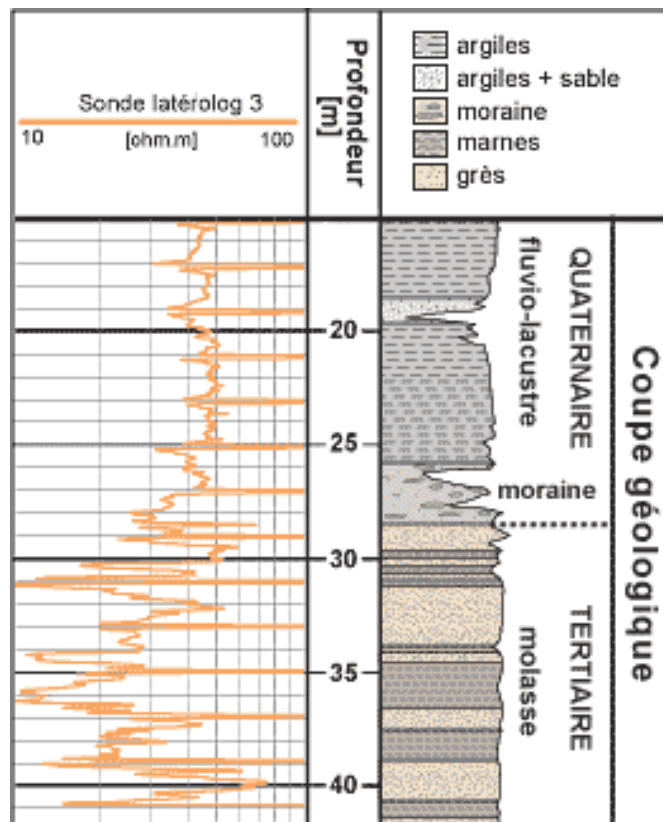


Figure 18 : Diagraphie d'un forage

II.9.8. Alésage et réalésage

L'opération d'alésage ou réalésage intervient généralement après l'analyse des données issues de la diagraphie et l'interprétation des cuttings. Ces informations permettent de mieux connaître la géologie traversée et de décider si un élargissement du puits est nécessaire.

Le réalésage consiste à reprendre un forage existant pour en augmenter le diamètre, cette opération est souvent réalisée dans les forages de reconnaissance ou un premier passage a été effectué avec un outil de plus petit diamètre, permettent une première évaluation géologique.

L'élargissement du trou s'effectue à l'aide de :

- ✓ Outils spécifiques appelés (pilot bits) ou (aléseurs), souvent montés avec un outil guide qui permet de diriger précisément l'agrandissement.

- ✓ Outils de grand diamètre, conçue pour élargir efficacement les sections du puits, tout en assurant la stabilité des parois.

L'objectif principal du réalésage est de permettre soit l'installation de tubages de plus grand diamètre, soit de faciliter l'interprétation géologique, ou encore de préparer le puits à une phase d'exploitation.

II.9. 9. La mise en place des équipements du forage

Le bon choix des équipements de forage (tubage, crépine, gravier filtrant, etc.) est crucial pour garantir le succès du forage est une exploitation optimale. Il permet notamment de protéger la nappe captée contre les pollutions de surface qui pourraient s'infiltrer le long du tubage (grâce à l'aménagement en surface et au bouchon de ciment.

II.9.9.1. Mise en place de tubage

Le plan de tubage (définissant la longueur et la position des tubes pleins et crépines) est élaboré en fonction de la coupe géologique du forage, celle-ci met en évidence les différentes couches de terrain et les venues d'eau, ce qui permet à partir de l'observation visuelle des échantillons, de mieux cibler l'installation.

Des essais de diagraphie (comme la mesure de la résistivité électrique) peuvent être réalisés avant le pose des équipements afin d'optimiser le captage, notamment dans les terrains sédimentaires (forage rotary), ou il est parfois difficile de localiser les horizons argileux.

Remarque :

En raison des risques d'effondrement souvent élevés, le tubage doit être mis en place rapidement, le trou ne doit pas rester longtemps sans protection pour éviter la perte du forage par effondrement.

II.9.9.1.1. Plan de tubage

Le plan de tubage doit respecter les points suivants :

- ✚ Le tubage ne va pas forcément jusqu'au fond du trou de forage, en effet des dépôts de débris en suspension dans la boue ou un effondrement partiel peuvent se produire lors de l'arrêt de la circulation, il faut donc prévoir de 0.5 à 1 mètre par rapport à la profondeur totale forée.

- ✚ Le dernier tube du tubage doit dépasser d'environ mètre au-dessus du sol pour faciliter les raccordements en surface

✚ Comme la longueur des tubes peut varier à cause du filetage, il est préférable de mesurer chaque tube pour établir un plan de tubage précis, permettent un captage efficace de l'aquifère

✚ Le tubage doit pouvoir descendre librement dans le forage par gravité, si le forage n'est pas parfaitement vertical (ce qui arrive souvent au -delà de

✚ Mètre de profondeur), des frottements peuvent bloquer le tube, dans ce cas il est possible d'appuyer légèrement sur le tubage pour l'aider à descendre si cela ne suffit pas il faudra le retirer et rélargir le trou.

II.9.9.1.2. Diamètre de tubage :

Pour bien installer votre tubage, prévoyez d'abord un espace d'environ 2.5 cm (1 pouce) entre la pompe et la paroi intérieure du tube afin de garantir une circulation douce de l'eau, évite la perte de pression et d'assurer un refroidissement optimal de l'appareil. Ensuite choisissez un tube dont l'extérieur dépasse d'environ 5 cm (2pouces), cet espace accueille un mélange de graviers ou de sable pour filtrer les impuretés, protéger votre équipement et maintenir un débit régulier. En fin un tubage bien dimensionné équilibre l'espace nécessaire autour de la pompe et la place réservée au filtre pour garantir à la fois la performance hydraulique et la durabilité de votre puits.

II.9.9.1.3. Le choix de tube plein

Les structures doivent être conçues pour résister aux contraintes mécaniques résultant des pressions exercées lors de la mise en œuvre du forage (telles que les efforts de traction, de compression, l'éclatement et de flambage).

Le diamètre des tubes dépend principalement du débit d'exploitation (le diamètre de la pompe) et leur épaisseur est déterminée par la profondeur d'installation ainsi que par la méthode de cimentage employée. La qualité des tubes est également influencée par la nature des fluides captés, grâce à une analyse chimique représentative il est possible d'optimiser les matériaux utilisés, d'autres éléments comme le délai d'approvisionnement et le coût, peuvent également jouer un rôle dans le choix des équipements, il est essentiel que l'étanchéité des colonnes de tubes cimentés soit de qualité afin de protéger efficacement les nappes d'eau.

Pour les tubes hors d'usage il est crucial d'améliorer la qualité des nouveaux matériaux.

De plus, il convient de prêter attention à deux aspects importants :

- Les zones thermiquement affectées par les soudures qui doivent résister à la corrosion.

Chapitre II : Matériels utilisés et les travaux à suivre pour réaliser un Forage

- La possibilité d'ajouter une couche de protection pour limiter les effets néfastes des soudures, tout en s'assurant que celle-ci doivent être réalisées en présence de gaz inerte, lorsque cela est nécessaire.

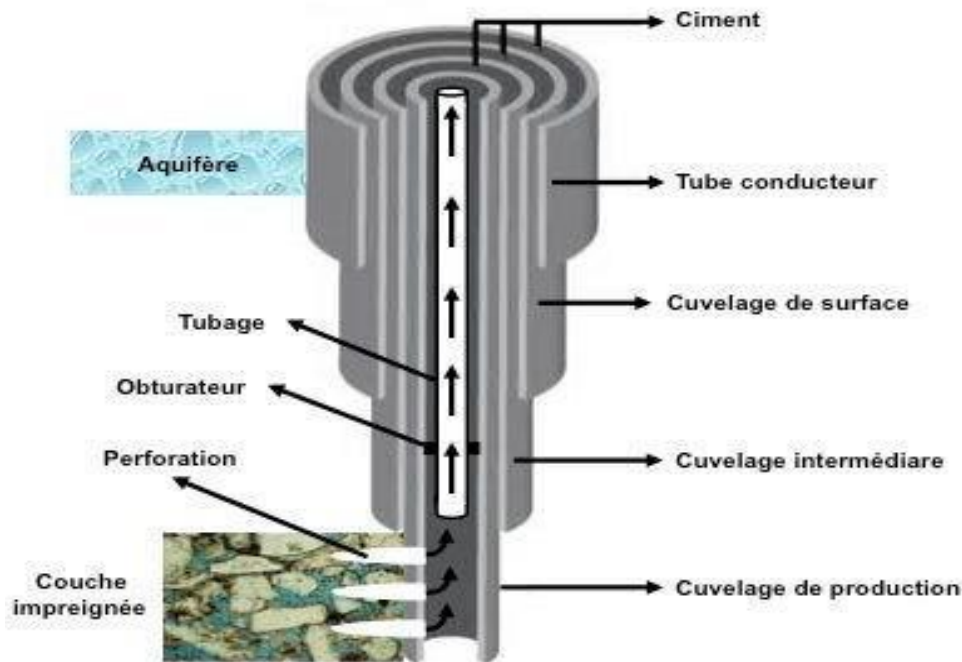


Figure 19 : Le tubage

II.9.9.2. Colonne de captage

II.9.9.2.1. La crépine

En termes simples, une crépine est un tube perforé qui permet à l'eau de passer tout en préservant la formation environnante.

Comme interface entre la source d'eau et l'équipement, la crépine joue un rôle essentiel dans le fonctionnement des installations d'exploitation d'eau. Sa longueur, son type et sa composition dépendent de plusieurs facteurs : l'épaisseur de la formation géologique, le niveau de rabattement maximal souhaité, ainsi que les caractéristiques de l'aquifère concerné.

Les crépines doivent répondre à plusieurs impératifs :

- Maintenir l'ouverture de puits cela permet une circulation d'eau continue.
- Stabiliser la formation pour éviter l'effondrement et préserver l'intégrité du sol environnant.
- Retenir le sable afin d'éviter que des particules indésirables n'entrent dans le système.
- Réduire les pertes de charge pour garantir un débit optimal et efficace.

Les éléments essentiels pour positionner les crépines incluent :

- Diagraphie.
- Analyse des échantillons.

II.9.9.2.2. Différents types des crépines

✓ Crépin de Johnson : ce type de crépine est construit à partir d'une armature de géométrie verticales faite de fils rond et triangulaires, enroulés pour former un profil, ce profil a une section en triangle avec des angles arrondis est fixé à un sommet où se trouvent les géométries. Chaque point de contact entre le fil et la génératrice est électriquement soudé pour assurer la solidité. Ces avantages incluent une utilisation fréquente dans les applications courantes.

✓ Crépines à perforations rondes : utilisées sur des surfaces dures, elles présentent une faible densité de perforation (10%).

✓ Crépine à perforations oblongues : dotée de fentes rectangulaires verticales, sa largeur est au moins égale à l'épaisseur de la tôle, avec une longueur standard de 3 cm et une faible densité de perforation (10à20%).

✓ Crépine à nervures repoussées : comprend des perforations rectangulaires horizontales, offrent une bonne résistance mécanique tout en ayant une résistant mécanique tout en ayant un faible pourcentage de perforation.

✓ Crépine latérale (tubages flottés) :

- L'ouverture varie selon l'épaisseur (10à4mm).
- Pourcentage de vide variant de 3à 5 mm.
- Ce type de crépine est fréquemment employé en raison de son cout attractif, bien qu'il présente des inconvénients en matière de filtration et augmente le risque de colmatage des pores.



Figure 20 : Types de crépines

II.9.9.2.3. Ouverture des fentes des crépines

En règle générale, l'ouverture des fentes de crépines devrait être inférieure à la plus petite taille granulaire du gravier filtrant. Cette ouverture est déterminée par la courbe granulométrique de la formation. De plus la forme et la répartition des ouvertures des crépines jouent un rôle tout aussi important que la détermination de leur ouverture-elle-même, car elles influencent le coefficient d'ouverture, qui doit être maximisé pour optimiser l'exploitation du forage.

