

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR & DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITE DE TIARET

FACULTE DES SCIENCES AGRO-VETERINAIRE

DEPARTEMENT AGRONOMIE

**Exploitation optimale des aquifères
composées de matériaux meubles
(sable).**

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de :

Magister.

En : Ecologie-Environnement

Par

Ahmed KHALDI

Date de soutenance : 25 mars 2002.

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE DE TIARET
FACULTE DES SCIENCES AGRO-VETERINAIRE
DEPARTEMENT D'AGRONOMIE**

**Exploitation optimale des
aquifères composées de matériaux
meubles (sable).**

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de :

Magister.

En : Ecologie-Environnement

Par

KHALDI AHMED

Sous la direction de Mr :

Abdelkader DELLAL : Maître de conférence, université de Tiaret

Devant le jury composé de :

Messaoud CHAIB : Maître de conférence, université de Tiaret **Président**

Abdelkader DILEM : Maître de conférence, université de Tiaret **Examineur**

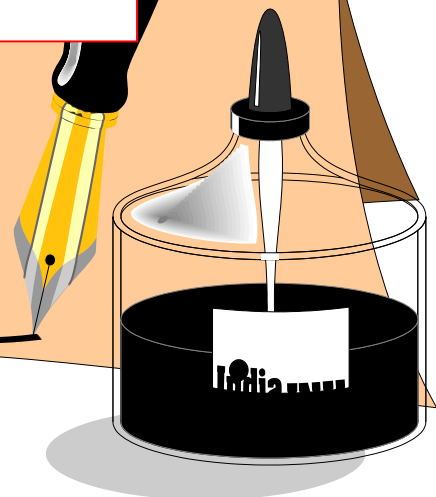
Aissa SAFA : Chargé de cours, université de Oran **Examineur**

Khaled BOUCHENTOUF: Chargé de cours, université de Tiaret **Examineur**

Dédicaces

*A mon épouse et à mes
enfants ;
à toute ma famille ;
à mes amis ;
à tout le personnel de
l'université ;
aux étudiants ;*

Je dédie ce mémoire.



AVANT PROPOS

C'est après avoir étudié le module « conservation et aménagement des sols » qu'en commun accord, avec Docteur A. DELLAL, directeur de thèse, nous avons eu l'idée de traiter la question « conséquences des venues de sable (lors de l'exploitation des nappes) sur l'environnement.

Ce travail a été réalisé au département agronomie de la faculté agro-vétérinaire sous la direction de Monsieur A. DELLAL, Maître de conférence et Directeur du laboratoire écologie-environnement.

Qu'il me soit permis, ici, de lui exprimer, ma profonde et sincère reconnaissance pour l'aide précieuse, les conseils éclairés et les encouragements qu'il m'a sans cesse prodigués tout au long de ce travail.

Je suis heureux de témoigner à Monsieur A.DILEM, Maître de conférence au département agronomie, l'expression de ma profonde gratitude pour sa contribution dans la partie statistique ainsi que pour l'attention particulière qu'il a accordé à ce travail.

Je tiens à remercier très vivement Monsieur M. CHAIB, Directeur du laboratoire chimie à la faculté des sciences de l'ingénieur, qui me fait l'honneur d'accepter la présidence du jury de cette thèse.

Je voudrais associer dans une même reconnaissance Messieurs KHALDI, LATIGUI, HADJ SAID, CHAIB, CHOUKRI, enseignants au département agronomie qui m'ont beaucoup apporté durant l'année théorique.

Ma gratitude s'adresse également à Messieurs, A.SAFA, Chargé de cours à l'Université d'Oran, K. BOUCHENTOUF, enseignant à l'Université de Tiaret pour avoir bien voulu examiner cette thèse et qui m'ont fait l'honneur de participer au jury.

Que tous mes collègues et tout le personnel du département hydraulique de Ksar-Chellala qui m'ont aidé et encouragé trouvent ici le témoignage de ma sympathie.

Toute ma reconnaissance va à Messieurs N. HADJ ZOUBIR, Recteur de l'Université de Tiaret ainsi que HADJ ZIANE, Vice Recteur de la Recherche Scientifique qui m'ont rendu de nombreux services. Je ne pourrai oublier leur soutien moral et leur souvenir en moi restera vivace.

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont facilité le long travail nécessité par cette étude à savoir :

- Monsieur S.BADRANE ;
- le personnel de l'ONM de Ksar-Chellala ;
- Le service forage de la DHW de Tiaret ;
- Monsieur A. AMARA, chef de département hydraulique ;

pour avoir mis à ma disposition une documentation sur la climatologie, la géologie et l'hydrogéologie de la zone d'étude.

- Monsieur D. DJAIT pour m'avoir aidé lors de l'élaboration du présent manuscrit.

RESUME

Le présent travail touche aux problèmes de la durée de vie d'un forage en exploitation lorsque l'aquifère est composée de matériaux meubles (sable). Dans ces cas là , une nappe mal équipée (mauvais choix des ouvertures des crépines et du gravier additionnel) ne peut jamais produire longtemps sans problèmes techniques à cause des venues de sable.

L'exploitation des résultats de laboratoire du paramètre granulométrie nous a permis de choisir le meilleur filtre de la couche aquifère composée de matériaux meubles (sable).

Ceci pour éviter les venues de sable dont la présence en surface est très néfaste à l'agriculture locale et avoisinante (érosion éolienne et / ou érosion hydrique). Il ne faut pas aussi oublier que la présence permanente de sable dans l'eau peut causer d'autres dégâts :

- détérioration de l'équipement de pompage ;
- affaissement de terrains à cause de la pression géostatique ;
- développements (à l'aide du compresseur) fréquents de l'ouvrage à cause de la diminution de débit (présence de sable au fond du trou).

Mots clés : eau ; aquifère ; sable ; granulométrie ; filtration ; crépine ; gravier ; forage.

ملخص

إن هذا العمل يعالج مشاكل مدى حياة بئر أثناء الإستغلال عند ما تكون الطبقة المائية متكونة من مواد هشة (رمل ، صخر رملي).

في هذه الحالة ، السطح المائي ذات تجهيز غير ملائم (لفتحات المصفاة و كذلك الحصى العازل) لا يمكن له أن ينتج طويلا بدون مشاكل تقنية ، و هذا لتسرب الرمل المكون للطبقة المائية .

إستغلال نتائج المخبر فيما يخص ثابت القياس الحبيبي سمح لنا باختيار أنجع مصفاة للطبقة المائية المتكونة من مواد هشة (رمل - صخر رملي) . هذا لتفادي تسرب الرمل (المكون للطبقة المائية) و الذي يكون له عواقب وخيمة على الفلاحة المحلية و المجاورة (إنجراف ناتج عن الرياح).

و لا ننسى أن وجود الرمل في الماء يمكن أن يسبب مشاكل أخرى:

- إتلاف عتاد الضخ
- إتهيار الأرض بسبب الضغط الجيوستاتيكي
- تكرار عملية تحسين إنتاجية البئر (بواسطة ضاغط هوائي) بسبب إنخفاض معدل الصرف (وجود رمل في قاع البئر).

الكلمات الأساسية : ماء- طبقة مائية - رمل - القياس الحبيبي- تصفية- مصفاة- حصى - التنقيب.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Pluviométrie de la région de KSAR-CHELLALA sur 11 ans (1990-2000).

Tableau 2 : Températures de la région de KSAR-CHELLALA sur 10 ans (1990-1999).

Tableau 3 : Vitesses du vent de la région de KSAR-CHELLALA sur 11 ans (1990-2000).

Tableau 4 : Humidité de la région de KSAR-CHELLALA sur 11 ans (1990-2000).

Tableau 5 : Granulométrie de la zone 1.

Tableau 6 : Granulométrie de la zone 2.

Tableau 7 : Granulométrie de la zone 3.

Tableau 8 : Capacités des grands réservoirs d'eau à la surface de la terre d'après les travaux Soviétiques (UNESCO 1978).

Tableau 9 : Volume d'eau stockée dans les réservoirs souterrains des grands continents d'après les travaux soviétiques (Unesco 1978).

Tableau 10 : Bilan global moyen des grands domaines du cycle de l'eau : continents, océans et globe d'après les documents publiés depuis 1970 (UNESCO 1978).

Tableau 11 : Normes de potabilité selon les normes internationales de l'OMS.

Tableau 12 : Normes Européennes de potabilité.

Tableau 13 : Facteurs bactériologiques.

Tableau 14 : Facteurs organoleptiques.

Tableau 15 : Teneurs en éléments indésirables toxiques.

Tableau 16 : Facteurs micro-biologiques.

Tableau 17 : Caractéristiques physicochimiques de l'eau des forages étudiés.

Tableau 18 : Caractéristiques des crépines Johnson de diamètre 8 pouces.

Tableau 19 : Relation, débit de la pompe immergée et diamètre intérieur de la chambre de pompage (tubage).

Tableau 20 : Classification Atterberg.

Tableau 21 : Classification MIT.

Tableau 22 : Crépines installées dans quelques forages de la zone d'étude.

Tableau 23 : Granulométrie à l'intérieur des classes.

Tableau 24 : Granulométrie entre les classes.

Tableau 25 : Légende de la figure 34.

Tableau 26 : Légende de la figure 35.

Tableau 27 : Extrait de la table de Student.

Tableau 28 : Comparaison entre les zones 1 et 3 (limons).

Tableau 29 : Comparaison entre les zones 1 et 3 (sable à grains fins).

Tableau 30 : Comparaison entre les zones 1 et 3 (sable à grains gros et moyens).

Tableau 31 : Comparaison entre les zones 1 et 2 (limons).

Tableau 32 : Comparaison entre les zones 1 et 2 (sable à grains fins).

Tableau 33 : Comparaison entre les zones 1 et 2 (sable à grains gros et moyens).

Tableau 34 : Comparaison entre les classes (12 à 36)m et (36 à 60)m pour sable à grains fins.

Tableau 35 : Comparaison entre les classes (12 à 36)m et (36 à 60)m pour sable à grains gros et moyens..

Tableau 36 : Comparaison entre les classes (60 à 84)m et (84 à 108)m pour limons.

Tableau 37 : Comparaison entre les classes (60 à 84)m et (84 à 108)m pour sable à grains fins.

Tableau 38 : Comparaison entre les classes (60 à 84)m et (84 à 108)m pour sable à grains gros et moyens.

Tableau 39 : Comparaison entre les classes (36 à 60)m et (60 à 84)m pour sable à grains fins.

Tableau 40 : Comparaison entre les classes (36 à 60)m et (60 à 84)m pour sable à grains gros et moyens.

Tableau 41 : Comparaison entre les classes (36 à 60)m et (84 à 108)m pour sable à grains fins.

Tableau 42 : Comparaison entre les classes (36 à 60)m et (84 à 108)m pour sable à grains gros et moyens.

Tableau 43 : Coupe géologique du forage n° 312.

Tableau 44 : Coupe géologique du forage n° 252.

Tableau 45 : Coupe géologique du forage n° 416.

Tableau 46 : Résultats granulométriques de la couche aquifère des zones 1 et 2.

Liste des Figures

Figure 1 : Situation géographique du secteur d'étude.

Figure 2 : Carte de situation du bassin versant du chéelif.

Figure 3 : Carte du sous bassin versant du chéelif (01).

Figure 4 : Carte géologique de la plaine nord de Ksar-Chellala (C. Caratini).

Figure 5 : Carte structurale 1 : Monts de Chellala.

Figure 6 : Carte structurale 2 : Extrémité occidentale des monts de Chellala et extrémité orientale du djebel Nador.

Figure 7 : Carte hydrogéologique de la plaine nord de Ksar-Chellala.

Figure 8 : Légende 1 de la carte hydrogéologique.

Figure 9 : Légende 2 de la carte hydrogéologique.

Figure 10 : Légende 3 de la carte hydrogéologique.

Figure 11 : Cycle de l'eau et quantité d'eau en mouvement en km³/an.

Figure 12 : Aquifère à nappe libre ; surface piézométrique.

Figure 13 : Aquifère à nappe captive.

Figure 14 : L'artésianisme.

Figure 15 : Aquifère à nappe semi-captive.

Figure 16 : Dispositif expérimental de Darcy.

Figure 17 : Dispositif de laboratoire avec écoulement latéral.

Figure 18 : Carte piézométrique.

Figure 19 : Conception des crépines Johnson.

Figure 20 : Comparaison des fentes entre les tubes perforés et les crépines Johnson.

Figure 21 : Pose des crépines.

Figure 22 : Longueur des crépines pour nappes captives.

Figure 23 : Longueur des crépines pour nappes libres.

Figure 24 : Colonne de captage pour nappe libre en terrain hétérogène.

Figure 25 : Abaque présentant la relation entre débit, diamètre et coefficient d'ouverture des crépines.

Figure 26 : Courbe granulométrique.

Figure 27 : Ouvertures des crépines pour terrains hétérogènes.

Figure 28 : Ouverture des crépines et dimensions du gravier.

Figure 29 : Mise en place du gravier (par gravité).

Figure 30 : Mise en place du gravier (sous pression).

Figure 31 : Fin de la mise en place du gravier (sous pression).

Figure 32 : Raccord baïonnette.

Figure 33 : Développement pneumatique.

Figure 34 : Histogramme à l'intérieur de la classe (12 à 18)m pour sable à grains fins.

Figure 35 : Histogramme à l'intérieur de la classe (24 à 30)m pour sable à grains fins

Figure 36 : Histogramme entre les classes (30 à 108)m pour sable à grains fins.

Figure 37 : Courbe granulométrique de la couche aquifère de la zone d'étude.

Figure 38 : Ouverture des crépines et dimensions du gravier de la zone d'étude.

Figure 39 : Droite représentant la granulométrie du gravier additionnel.

Liste des abréviations

OMS : Organisation Mondiale de la santé

UNESCO : United Nations Educational Scientific And Cultural Organization.

ANRH : Agence nationale des ressources hydriques

DHW TIARET : Direction de l'hydraulique de la wilaya de Tiaret

APC : Assemblée populaire communale.

MIT : Massachusetts Institute of technology

OSS: Observatoire du Sahel et du Sahara.

SASS : Programme système aquifère du Sahara septentrional.

EPE : Entreprise de production d'eau.