II.9.9.3. Massif filtrant

II.9.9.3.1. Définition et rôle

Le gravier additionnel joue un rôle crucial dans l'augmentation des débits d'exploitation, la réduction des vitesses d'écoulement, et la prévention de l'érosion en limitant l'entrée des sables fins. Pratiquement, il est défini par la granulométrie du matériau et par l'ouverture de la crépine, qui doit être adaptée afin d'uniformiser le débit et calibrer les sillons de préférences.

La pression exercée le long du tube indique une variation dans l'espace annulaire dédié au gravier. Une élévation du niveau de boue dans le tube peut indiquer une obstruction du gravier, surtout lorsque le niveau de gravier atteint le haut du tube, mais ne parvient pas à entrer dans l'espace annulaire. Cela signifie que le gravier doit excéder la hauteur des crépines sur quelques mètres.

En pratique, le gravier additionnel est déterminé par la granulométrie de la formation et par l'ouverture de la crépine.

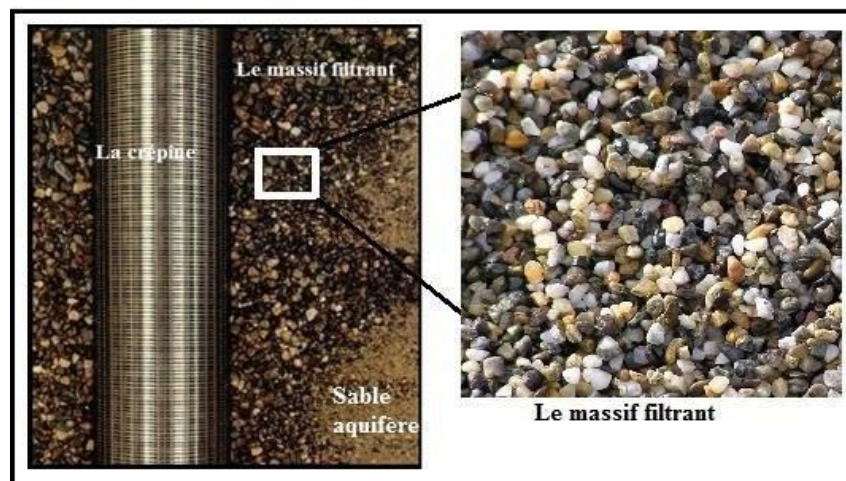


Figure 21 : Massif filtrant

II.9.9.3.2. Rôle de gravier additionnel

- ✓ Accroître les débits d'exploitation grâce à la filtration.
- ✓ Réduire les vitesses d'écoulement.
- ✓ Prévenir l'érosion souterraine ainsi que l'infiltration de sables fins.
- ✓ Eviter le colmatage.

II.9.9.3.3. Conditions pour réussir le gravillonnage

- Le gravier utilisé doit être propre et consistant en silice à hauteur d'au moins 90% afin de minimiser les risques de dissolution (stabilité chimique)
- Les grains doivent avoir des bords arrondis pour réduire les pertes de charge (assurant une circulation optimale entre les grains) et augmenter le pouvoir de filtration.
- Il est déconseillé de verser du gravier depuis la surface en raison des problèmes potentiels de formation de ponts et du classement des grains.
- L'installation doit se faire via des cannes d'injection, allant jusqu'au sommet de la nappe aquifère, ou en utilisant une circulation inversée pour des forages plus profonds.
- Une réserve de gravier est essentielle au-dessus des crépines.
- L'espace annulaire doit être compris entre 2 et 4 pouces en fonction des caractéristiques de l'aquifère.

II.9.9.3.4. Volume de gravier

Le volume requis de gravier peut être déterminé de manière théorique, en calculant la différence entre le volume du trou et le volume du tubage. Alternativement, il peut être estimé à l'aide d'une formule empirique proposée par E. Drouard, qui s'exprime comme suit :

$$V=H*0.8*(D^2-d^2)$$

V : représente le volume de gravier en mètres cubes (m³).

H : la hauteur mesurée en mètres (m).

D : désigne le diamètre du forage, en pouces (in).

d : fait référence au diamètre du tubage, également en pouces.

Le facteur 0.8 est un coefficient empirique qui tient compte de l'ouverture de la crépine.

L'estimation du volume de gravier à installer dépend non seulement du volume théorique calculé, mais requiert aussi l'ajout éventuel de 20% ou plus, afin de tenir compte des conditions spécifiques de forage et de la nécessité d'adapter le volume aux horizons de cavage.

[19]



Figure 22 : Gravier de filtration

II.9.9.4. La cimentation

Cette méthode consiste à remplir, par un mélange à base de ciment, tout ou partie de la hauteur de l'espace annulaire entre un tubage et les parois du trou. La cimentation est utilisée notamment dans les cas suivants :

- Pour colmater des cavités ou des grosses fissures qui engendrent de fortes pertes de bous lors de la forassions.
- Pour rendre étanche l'espace annulaire et empêcher la pollution par les eaux de surface, des nappes souterraines mises en exploitation.
- Pour fixer les colonnes de tubage au terrain et les protéger ainsi contre les attaques corrosives de certaines eaux. [18]

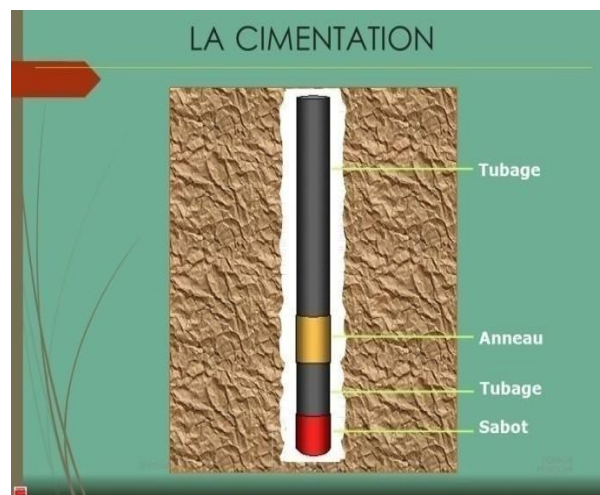


Figure 23 : La cimentation

II.9.10. Développement

Le développement d'un forage consiste entre autres à améliorer la perméabilité de la formation aquifère située autour de la crépine et à stabiliser cette formation. Il faut savoir que la mise en production immédiate d'un ouvrage sans développement aurait des conséquences fâcheuses :

- Elle ne permettrait pas d'obtenir de débit optimal pouvant être fourni par l'aquifère.
- Elle entrainerait très certainement d'importantes venues de sable (risques de dommages à la crépine et à la pompe, de colmatage, de tassement du massif de gravier)

Le développement est donc destiné à parfaire le nettoyage de trou, de la crépine et du massif de gravier et à améliorer les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère autour de la crépine, dans le but d'augmenter le débit exploitable et de produire une eau propre. La perméabilité du terrain près de la crépine est ainsi améliorée, notamment par élimination dans cette zone du maximum d'éléments fins et par restructuration et stabilisation du massif de gravier. [22]

II.9.10.1. Les méthodes de développement

Il existe plusieurs méthodes de développement, les plus utilisées sont :

1. Le développement par sur pompage

C'est la méthode la plus simple, elle est couramment utilisée, mais ce n'est pas la plus efficace. Le procédé consiste à mettre provisoirement le forage en production par un pompage à un régime supérieur à celui fixé pour l'exploitation.

Son avantage réside surtout dans le fait qu'il permet d'obtenir une production régulière plutôt que dans celui d'un développement absolu, même si ce sur pompage a apparemment débarrassé la zone critique de la formation du sable fin qu'elle contenait. En fait le sur pompage constitue en moyen de nettoyer le forage en provoquant un début de développement.

2. Le Développement par pompage alterné

Comme le cas précédent, on met le forage en production par pompage et on provoque, à plusieurs reprises des arrêts brusques de la pompe, on crée ainsi des variations brutales de pression qui ont pour effet de développer la formation on emploie de préférence une pompe centrifuge classique à axe vertical, sans clapet de pied, mais l'on doit prévoir une assez grande fatigue du matériel utilisé.

Chapitre II : Matériels utilisés et les travaux à suivre pour réaliser un Forage

✓ Premier procédé

On utilise la pompe à sa capacité maximum jusqu'à obtenir le plus grand rabattement possible du niveau de l'eau. On arrête alors la pompe et toute l'eau de la colonne d'aspiration retombe dans le forage pendant que le niveau remonte à sa cote de départ. On recommence l'opération autant de fois que nécessaire.

✓ Le deuxième procédé :

Même processus que précédemment, mais dès qu'on a obtenu le rabattement maximum et arrête la pompe, au lieu d'attendre que le niveau remonte à sa cote de départ on recommence le pompage presque aussitôt. Cela a pour effet d'agiter fortement l'eau au fond de la crépine, il faut cependant prendre garde de ne pas remettre la pompe en marche avant son arrête complet pour ne pas risquer une rupture de l'arbre.

✓ Troisième procédé :

Sans rechercher à obtenir le rabattement maximum, on pompe jusqu'à ce que l'eau se déverse à la surface, on arrête la pompe ce qui libère toute la colonne d'eau, et on recommence.

3. Développement par pistonnage :

a. Principe :

L'outil est un piston actionné verticalement dans les deux sens à l'intérieur d'un forage tube et crépine, dans son mouvement de remontée le piston crée une dépression, au-dessous de lui qui attire l'eau et le sable fin de la formation vers la crépine.

b. Les étapes de pistonnage :

- Descendre le piston dans le forage jusqu'à ce qu'il touche l'eau.
- Commencer à pistonner doucement, puis augmenter la cadence et la course mais sans laisser le câble mollir.
- Continuer ainsi pendant quelque minute, le forage sentira à la tension de câble et bruit de l'outil que le sable à pénétrai dans la crépine. Sortir alors le piston et descendre une cuillère à clapet ou une pompe à sable.
- Recommencer à pistonner puis à curer et comparer les niveaux et les volumes de sable extraits aux divers cycles d'égale durée, continuer ainsi jusqu'à ce qu'aucune venue de sable ne se produise.
- Augmenter la durée du pistonnage de chaque cycle si la venue de sable décroît d'un cycle à l'autre.

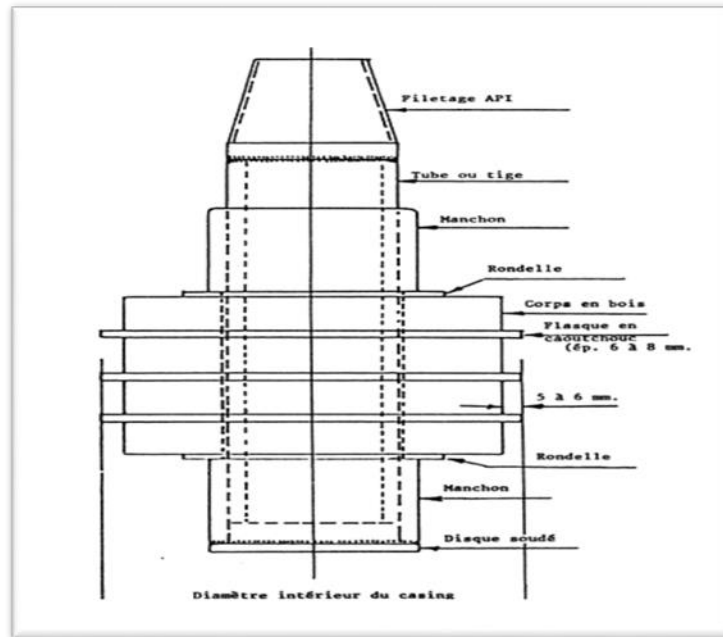


Figure 24 : Piston de développement (ALBERT MABILLOT)

4. Développement pneumatique :

Cette méthode est certainement la plus efficace si elle est bien adaptée et bien conduite, elle présente l'avantage de n'entraîner aucune détérioration du matériel employé. Elle permet de combiner l'action de flux et de reflux provoquée par de grands volumes d'air introduits dans l'ouvrage avec celle de mise en production par **air lift** (éjecteur ou émulseur). Nous indiquons ci-dessous les deux méthodes de son utilisation pour le développement.

✚ Méthode de forage ouvert :

- L'opération consiste à alterner les phases de pompage à l'air-lift et de soufflage brusque. On procède ainsi :
 - Descendre le pied du tube d'eau à 0.60 m environ de sabot de la crépine.
 - Descendre ensuite le tube d'air de façon que sa base soit à a environ de 0.30 m au-dessus de celle de tube d'eau.
 - Ouvrir l'air et laisser s'écouler l'eau pulsée par l'air-lift jusqu'à ce qu'elle ne contienne plus de sable.
 - Fermer l'air et laisser la pression monter au maximum au compresseur.
 - Pendant ce temps, descendre le sabot du tube d'air à environ 0.30 m au-dessous du sabot du tube d'eau, soit 0.60 m lus bas que précédemment et à 0.30 m du fond de la crépine.

Chapitre II : Matériels utilisés et les travaux à suivre pour réaliser un Forage

□ Ouvrir brusquement le robinet d'air. L'eau sera violemment projetée au-dehors par le tube d'eau et par le casing, mais pendant un temps très court

□ Remonter ensuite le tube d'air à sa première position ce qui provoque un violent renversement de flux dans le tube d'eau et une grande turbulence dans la formation autour de la crépine

□ Quand elle est redevenue claire, remonter le tube d'eau de 0.60 m à 1 m recommencer les opérations précédentes pour traiter la formation au nouveau du sabot du tube d'eau et ainsi de suite sur toute la hauteur de la crépine.

□ Il sera alors nécessaire de redescendre le tube d'eau à sa première position afin de sortir par air-lift le sable qui s'est déposé tout au fond de la crépine.

□ Lorsque l'eau extraire à ce dernier stade sort claire, sans sable on peut considérer que l'opération est terminée.

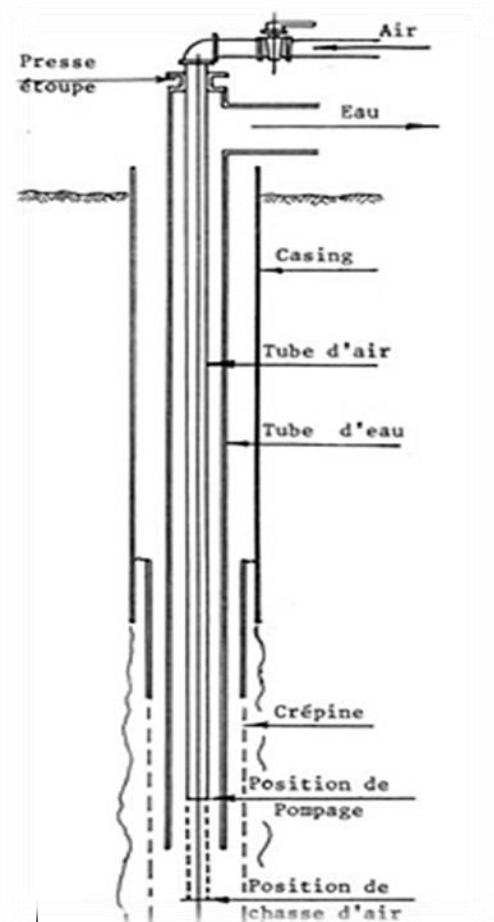


Figure 25 : Développement à Forage ouvert
(ALBERT MABILLON)

✚ Méthode de forage fermé :

Le casing est hermétiquement fermé par joint plein que traverse le tube d'eau et qui comportent une ouverture recordée à un robinet de décharge. Les opérations à réaliser sont les suivantes :

□ Manœuvrer le robinet 3 voies pour envoyer l'air dans la crépine, le robinet de décharge étant ouvert.

□ Laisser couler comme dans la méthode à forage ouvert jusqu'à ce que l'eau éjectée sorte claire.

□ Laisser l'eau remonter à son niveau statique dans le forage ce qu'on peut vérifier en écoutant l'air sortir par le robinet de décharge.

□ Fermer le robinet de décharge et manœuvrier le robinet 3 voies pour envoyer l'air par le tube supportant le robinet de décharge à l'intérieur du forage, sous le couvercle du casing.

□ Lorsque le niveau de l'eau dans le forage aura été rabattu jusqu'au sabot du tube d'eau, l'air sortira par ce tube à la surface. A ce moment, ouvrir le robinet de décharge et laisser l'eau remonter à son niveau statique, le robinet d'air étant fermé.

□ Manœuvrer le robinet 3 voies et provoquer à nouveau par air lift le pompage de forage.

□ Répéter ces opérations jusqu'à ce que le forage ne produise plus de sable

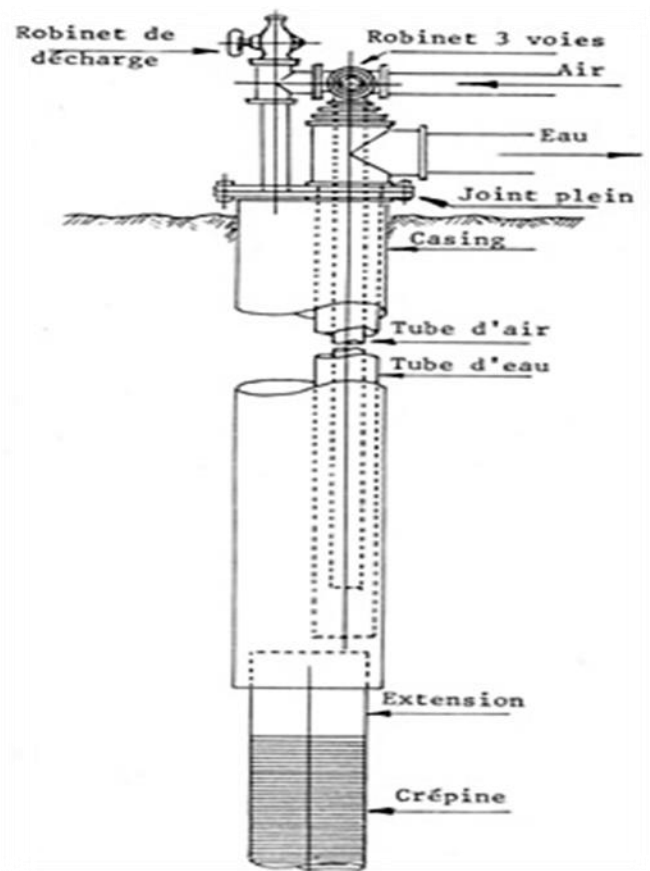


Figure 26 : Développement à forage fermé
(ALBERT MABILLON)

5. Développement par lavage au jet :

Le lavage au jet sous pression est une des plus récentes et des meilleures méthodes de développement, c'est aussi la plus simple et la moins coûteuse, un outil à jets très facile à construire, une pompe à haute pression, la tuyauterie rigide ou souple, la robinetterie et la cuverie correspondantes constituent tout l'équipement. Les puissants jets d'eau ou de solution chimique sont projetés à travers la crépine dans la formation ou dans le massif de gravier additionnel qui l'entoure, par une lente rotation de cet outil combinée avec un mouvement vertical de va et vient la surface entière de la crépine est soumise à l'action vigoureuse des jets. La turbulence ainsi créée déplace le sable fin, le limon ou l'argile qui pénètrent dans la crépine au-dessus et au-dessous du point où l'on opère.

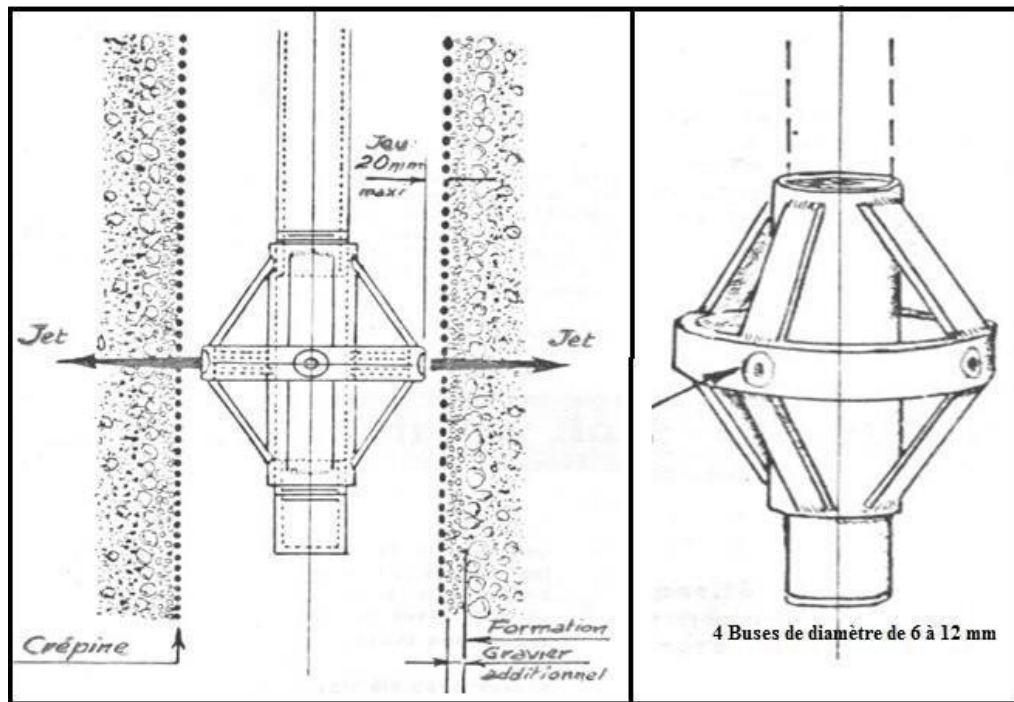


Figure 27 : Développement par lavage au jet (ALBERT MABILLON)

II.9.10.2. Contrôle du développement

Le principe d'un bon développement permet d'éliminer les venues de sable ou sédiments au cours des pompages d'exploitation de l'ouvrage, et d'améliorer la capacité spécifique du pompage. Ces deux critères doivent être contrôlés.

- Contrôle des sédiments : cinq échantillons seront prélevés au cours du pompage de réception. Le premier après 15 mn de pompage, les suivants après 25%, 50% et 75% du temps prévu du pompage. Le dernier échantillon sera prélevé en fin de pompage.
- Contrôle de la capacité spécifique : une formation peut être débarrassée du sable sans que pour autant, le classement des éléments restés en place soit optimum. Le contrôle se fera par comparaison du rabattement de la nappe pour un même débit avant et après le développement, ou par des mesures du coefficient de perméabilité. [7]

II.9.10.3. Traitement à l'Hexamétaphosphate

Après la phase de développement du forage, un traitement à l'Hexamétaphosphate a été réalisé afin d'éliminer la bentonite présente, ce traitement consiste à injecter une certaine quantité d'Hexamétaphosphate dans le forage, puis à le pomper à l'aide du système d'air lift.

L'Hexamétaphosphate est un polymère de type méta-phosphate, il est utilisé se forma de solution de 4% par mètre cube.

Les étapes de ce traitement sont les suivantes :

- La solution a été injectée à l'aide d'un tube dirigé vers la zone à traiter dans le forage.
- La solution a ensuite été laissée en contact pendant 48 heures, durant cette période elle a agitée toutes les 4 heures à faible débit en circuit fermé, à l'aide du système d'air lift afin de maximiser l'échange et l'efficacité du nettoyage. [20]

II.9.11. Essai de pompage

Les essais de pompage à débit constant réalisés sur des puits ou des forages, permettent de mesurer la baisse du niveau de l'eau (rabattement) dans les piézomètres en fonction du temps de pompe, ainsi que leur remontée une fois le pompage arrêté.

Ces essais sont interprétés en utilisant des méthodes graphiques basées sur les équations de l'hydrodynamique souterraine en régime transitoire. Ils visent à analyser les réactions du système formé par le puits ou forage et le milieu aquifère, soumis à un pompage à débit constant.

II.9.11.1. Le but des essais de pompage

La réalisation d'un essai de pompage peut répondre à plusieurs objectifs essentiels :

- ✓ Analyser la productivité durable d'un forage ou d'un puits et en estimer le débit exploitable sur le long terme.
- ✓ Caractériser les performances hydrauliques du forage, notamment en déterminant les paramètres comme le rendement et le rabattement.
- ✓ Evaluer les effets de l'extraction d'eau sur l'environnement, en particulier sur les ressources avoisinantes.
- ✓ Obtenir des données sur la qualité de l'eau captée pour le forage.