SOMMAIRE

0. Introduction

| | |
|--|----|
| 0.1. Rareté de l'eau..... | 17 |
| 0.2. Le contexte du travail..... | 18 |
| 0.3. Les objectifs du travail..... | 19 |
| 0.4. La démarche suivie..... | 19 |
| 0.5. Les caractéristiques prises en considération..... | 19 |
| 0.6. Le plan du mémoire retenu..... | 20 |

Chapitre 1

Données géologiques et hydrogéologiques de la région d'étude

1.1. Cadre géographique de la région d'étude.

| | |
|------------------------------------|----|
| 1.1.1. Situation géographique..... | 21 |
| 1.1.2. Géomorphologie..... | 21 |
| 1.1.3. Aperçu climatologique..... | 25 |

1.2. Cadre géologique de la région d'étude.

| | |
|--------------------------------------|----|
| 1.2.1. Litho-stratigraphie..... | 27 |
| 1.2.2. Esquisse tectonique..... | 31 |
| 1.2.3. Aperçu paléogéographique..... | 35 |

1.3. Cadre hydrogéologique de la région d'étude.....

| | |
|---|----|
| 1.3.1. Nappe aquifère dans les dépôts du quaternaire..... | 41 |
| 1.3.2. Horizon aquifère des dépôts non démembrés du pliocène-quaternaire inférieur..... | 42 |
| 1.3.3. Les eaux souterraines dans les dépôts du miocène..... | 42 |
| 1.3.4. Les eaux souterraines dans les dépôts d'oligocène..... | 42 |
| 1.3.5. L'horizon aquifère dans les dépôts du turonien..... | 42 |
| 1.3.6. L'horizon aquifère dans les dépôts de l'albien..... | 43 |
| 1.3.7. Les eaux souterraines dans les dépôts de l'aptien..... | 43 |

| | |
|--|-----------|
| 1.3.8. L'horizon aquifère dans les dépôts du barrémien..... | 43 |
| 1.3.9. Le complexe aquifère du valangino-hauterivien..... | 44 |
| 1.3.10. L'horizon aquifère dans les dépôts du tithonique..... | 44 |
| 1.3.11. L'horizon aquifère dans les dépôts du kimmeridgien..... | 45 |
| 1.3.12. Les eaux souterraines dans les dépôts du complexe callovo-oxfordien..... | 47 |
| 1.4. Résultats d'analyse de laboratoire des échantillons des roches..... | 48 |

Chapitre 2

Evaluation et mobilisation des ressources hydriques

| | |
|--|----|
| 2.1. Généralités..... | 52 |
| 2.2. Bilan d'eau. | 55 |
| 2.3. Origine des eaux souterraines. | 58 |
| 2.4. Identification hydrodynamique de l'aquifère. | 59 |
| 2.4.1. Notions sur l'aquifère. | 59 |
| 2.4.2. Configuration de l'aquifère. Types hydrodynamiques. | 60 |
| 2.5. Le sable et le grès. | 64 |
| 2.6. Qualité de l'eau. | 66 |
| 2.7. Etude expérimentale en milieu poreux (loi de Darcy). | 73 |
| 2.7.1. Aquifère, conduite d'eau souterraine. | 73 |
| 2.7.2. Loi de Darcy. Dispositif expérimental de Darcy. | 74 |
| 2.7.3. Enoncé de la loi de Darcy. | 75 |
| 2.7.4. Dispositif de laboratoire avec écoulement latéral..... | 76 |
| 2.7.5. Généralisation de la loi de Darcy au laboratoire. | 77 |
| 2.7.6. Application de la loi de Darcy sur terrain. | 78 |
| 2.8. Equipement de la zone de captage. | 80 |
| 2.8.1. Construction et pose des crépines. | 80 |
| 2.8.2. Longueur et position des crépines. | 88 |
| 2.8.3. Relation : débit, diamètre, coefficient d'ouverture des crépines de forage..... | 91 |
| 2.8.4. Structure du sol. | 93 |
| 2.8.4.1. Granulométrie. | 93 |

| | |
|--|------------|
| 2.8.4.2. Coefficient d'uniformité (Hazen) | 94 |
| 2.8.5. Analyse granulométrique. | 94 |
| 2.8.5.1. Mesures de laboratoire..... | 94 |
| 2.8.5.2. Elaboration de la courbe..... | 95 |
| 2.8.6. Gravier additionnel..... | 97 |
| 2.8.7. Mise en place du gravier..... | 99 |
| 2.8.8. Développement..... | 104 |
| 2.8.9. Colonnes de captage installées dans la région de Ksar-Chellala..... | 111 |
| 2.9 Conclusion. | 111 |

Chapitre 3

Analyse statistiques des résultats

| | |
|---|------------|
| 3.1. Introduction..... | 112 |
| 3.2. Classification de la granulométrie adoptée..... | 112 |
| 3.3. Organisation des données..... | 112 |
| 3.3.1. Sous forme de tableaux..... | 112 |
| 3.3.2. Sous forme d'histogrammes..... | 114 |
| 3.4. Comparaisons des moyennes à l'intérieur des classes..... | 117 |
| 3.4.1. Entre les zones 1 et 3 dans l'intervalle 12m à 18m..... | 119 |
| 3.4.2. Entre les zones 1 et 2 dans l'intervalle 24m à 30m | 120 |
| 3.4.3. Conclusion..... | 121 |
| 3.5. Comparaison des moyennes entre les classes..... | 121 |
| 3.5.1. Comparaison entre les intervalles (12 à 36)m et (36 à 60)m..... | 123 |
| 3.5.2. Comparaison entre les intervalles (60 à 84)m et (84 à 108)m..... | 124 |
| 3.5.3. Comparaison entre les intervalles (36 à 60)m et (60 à 84)m..... | 125 |
| 3.5.4. Comparaison entre les intervalles (36 à 60)m et (84 à 108)m..... | 127 |
| 3.5.5. Conclusion..... | 127 |

Chapitre 4

Choix de la colonne de captage

| | |
|---|------------|
| 4.1. Introduction..... | 128 |
| 4.2. Courbe granulométrique..... | 132 |
| 4.3. Choix de l'ouverture des crépines et des dimensions du gravier..... | 133 |
| 4.3.1. Dimensions du gravier additionnel..... | 134 |
| 4.3.2. Diamètre de l'ouverture de la crépine..... | 134 |
| 4.4. Programme de forage..... | 135 |
| 4.5. Recommandations..... | 135 |
| Conclusion générale..... | 13 |
| Bibliographie. | |

INTRODUCTION

0.1. Rareté de l'eau :

L'eau est de plus en plus évoquée comme le problème majeur du 21^{ème} siècle, car elle est vitale et sa répartition sur la surface de la terre est inégale.

Pour les pays à forte précipitation, à faible croissance démographique, économiquement développés et à voisinage tranquille, les difficultés ne proviennent pas de la rareté de l'eau mais de l'état dans lequel elle se trouve (dégradation par la densification de l'activité industrielle et de l'agriculture à haut rendement).

Mais pour les pays comme le nôtre situé dans les zones du sud, la combinaison des mêmes facteurs naturels démographiques, économiques, contribue à la création des plus mauvaises conditions d'accès à cette source de vie qu'est l'eau.

La nature et la gravité des problèmes sont bien sûr très différentes pour les pays comme le nôtre ; car il nous faut faire face à la rareté d'abord, à l'urbanisation sauvage, à l'inefficacité de la gestion de ce produit rare ; ensuite régler les problèmes de réseaux d'adduction d'eau propre mais aussi d'évacuation d'eau usée.

Il résulte de tout cela une tension permanente sur la disponibilité en eau, susceptible de générer en catastrophe à tout moment.

Les Nations unies estiment à une trentaine seulement, les Etats capables, en 2050, de subvenir à leurs propres besoins. Si, depuis une dizaine d'années, la question de l'eau s'est imposée comme une des priorités de la communauté internationale, il reste selon les experts de l'ONU, à la reconnaître comme un bien stratégique comme le pétrole. Dans la crainte de pénuries futures, des pays tentent de s'approprier les réserves d'eau encore disponibles.

L'industrie et l'agriculture qui sont de très gros consommateurs d'eau doivent absolument traquer le gaspillage car on ne peut plus agir sur l'offre pour satisfaire les besoins de ces deux secteurs. L'agriculture peut et doit produire plus, en réduisant l'usage de l'eau, et l'industrie peut et doit développer les méthodes de recyclage pour à la fois, protéger l'environnement et réduire considérablement son utilisation de l'eau en faveur de la population.

0.2. Le contexte du travail :

Contrairement au domaine des hydrocarbures, déjà maîtrisé depuis les années 1970 suite aux importants investissements humains et matériels, l'Algérie est encore en retard dans le domaine de l'eau.

Jusqu'à aujourd'hui, la plupart des réalisations des forages d'eau se font soit en exploration (sans tenir compte de la géologie et de l'hydrogéologie de la région connue), soit en semi-exploration, et ceci augmente le prix de revient du projet et diminue la durée de vie de l'ouvrage. Ces lacunes existent à cause de la mauvaise coordination entre les différents secteurs de l'eau (ANRH, DHW, APC, EPE, entreprises de forage).

Le présent travail touche aux problèmes de la durée de vie d'un forage en exploitation lorsque la couche aquifère est composée de matériaux meubles (sable et grés). Dans ces cas là, une nappe mal équipée (mauvais choix des ouvertures des crépines et du gravier additionnel) ne peut jamais produire longtemps sans problèmes techniques à cause des venues de sable.

Afin de réaliser notre recherche, il fallait utiliser les données techniques du livre 3 du volume 2 ; il s'agit du « catalogue des ouvrages et résultats des analyses de laboratoires des échantillons d'eau et des roches ». ces études hydrogéologiques, géotechniques et géophysiques ont été effectuées conformément au contrat n° 9388 signé le 15 mai 1969 entre monsieur le wali de la wilaya de Médéa et une mission Soviétique. Ceci afin d'argumenter les projets d'exécution de l'irrigation de 2500 hectares de terres et de l'alimentation des localités en eau à partir des eaux souterraines .

La méthode de l'exécution de tous les genres de travaux répondait aux exigences et aux normes en vigueur en URSS tenant compte des désirs du service des recherches scientifiques de l'Algérie (SES) avec lequel toutes les questions principales concernant la méthode ont été mises au point d'un commun accord.

Les analyses de laboratoire des échantillons d'eau et des roches étaient exécutées au laboratoire central de Mahdi Boualem, les analyses bactériologiques étaient exécutées à l'institut Pasteur d'Alger. Les recherches de laboratoire ont été faites par l'ingénieur Koutianine A.V. et les techniciens Ilina M.N. et Novak G.I.

0.3. Les objectifs du travail :

Il faut bien équiper le forage en choisissant le meilleur filtre possible afin de retenir les grains de sable, de la nappe, derrière les crépines et derrière le massif de gravier additionnel (introduit à partir de la surface entre les parois et les crépines).

L'application des résultats obtenus ,

- le diamètre des ouvertures des crépines,
- les dimensions du gravier additionnel,

nous permet d'éviter les reprises permanentes des forages à cause des diminutions brusques des débits.

On peut citer comme exemples de reprises (dépenses supplémentaires), les opérations suivantes :

- Développements répétés.
- Réparations fréquentes ou changements de la pompe immergée.
- Parfois, pour des raisons économiques, on abandonne le forage mal équipé pour le remplacer par un nouveau ouvrage.

0.4. La démarche suivie :

La démarche retenue consiste à étudier de façon détaillée, sur 3 zones de la région de KSAR-CHELLALA, de géologie et d'hydrogéologie sensiblement homogène mais de coordonnées variées, la variabilité et la corrélation de la granulométrie de la nappe entre 3 différentes régions.

Après interprétation des résultats statistiques, nous aurons la possibilité de proposer pour chaque région :

- le diamètre optimum de l'ouverture des crépines.
- les meilleures dimensions du gravier additionnel.

0.5. Les caractéristiques prises en considération :

Il sera tenu compte au cours de ce travail des propriétés suivantes :

- Configuration de l'aquifère. Afin de décider de la nature de la colonne de captage, il faut tenir compte de l'épaisseur de la nappe, du type des roches et voir si la nappe est libre, captive ou semi-captive.
- Débit de la nappe. Ceci afin de choisir le diamètre des crépines.

- La granulométrie de la couche aquifère. Pour choisir le diamètre optimum des ouvertures des crépines ainsi que les meilleures dimensions du gravier additionnel

0.6. Le plan du mémoire retenu :

Nous commencerons donc dans un premier chapitre, par une synthèse bibliographique dans laquelle nous présenterons la région étudiée, du point de vue :

- géographique,
- climatologique,
- géologique,
- hydrogéologique, (les roches réservoirs, et plus particulièrement les résultats des analyses de laboratoire des échantillons des roches),
- hydro-chimique, (résultats des analyses de laboratoire des échantillons d'eau).

Le second chapitre sera consacré à l'évaluation et à la mobilisation des ressources hydriques (plus particulièrement en Algérie). Nous évoquerons ensuite les travaux déjà réalisés sur le sujet.

Les résultats de ces travaux ne seront qu'évoqués, car ils seront repris à l'occasion de leur confrontation avec nos propres résultats.

L'interprétation des résultats statistiques, formera l'ossature du troisième chapitre.

Dans un quatrième chapitre, nous proposerons un meilleur filtre de la nappe afin d'éviter les venues de sable.

CHAPITRE 1

Données géologiques et hydrogéologiques de la région d'étude

1.1. Cadre géographique :

1.1.1. Situation géographique de la zone d'étude :

La région de Ksar Chellala (fig. 1) se situe à 250 kilomètres au sud-ouest d'Alger limitée :

- au Nord par les hautes plaines Algéroises ;
- au Sud par la vaste plaine des Zahres (les monts de Chellala) ;
- à l'Ouest par les monts du Nador ;
- à l'Est par Aïn Oussara (Sabaa Rouss).

Cette région appartient au grand bassin du chéelif (fig. 2), ce bassin versant couvre une superficie de 45 000 km² (répertoire ANRH), et se compose de 3 régions distinctes :

- le haut chéelif ;
- le moyen chéelif ;
- le bas chéelif.

La zone d'étude, qui s'intègre dans le haut chéelif, fait partie du sous bassin versant de l'oued Ouerk codé 07 (fig. 3).

Cette région présente deux paysages fort différents :

- un versant nord, celui des monts de Chellala ;
- une plaine à pente douce de direction sud-est, nord-ouest.

1.1.2. Géomorphologie de la région d'étude :

La plaine de Chellala fait partie du grand bassin versant de l'Oued Touil qui traverse le territoire du sud-ouest au nord-est, sur un terrain recouvert d'Alfa et d'Absinthe. Le terrain de ce bassin représente un lieu semi-désertique, il est caractérisé par la présence de dépressions connues sous le nom local « Daya ».