II.9.11.2. Test de l'ouvrage

Les essais réalisés sur les forages permettant d'identifier les caractéristiques techniques, sans pour garantir la capacité durable de la nappe. Ces essais consistent en une série de 3 à 5 pompages à débits croissants mais de durées fixes (entre 1 et 2 heures). Entre chaque essai, une phase de repos d'une durée équivalente est observée afin de permettre à la nappe de retrouver son niveau d'origine. L'objectif de ces tests est de déterminer le débit d'exploitation maximal admissible (appelé débit critique), sans induire de pertes de charge excessives pouvant endommager l'ouvrage, ce débit critique doit impérativement être respecté afin d'éviter toute détérioration de l'ouvrage.

II.9.11.3. Test de la nappe

Pour définir la durée de l'essai de la nappe on se base sur le (débit journalier maximal exploité au moins une fois par an), il est recommandé de réaliser ces essais en période de baisse naturelle du niveau de la nappe pour une meilleure interprétation des résultats.

Si le débit journalier est inférieure ou égale à $20 \text{ m}^3/\text{j}$ (soit environ 0.23 l/s), l'essai de la nappe doit se faire à débit constant pendant 12 heures.

Pour des débits journaliers compris entre $20 \text{ m}^3/\text{j}$ et $150 \text{ m}^3/\text{j}$ (soit environ 1.74 l/s), le pompage doit se faire à débit constant pendant une durée allant de 24 à 72 heures. [16]

II.9.11.4. Principaux types d'essai de pompage

Il existe nombreux types d'essais parmi lesquels il faut choisir les essais les mieux adaptés aux situations dans lesquelles travaillent les ingénieurs, sont les suivants :

II.9.11.4.1. Essai par paliers

Conçu pour déterminer le rapport à court terme entre le rendement et le rabattement du forage testé, il consiste à effectuer des pompages dans le forage avec une série de paliers à débit différent, le débit augmentant habituellement à chaque palier, le dernier palier devrait se rapprocher du rendement maximal estimé pour le forage.

- ✓ Commencer par un débit de pompage faible et l'augmenter à chaque palier sans débrancher la pompe entre les paliers.

- ✓ Prévoir quatre à cinq palier au total, les débits de pompage progressant par échelons plus ou moins régulier entre le minimum et le maximum.

Tous les paliers devraient avoir la même durée, la plus courante étant de 60 à 120 minutes.

Le débit du dernier palier devrait être égale ou supérieures au débit d'exploitation prévu lorsque le forage fonctionnera à pleine capacité, cela n'est possible bien sûr que si la pompe utilisé pour l'essai peut fournir au tel débit. **II.9.11.4.2. Essai à débit constant**

Effectue en pompant à un débit constant beaucoup plus longtemps que dans l'essai par paliers, il est conçu avant tout pour fournir des informations sur les caractéristiques hydrauliques de l'aquifère, il est possible de déduire des informations relatives au coefficient d'emmagasinement de l'aquifère que si les données proviennent de forages d'observation appropriés.

II.9.11.4.3. Essai de remontée

Consiste à observer la remontée des niveaux d'eau après l'arrêt du pompage à la fin d'un essai à débit constant (est parfois après un essai par palier), il est utile pour vérifier les

Caractéristiques de l'aquifère déduits des autres essais, mais n'est valide que si une valve anti routeur (clapet de pied) est placée sur la colonne de refoulement sinon l'eau est refoulée dans le forage.

II.9.11.5. Equipement d'observation de base

Lors de tout essai de pompage, il est essentiel de mesurer deux paramètres fondamentaux : le niveau d'eau dans le forage et le débit d'extraction, pour cela, un équipement de base est nécessaire afin de surveiller ces deux éléments

II.9.11.6. Observation du niveau d'eau

Le dispositif manuel le plus couramment utilisé pour mesurer le niveau d'eau est la sonde piézométrique. Cet outil simple, faible et facile à utiliser permet de contrôler efficacement le niveau d'eau dans les puits et les forages. lorsqu'on introduit la sonde dans le forage, elle déclenche un signal sonore (bip) dès qu'elle entre en contact avec l'eau, la profondeur à laquelle ce contact se produit est ensuite lue sur un ruban gradué, avec une précision généralement de l'ordre du centimètre.



Figure 28 : Sonde piézométriques

II.9.11.7. Observation des débits de pompage

Il existe diverses méthodes pour mesurer les débits de pompage, les plus couramment utilisées étant les suivantes :

II.9.11.7.1. Seau et chronomètre

La détermination du débit de pompage pour des flux faibles peut être réalisée par la méthode du seau et chronomètre. Cette technique implique l'utilisation d'un récipient de volume connu et d'un chronomètre pour mesurer le temps requis au remplissage. Le débit est ensuite calculé en divisant le volume par le temps requis au remplissage. Pour assurer une mesure précise, il n'est conseillé que le temps de

Chapitre II : Matériels utilisés et les travaux à suivre pour réaliser un Forage

remplissage soit supérieur à 100 secondes, Dans le cas de débits plus élevés l'utilisation d'un récipient de plus grande capacité, tel qu'un fut de 200 litres, est recommandée.

II.9.11.7.2. Débitmètres

Lorsqu'un équipement plus avancés est disponibles, les débits peuvent être mesurés à l'aide de débitmètres, disponibles en plusieurs modèles. Celui illustré à droite fait partie du kit standard utilisé pour les essais de pompage. Il fonctionne à l'aide de pistons à ressorts, déplacés par le flux d'eau, ce qui permet de lire directement le débit sur une échelle graduée. Il est essentiel de vérifier les mesures à l'aide d'une méthode alternative, de bien utiliser la jauge et d'assurer un bon entretien du matériel.

II.9.11.7.3. Compteurs d'eau

Certains débitmètres mesurent le volume total d'eau ayant circulé à travers le compteur. Il est donc nécessaire d'effectuer des relevés à des heures précises pour pouvoir calculer le débit, après avoir vérifié les unités utilisées par le compteur. Pour garantir une mesure fiable, les débitmètres doivent être installés conformément aux recommandations du fabricant, en respectant notamment la longueur du tronçon de tuyau doit être horizontal placé avant et après le compteur. [15]



Figure 29 : Kit débitmètre

II.10. Conclusion

En résumé, la réalisation d'un forage passe par une série d'étapes indispensables qui doivent être respectées avec rigueur et méthode. Depuis la préparation du site jusqu'à la finalisation du puits, chaque phase a un rôle essentiel dans le bon déroulement du projet qu'il s'agisse de déterminer la méthode de forage la plus adaptée, de choisir les équipements appropriés ou d'assurer la sécurité du chantier, toutes les décisions prises influencent directement la qualité et la durabilité du forage, de plus les opérations de nettoyage, de développement et de contrôle permettent de garantir que le forage répond aux normes techniques et aux besoins pour lesquels il a été conçu comme l'accès à l'eau, l'analyse du sol ou l'exploitation de ressources souterraines.

Ce chapitre a donc permis de mieux comprendre l'importance de chaque étape dans un projet de forage et souligne la nécessité d'une technique précise et du respect des bonnes pratiques professionnelles pour obtenir un résultat fiable et efficace.

Chapitre III

Suivi des cas de réalisation des forages

III.2.2. Localisation de la commune

La commune d'AIT TOUDERT est délimitée comme suite

- Au nord : par la commune de, BENI YANNI.
- A l'est : par la commune d'OUACIF.
- Au sud : par la commune d'Ait BOUMEHDI.
- À l'ouest : par la commune d'AGOUNI GEGHRAN.

III.3. Implantation du forage

La zone de forage est située sur la rive gauche de l'oued djemaa commune d'OUACIF qui alimentera la zone mixte d'Ait TOUDERT.



Figure 31: Localisation de forage de Ait Toudert

Les coordonnées de forage (GPS) :

- Latitude : 36°32'39.94N
- Longitude : 4°11'49.13E
- Altitude : 362m

III.4. Choix de la méthode de réalisation

D'après avoir étudié la nature du sol et les conditions d'eau souterraine dans la région d'AIT TOUDERT, le forage a été implanté sur une nappe alluvionnaire, elle n'est pas profonde (19m), qui nous a emmené à choisir cette méthode et de pouvoir forer avec un grand diamètre pour emmagasiner plus d'eau.



Figure 32 : Installation de la machine de battage (original)

III.5. Installation de chantier

Avant l'installation, Les foreurs ont commencé par délimiter la zone ou les travaux vont se faire avec des barrières de sécurité pour protéger le site, ensuite une plateforme solide en béton est préparée pour accueillir la machine de battage, elle doit être parfaitement stable pour fonctionner efficacement. Ils organisent également un accès pour les véhicules notamment les camions transportant la machine de battage et les matériaux utilisés pour l'opération. En fin une citerne d'eau est installée à fin de répondre aux besoins en eau du chantier (nettoyage, refroidissement ou injection si besoin).



Figure 33 : La plateforme de forage (original)

III.7. Equipement de forage

L'appareil de battage à câble est composé de plusieurs éléments essentiels, chacun jouant un rôle précis dans la réalisation de forage.

III.7.1. Le trépan

Le trépan est un outil de coupe ou de frappe, généralement il est en acier. Il est utilisé pour briser la roche ou les sédiments, Lors de battage, il est soulevé par le câble puis relâché en chute libre.



Figure 34 : Le trépan (original)

III.7.2. Le mât

Le mât est une structure métallique en forme de Lettre A avec une pointe marquée. Ce type de mât se distingue qui facilite son assemblage ou démontage en position horizontale. Une monté, il peut être redressé à la verticale à l'aide de treuil de forage et d'un câble de levage spécifique. Cette conception est idéale pour les équipements de forage terrestres qui requièrent une grande mobilité.



Figure35 : Le mât

III.7.3. Clapette

La clapette, et un outil utilisé dans le forage par battage pour remonter les déblais du fond du trou, elle est constituée d'un cylindre métallique muni d'un système de fermeture interne qui agit comme une valve, lorsqu'on l'abaisse dans le forage, la clapette s'ouvre sous le poids de l'outil et laisse entrer les déblais, en remontant, elle se referme automatiquement, emprisonnant les matériaux à l'intérieur.



Figure 36 : Clapette (original)

III.7.4. La table de rotation

La table de rotation est un élément mécanique utilisé dans certaines machines de forage par battage pour ajouter un mouvement de rotation aux tiges ou aux tubes de forage, elle est située à la base de la machine et fonctionne grâce à un moteur, qui fait tourner le plateau qui entraîne la tige de forage ce qui permet à l'outil situé au bout de la tige de tourner en même temps qu'il est enfoncé dans le sol par coups de battage.



Figure 37: Une table de rotation (original)

III.7.5. Le treuil

Le treuil est un dispositif mécanique servant à tirer ou lever des charges lourdes à l'aide d'un câble ou d'une chaîne enroulé autour d'un tombeur, il est essentiel pour manipuler les tiges de forage



Figure 38 : Le treuil (original)

III.8. La réalisation de forage

Le forage a été exécuté selon la méthode de battage par fonçage de tube guide en 1000mm de diamètre et tubé en 800mm de diamètre et atteint une profondeur totale de 23 mètres. Effectuée à sec et sans recours à un fluide de forage, assurant la stabilité initiale du forage.



Figure 39 : Installation du tube guide (original)

III.9. Prélèvement des échantillons

Le prélèvement des échantillons dans un forage est une étape essentielle pour connaître la nature du sol traversé, dans notre cas cette opération se fait chaque 1 mètre jusqu'à la profondeur totale de 23 mètres, est ensuite remonté à la surface.

L'analyse de ces cuttings a permis d'établir la coupe lithologique montrée dans le (tab 1)

Tableau 2 : Coupe lithologique établie à partir le prélèvement des échantillons

Profondeur	Lithologie
0 m – 2 m	Terre végétale
2 m – 20 m	Alluvions
20 m – 23 m	schistes



Figure 40 : Prélèvement des échantillons

III.10. Tubage du forage

III.10.1. La mise en place de tubage plein et crépine

Suite à l'interprétation des cuttings prélevés, un tubage complet du forage a été mis en place afin de garantir la stabilité des parois et d'assurer une bonne exploitation future. Le tubage installé est constitué d'éléments pleins et de crépines, de type TNRS (tubage normalisé à résistance standard), avec les caractéristiques suivantes :

- Epaisseur : 5 mm
- Diamètre : 800 mm
- Ouverture de la crépine : 2 mm

Ce dispositif a été conçu pour répondre aux contraintes géologiques identifiées, notamment la présence d'alluvions et de schistes, en assurant une protection mécanique adéquate et une filtration optimale de l'eau dans les zones productives.

Tableau 3 : Programme de tubage

Tubage	Diamètre (mm)	profondeurs
T.P	800	0m - 15.00m
T.C	800	15.00m - 20.00m
T.P	800	20.00m 23.00m



Figure 41: La mise en place de tubage

III.10.2. Massif filtrant

Dans notre cas la mise en place de massif filtrant consiste à introduire un gravier roulé et siliceux de dimension 3x8, propre et calibré autour de la crépine de 1 m jusqu'à 23m, dans l'espace annulaire entre le tubage et la paroi du forage, son volume est de 6.5 m³. Cette opération vise à créer un filtre naturel permettant de retenir les particules fines tout en assurant un bon passage de l'eau vers l'intérieur du puits, le gravier est versé de manière contrôlée, puis calé pour garantir sa stabilité et son efficacité.

Le volume de gravier

$$V_g = \left(\frac{\pi \times D^2}{4} \right) - \left(\frac{\pi \times d^2}{4} \right) \times p_f$$

V_g : Volume de gravier nécessaire

D : Diamètre de tube guide en mètre

d : Diamètre de tubage en mètre

P_f : La profondeur de forage

Dans notre cas :

$$V_g = \left[\frac{3.14 \times 12^2}{4} - \frac{3.14 \times 0.82^2}{4} \right] \times 23$$

$$V_g = 6.5 \text{ m}^3$$



Figure 42 : La mise en place de massif filtrant

III.10.3. Cimentation

La cimentation est réalisée après la mise en place de massif filtrant sur 1m autour de forage, et l'emplacement des tubes de rajout en diamètre de 80m. Un coulis de ciment préparé à base de ciment et d'eau est injecté. Cette opération est cruciale pour assurer l'étanchéité du forage et éviter les communications entre aquifère, et garantir la stabilité à long terme de l'installation.



Figure 43 : L'aménagement de la tête de forage

III.11. le développement

Le développement d'un forage est l'étape qui consiste à nettoyer et améliorer la zone filtrante et avoir une eau claire.

Dans notre cas ils ont utilisé le développement par barbotage, ils ont injecté de l'air comprimé par un tuyau plongé dans l'eau pour créer des boules d'air qui remontent à la surface et font circuler l'eau à l'intérieur du forage, cela crée un brassage qui libère les fines particules emprisonnées dans la crépine et le massif filtrant. Cette opération de développement jusqu'à

l'obtention de l'eau clair, a été réalisée a durées 47 heures.



Figure 44 : Développement du forage

III.12. Essai de pompage

III.12.1. Essai par palier

Quatre essais de pompage ont été réalisés, pendant quatre heure de pompage chacun. Afin de déterminer le débit de pompage de longue durée.

Tableau 4 : Essai par palier

Opération	Date et heure	NS	ND	Q (L/S)	Rabatement En (m)	Remontée	Q en (m ³ /H)
Essai a max débit 04h	14/04/2025 Du 10h.00mn à 14h.00mn	7.32	21.00	18	13.68	13.66m (après 1h)	64.80
Essai 04h	14 :04 :2025 du 15h.00mn à 00h.00mn	7.34	18.65	15	11.31	11.34m (après 1h)	54.00
Essai 04h	Le 14/04/2025 du 20h.00mn à 00h.00mn	7.34	12.49	10	5.15	5.15m (après2h)	36.00
Essai 04h	Le 15/04/2025du 02h : 00mn à 06 :00mn	7.32	9.04	7	1.72	1.72m (après 1h)	25.20

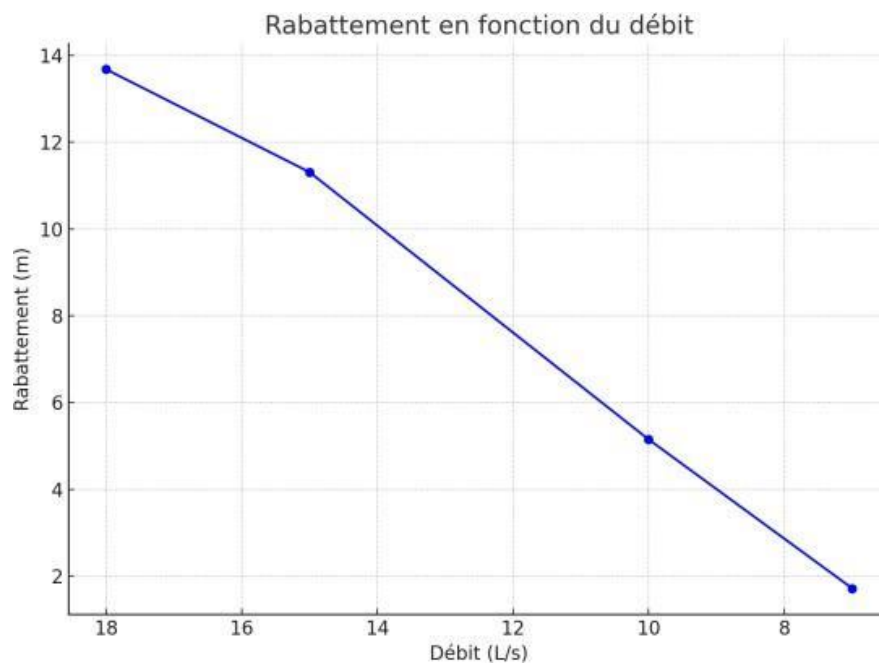


Figure 45 : La courbe caractéristique des essais par paliers

III.12.2. Essai à longue durée

Essai de pompage de longue durée a été réalisé avec une pompe calée à 22m de profondeur, le niveau statique était de 0m du sol, avec un débit de pompage de 13 l/s, après 72 heures de pompage le niveau a attient 13.66m de profondeur, la remontée a durée 04 heures.

Tableau 5 : Essai a longue durée

opération	Date et heure	NS	ND	Q(L/S)	Rabattement En (m)	Remonté après en (m)	Q en (m ³ /h)
Essai longue durée 72h	Le 15/04/2025 Du 16h : 00mn Au 18/04/2025 à 16h00mn	7.32	13.66	13	6.34	1.19m (après 04h)	46.80

III.12.3. Interprétation des résultats

D’après l’interprétation des résultats des essais de pompage, il en ressort les conclusions suivantes :

Niveau statique = 7.32m

Niveau dynamique = 13.66m

Rabattement = 6.34m

Calage de la pompe à 22m

Débit d’exploitation avec 13 l/s

III.13. L’aménagement du forage

L’aménagement de la tête de forage constitue la dernière étape de réalisation d’un forage. Il a pour objectif principal d’assurer la protection mécanique et sanitaire du forage, de faciliter l’exploitation (pompage), et de prévenir toute contamination de la nappe. Il comprend la mise en place d’une tête du tubage.

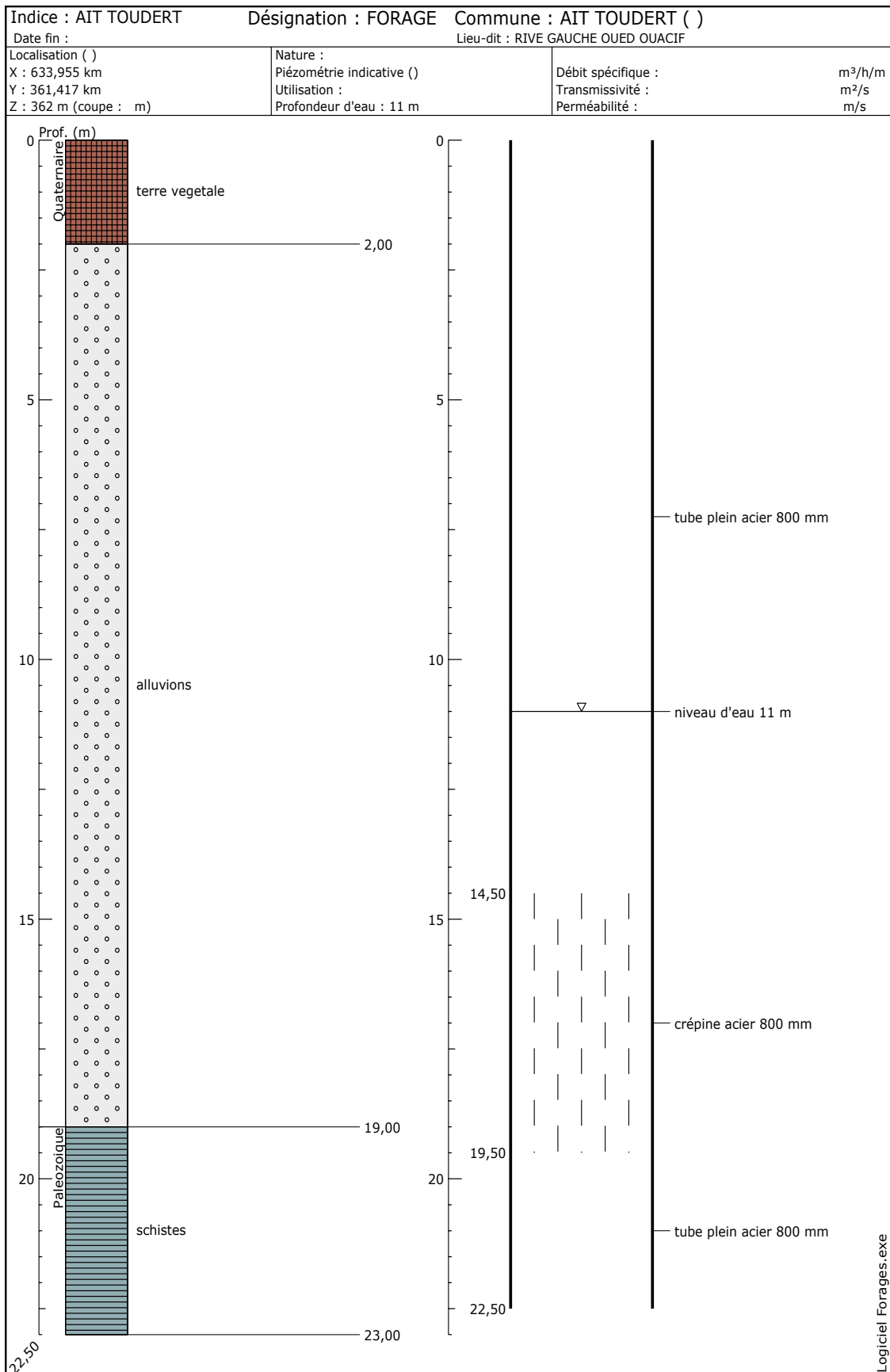


Figure 46 : La coupe lithologique de forage d'AIT TOUDERT (original)

CAS 2 : forage en mode rotary

Dans le cadre des efforts visant à améliorer l'alimentation en eau potable dans la région, la direction de l'hydraulique de la wilaya de TIZI-OUZOU a implanté un projet de forage sur le site ASSIF BOULMA, ce projet inscrit dans une logique de renforcer l'alimentation en eaux potables de commune d'Ait BOUADOU DE TIZI N TLATHA, a été confié à l'entreprise SARL STGRU, chargée de la réalisation des travaux. Le forage a débuté le 26 septembre 2024 et c'est achevé le 11 mars 2025.

Dans cette partie pratique nous avons suivi étape par étape la réalisation du forage, depuis le début des travaux jusqu'à leur achèvement, nous avons présenté les moyens humains et matériels utilisés ainsi que les contrôles effectués pour garantir la qualité du forage. Ce suivi permet de s'assurer que le projet a été bien réalisé, selon les normes et dans le respect des délais fixés.