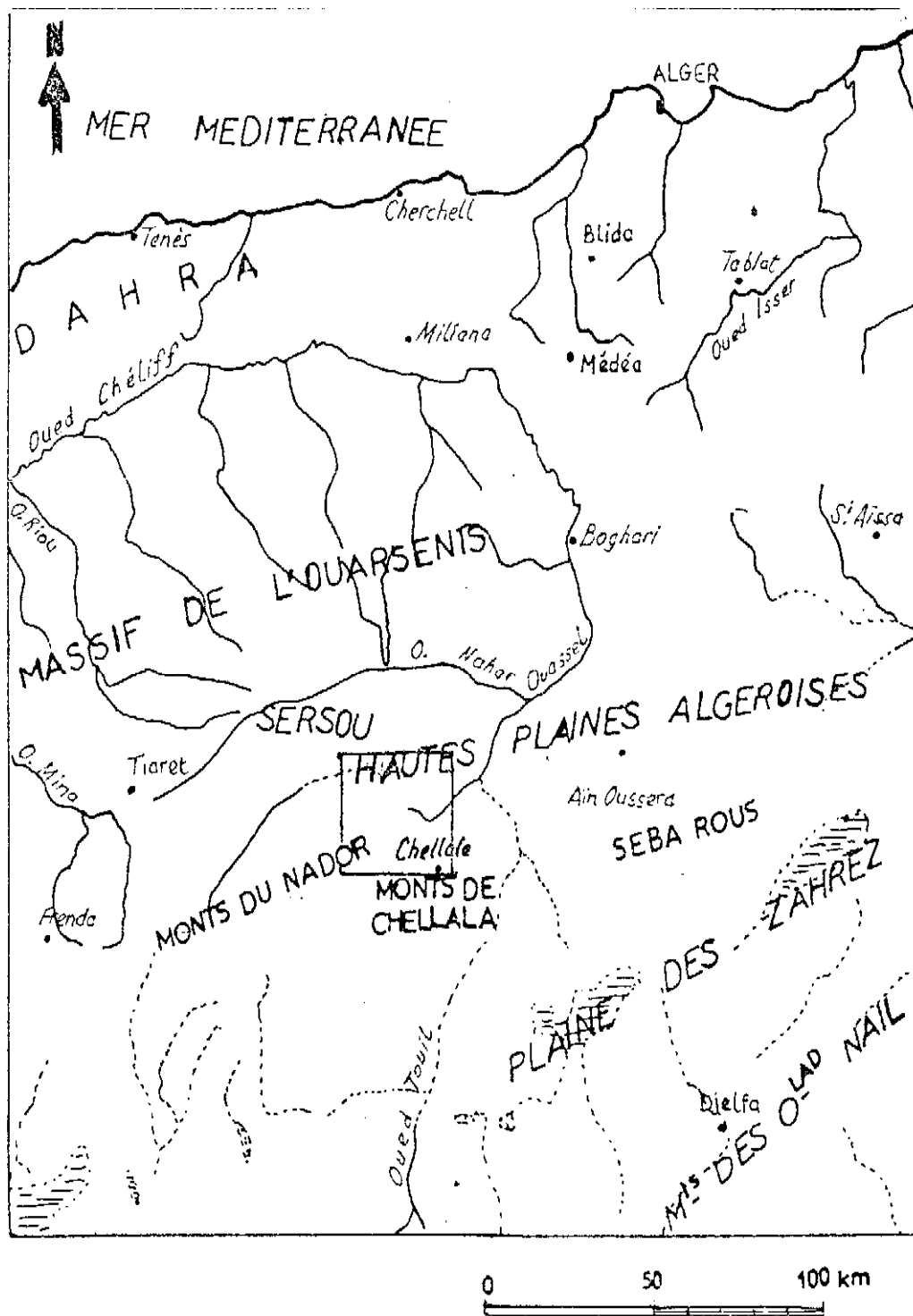
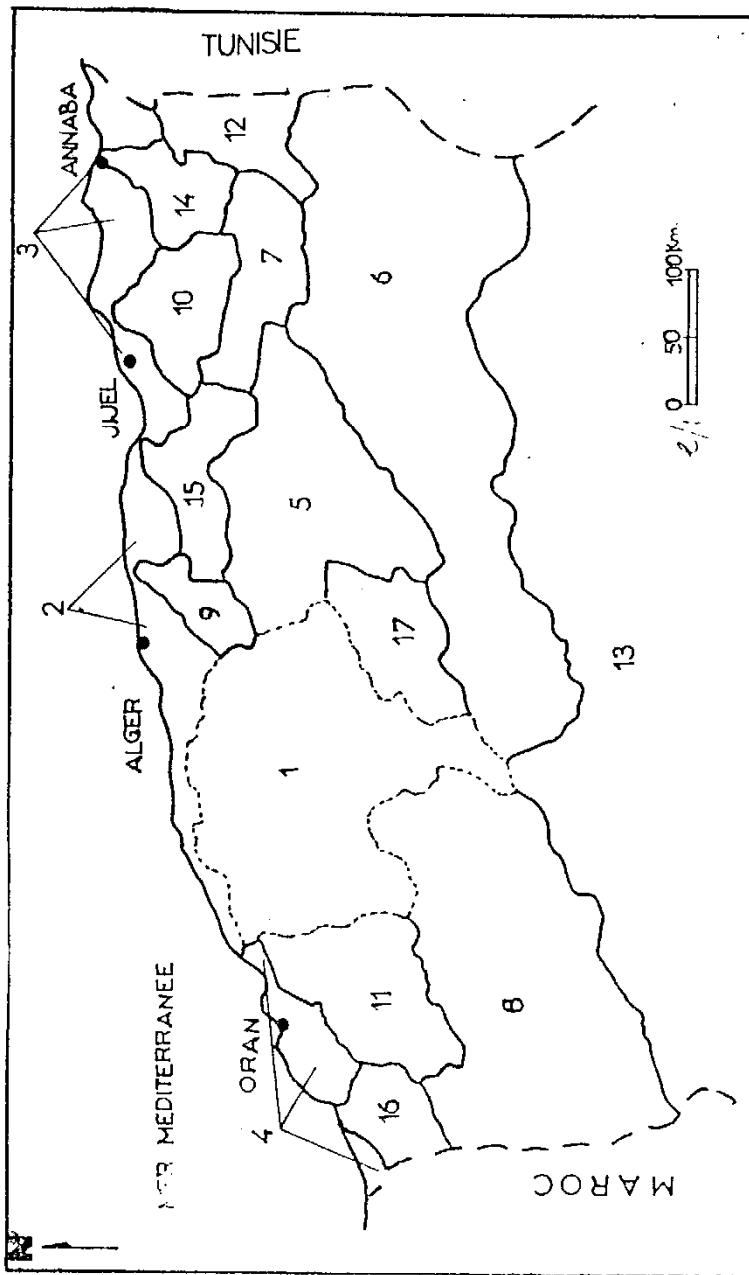


Fig n° 1 : Situation géographique de la zone d'étude

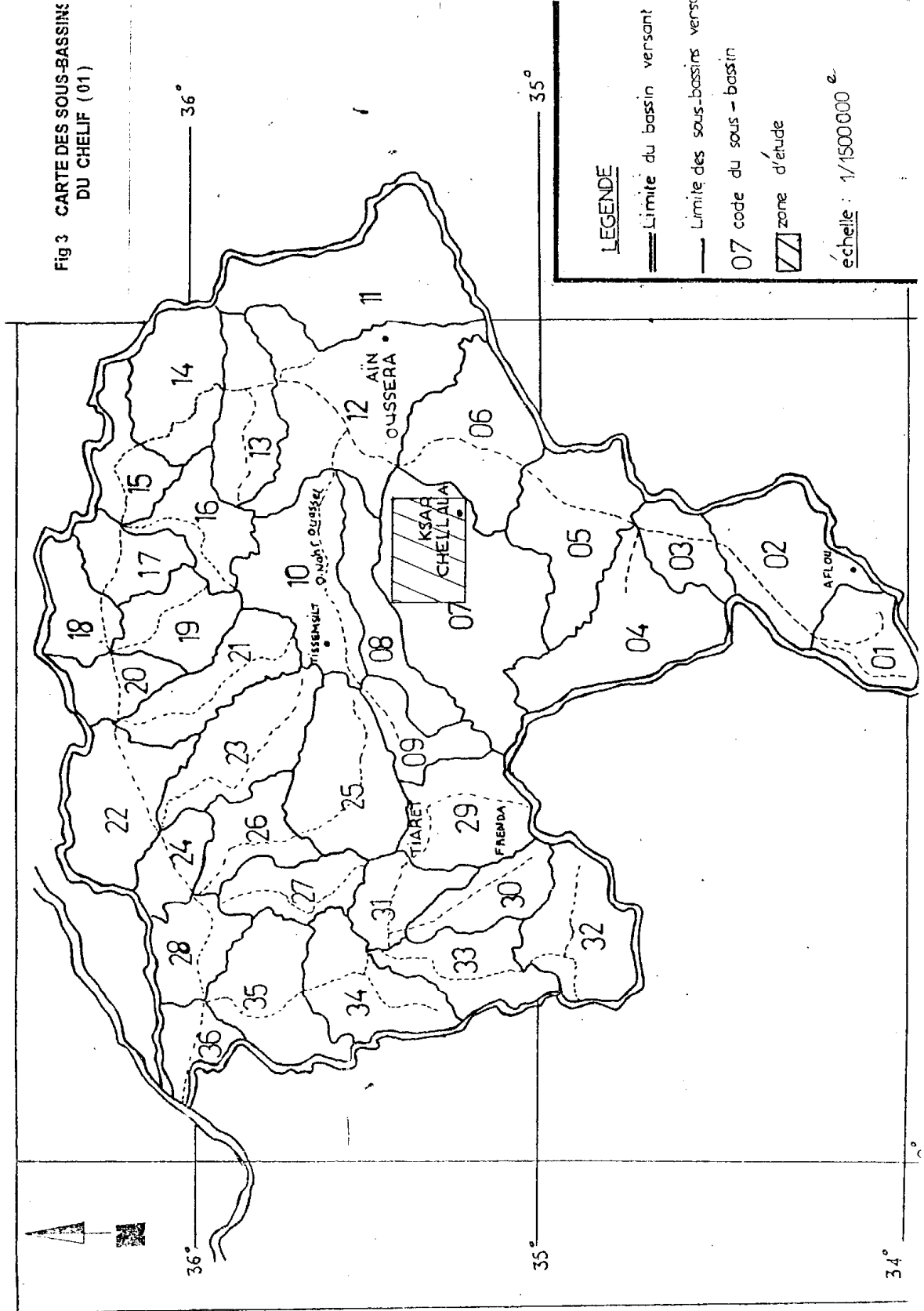
Fig 2 CARTE DE SITUATION DU BASSIN VERSANT DU CHELIF



BASSINS VERSANTS

- | | | | | | |
|---|-----------------------|----|------------------------------|----|----------|
| 1 | CHELIFF | 7 | HAUTS PLATEAUX CONSTANTINOIS | 13 | SAHARA |
| 2 | COTIERS ALGEROIS | 8 | HAUTS PLATEAUX ORANAIS | 14 | SEYBOUSE |
| 3 | COTIERS CONSTANTINOIS | 9 | ISSER | 15 | SOUMMAM |
| 4 | COTIERS ORANAIS | 10 | KEBIR RHUMEL | 16 | TAFNA |
| 5 | CHOTT HODNA | 11 | MACTA | 17 | ZAHREZ |
| 6 | CHOTT MELGHIR | 12 | MEDJERDAH | | |

Fig 3 CARTE DES SOUS-BASSINS
DU CHELIF (01)



Le bassin versant de l’oued Touil est un sous bassin du grand bassin du Chélif (fig. 2 ; 3). Il est caractérisé par une très grande superficie (égale à 12 070 km²) et une longueur de 253 km. C’est un bassin allongé caractérisé par une faible pente.

1.1.3. Aperçu climatologique : [44]

Cette région présente des particularités exceptionnelles dues au climat semi-aride. Elle est caractérisée par des saisons thermiques nettement tranchées et une pluviosité concentrée sur la période froide de l’année.

| Mois Ans | JAN | FEV | MAR | AVR | MAI | JUIN | JUIL | AOU | SEP | OCT | NOV | DEC | Annuel | Moy |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|------|
| 1990 | 62,8 | 1,1 | 40,1 | 26,6 | 63,0 | 18,4 | 39,7 | 2,0 | 31,2 | 9,6 | 11,6 | 19,0 | 325,1 | 27,0 |
| 1991 | 6,1 | 24,2 | 74,0 | 8,8 | 15,6 | 11,9 | 12,0 | 15,3 | 6,0 | 10,7 | 1,5 | 11,4 | 197,5 | 16,4 |
| 1992 | 17,5 | 6,5 | 29,8 | 19,7 | 85,0 | 12,3 | 24,2 | 3,0 | 5,5 | 12,4 | 12,0 | 12,0 | 239,9 | 19,9 |
| 1993 | 0,0 | 65,0 | 4,7 | 25,0 | 32,2 | 0,4 | 6,0 | 25,0 | 45,0 | 1,0 | 15,0 | 6,0 | 225,3 | 18,7 |
| 1994 | 5,0 | 78,0 | 15,3 | 6,0 | 5,0 | 0,0 | 8,0 | 34,0 | 31,0 | 35,0 | 11,7 | 79,0 | 308,0 | 25,6 |
| 1995 | 9,4 | 4,1 | 28,8 | 13,8 | 3,2 | 15,7 | 3,5 | 9,3 | 34,0 | 27,4 | 2,1 | 11,8 | 163,1 | 13,5 |
| 1996 | 19,5 | 38,1 | 39,8 | 29,0 | 31,0 | 55,2 | 25,1 | 7,0 | 43,2 | 7,9 | 11,1 | 4,5 | 311,4 | 25,9 |
| 1997 | 52,0 | 9,4 | 0,0 | 55,3 | 23,9 | 0,0 | 3,6 | 40,3 | 44,9 | 24,3 | 37,1 | 13,5 | 304,3 | 25,3 |
| 1998 | 5,9 | 19,5 | 8,8 | 31,4 | 48,1 | 5,6 | 0,0 | 1,0 | 44,9 | 19,6 | 6,6 | 5,3 | 196,7 | 16,3 |
| 1999 | 50,0 | 28,2 | 63,1 | 0,0 | 17,1 | 2,1 | 2,0 | 7,9 | 35,7 | 61,5 | 32,0 | 71,5 | 371,1 | 30,9 |
| Moy | 22,8 | 27,4 | 30,4 | 21,5 | 32,4 | 12,1 | 12,4 | 14,4 | 32,1 | 20,9 | 14,0 | 23,4 | 264,2 | 22,0 |

Tableau n° 1 : Pluviométrie de la région de KSAR-CHELLALA sur 10 ans (1990-1999).