III.14. Présentation de la zone d'étude**III.14.1. La situation géographique de TIZI N TLATHA**

TIZI N TLATHA est une commune située au sud-ouest de la wilaya de TIZI OUZOU, en Kabylie, dans le nord de l'Algérie. Elle est localisée dans une zone montagneuse du massif du Djurdjura. Elle fait partie de la daïra de OUADHIA et couvre une superficie de près de 27 km², avec une population atteignant environ 22404 habitant.



Figure 47 : Situation géographique de TIZI N TLATHA.

III.14.2. Les limitée administrativement

La commune de TIZI N TLATHA est délimitée par

- Au nord : BENI DOUALA.
- A l'est : OUADHIA.
- Au sud : AIT BOUADDOU.
- A l'ouest : METCHRAS ET SOUK EL THENINE.

III.14.3. Les coordonnées de la commune (GPS)

Latitude : 36.5457°N

Longitude : 4.0571°E

Altitude : 488 m

III.15. L'implantation de forage F2 ASSIF BOULMA

Pour implanter un forage dans les meilleures conditions, il est essentiel de considérer plusieurs éléments tels que les aspects techniques, environnementaux, sociaux, financiers et institutionnels. Le choix de l'emplacement doit se baser sur les caractéristiques de l'eau souterraine disponible dans la région afin de garantir un forage adapté aux réalités locales.

Le forage concerné par cette étude se situe à la commune de TIZI N TLATHA au niveau du lieu-dit ASSIF BOULMA.



Figure 48 : Localisation de forage ASSIF BOULMA

❖ Les coordonnées de forage (GPS)

Latitude : 36° 32' 23.63'' N.

Longitude : 4° 1' 45.93'' S.

Altitude : 403 m.

III.16. Le choix de la méthode de réalisation de forage

Le choix de la méthode de réalisation de forage dépend de plusieurs facteurs essentiels, il faut tenir compte de la nature du sol, de sa teneur en eau, de la profondeur à atteindre, du type

d'équipement utilisé, ainsi que la quantité d'eau recherchée et de la localisation du forage, tout ces éléments permettent de déterminer la technique la plus efficace et la mieux adaptée au contexte géologique et hydrologique du site.

Dans ce cas présent la méthode choisi mode « rotary », cette méthode est très répandue aux terrains à structure sédimentaire.

III.17. L'installation du chantier

Lorsqu'on installe un chantier de forage il est crucial de bien préparer l'emplacement du tubage, celui-ci doit être soigneusement étanché, cimenté et fixé dans un support en béton appelé margelle. Cette margelle repose sur une dalle spéciale, fabriquée en béton.

✓ Dimension de cette dalle :

Elle doit couvrir au minimum 3m² pour offrir une base stable et sécurisée et être surélevée d'au moins 30 cm par rapport au terrain naturel, cela permet d'éloigner les eaux de ruissellement et de prévenir la contamination du forage.



Figure 49 : La plateforme de forage (original) **Figure 50:** la machine de rotary

III.18. Les bassins à boue

Les bassins a boue jouent un rôle essentiel dans les opérations de forage ils servent de réservoirs pour le fluide de forage. Dans notre cas on a deux bassins, le premier reçoit directement la boue en provenance du forage, il a pour fonction principale de permettre la décantation des solides contenus dans la boue, et le deuxième bassin contient la boue clarifiée, celle-ci est ensuite pompée à nouveau dans le puits de forage à l'aide d'une pompe pour être réutilisée, assurant ainsi un cycle continu et optimisé du fluide de forage.



Figure 51 : Les bassines à boue (Originale)

Les dimensions des bassines à boue

- ✚ Longueur : 2 m.
- ✚ Largeur : 1.5 m.
- ✚ Profondeur : 1.5m.

III.19. Les étapes de construction de forage

Etape 1 : Mise en place de tube guide

Le tube guide c la première étape de la construction du forage, consiste à forer un avant trou de 26 pouces de diamètre (environ 660mm) sur une profondeur de 0 à 5 mètres, afin de permettre l'installation de tube guide de 5 m de longueur et de 22 pouces de diamètre. Cette étape a pour but de stabiliser la tête du forage et de faciliter le démarrage du forage et des opérations de fonçage.

Etape 2 : Forage de reconnaissance

Le forage principal a été effectué de 5 à 10m de profondeur, avec un diamètre de 12 pouces (environ 318mm). Cette phase a permis de traverser le majeure petite de la formations géologique, en assurant une bonne circulation de la boue pour évacuer les cuttings et stabiliser les parois du trou.

❖ L'injection de fluide dans le forage

L'injection de fluide de forage est une étape essentielle dans tout processus de forage, le fluide utilisé généralement appelé boue de forage est un mélange d'eau et d'argile, dans notre cas l'argile c'est la bentonite, ce mélange est préparé jusqu'à atteindre une densité appropriée généralement de l'ordre de 1.20 g/cm^3 , afin d'assurer le refroidissement des outils de forage, la stabilité des parois du trou et le contrôle des pressions. Le fluide est injecté en circuit fermé grâce à une pompe à boue, cette circulation continue garantit un forage sécurisé, propre et efficace.



Figure 52 : La pompe a boue et la bentonite (original)

❖ Prélèvement des échantillons

Au fur à mesure de l'avancement du forage, des échantillons de sol ont été prélevés à l'intervalle régulier chaque 1 mètre, ces échantillons permettent d'identifier la nature des couches traversées (sable, gravier, argile, etc.) et d'évaluer leurs caractéristiques géologiques et hydrogéologiques. Chaque échantillon a été soigneusement collecté, étiqueté avec la profondeur correspondante puis stocké dans des sachets, ce travail permet de construire la coupe lithologie du terrain suivante

Tableau 6 : coupe lithologie du terrain

Profondeur	Lithologie
0m - 2m	Terre végétale.
2m - 50m	Alluvions.
50m - 60m	Argiles.

Etape 3: la diagraphie

Dans notre cas, les mesures diagraphiques ont été réalisées par la société ELOG N GAMMA le 27 janvier 2025, entre 5m et 28 m de profondeur. Ces mesures ont porté sur les paramètres suivants :

- La polarisation spontanée en Mili volte (MV).
- Les résistivités, la petite normale (R16) et la grande normale (R64) en home mètre (Ohm. M)
- Le gamma ray en CPS.

Etape 4 : Alésage

Après l'analyse des résultats de la diagraphie et les cuttings, un alésage a été réalisé pour élargir le diamètre du trou sur une section allant de 5m à 60m de profondeur et deux diamètres sont utilisé 17 pouces (environ 438mm) et 19 pouces (environ 483mm).

Tableau 7 : Récapitulatif des phases de forage

opération	Diamètre	Profondeur	La méthode	Fluide de forage
Avant-trou (tube guide)	26'' (660mm)	0 à 5 m	Rotary	Bentonite
Forage principale	12'' (318mm)	5 à 105 m	Rotary	Bentonite
Alésage	17'' (438mm)	5 à 60 m	Rotary	Bentonite
Alésage	19'' (483mm)	5 à 60 m	Rotary	Bentonite

III.20. Tubage du forage**III.20.1. mise en place de tubage plein et crépine**

A la suite de l'analyse des cuttings (échantillons extrait lors du forage) et de l'interprétation des diagraphies géophysiques, un programme de tubage (tab7) a été établi afin d'assurer à la fois la stabilité mécanique du forage et la bonne captation de l'aquifère identifié. Dans notre cas nous avons opté pour un tubage en PVC PN20, reconnu pour sa résistance à la corrosion et à la pression, avec les caractéristiques suivantes :

Diamètre extérieur : 315 mm.

Epaisseur de paroi : 23.7 mm.

Type de tubage : plein et crépine.

Fente des crépines : 1mm (adaptée pour filtrer les particules fines et limiter L'encrassement).

Le tubage mise en œuvre dans notre cas permet une prise d'eau maîtrisée et de qualité, tout en assurant la durabilité et la protection de l'ouvrage



Figure 53: Tube en PVC (original)

Tableau 8 : Programme de tubage mise en œuvre

Type de tubage	Diamètre (mm)	Profondeur
Tube plein	315 mm	De 0 à 32.70 m
Tube crépine	315 mm	De 32.70 à 48.50 m
Tube plein	315 mm	De 48.30 à 60 m



Figure 54 : La mise en place de tubage (original)

III.20.2. Massif filtrant

Lorsque l'on réalise un forage, il est important de placer un massif filtrant autour du tuyau principal. Dans notre cas ce massif est fait de petits graviers de type roulé siliceux lavés et calibrés sa granulométrie (3x 8 mm de diamètre), et son volume total est de 17m³ qu'on verse doucement dans l'espace vide entre le tuyau et les parois du trou. Cette opération doit être réalisée avec attention à ne pas aller trop vite, sinon des amas de gravier peuvent se former et bloquer l'écoulement, l'objectif est de filtrer les particules fines avant qu'elles n'atteignent les crépines et d'améliorer le débit d'entrée de l'eau dans le forage.



Figure 55 : La mise en place de massif filtrant (original)

III.20.3. La cimentation

La cimentation a été réalisé sur les quatre premières mètres du forage (0 à 4 m), entre la paroi du trou et le tubage, le ciment utilisé est injecté dans l'espace annulaire pour former une gaine solide et étanche autour du tubage, le volume de ciment utilisé est estimé à 1 m³ ce qui est conforme aux dimensions du forage et aux recommandations techniques pour ce type d'ouvrage. Cette opération permet d'assurer l'étanchéité en surface en bloquant toute infiltration d'eau de ruissellement ou de polluants provenant de la zone superficielle, ce qui protège efficacement la qualité de l'eau souterraine et elle contribue également à la stabilisation mécanique de la tête du tubage en consolidant les premières mètre du forage qui son souvent exposé à des contraintes physiques ou à des risques de déchaussement.



Figure 56: la cimentation (original)

III.21. Le développement

L'objectif de développement est de nettoyer le forage pour obtenir une eau claire ce qui signifie que le puits est bien dégagé et prêt à l'utilisation. Dans notre cas ce travail a été effectué avec la méthode de l'air- lift, qui utilise de l'air comprimé pour remonter l'eau et les particules vers la surface, l'opération a duré 34 heures.

Elle a débuté par une phase de pompage et de barbotage, consistant à injecter de l'air pour faire remonter l'eau et les particules fines, jusqu'à clarification de l'eau. Ensuite, 100 kg d'Hexamétoposphate ont été injectés dans le forage pour faciliter le décollement des impuretés, suivis d'un temps de repos de 24 heures pour permettre au produit d'agir efficacement.

Le nettoyage a été poursuivi en ciblant tous les niveaux équipés de crépines, avec des barbotages localisés de quelques minutes, en fin un pompage continu a été réalisé en plaçant le tuyau d'eau à 56m et celui de l'air à 53m de profondeur, jusqu'à obtention d'une eau totalement claire.



Figure 57: Le développement de forage (original)

III.22. Les essais de pompage

L'objectif de cette mission est de déterminer le débit optimal pour l'exploitation du forage après sa phase de développement. Les essais ont été réalisés du 06/03/2025 ou 11/03/2025, le Protocole a été défini par le maître d'ouvrage et comprend quatre paliers d'essai de 4 heures, suivi d'un essai de 72 heures et continu.

Les responsables du projet nous ont communiqué que le forage est généralement exploité à un débit de 15 l/s, ce qui a orienté notre choix des débits à tester ainsi que le dimensionnement de la pompe utilisée.

III.22.1. Choix du protocole des essais

Le maître de l'ouvrage a validé un protocole structuré comme suit :

- Essai de 4 heures à débit constant de 20 l/s.
- Essai de 4 heures à débit constant de 15 l/s.
- Essai de 4 heures à débit constant de 10 l/s.
- Essai de 4 heures à débit constant de 5 l/s.
- Essai de longue durée de 72 heures à débit stabilisé.

III.22.2. Equipements utilisés

○ Pompe de pompage : GEPI CAPRARI type E6P55/9A, débit $Q = 20$ l/s, hauteur manométrique $H = 60$ m.

- Sonde piézométrique : utilisée pour mesurer les niveaux d'eau dans le forage.
- Compteur hydraulique avec chronomètre : permet de mesurer précisément les débits.
- Vanne : sert à réguler les débits selon les besoins de chaque essai.