Les précipitations atmosphériques tombent généralement de septembre jusqu’à mai, donc, elles sont à dominance hivernale. Toutefois, le commencement et la durée des précipitations varient largement d’année en année.

| | JAN | FEV | MAR | AVR | MAI | JUIN | JUI | AOU | SEP | OCT | NOV | DEC | Moy |
|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| 1990 | 7,1 | 11,5 | 12,8 | 13,0 | 18,9 | 26,4 | 27,5 | 27,1 | 26,1 | 18,3 | 11,7 | 5,9 | 17,19 |
| 1991 | 6,1 | 6,9 | 11,5 | 12,3 | 15,4 | 24,0 | 28,5 | 27,4 | 23,9 | 15,1 | 10,1 | 6,2 | 15,61 |
| 1992 | 5,5 | 7,5 | 9,7 | 13,1 | 18,1 | 20,1 | 25,8 | 27,1 | 24,1 | 16,7 | 12,0 | 8,2 | 15,65 |
| 1993 | 6,1 | 6,7 | 11,3 | 13,8 | 19,1 | 25,8 | 28,9 | 28,3 | 21,6 | 17,8 | 11,6 | 7,6 | 16,55 |
| 1994 | 7,8 | 9,5 | 13,1 | 12,9 | 21,9 | 25,4 | 30,2 | 30,6 | 22,4 | 17,4 | 12,4 | 8,3 | 17,65 |
| 1995 | 7,1 | 10,5 | 10,9 | 13,1 | 21,1 | 24,0 | 28,4 | 27,7 | 21,1 | 17,9 | 13,1 | 10,4 | 17,10 |
| 1996 | 10,2 | 7,6 | 11,9 | 14,3 | 18,3 | 22,7 | 27,6 | 27,7 | 19,8 | 15,4 | 13,0 | 9,4 | 16,49 |
| 1997 | 9,1 | 13,1 | 12,0 | 15,2 | 20,1 | 26,2 | 28,3 | 27,4 | 23,3 | 18,2 | 12,7 | 9,0 | 17,88 |
| 1998 | 7,9 | 9,9 | 12,0 | 15,1 | 17,6 | 26,1 | 30,0 | 25,0 | 25,0 | 15,9 | 12,1 | 7,2 | 16,98 |
| 1999 | 7,7 | 7,6 | 11,8 | 15,8 | 23,0 | 26,6 | 28,5 | 31,2 | 24,2 | 20,7 | 10,9 | 7,3 | 16,21 |
| Moy | 7,46 | 9,08 | 11,7 | 13,86 | 17,28 | 24,73 | 28,37 | 27,95 | 23,15 | 17,34 | 11,96 | 7,95 | |

Tableau n° 2 : Températures moyennes de la région de KSAR-CHELLALA sur 10 ans (1990-1999).

Sur tout le territoire étudié la température moyenne annuelle est considérablement au-dessus de zéro. Dans la région de Chellala la température moyenne annuelle atteint 16,2°.

Pendant la période chaude (Juillet- août) la température atteint +35° et bien plus.

| Mois Ans | JAN | FEV | MAR | AVR | MAI | JUIN | JUIL | AOU | SEP | OCT | NOV | DEC | Moy |
|-------------|-----|-----|------|-----|-----|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1990 | 3,4 | 3,3 | 3,5 | 4,6 | 3,1 | 3,2 | 2,6 | 3,2 | 3,9 | 4,5 | 4,0 | 4,3 | 3,6 |
| 1991 | 2,8 | 3,9 | 5,9 | 4,3 | 3,6 | 3,7 | 3,2 | 2,9 | 2,8 | 3,2 | 3,5 | 2,4 | 3,5 |
| 1992 | 2,6 | 1,9 | 4,1 | 5,4 | 3,3 | 4,9 | 3,1 | 29,0 | 3,2 | 2,6 | 1,5 | 1,5 | 5,2 |
| 1993 | 0,4 | 1,2 | 2,2 | 2,5 | 2,3 | 1,9 | 1,9 | 1,6 | 1,9 | 2,8 | 1,7 | 2,6 | 1,9 |
| 1994 | 3,8 | 4,4 | 2,4 | 4,8 | 3,9 | 3,5 | 3,0 | 3,3 | 3,1 | 3,5 | 2,5 | 3,2 | 3,4 |
| 1995 | 5,2 | 3,3 | 4,4 | 4,0 | 4,7 | 4,9 | 4,3 | 4,7 | 3,7 | 1,8 | 3,3 | 4,2 | 4,0 |
| 1996 | 4,7 | 2,3 | 3,5 | 5,4 | 4,4 | 3,5 | 4,5 | 4,4 | 4,8 | 3,3 | 5,6 | 4,5 | 4,2 |
| 1997 | 2,7 | 1,7 | 12,7 | 3,3 | 2,5 | 4,6 | 4,6 | 2,9 | 3,0 | 3,0 | 5,2 | 3,9 | 4,1 |
| 1998 | 3,9 | 2,6 | 2,3 | 5,0 | 3,9 | 4,0 | 3,6 | 3,3 | 4,5 | 3,0 | 3,0 | 3,1 | 3,5 |
| 1999 | 4,6 | 5,6 | 4,7 | 2,8 | 4,5 | 4,0 | 3,6 | 4,0 | 0,5 | 2,2 | 3,9 | 4,9 | 3,7 |
| 2000 | 3,4 | 3,0 | 4,5 | 4,2 | 3,6 | 3,8 | 3,4 | 5,9 | 3,1 | 3,0 | 3,4 | 3,4 | 3,7 |

Tableau n° 3 : Vitesses moyennes du vent en m/s de la région de KSAR-CHELLALA sur 11 ans (1990-2000).

La principale direction des vents est Nord-Est. Le « sirocco » est un vent d'été et vient du Sahara. C'est un vent dangereux pour les plantes. C'est un vent qui vient du Sud à Sud-Ouest et qui souffle pendant 20 à 40 jours par an [51 ;52 ;53].

| Mois Ans | JAN | FEV | MAR | AVR | MAI | JUIN | JUIL | AOU | SEP | OCT | NOV | DEC | Moy |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1990 | 82,0 | 58,0 | 61,0 | 70,0 | 67,0 | 42,0 | 39,0 | 36,0 | 43,0 | 57,0 | 73,0 | 83,0 | 59,2 |
| 1991 | 68,0 | 73,0 | 66,0 | 60,0 | 49,0 | 39,0 | 30,0 | 34,0 | 45,0 | 73,0 | 58,0 | 78,0 | 56,0 |
| 1992 | 75,0 | 67,0 | 67,0 | 58,0 | 57,0 | 46,0 | 44,0 | 30,0 | 39,0 | 54,0 | 68,0 | 72,0 | 56,4 |
| 1993 | 54,0 | 68,0 | 55,0 | 48,0 | 49,0 | 38,0 | 29,0 | 32,0 | 50,0 | 51,0 | 71,0 | 75,0 | 51,6 |
| 1994 | 70,0 | 62,0 | 52,0 | 38,0 | 37,0 | 31,0 | 21,0 | 27,0 | 50,0 | 73,0 | 71,0 | 74,0 | 50,5 |
| 1995 | 78,0 | 62,0 | 66,0 | 50,0 | 39,0 | 48,0 | 34,0 | 36,0 | 56,0 | 62,0 | 59,0 | 72,0 | 55,1 |
| 1996 | 71,0 | 71,0 | 64,0 | 57,0 | 58,0 | 51,0 | 40,0 | 41,0 | 51,0 | 53,0 | 54,0 | 75,0 | 57,1 |
| 1997 | 71,0 | 64,0 | 48,0 | 62,0 | 50,0 | 34,0 | 33,0 | 44,0 | 58,0 | 65,0 | 72,0 | 76,0 | 56,4 |
| 1998 | 72,0 | 66,0 | 50,0 | 54,0 | 61,0 | 32,0 | 27,0 | 35,0 | 44,0 | 55,0 | 66,0 | 68,0 | 52,5 |
| 1999 | 72,0 | 63,0 | 63,0 | 47,0 | 35,0 | 36,0 | 31,0 | 33,0 | 53,0 | 58,0 | 70,0 | 80,0 | 53,4 |
| 2000 | 71,3 | 65,4 | 59,2 | 54,4 | 50,2 | 39,7 | 32,8 | 34,8 | 48,9 | 60,1 | 66,2 | 75,3 | 54,8 |

Tableau n° 4 : Humidité en % de la région de KSAR-CHELLALA sur 11 ans (1990-2000).

On remarque la formation de rosées pendant les mois d'octobre et de novembre. L'été est sec avec des vents continus.

1.2. Cadre Géologique de la région (fig. 4) :

1.2.1. Litho stratigraphie [13] :

La couverture sédimentaire dans la région étudiée est épaisse et complexe, formée par des terrains triasique, jurassique, crétacé, paléogène, néogène et quaternaire.

1.2.1.1. Le Trias :

Le Trias est représenté en diapirs, formé surtout de matières plastiques (gypses, sels, argilites) entraînent avec elles des dolomies, des cargneules, des quartzites..... Ces diapirs affleurent à l'extrémité nord-est des montagnes de Chellala en rive gauche de l'oued Ouerq (collines Djouabi, djebel Zerga) ; (fig. 4).

La stratigraphie du Trias dans la région est définie comme suit , de bas en haut :

- une formation détritique épaisse de 140m ;
- une formation argilo-anhydritique(270m) à intercalation calcaréo-dolomitiques ;
- une formation calcaréo-anhydrique de 110m d'épaisseur, avec des restes fréquents de lamellibranches et de Gastéropodes.

1.2.1.2. Le jurassique :

1.2.1.2.1. Le Lias et le Dogger :

Le Lias inférieur (Hettangien à Carixien) est formé dans la région de calcaires biolithiques ou de dolomies méta somatiques (djebel Nador). Son épaisseur est d'environ 400m.

Le Domérien est constitué de 100 à 150m de calcaires marneux et de calcaires à silex riches en Ammonites.

Le Toarcien est caractérisé par son faciès « ammonitico rosso » marneux au djebel Nador ; avec une épaisseur de 10 à 20m.

A part quelques grains de quartz présents dans le Toarcien, la sédimentation reste essentiellement carbonatée durant le Lias et le Dogger.

1.2.1.2.2. Le Callovien supérieur-Oxfordien :

La sédimentation devient détritique déposant (400 à 700)m de grés fins et d'argilites verts.

Les principaux affleurements sont :

- sur les limites des monts de Chellala ;
- sur le versant Sud du Dj. Metales ;
- dans une fenêtre d'érosion (au sud de djebel Ben Hammade).

1.2.1.2.3. Le Kimméridgien :

Il est constitué des dolomies massives, cristallines, stratifiées, fissurées par fois cavernueuses. Ces dernières affleurent largement tout au long de la chaîne de Chellala avec 250 à 350m d'épaisseur.

Les principaux affleurements sont :

- djebel Metales (dolomies blanches à grains moyens) ;
- djebel Ben Hammade (dolomies grises à grains grossiers) ;
- djebel Kradou (dolomies grises claires à grains fins) ;
- djebel Charef ;
- djebel Daoura ;
- djebel Sekkine et Guelb.

1.2.1.2.4. Le Tithonique :

Il est caractérisé par un ensemble de calcaires, calcaires dolomités, d'argiles et de marnes.

Les calcaires dolomités sont fissurés et de couleur grise. La puissance de la série est comprise entre (150 et 200)m.

Les principaux affleurements sont :

- au Sud des monts de Chellala ;
- à djebel Ben Hammade (1274m);
- au flanc nord de djebel Metales.

1.2.1.2.5. Le Jurassique terminal et la base du Crétacé (Barrémien, Valanginien inférieur) :

Les grés et les argilites verts sont remplacés par les calcaires et les marnes.

La sédimentation carbonatée s'établit et persiste jusqu'au sommet du Berriasien.

1.2.1.3. Le crétacé inférieur :

Le Crétacé inférieur et la partie inférieure du Cénomaniens sont représentés par 200m de grés continentaux. Grâce aux intercalations marines, C. Caratini (1969), a subdivisé le Crétacé inférieur de la manière suivante :

1.2.1.3.1. Groupe gréseux inférieur : Valanginien ; Hauterivien ; Barrémien.

Ce groupe est caractérisé par une alternance des niveaux marins grés-carbonatés et des grés continentaux.

1.2.1.3.2. Groupe grés-carbonaté moyen : Aptien.

Ce groupe est représenté par le dépôt des calcaires à orbitolines.

1.2.1.3.3. Groupe gréseux supérieur : Albien.

C'est une couche de 100m environ de grés continentaux.

1.2.1.4. Le Crétacé supérieur : (Cénomaniens-Turonien)

Les dépôts du Cénomaniens affleurent sur la chaîne montagneuse de Taguine et à l'Est de l'oued Touil. Ils sont représentés par des calcaires jaunes rosâtres et blancs avec des intercalations de marnes gris claires et jaunes claires.

1.2.1.5. Le Tertiaire :

Le Tertiaire occupe la dépression du Kef Hasbaïa où passe la piste de Chellala à l'oued Touil. On peut y reconnaître des argiles rouges, des grés jaune clair et des conglomérats.

L'épaisseur de cette formation varie de 30 à 40m.

1.2.1.5.1. Le Miocène :

L'affleurement le plus important se situe à l'Ouest du djebel Ben Hammade où il forme une corniche au Nord.

Le Miocène débute par une mince assise conglomératique à éléments calcaires et dolomitiques mal arrondis surmontés par des calcaires marno-sableux.

Des calcaires friables passant à des grés tendres de couleurs jaune. Le Miocène est transgressif sur le Jurassique supérieur dans les monts de Chellala. L'épaisseur des dépôts miocènes varie entre 30 et 35m.

1.2.1.5.2. Le Pliocène Quaternaire inférieur :

Ce sont des dépôts typiquement continentaux dont la lithogenèse se faisait dans des conditions de climat aride. Le Plioquaternaire est représenté par des conglomérats, des grés, des marnes et des sables. Les conglomérats comportent des éléments subanguleux, ces dépôts reposent directement sur le Crétacé de part et d'autre de la chaîne de Chellala.

Les plus grosses épaisseurs des conglomérats sont observées dans le lit de l'ancienne vallée de l'oued Touil.

La puissance totale du complexe Pliocène-Quaternaire inférieur atteint (40 à 60)m.

1.2.1.6. Le Quaternaire :

Les formations du Quaternaire sont représentées par les roches calcaires spécifiques connues sous le nom « la croûte calcaire ». Cette dernière forme la couverture continue de toutes les plaines de la région et localement des piémonts des chaînes montagneuses mais elle manque seulement sur les jeunes terrasses des oueds.

1.2.2. Esquisse Tectonique (fig. 5 ; 6) :

Vu la complexité de la structure géologique, on donne un aperçu sur les grands traits de la géologie structurale du secteur d'étude (fig. 5 ; 6).

La chaîne Nador-Chellala s'apparente à l'Atlas Saharien notamment par :

- son orientation générale : N 55⁰ E , direction dite « Atlassique » ;
- l'existence d'anticlinaux longs et étroits, plongeant et disparaissant très rapidement à leurs extrémités par de courtes fermetures périclinales et de ce fait, les structures se relient mais ne se prolongent pas (djebel Ben Hammade, djebel Serguine). Transversalement de vastes aires synclinales peu tectonisées séparent ces anticlinaux.

Au Sud, la terminaison orientale des monts de Chellala est marquée par une ligne de failles qui ceinture les reliefs jurassiques. Cette dernière qui constitue un accident majeur est appelée « faille

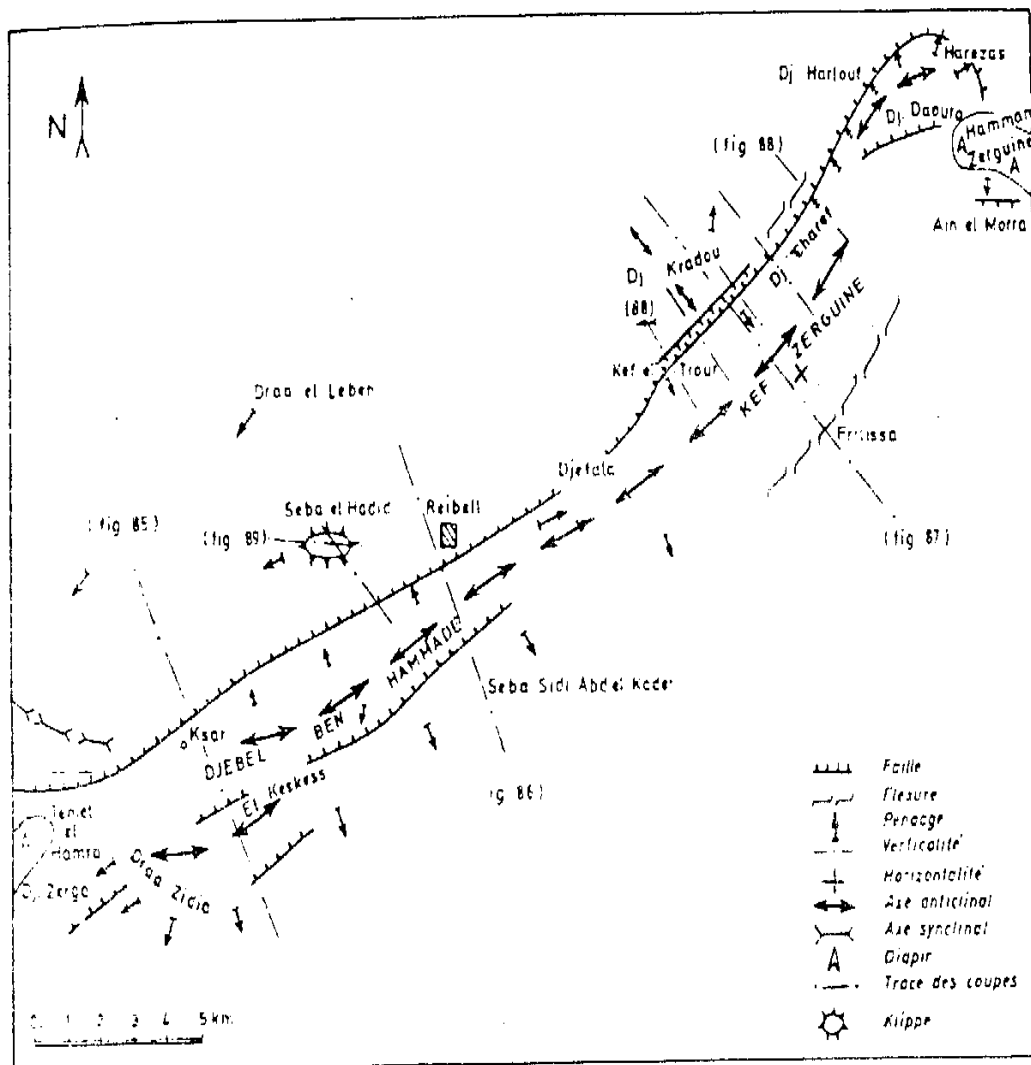


Fig n° 5: Schéma structural n°1 de la zone d'étude [13].

ces accidents abaissent très sensiblement le compartiment septentrional.

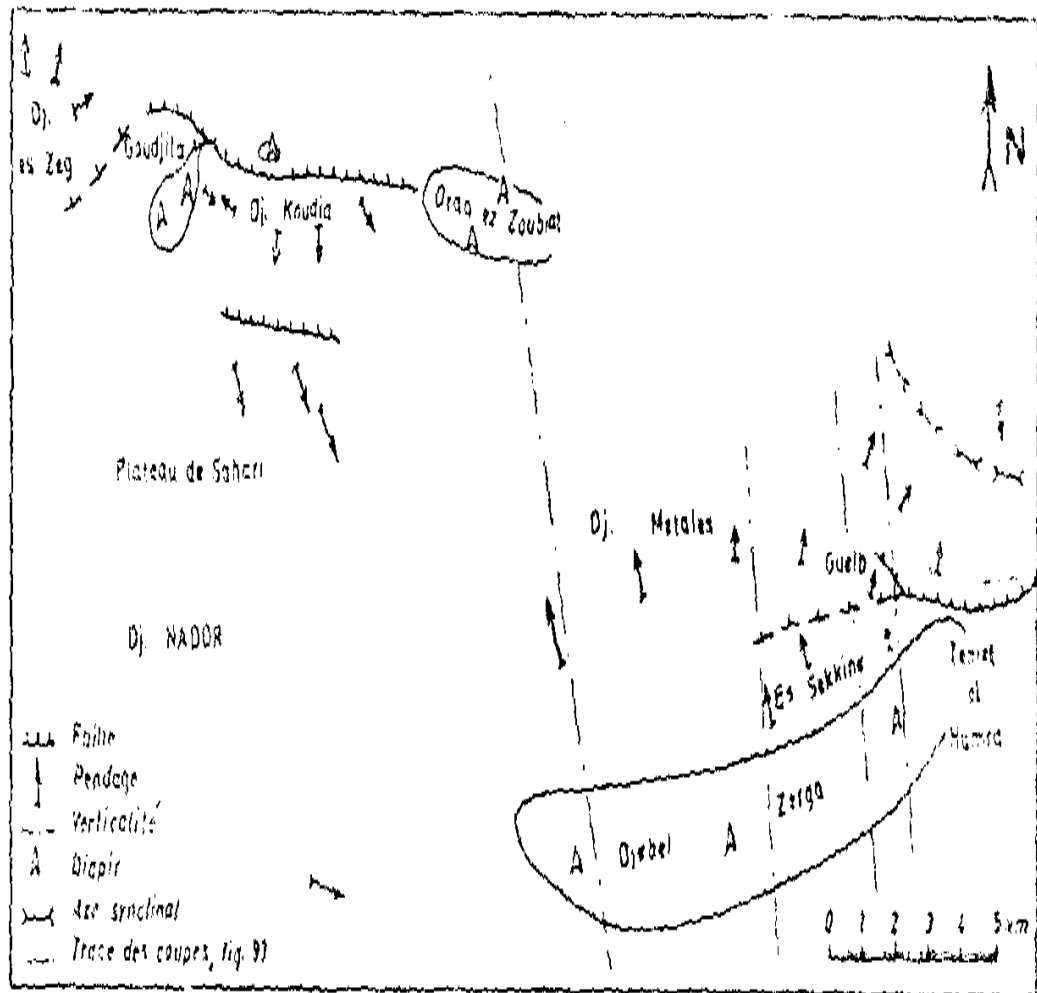


Fig n° 6: Schéma structural n° 2 de la région d'étude [13].

de Chellala». Elle s'étend sur plus de 40 km de direction N 70° E. Cette faille a pour effet d'isoler et de surélever les reliefs du Jurassique au-dessus du Crétacé inférieur en une sorte de horst « horst de Serguine », lequel a dû être décollé de son substratum. . C'est à la faveur de cette rupture qu'a pu se manifester le diapir triasique [13].

A ce niveau, le Miocène repose en discordance angulaire sur les formations du Jurassique, donnant une structure synclinal avec des pendages variant de 10° à 15° NE et SW. La tectonique cassante qui a affecté la région et surtout matérialisée par l'accident NW-SE, longeant le flanc Nord de l'anticlinal des monts de Chellala provoquant un réseau de failles sensiblement parallèles à cet accident, un autre accident transversal de direction NW-SE interrompt la continuité de la chaîne de Chellala.

Le pendage des formations jurassiques varie de 10° à 70° avec des directions générales NW-SE.

Au djebel Ben Hammad (1100m), les dolomies sont subhorizontales et à Sebaâ El Hadid (1022m), leur pendage est faible (10° SE).

Au Nord de djebel Sekkine, ces dolomies présentent des pendages qui varient entre 60 et 70° NW.

Il existe trois directions de failles pour l'ensemble de la chaîne de Chellala :

- accident sensiblement WSN-NE,
(N60° –N80°), fréquence = 28% ;
- Accident approximativement NW-SE,
(N120° –N140°), fréquence = 12% ;
- Accident approximativement NE-SW,
(N80° –N40°), fréquence = 10%.

Grâce à la plasticité, la mobilité du trias et en faveur des dislocations importantes des roches que le diapirisme gypso—salin s'est manifesté, on retrouve ce style tectonique plus particulièrement au niveau des djebel Metales et djebel Es-Sekkine.

Sa présence dans notre région permet d'expliquer l'existence d'accidents tectoniques très importants.

L'âge de la mise en place est anti-Miocène. L'absence de sel (gypse, halite) à la surface du sol est due à leur dissolution par les eaux lors de la transgression miocène.

Cette absence de sel n'est pas généralisée, car non loin de la surface du sol sa présence est mise en évidence au niveau de petites sources à eau saumâtre. Après le Miocène, ces diapirs ont continué leur activité attestée par des formations très récentes.

Remarque : Deux directions principales et 04 directions secondaires des fissures affectent les formations d'étude :

1.2.2.1. Directions principales :

- Djebel Ben-Hammade, djebel Es Sekkine (N70°-N80°), fréquence :29%
- Djebel Charef, djebel Kradou (N60°-N70°), fréquence :37%

1.2.2.1. Directions secondaires :

- Djebel Es Sekkine Teniet El Hamma (N110°-N120°), fréquence 10% .
- Djebel Ben Hammade (N20°-N40°), fréquence 11%.
- Djebel Charef (N40°-N60°), fréquence 15%.
- Djebel Kradou (N120°-N140°), fréquence 7%.

L'étude tectonique et structurale a montré que la direction dominante des failles est N60° E et que les anticlinaux sont bien comparables à celles de l'Atlas saharien. Ceci, permet de suggérer que la tectonique affectant notre zone d'étude et ses environs sont influencés par l'accident Nord atlasique [13].

1.2.3. Aperçu Paléogéographique :

Au Trias inférieur la présence de niveau détritiques montre la fin de l'orogénèse hercynienne. La fin du Trias est marquée par la transgression liasique qui a subsisté durant tout le Jurassique donnant naissance à d'énormes séries carbonatées. On assiste par la suite à une régression néocomienne du Crétacé inférieur.

L'alternance de calcaires et de grés d'âge Valanginien ou Barrémien est à l'origine.

L'Aptien est marqué par une sédimentation caractérisée par une intercalation de faciès suivants ; des dépôts marins carbonatés ; des dépôts lagunaires, de grés et de gypses et des dépôts continentaux formés de grés.

Durant tout l'Albien la sédimentation est de type continentale. Elle est formée de grés riches en bois férilisés et silicifiés. Au dessus des grés de l'Albien et après la transgression cénomaniennne, on assiste à une sédimentation carbonatée d'origine marine qui persistera jusqu'à la fin du Turonien. Après la régression sénonienne, cette région connaîtra une dernière invasion marine : C'est la transgression d'âge Miocène, qui donnera naissance successivement à une sédimentation de type néritique et littorale.

1.3. L'hydrogéologie (fig.7 ;8 ;9 ;10) :

L'étude hydrogéologique de cette région [51 ; 52 ; 53] nous a permis de distinguer des formations géologiques qui sont susceptibles d'être aquifères et qui sont représentées ci-après :

- la nappe aquifère dans les dépôts du quaternaire :
 - l'horizon des dépôts alluviaux ;
 - l'horizon des dépôts coluviaux ;
- l'horizon aquifère des dépôts non démembrés du Pliocène-Quaternaire inférieur ;
- les eaux souterraines dans les dépôts du Miocène ;
- les eaux souterraines dans les dépôts d'Oligocène ;
- l'horizon aquifère dans les dépôts du Turonien ;
- l'horizon aquifère dans les dépôts de l'Albien ;
- les eaux souterraines dans les dépôts de l'Aptien ;
- l'horizon aquifère dans les dépôts du Barrémien ;
- le complexe aquifère du Valangino-Hauterivien ;
- l'horizon aquifère dans les dépôts du Tithonique ;
- l'horizon aquifère dans les dépôts du Kimméridgien ;
- les eaux souterraines dans les dépôts du complexe Callovo-Oxfordien.

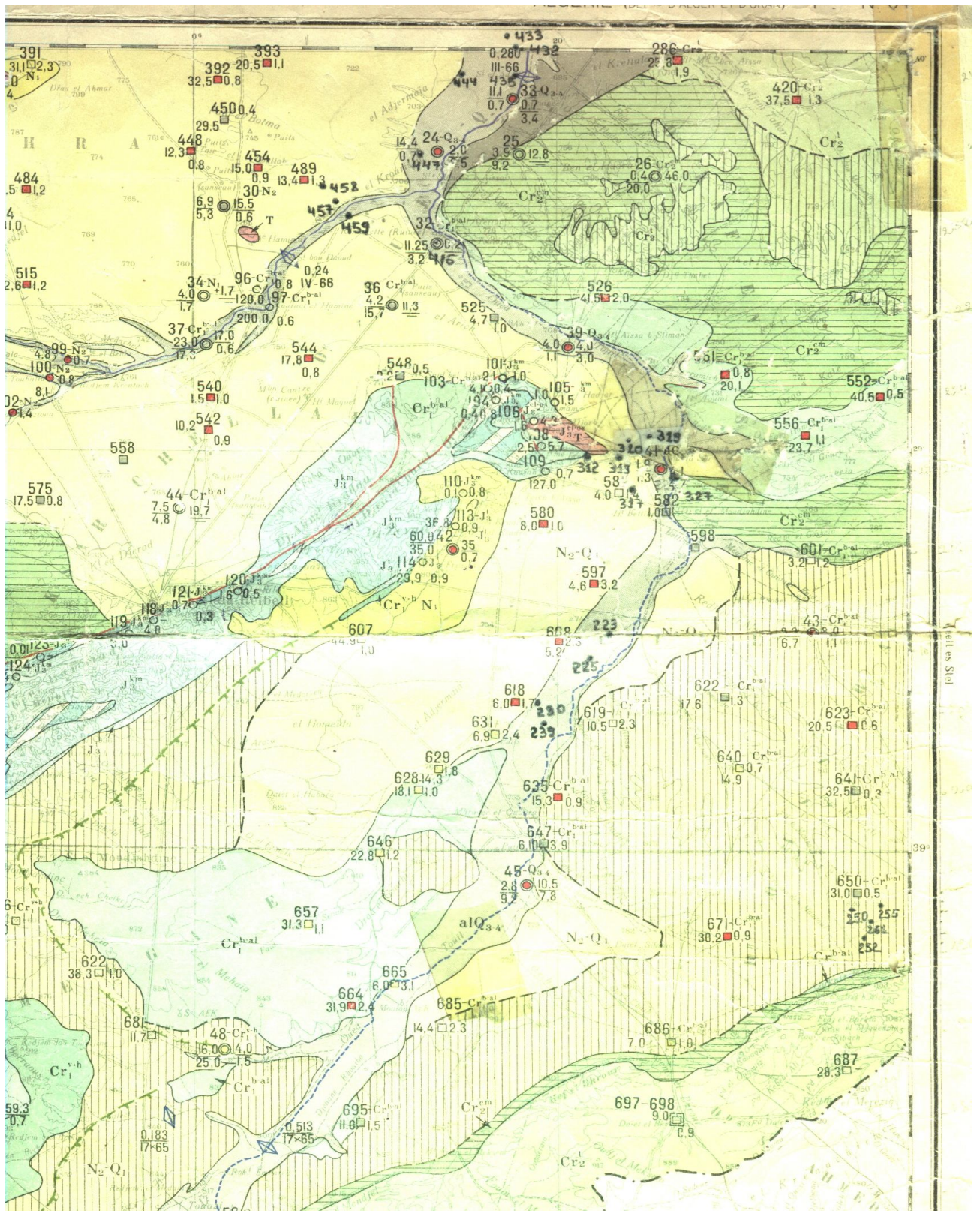


Fig n°7 : Carte hydrogéologique de la zone d'étude .[52]