III.22.3. Déroulement des essais

Comme motionné précédemment, les essais se sont déroulés en deux étapes principales :

- ✓ Des essais courts de 4 heures (avec phases de pompage et de mesure de remonté).
- ✓ Et un prolongé de 72 heures en continu.

III.22.3.1. Préparation du forage

1. Choix du point de référence : pour nos mesures nous avons retenu l'extrémité du tubage du forage comme point zéro.
2. Détermination de la profondeur du forage : dans notre cas, elle est de 60 m.
3. Immersion de la pompe : la pompe a été immergée à une profondeur de 48 m, comme recommandé par le maître d'ouvrage. Le niveau de crépine étant à 48 m, le rabattement ne devait pas dépasser 47m.
4. Installation des tuyaux d'évacuation : les eaux refoulées sont évacuées vers la canalisation de la route, les tuyaux ont été posés sur environ 20m à partir du forage.
5. Définition du débit maximal : le GEPI (groupe électropompe immergée) a été d'abord mis en service à faible débit, puis le débit a été progressivement augmenté jusqu'à atteindre le débit maximum possible de la pompe ou du forage, après 3 heures d'essais (avec des débits de 5l/s, 8l/s, 10l/s, 2l/s, et jusqu'à 20l/s), tout en contrôlant le rabattement et la remonté de la nappe. Nous avons constaté que le débit maximal du forage est de 7l/s, au-delà de cette limite la pompe présente des problèmes de fonctionnement à cause d'un rabattement atteint 47m, nous avons donc fixé ce débit comme seuil critique ($25,2 \text{ m}^3/\text{h}$) et prévu des essais à débits constants (avec une marge de 10%) pour observer le comportement de la nappe.
6. Des fiches de relevé ont été préparées pour suivre les variations du niveau d'eau pendant ces essais.

III.22.4. Récapitulatif de résultat des essais

Tableau 9 : Essai de pompage par palier

	Date et heure	NS	ND	Q (L/S)	Rabattement en (m)	Remonté en (m)	Q en (M3/H)	Q en (M3/jour)
1^{er} palier	Le 06/03/2025 De 13h : 30mn à 17h:30mn	<u>0</u>	<u>47,00</u>	<u>7</u>	<u>47,00</u>	<u>46,28</u> (après 03h)	<u>25,20</u>	604,8
2^{eme} palier	Le 06/03/2025 De 20h : 30mn à 23h:30mn	Opération	<u>47,00</u>	<u>6,5</u>	<u>47,00</u>	<u>41,40</u> (après 01h30h)	<u>23,40</u>	561,6
3^{eme} palier	Le 07/03/2025 De 16h : 00mn à 20h:00mn	<u>5,6</u>	<u>34,00</u>	<u>5</u>	<u>28,40</u>	<u>30,80</u> (après 01h30)	<u>18,00</u>	432
4^{eme} palier	Le 07/03/2025 du 23h :30mn à 03h:20mn	<u>7,7</u>	<u>45,4</u>	<u>6</u>	<u>37,70</u>	<u>41,39</u> (après 02h)	<u>21,60</u>	518,4

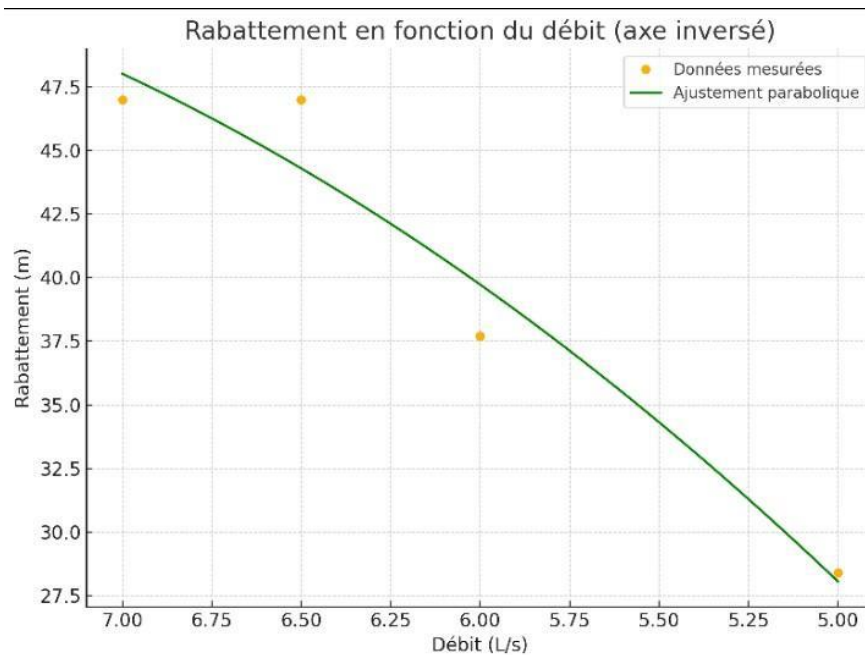


Figure 58 : courbe caractéristique de rabattement en fonction du débit

Tableau 10 : Essais de pompage de longue durée

	Date et heure	NS	ND	Q (L/S)	Rabattement en (M)	Remonté en (m)	Qen (M3/H)	Q en (M3/jour)
Essai longue durée 72h	Le 8/03/2025 du 13h : 00mn au 11/03/2025 à 13h:00mn	0	30	5	30	30(après 03h)	18,00	432

III.22. 5 Analyse et interprétation des résultats

D’après l’interprétation des résultats obtenus lors des essais de pompage, les paramètres suivants ont été relevés :

- ✓ Niveau statique : 0m.
- ✓ Niveau dynamique : 30m.
- ✓ Rabattement : 30m.
- ✓ Calage de la pompe recommandé : 49m.
- ✓ Débit d’exploitation retenu : 5 l/s (18m³ /h).

III.22.6. Aménagement de la tête de forage

La dernière étape des travaux de forage est l’aménagement de la tête de forage, cette étape est essentielle pour le protéger et garantir son bon fonctionnement.

Elle consiste à construire une dalle en béton autour du tubage afin d’empêcher l’infiltration d’eau sale provenant de la surface.

Ensuite, on installe une tête de forage métallique, fermée à clé pour éviter toute intrusion ou pollution, cette tête peut aussi être équipée d’un petit tuyau pour prélever de l’eau ou mesurer le niveau. Si une pompe est installée, un regard en béton est également construit pour protéger les équipements, cette dernière étape assure la sécurité, la propreté et la durabilité du forage.



Figure 59 : L’aménagement du forage

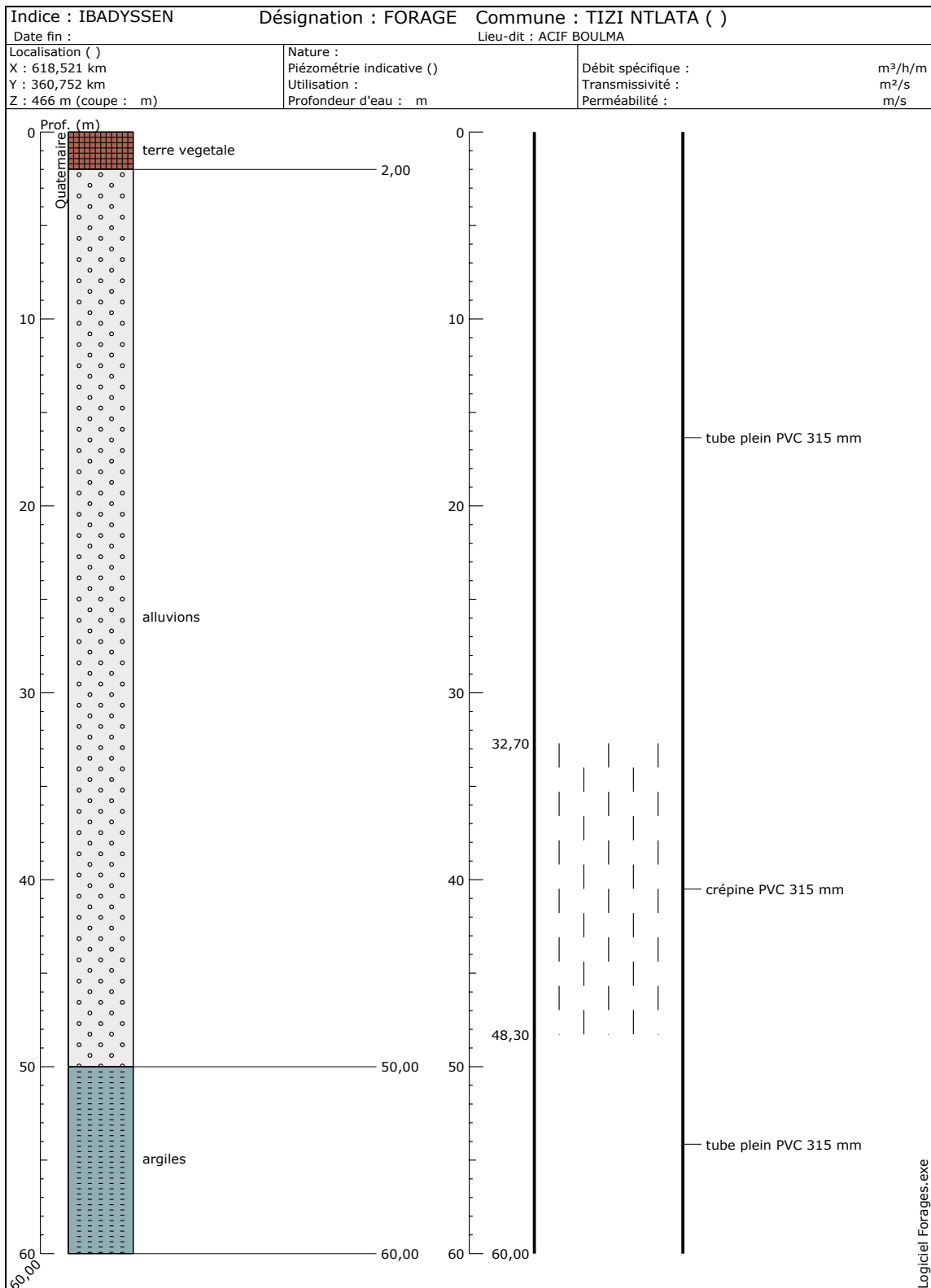


Figure 60: La coupe lithologique de forage ASSIF BOULMA

III.23. Conclusion

Ce chapitre a présenté deux cas réalisations de forage, mettant en évidence l*es étapes de réalisation spécif

iques à chaque méthode, le forage en mode battage à AIT TOUDERT et le forage en mode rotary ASSIF BOULMA.

Chaque chantier a suivi un déroulement structuré, depuis la mobilisation du matériel jusqu'à la fin des travaux, avec des procédures adaptées au terrain et aux exigences techniques. Le mode battage s'est caractérisé par une mise en œuvre manuelle et linéaire, tandis que le mode rotary a nécessité une logistique plus complexe, impliquant l'utilisation de boue de forage et un contrôle continu des paramètres de fonctionnement.

En conclusion, une comparaison entre les deux techniques met en évidence que le forage par battage est plus simple, économique et efficace pour les terrains meubles, tandis que le forage rotary, plus techniques, est mieux adapté aux formations géologiques dures et aux forages profond.

Ces cas pratiques soulignent l'importance d'un suivi rigoureux à chaque étape, ainsi que d'une bonne interprétation des essais de pompage pour garantir la réussite des travaux.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Le besoin en eau pousse l'humanité à rechercher des techniques efficaces pour exploiter ces ressources vitales. Parmi ces techniques, l'exploitation des eaux souterraines se révèle souvent avantageuse, car ces eaux sont généralement de bonne qualité, ce qui les dispense d'un traitement approfondi. Pour localiser ces ressources en eau souterraine et choisir la méthode d'exploitation la mieux adaptée aux caractéristiques de recourir à des études géophysiques et géologiques. Plusieurs méthodes permettent de réaliser un forage d'eau, chacune présentant ses avantages et ses limites. Ces méthodes suivent un certain nombre d'étapes techniques spécifiques.

Ce mémoire a permis d'explorer en profondeur les aspects liés à la mobilisation des eaux souterraines, ressources essentielle pour répondre aux besoins croissants en eau potable. A travers le premier chapitre, nous avons posé les bases théoriques nécessaires à la compréhension du fonctionnement des nappes souterraines et des techniques de forage.