Ech :1/200 000

I-EXTENSION DES HORIZONS AQUIFERES OU DES COMPLEXES

I. Распространение водоносных горизонтов или комплексов

| | |
|-------------------------------------|---|
| alQ₃₋₄ | <p>HORIZON AQUIFERE ABONDANT EN EAU DANS LES DEPOTS ALLUVIAUX DU CONTEMPORAIN ET DU QUATERNAIRE SUPERIEUR LES DEBITS DES SONDEGES JUSQU'A 14,4 l/sec</p> <p>Водообильный водоносный горизонт в аллювиальных отложениях современного и верхнечетвертичного возраста. Дебиты скважин до 14,4 л/сек.</p> |
| al-1Q₂ | <p>HORIZON AQUIFERE D'UNE FAIBLE ABONDANCE EN EAU DANS LES DEPOTS ALLUVIAUX - LACUSTRES DU QUATERNAIRE MOYEN. LES DEBITS DES PUIES MOINS 0,1 l/sec</p> <p>Слабоводообильный водоносный горизонт в аллювиально - озерных отложениях среднечетвертичного возраста. Дебиты колодцев менее 0,1 л/сек.</p> |
| N₂-Q₁ | <p>HORIZON AQUIFERE ABONDANT EN EAU DANS LES DEPOTS DU PLOCENE - QUATERNAIRE INFERIEUR LES DEBITS DES PUIES ET DES SONDEGES JUSQU'A 1,5 l/sec.</p> <p>Водообильный водоносный горизонт в отложениях плиоцен - нижнечетвертичного возраста. Дебиты колодцев и скважин до 1,5 л/сек.</p> |
| N₁ | <p>COMPLEXE AQUIFERE D'UNE FAIBLE ABONDANCE EN EAU DANS LES DEPOTS DU MIOCENE INFERIEUR. LES DEBITS PREPONDERANTS DES SOURCES JUSQU' A 1,5 l/sec.</p> <p>Слабоводообильный водоносный комплекс в отложениях нижнего плиоцена. Преобладающие дебиты родников до 1,5 л/сек.</p> |
| Pg₃ | <p>HORIZON AQUIFERE D'UNE FAIBLE ABONDANCE EN EAU DANS LES DEPOTS D'OLIGOCENE LES DEBITS DES SOURCES MOINS D' 1,0 l/sec.</p> <p>Слабоводообильный водоносный горизонт в отложениях олигоцена. Дебиты родников менее 1,0 л/сек.</p> |
| Cr₂¹ | <p>HORIZON AQUIFERE D'UNE FORTE ABONDANCE EN EAU DANS LES DEPOTS DU TURONIEN. LES DEBITS DES SOURCES JUSQU'A 65,0 l/sec.</p> <p>Сильноводообильный водоносный горизонт в отложениях туронского яруса. Дебиты родников до 65,0 л/сек.</p> |
| Cr₁^{1a1} | <p>HORIZON AQUIFERE D'UNE FORTE ABONDANCE EN EAU DANS LES DEPOTS DU BARREMIEN, DE L'APTIEN ET DE L'ALBIEN. LES DEBITS DES SOURCES ET DES SONDEGES JUSQU'A 120 l/sec.</p> <p>Сильноводообильный водоносный горизонт в отложениях барремского, аптского и альбского ярусов. Дебиты родников и скважин до 120,0 л/сек.</p> |
| Cr₁^{v-h} | <p>COMPLEXE AQUIFERE D'UNE FAIBLE ABONDANCE EN EAU DANS LES DEPOTS DU VALANGENIEN ET DU GOTERIVIEN. LES DEBITS DES SOURCES JUSQU'A 2 l/sec.</p> <p>Слабоводообильный водоносный комплекс в отложениях валанжинского и готеривского ярусов. Дебиты родников до 2,0 л/сек.</p> |
| J₃¹ | <p>HORIZON AQUIFERE D'UNE FORTE ABONDANCE EN EAU DANS LES DEPOTS DU TITHONIQUE. LES DEBITS DES SOURCES ET DES SONDEGES JUSQU'A 60 l/sec.</p> <p>Сильноводообильный водоносный горизонт в отложениях титонского яруса. Дебиты родников и скважин до 60,0 л/сек.</p> |
| J₃^{1m} | <p>HORIZON AQUIFERE D'UNE FORTE ABONDANCE EN EAU DANS LES DEPOTS DU KIMERIGENIEN. LES DEBITS DES SOURCES DANS LE DOMAINE D'ALIMENTATION JUSQU'A 5 l/sec. DANS LE DOMAINE DE LA DECHARGE JUSQU'A 130 l/sec.</p> <p>Сильноводообильный водоносный горизонт в отложениях кимериджского яруса. Дебиты родников в области питания до 5,0 л/сек. в области разгрузки до 130,0 л/сек.</p> |

Fig n° 8: Légende de la carte hydrogéologique.[52]

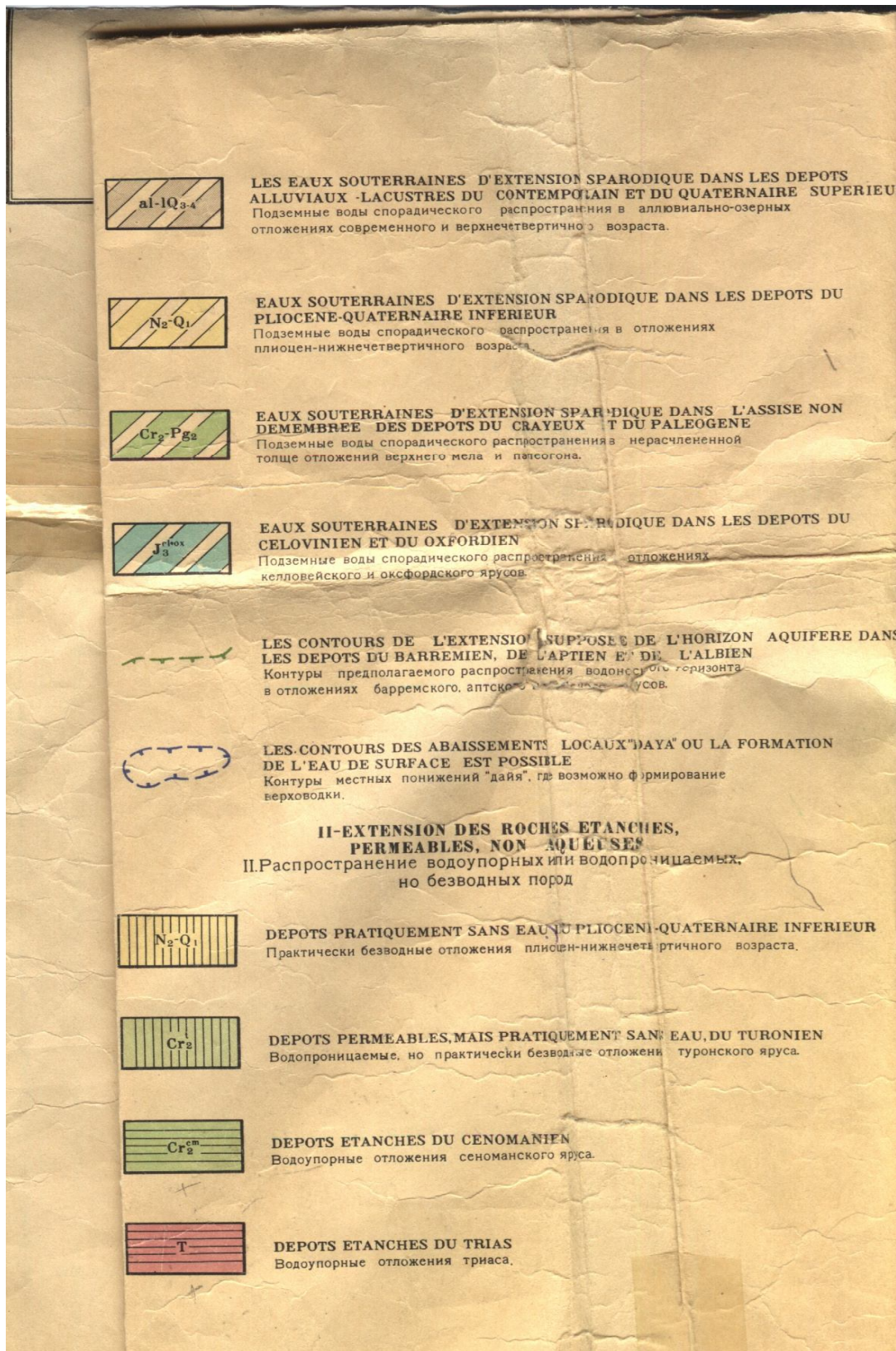


Fig n° 9: Légende de la carte hydrogéologique.[52]

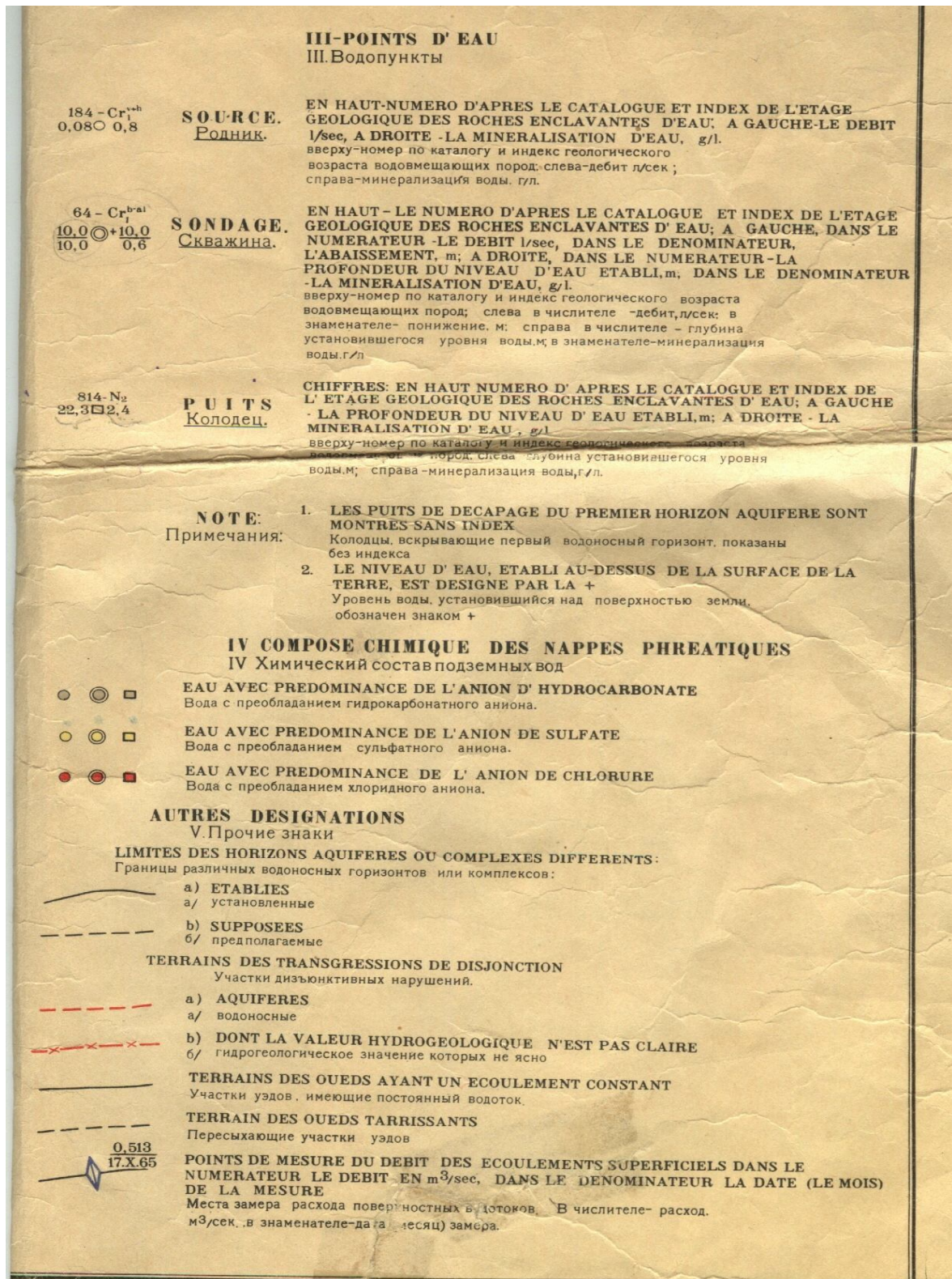


Fig n° 10: Légende de la carte hydrogéologique.[52]

1.3.1. Nappe aquifère dans les dépôts du Quaternaire :

1.3.1.1. L'horizon aquifère des dépôts alluviaux :

L'horizon aquifère des dépôts alluviaux est un horizon moins développé dans la région car il n'est localisé que dans la vallée de l'oued Touil dont la largeur s'élève à 2-3 km environ. Ces alluvions (poudingues, sable limoneux, limon avec du gravier) peuvent être considérées dans leur ensemble comme perméable.

La puissance de la couverture s'accroît de 2,5-3m à 10-15m au fur et à mesure de l'éloignement du lit.

Dans le secteur où l'oued Touil est traversé par la chaîne montagneuse de Chellala et jusqu'au poste de Bel Kheitar, les dépôts alluviaux reposent sur les terrains barrémiens albiens, aptiens et, partiellement, cénomaniens. En aval de Bel Kheitar, les alluvions reposent sur des argiles de Miocène. L'alimentation de la nappe aquifère est mélangée. Elle s'effectue par drainage des horizons aquifères plus profonds et par infiltration des précipitations atmosphériques sur la superficie de l'étendue de cette nappe.

Les eaux souterraines sont essentiellement déchargées par évaporation dans les secteurs de leur gisement peu profond (jusqu'à 2,5-3 m) et par le drainage par les cours d'eau superficiels. L'écoulement des eaux souterraines est Nors-Est le long de la vallée.

1.3.1.2. L'horizon aquifère des dépôts colluviaux :

Les dépôts colluviaux constituent les plaines accumulatives développées sur les rives de l'oued Touil et dans la cuvette de Zénina.

Les roches réservoirs sont présentées par des passées et lentilles de gros matériels détritiques différemment roulé, par des sables, sables limoneux et limon.

La puissance de l'horizon aquifère est différente, de 1-2m jusqu'à 10-15m et bien plus.

Les eaux souterraines sont essentiellement alimentées par les précipitations atmosphériques ; cependant dans certains secteurs elles sont suralimentées par des venues d'eau à partir des horizons aquifères localisés plus profond. Le déchargement de cet aquifère se fait dans les alluvions de l'oued ou par évaporation. L'écoulement des eaux souterraines est orienté dans la direction des drains principales.

1.3.2. L'horizon aquifère des dépôts non démembrés du Pliocène-Quaternaire inférieur :

Les roches réservoirs sont représentées par une assise des grès, argiles et conglomérats alternés. La puissance des passées de conglomérats et de calcaires augmente dans la direction de l'oued Touil où ces dépôts forment la vallée sur creusée de la rive gauche. L'assise de l'horizon aquifère en rive droite de l'oued Touil est surtout formée par des calcaires et brèches.

La puissance de l'horizon aquifère varie de 5-10m à 20-45m. L'horizon est alimenté par infiltration des précipitations atmosphériques dans les limites de l'extension de l'horizon, et par des eaux venant des horizons aquifères plus profond dans les zones de contact directs.

Dans son ensemble , la direction des eaux souterraines est orientée à l'Est, mais près des drains naturelles elle varie fonction de la situation des dernières.

1.3.3. Les eaux souterraines dans les dépôts du Miocène :

Dans la partie Nord (la rive droite de l'oued Nahr Ouassel) les roches réservoirs sont présentées par des passées de calcaires, de grès et de marnes, renfermées par les argiles.

La direction de l'écoulement des eaux souterraines est Nord-Est, c'est à dire , vers les vallées des oueds Touil et Nahr Ouassel où elles sont partiellement déchargées.

En rive droite de l'oued Nahr Ouassel l'horizon aquifère est alimenté par le déversement des eaux souterraines emprisonnées dans les dépôts Plio-Quaternaires inférieur. Dans les endroits d'affleurement des terrains perméables miocènes a lieu l'infiltration des précipitations atmosphériques.

1.3.4. Les eaux souterraines dans les dépôts d'Oligocène :

L'horizon aquifère d'Oligocène est développé au-delà de la limite nord du territoire étudié . Dans les secteurs de la région au sud de l'oued Nahr Ouassel constitués par des terrains d'Oligocène, aucune présence des eaux n'est pas révélée.

1.3.5. L'horizon aquifère dans les dépôts du Turonien :

Les roches réservoirs sont présentées par des gros calcaires fissurés, prédominant surtout dans la partie inférieur de l'assise. Les dépôts imperméables cénomaniens servent de couches d'étanchéité inférieure ; le substratum imperméable supérieur est constitué par les dépôts pliocènes.

Cet aquifère est alimenté par infiltration des précipitations atmosphériques dans les parties extrêmes de la structure et passant au régime artésien, il est déchargés dans la vallée de l'oued Touil qui met au jour les dépôts turoniens dans les cotes les plus basses.

1.3.6. L'horizon aquifère dans les dépôts de l'Albien :

Cet aquifère est étudié en rive droite de l'oued Touil et dans la région de Zénina. En rive gauche de l'oued Touil l'aquifère albien faiblement développé est mis à découvert par les forages seulement entre la chaîne de montagne de Chellala et la vallée de l'oued Ouerq.

Les roches réservoirs sont présentées partout par des grés fins, faibles et de dureté moyenne, constituant parfois les couches d'une puissance jusqu'à 50m séparées par des argiles.

Généralement, cet aquifère est alimenté par les venues d'eau du côté de l'Atlas saharien et par infiltration des précipitations dans les zones à surface libre. Les eaux souterraines sont essentiellement déchargés au-delà des limites du territoire étudié ; le déchargement partiel a lieu dans les parties de l'extension de l'aquifère le long des vallées où les grés albiens sont en contact avec les dépôts moins âgés. La direction générale de l'écoulement des eaux souterraines est Nord et Nord-Est.

1.3.7. Les eaux souterraines dans les dépôts de l'Aptien :

La structure de l'assise aquifère et les caractéristiques hydrologiques (d'infiltration) des roches réservoirs déterminent le rôle de l'horizon aquifère aptien dans le complexe barrémien-albien.

Les éléments les plus perméables de l'assise aquifère aptienne sont les passées de grés d'une puissance de 20m d'environ renfermées entre les marnes, calcaires et argiles. Les marnes et les calcaires sont stratifiés et fissurés. L'aquifère de l'Aptien joue le rôle d'un mur faiblement perméable entre les horizons aquifères barrémien et albien succédant leurs particularités des régimes chimiques et de niveau.

1.3.8. L'horizon aquifère dans les dépôts du Barrémien :

Cet aquifère , le plus répandu sur le territoire étudié, est plus abondant en eau parmi les horizons aquifères du Crétacé.

Les roches enclavantes d'eau sont présentées par des grés de granulométrie hétérogène, quartzeux, à intercalation de gros grains et galets du quartz ; le ciment est calcaire, plus rarement calcaréo-argileux de dureté moyenne.

Grâce aux conditions d'alimentation et de la décharge, la superficie de l'extension de l'horizon aquifère barrémien se divise en deux zones séparées par la chaîne montagneuse de Chellala.

1.3.8.1. Au Nord des montagnes de Chellala :

cet aquifère est alimenté par des précipitations atmosphériques sur les versants du plateau jurassique où les grès viennent au jour. La décharge s'effectue par l'écoulement des sources Aïn Rmel et Aïn Hamin, ainsi que par les forages.

Dans la partie axiale des structures élevées, dont l'origine est due à la pénétration des roches triasiques, l'horizon aquifère barrémien se caractérise par une surface libre ; dont la direction est à l'Ouest de la source Aïn Rmel.. son caractère hydraulique change et l'horizon passe au régime artésien.

1.3.8.2. Dans la zone Sud limitée par la chaîne de montagnes de Taguine :

l'aquifère barrémien est alimenté par infiltration en rive gauche de l'oued Touil où les affleurements des grès s'observent jusqu'à la limite Est du plateau Taga ; outre cela, cet aquifère est suralimenté par les venues d'eau du Sud. La décharge partielle a lieu dans la vallée de l'oued Touil où les dépôts des alluvions de faciès du lit reposent directement sur les grès du Barrémien.

Vu l'apparition de l'assise calcaréo-argileuse de l'Aptien, l'horizon aquifère y passe au régime artésien.

Le cours des eaux souterraines est orienté du Sud-Ouest au Nord-Est.

1.3.9. Le complexe aquifère du Valangino-Hauterivien :

L'étude de ce complexe ne concernait que la partie inférieure dans la région de la cuvette de Zénina. Ces dépôts (calcaires, calcaire-marno, marnes, argiles) forment un ensemble semi-perméable. La superficie des terrains affleurants Valanginà-Hauteriviens est peu considérable.

La zone d'alimentation est localisée à 30-40 km au Sud-Ouest de Zénina, la direction de l'écoulement des eaux souterraines est Nord-Est.

1.3.10. L'horizon aquifère dans les dépôts du Tithonique :

L'horizon aquifère emprisonné par les dépôts tithoniques du Jurassique supérieur est largement répandu sur le territoire situé au Sud de la chaîne de montagnes de Chellala.

Les roches réservoirs sont représentées par des calcaires, par les dolomies, plus rarement par des grès. Les couches sont alternées avec des argiles et marnes qui jouent le rôle de substratum imperméable relatif.

Le rapport de puissance sommaire des couches perméables et imperméables est proche à 2.

L'horizon aquifère est alimenté dans les limites du plateau Jurassique Taga où a lieu l'accès libre des précipitations atmosphériques dans les dépôts du Tithonique. Il est mis à découvert par les puits à la profondeur allant jusqu'à 10 m. Les cotes absolues de la surface des eaux souterraines dans la région intéressée sont à 1100m, mais dans la direction Est et Nord-Est elles baissent brusquement ce qui témoignent de l'écoulement difficile des eaux souterraines du territoire du plateau Jurassique. La direction principale de l'écoulement des eaux souterraines est Nord-Est et Est.

Dans la zone de transit, l'horizon aquifère tithonique est suralimenté par les venues d'eau à partir de l'horizon aquifère sous-jacent à régime artésien renfermé dans les dolomies kimméridjiennes du Jurassique supérieur ; ce phénomène est essentiellement caractéristique pour les périmètres voisins des accidents tectoniques.

La décharge partielle des eaux souterraines s'effectue par l'écoulement des sources sur le flanc Est de la chaîne de montagnes de Chellala.

Tenant compte de la nature des roches réservoirs, des conditions intenses de l'échange d'eau et de la fissuration élevée des roches dans cette zone, il ne faut pas attendre l'augmentation de la transmissivité de l'horizon aquifère dans sa partie centrale. Ce facteur permet de ranger l'horizon aquifère tithonique au nombre des sources non perspectives pour l'alimentation en eau.

1.3.11. L'horizon aquifère dans les dépôts du Kimméridgien :

Cet aquifère des dépôts du Kimméridgien est l'un des plus abondant en eau dans la région décrite parmi d'autres horizons aquifères jurassiques supérieur.

Les dépôts du Kimméridgien sont largement étendus dans la partie Ouest de la région et constituant également les structures synclinales des montagnes de Chellala.

Partout, dans les limites des affleurements les roches réservoirs sont représentées par les dolomies massives, fissurées à un degré différent, cavernueuses, dont l'épaisseur varie de 150m, dans la partie occidentale de la région, à 350-400m dans les montagnes de Chellala. Les dolomies sont alternées avec les passées de marnes et d'argiles, dont l'épaisseur dans la partie Nord de la région est peu notable ; selon les données des études de 1965 l'épaisseur s'accroît étant accompagnée par le changement total de la composition lithologique du complexe.

L'horizon aquifère du Kimméridgien est caractérisé par la présence de deux zones différentes d'après le caractère hydraulique, la profondeur des eaux souterraines mise à découvert et le degré de karstification des dolomies.

- La zone extrême à régime libre est étendue à l'Ouest sous forme d'une bande le long du flanc Sud du méga anticlinal de Chellala et vient au jour sur le plateau Taga où la superficie des affleurements des terrains kimméridgiens excède 500km².

La profondeur du plan des eaux souterraines sur le versant des montagnes de Chellala est de 10 à (40-70) m ; sur le plateau Taga la profondeur de 10 est prédominante.

- La zone à régime libre développée au Sud-Est de la zone à régime artésien, est caractérisé par l'augmentation brusque de la profondeur de gisement de l'horizon aquifère Sud et Nord-Est. Vu le pendage du relief dans la même direction le niveau piézométrique des eaux s'établi au-dessus de la surface de la terre.

La zone principale de l'alimentation de la partie étudiée de l'horizon aquifère du kimméridgien est localisée dans les limites du plateau Taga. L'alimentation s'effectue par l'infiltration des précipitations.

L'aquifère reçoit l'alimentation supplémentaire sur le versant Sud-Est de la chaîne montagneuse de Chellala.

La décharge des eaux souterraines s'effectue par l'écoulement des sources sortant dans la partie Est de la chaîne montagneuse de Chellala, ainsi que par le déversement des eaux dans les horizons aquifères plus jeunes, ce qui est dû à la situation plus élevée de la surface piézométrique des eaux souterraines du Kimméridgien et à la présence des zones de fissuration élevée liées avec les ruptures tectoniques.

La direction de l'écoulement des eaux souterraines est Nord –Est (vers la région de décharge)

Le degré de fissuration et de karstification des dolomies baisse brusquement des parties extrêmes au centre de la nappe aquifère.

Il importe d'étudier à part la région de l'extension de l'horizon aquifère du Kimméridgien située au Sud-Ouest et au Nord du village de Chellala (crête Ben Hammade).

Les eaux souterraines y sont emprisonnées par des dolomies du Kimméridgien constituant le noyau du synclinal d'une superficie de 50 km².

La région est isolée du champ principal de l'extension du Kimméridgien car suivant la périphérie du plis dans sa base presque partout on observe les affleurements des argiles et es marnes du complexe Callovo-Oxfordien.

Les eaux souterraines sont fermées par les précipitations atmosphériques tombant sur ce territoire.

1.3.12. Les eaux souterraines dans les dépôts du complexe Callovo-Oxfordien :

Une brève caractéristique des eaux souterraines ne peut être donnée que pour la partie supérieure du complexe où dans l'assise argileuse on rencontre des passées de calcaires, de marnes et de grés saturées d'eau.

Sur le versant Sud-Ouest de la crête Ben Hammade, par les puits, on a découvert des eaux faiblement salées renfermées par les calcaires et marnes du complexe Callovo-Oxfordien.

Les passées aquifères des grés sont découvertes à l'Est du village de Chellala par un forage dans l'assise argileuse à la profondeur allant de 126 à 147 m. Le niveau des eaux souterraines s'établit à la profondeur de 71,5m.

L'exploitation des eaux souterraines des dépôts Callovo-Oxfordiens pour l'alimentation en eau du village de Chellala est possible par les forages isolés.

Les sources dénotent une fois de plus la présence de la cassure importante dans laquelle se faisaient la pénétration des roches triasiques.