Le deuxième chapitre s'est focalisée sur les étapes à suivre pour réaliser un forage d'eau, depuis les études préalables jusqu'aux opérations de développement, en passant par les choix techniques et les outils adaptés à chaque situation de terrain.

Enfin, la partie pratique a illustré deux cas concrets de réalisation de forage dans la région. Le premier, réalisé par la méthode rotary à THIZI N TLATHA, a mis en évidence l'efficacité de cette technique pour les terrains complexes et profonds. Le second, effectué par battage à AIT TOUDERT, a démontré la pertinence cette méthode dans des contextes géologiques plus simples et peu profonds. Ces deux expériences ont permis d'apprécier les avantages et les limites de chaque technique, ainsi que les défis rencontrés sur le terrain.

En conclusion, ce travail montre que la réussite d'un forage repose sur une bonne compréhension du contexte géologique, un choix judicieux de la méthode d'exécution, ainsi qu'un suivi rigoureux des travaux. Les eaux extraites dans les deux cas étudiés se sont révélées exploitables, confirmant le potentiel des ressources souterraines locales pour renforcer l'approvisionnement en eau potable.

Référence bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Vincent –W, Jaclyna –B, AL, Exploitations des eaux souterraines, juillet 2009
- [2] G. CASTANY principes et méthodes e l’hydrologie DUNOD ED.PARIS
- [3] ALBERT MABILLON, Le forage d’eau (guide pratique), 1995, (page 14-15).
- [4] MICHEL DETAY, Le forage d’eau (réalisation, entretien, réhabilitation) 1993, (page 71-76)
- [5] RICHARD LAGABRIELLE, Diagraphies et géophysiques de forage, 1996.
- [6] ALBERT MABILLON, le forage d’eau, 1986.
- [7] CHEHIMA Sofiane & DEDDOUCHE Houria (ETUDE ET SUIVI TECHNIQUE D’UN FORAGE PROFOND ALBIEN DANS LA REGION DE SEBSEB/CAS DU FORAGE DE LEHRITH), Année universitaire : 2020/2021
- [8] MICHEL DETAY, le forage d’eau (réalisation entretien, réhabilitation), MASSON PARIS BARCELONE BONN, 1993
- [9] <http://staff.univ-batna2.dz-athamena-ali> (chapitre III : fluides de forage).
- [10] ALBERT MABILLOT, Forage d’eau (guide pratique), 1986
- [11] KHODJA Mohamed, Les fluides de forage: étude des performances et considérations environnementales Master géosciences environnement et risque, Ingénieur en Génie des procédés chimiques à l’Université des sciences et de Technologie Houari Boumediene d’Alger – Algérie université louis pasteur Strasbourg - France 15 février 2008.
- [12] RICHARD LAGABRIELLE, Diagraphies et géophysique de forage, 1996
- [13] BETAHAR Mohammed ali et LAKHCHAKHECHE Abbas, étude de réalisation d’un forage hydraulique a usage agricole dans la région de Touggourt, Année 2016/2017
- [14] Dr MEHDI METAICHE, Maître de Conférences-Université de Brouira forage techniques et procède octobre 2013.
- [15] Dr. BOUSELSAL BOUALEM Maître de Conférences forage d’eau Procédés et mesures.
- [16] BOUTOBBA Abderaouf, réalisation d’un forage d’eau université AKLI MOHAND OULHADJ-BOUIRA institue de technologie années 2019-2020.
- [17] BESSAILET Abdelhak et DOUDI Mahieddine, suivi hydrogéologique des travaux de réalisation d’un forage d’eau pour L’AEP de la ville de L’ARBAA, années 2018-2019.
- [18] MICHEL DETAY, Le forage d’eau page 101.

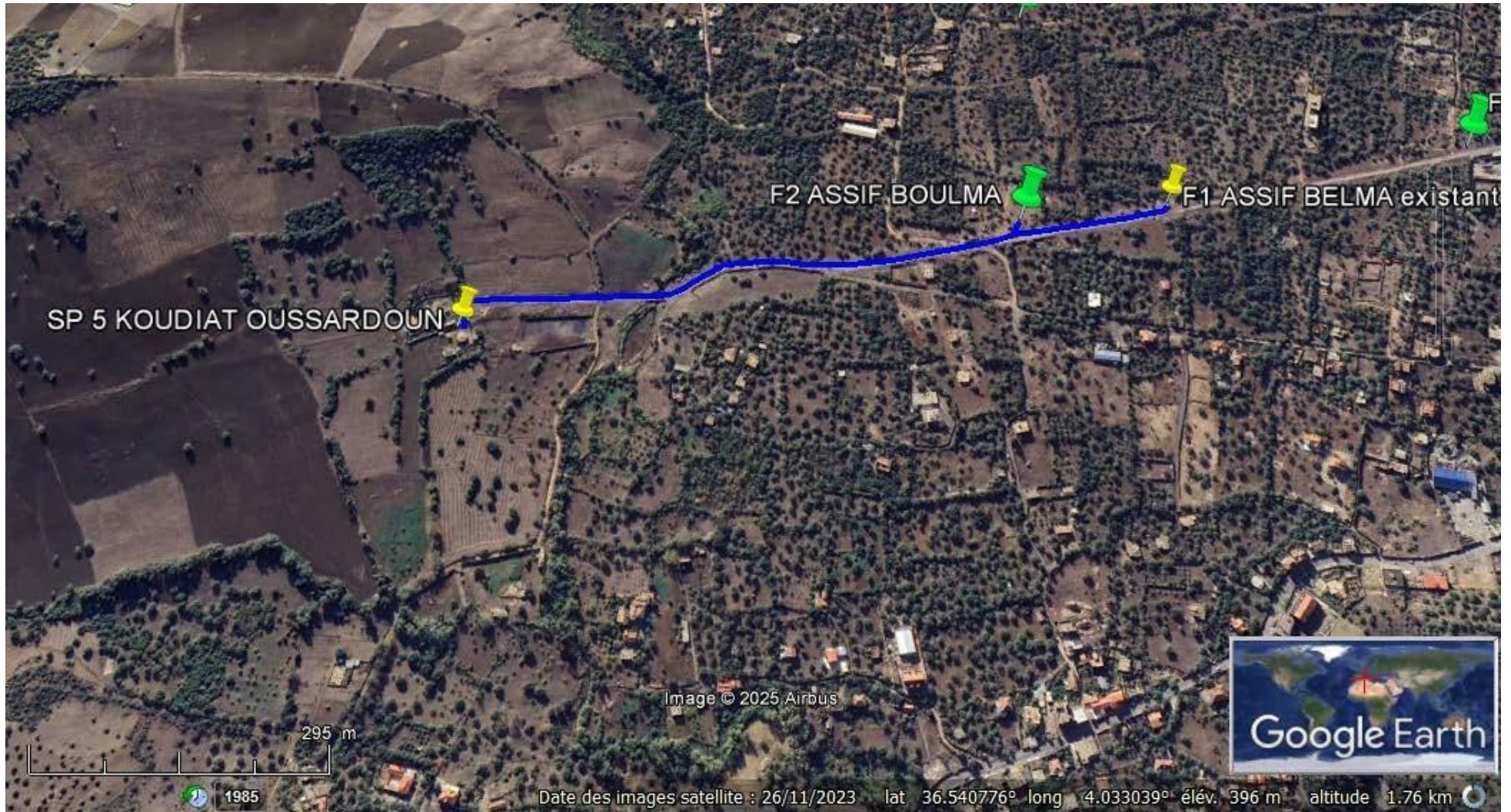
[19] CHEHIMA Sofiane et DEDDOUCHE Houria, ETUDE ET SUIVI TECHNIQUE D'UN FORAGE PROFOND ALBIEN DANS LA REGION DE SEBSEB/CAS DU FORAGE DE LEHRITH, Année universitaire : 2020/2021

[20] KREMIS Mohammed Elamin, Réalisation d'un forage hydraulique dans la commune de Djendel wilaya d'Ain Defla, Année Universitaire : 2021/2022

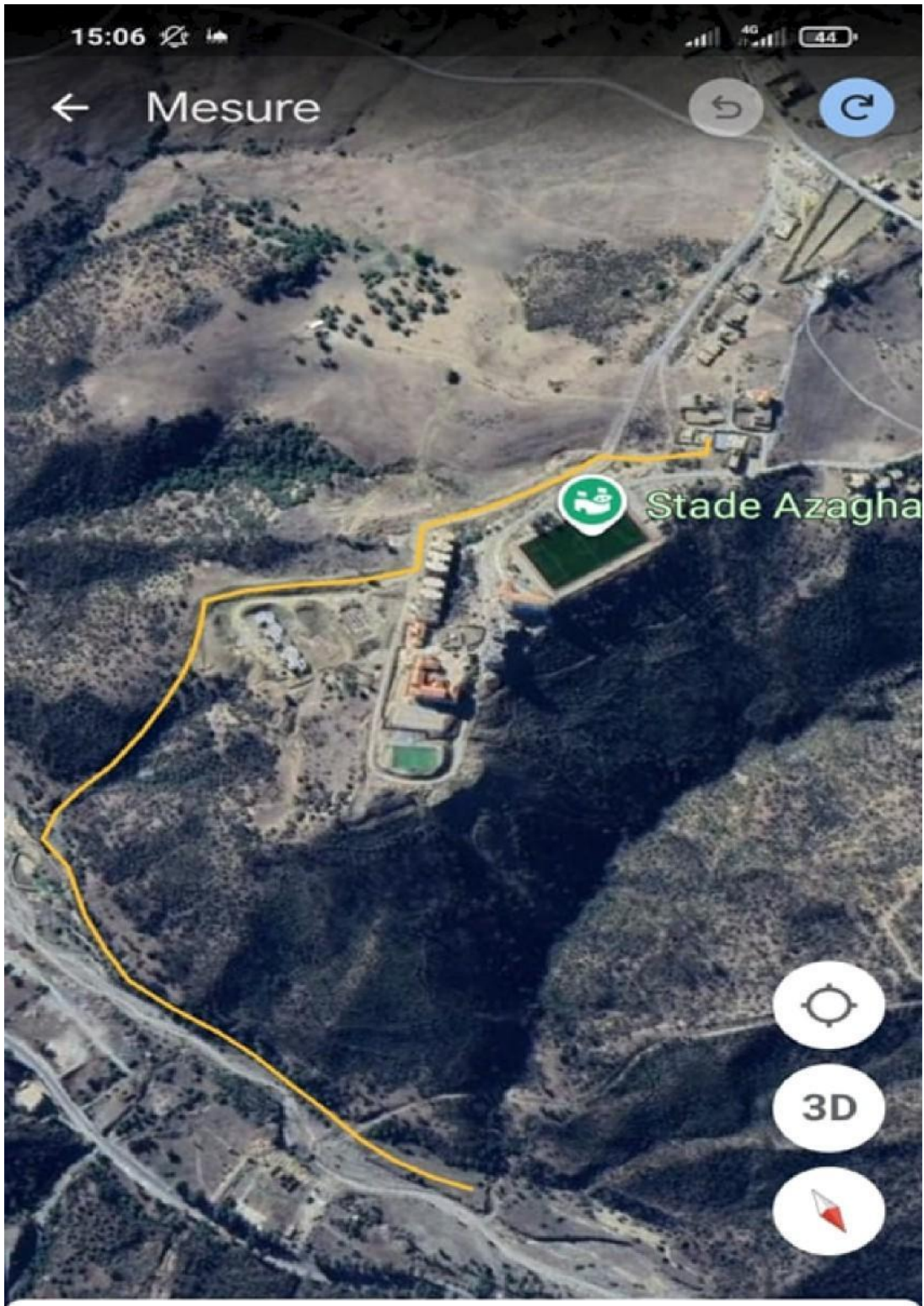
[21] SEDDIKI Brahim ANICHEL Imad Eddine Étude de conception d'un forage d'Albien (Cas de la nouvelle ville Ain Beida Ouargla), Promotion : 2019-2002

[22] MICHEL DETAY, Le forage d'eau (réalisation, entretien, réhabilitation), 1993, page 106

Annexes



ANNEX 01



Distance ?

1,47 km - □