Résultats d'analyse de laboratoire des échantillons des roches [53]

| Numéro du forage/ profondeur finale du forage [m] / altitude z [m] | Coordonnées X Y | Profondeur du prélèvement de l'échantillon [m] | Granulométrie (Dimensions des grains, en mm) | | | | | | | | | | |
|---|-----------------------|---|---|-------|------|------|-------|----------|----------|----------|-----------|----------------|--------|
| | | | >1 0 | 5-10 | 2-5 | 1-2 | 0,5-1 | 0,25-0,5 | 0,1-0,25 | 0,05-0,1 | 0,01-0,05 | 0,005- 0,01 | <0,005 |
| 223 / 18,50 739,40 | 485,78 211,24 | 12,0-13,0 | | | | | 0,58 | 5,37 | 23,94 | 11,79 | 8,50 | 10,69 | 39,13 |
| | | 13,0-14,5 | | | | | 0,41 | 3,32 | 13,24 | 10,49 | 2,66 | 21,30 | 48,58 |
| 225 / 20,50 741,30 | 484,63 210,28 | 12,0 | | | | | 0,17 | 0,72 | 5,97 | 5,74 | 4,05 | 5,63 | 77,72 |
| 230 / 15,00 748,30 | 482,32 208,36 | 12,0 | | | | | 0,00 | 4,22 | 3,34 | 0,18 | 11,77 | 5,37 | 74,10 |
| 239 / 30,60 748,46 | 482,31 207,64 | 12,5-13,5 | | | | | 0,91 | 6,77 | 17,23 | 20,38 | 11,87 | 6,10 | 36,74 |
| 312 / 82,00 745,60 | 484,13 219,52 | 55,0 | | | | | 0,16 | 0,12 | 5,62 | 58,12 | 12,83 | 7,93 | 15,22 |
| | | 65,0 | | | | | | | 0,08 | 31,58 | 38,33 | 8,49 | 21,52 |
| | | 70,0 | 1,50 | 11,11 | 8,54 | 0,49 | 2,42 | 3,41 | 8,03 | 24,43 | 4,85 | 35,29 | |
| | | 76,0 | 0,52 | 0,93 | 1,04 | | 2,40 | 5,78 | 7,81 | 28,48 | 11,20 | 41,84 | |
| 313 / 156,15 728,60 | 485,97 219,80 | 14,0 | | | | | 1,70 | 11,34 | 29,84 | 23,67 | 9,68 | 4,05 | 19,72 |
| | | 22,0 | | | | | 0,08 | 0,41 | 1,23 | 3,11 | 23,44 | 22,38 | 49,35 |
| | | 24,0 | | | | | 0,53 | 1,03 | 3,38 | 15,39 | 28,15 | 8,53 | 42,99 |
| | | 26,5 | | | | | 0,82 | 3,21 | 14,02 | 17,53 | 16,98 | 6,49 | 40,95 |
| 317 / 25,50 728,00 | 486,61 218,03 | 14,0 | | | | | | 2,2 | 18,5 | 21,0 | 3,2 | 8,3 | 46,8 |
| | | 18,0 | | | | | 0,1 | 2,5 | 21,8 | 21,2 | 5,7 | 4,4 | 44,3 |
| | | 20,5 | | | | | 0,1 | 3,3 | 28,8 | 21,7 | 3,8 | 5,1 | 37,2 |
| 319 / 18,00 720,40 | 487,16 220,81 | 22,5 | | | | | | 0,2 | 2,2 | 27,2 | 21,2 | 49,2 | |
| 320 / 16,50 724,40 | 486,23 220,48 | 13,0 | | | | | | 0,5 | 8,0 | 18,0 | 24,1 | 15,9 | 33,5 |
| 325 / 16,50 724,10 | 488,18 218,92 | 12,0 | | | | | 0,1 | 2,1 | 31,8 | 36,5 | 8,2 | 3,8 | 17,5 |

Tableau n° 5. Granulométrie de la zone 1

| Numéro du forage/ profondeur finale du forage [m] / altitude z [m] | Coordonnées X Y | Profondeur du prélèvement de l'échantillon [m] | Granulométrie (Dimensions des grains en mm) | | | | | | | | | | |
|---|-----------------------|---|--|------------|------------|------------|--|--|---|--|-----------------------------|---------------------------|------------------------------|
| | | | >10 | 10-5 | 5-2 | 2-1 | 1-0,5 | 0,5-0,25 | 0,25-0,1 | 0,1-0,05 | 0,05-0,01 | 0,01- 0,005 | <0,005 |
| 250 / 150,0 821,70 | 496,76 198,05 | 16,0-16,2 26,0-27,0 36,0-37,0 42,0-43,0 46,0-47,0 | 0,6 | 0,2 0,1 | 0,1 | | 0,4 1,7 1,1 2,5 | 0,1 45,4 52,3 31,6 74,1 | 0,3 48,1 39,9 53,4 15,0 | 6,0 5,3 5,8 13,9 7,4 | 23,5 | 36,2 | 33,9 |
| 252 / 259,65 845,40 | 497,07 196,66 | 9,4-16,0 17,25-22,4 22,4-26,25 26,25-38,5 47,0-52,0 52,0-56,0 56,0-59,0 | 24, 4 | | 0,3 | 0,4 | 1,2 0,7 0,4 1,9 1,0 1,6 | 34,0 78,8 41,0 32,9 41,2 48,8 | 48,2 14,9 0,7 49,0 33,0 47,2 41,5 | 16,6 5,6 18,1 9,6 7,1 10,6 8,1 | 2,7 | 21,5 | 56,8 |
| 255 / 51,00 828,00 | 498,07 198,19 | 13,00 | 3,3 | 0,3 | | | 0,3 | 13,7 | 36,9 | 22,7 | 0,0 | 3,7 | 19,1 |
| 261 / 58,00 832,20 | 497,52 197,48 | 26,0-27,0 | | | | | | 0,2 | 1,3 | 18,1 | 22,9 | 9,6 | 47,9 |
| 351 / 261,3 1071,80 | 487,60 126,68 | 260,0 | | | | | 0,2 | 6,7 | 48,6 | 19,1 | 7,6 | 0,6 | 17,2 |
| 354 / 142,0 1058,70 | 487,78 127,39 | 89,0-94,6 130-140 | | | 0,2 0,3 | 0,7 4,0 | 3,8 5,6 | 25,7 41,8 | 30,0 32,5 | 6,9 15,7 | 6,9 | 8,2 | 24,5 |
| 357 / 123 1073,2 | 488,50 122,77 | 34,0 51,0 74,5 102,5 110,0 | | | | | 0,4 0,4 0,2 | 0,4 0,8 1,7 6,4 0,8 | 27,0 16,6 21,9 64,6 16,6 | 48,8 20,3 29,4 28,8 36 | 7,6 12,1 22,9 21,6 | 2,6 11,4 4,4 5,7 | 13,6 38,4 19,3 19,3 |

Tableau n°6: Granulométrie de la zone 2

| Numéro du forage/ fondeur finale du forage [m]/ altitude z [m] | Coordonnées X Y | Profondeur du prélèvement de l'échantillon [m] | Granulométrie (Dimensions des grains en mm) | | | | | | | | | | |
|--|-----------------------|---|--|------|-----|-----|-------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| | | | >10 | 10-5 | 5-2 | 2-1 | 1-0,5 | 0,5-0,25 | 0,25-0,1 | 0,1-0,05 | 0,05-0,01 | 0,01-0,005 | <0,005 |
| 416 / 97,2 702,10 | 477,12 230,12 | 18,0-21,0 | | | | | | 2,32 | 7,12 | 16,44 | 24,12 | 3,20 | 46,80 |
| 432 / 16,4 482,50 | 480,86 239,54 | 14,50 | | | | | | | 0,64 | 15,08 | 11,44 | 36,84 | 36,00 |
| 433 / 12,7 683,50 | 480,20 239,78 | 12,00 | | | | | 23,80 | 44,48 | 19,72 | 0,56 | 0,64 | 1,28 | 9,52 |
| 444 / 16,0 492,50 | 478,18 238,14 | 14,50 | | | | | 0,36 | 5,48 | 14,96 | 34,32 | 10,8 | 1,92 | 32,16 |
| 457 / 59,0 706,19 | 472,79 231,818 | 12,50 | | | | | 0,2 | 4,9 | 22,6 | 24,9 | 11,4 | 14,0 | 22,0 |
| 458 / 66,0 711,59 | 472,30 232,32 | 13,0 18,0 | | | | | 46,7 0,6 | 30,4 11,4 | 10,6 26,5 | 5,9 24,9 | 2,6 8,2 | 1,3 10,2 | 2,5 18,2 |
| 459 / 40,0 720,51 | 473,27 231,30 | 12,0 14,50 16,00 18,00 | | | | | 2,56 | 0,08 3,32 0,52 0,40 | 9,80 24,56 2,72 4,12 | 18,32 25,68 20,76 27,08 | 15,88 8,24 23,48 19,04 | 13,36 29,40 16,52 16,52 | 41,08 8,72 36,00 32,84 |

Tableau n°7: Granulométrie de la zone⁵³.

CHAPITRE 2

EVALUATION ET MOBILISATION DES RESSOURCES HYDRIQUES

2.1. GENERALITES :

2.1.1. Eau ; sujet d'actualité :

L'eau devenant une ressource de plus en plus rare, les pays et les organismes de développement s'efforcent de déterminer comment gérer au mieux cet élément vital.

L'eau est essentielle à la survie de l'homme, au développement économique et à l'environnement. En fait, peu d'autres ressources touchent autant d'aspects de l'économie, de la santé et de l'environnement.

L'eau polluée peut tuer. Chaque année les maladies hydriques causent la mort de 3 millions de personnes (des enfants surtout) et plus de 1 milliard d'indispositions passagères par an. Les efforts déployés pour fournir des installations adéquates d'eau et d'assainissement, en particulier pour les pauvres, restent insuffisants. Sur les 5,4 milliards d'habitants de la planète, plus de 1 milliard ne dispose pas d'eau potable et 1,7 milliard vit dans des conditions d'hygiène insuffisantes .[26]. Ces problèmes ne sont pas circonscrits aux pays en développement .

Par l' usage qui en fait dans l'agriculture et l'industrie , et par l'énergie que fournit l'hydroélectricité , l'eau joue un rôle vital dans l'économie . Les cultures irriguées fournissent le tiers des quantités récoltées dans le monde .

Une grande partie du patrimoine naturel (des écosystèmes du littoral aux marécages) dépend de l'eau . En réduire la qualité ou la quantité peut avoir des effets désastreux sur l'environnement et la biodiversité .

A l'évidence , des ressources en eau de qualité sont indispensables au progrès économique et à la sauvegarde d' un milieu naturel , gage même du progrès économique . Pourtant la plupart des pays ne gèrent pas leurs ressources en eau de façon efficace et équilibrée et cette situation est intenable . Tout d' abord , la population mondiale augmente rapidement , en particulier dans les zones urbaines (de 5,3 milliards d'habitants en 1990 , elle passera à 8milliards en 2025). La demande de vivre va donc augmenter et , avec elle , les besoins d'irrigation [26] .

Par ailleurs, les quantités disponibles d'eau de bonne qualité diminuent, contaminée par les rejets domestiques, l'industrie, les produits chimiques utilisés pour l'agriculture et la mauvaise utilisation des terres.

Le manque d'eau est déjà un problème majeur dans nombre de pays et, d'ici 2025, la situation deviendra critique dans certains pays si la demande globale ne diminue pas .

Un hydrologue suédois réputé, Malin Falkenmark, a calculé qu'il fallait au minimum 100 litres d'eau par jour et par habitant ($36,5 \text{ m}^3$ par an) pour protéger la santé, et qu'il en fallait généralement 5 à 20 fois plus pour répondre aux besoins de l'agriculture, de l'industrie et de la production d'énergie. Selon lui, lorsque la quantité d'eau douce renouvelable disponible tombe au dessous de 1700 m^3 par personne, le pays éprouve des difficultés d'eau périodiques; en dessous de 1000 m^3 , la rareté devient chronique [26].

Selon les projections démographiques à moyen terme de l'ONU, quelques 34 pays auront moins de 1000 m^3 d'eau renouvelable par habitant en 2025 [26].

2.1.2. La gestion de l'eau dans le Maghreb :

Au cours des dernières décennies, les pays du Maghreb (Algérie, Maroc et Tunisie) ont beaucoup investi dans des ouvrages hydrauliques en réponse aux sérieux problèmes que leur pose, outre de maigres ressources en eau, un climat aride ou semi-aride, avec des précipitations très variables et irrégulières. Ils ont construit, avec des résultats remarquables, des barrages, des canaux, des puits et des réseaux d'irrigation et de distribution d'eau. Entre 1970 et 1990, les surfaces irriguées ont augmentées de près de 80%. Ces travaux ont stimulé la croissance économique et légèrement atténué les méfaits de la sécheresse [38].

Cependant, ces pays abordent une phase critique. Si la demande reste inchangée, les ressources en eau disponibles seront presque entièrement épuisées d'ici 15 à 20 ans. La demande devrait en outre continuer d'augmenter rapidement par suite de la croissance démographique et de l'expansion des économies. Il deviendra, en même temps, de plus en plus coûteux de construire des barrages et d'utiliser les eaux souterraines, tandis que la pollution généralisée de l'eau amenuisera encore les ressources [38].

Les pays du Maghreb doivent donc modifier rapidement leur façon de gérer l'eau. Devant le manque d'eau renouvelable, l'Algérie, la Libye et la Tunisie se sont mises à exploiter les eaux souterraines (fossiles) non renouvelables du Sahara. Toutefois, même si on fait abstraction du coût du transport sur de longues distances vers les centres de consommation, ce n'est pas une solution durable.

2.1.3. Environnement – eau :

La Négligence des problèmes de santé publique, de la qualité de l'eau et d'environnement est remarquable. En général les pays ne se soucient pas assez de la qualité de l'eau et de la lutte contre la pollution. La mauvaise gestion des ressources entraîne non seulement de graves problèmes de santé publique, mais aussi la dégradation généralisée des sols et de l'eau. Beaucoup de pays n'ont pas adopté de normes leur permettant de maîtriser correctement la pollution de l'eau ou n'ont pas de moyens pour faire respecter la législation en vigueur.

2.1.4. Prise de conscience de l'importance de l'eau :

Les mesures à prendre pour résoudre les problèmes de la gestion des ressources en eau ont été au centre de nombreux débats internationaux. A la conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement tenue à Rio de Janeiro en juin 1992, les pays membres ont approuvés des politiques qui mettent l'accent sur une gestion intégrée des ressources en eau « où l'eau est considérée comme une partie intégrante de l'écosystème, une ressource naturelle et un bien économique et social » [38].

Priorité est donnée aujourd'hui au comportement économique, aux mesures destinées à remédier aux défaillances du marché et de l'état, et aux technologies qui permettent une utilisation plus efficace de l'eau.

Parmi les objectifs que les pays adoptent de plus en plus, c'est mettre en place un schéma directeur tenant compte des considérations intersectorielles et environnementales . Le schéma directeur permet de s'assurer que les conséquences intersectorielles et environnementales des investissements et des utilisations de l'eau sont prises en compte et que les problèmes causés par une gestion fragmentaire peuvent être résolus grâce à des mécanismes appropriés de coordination.

2.2. Le bilan d'eau :

Le mouvement de l'eau dans le sol et le sous sol est une étape d'un grand circuit sur la terre, cycle global de l'eau. L'infiltration renouvelle l'eau des réservoirs souterrains et entretient, par son circuit dans les aquifères, le débit de l'écoulement souterrain.

Le bilan d'eau est la balance comptable entre les débits des apports et ceux des écoulements dans le système hydrologique (bassin hydrologique, bassin hydrogéologique ou aquifère) délimité et au cours d'une durée moyenne déterminée.

Dans le but de mieux comprendre l'origine de l'eau souterraine et les modalités de son écoulement dans le sous sol il est utile de les situer dans le cadre de la répartition et de la circulation de l'eau sur la terre. C'est à dire d'analyser le cycle global de l'eau. Cette étude permet également de définir les bilans d'eau. Le cycle de l'eau est étroitement lié à ceux de l'énergie et du transport des substances minérales. [17]

Deux aspects sont considérés : La quantité d'eau stockée avec son rôle régulateur et la circulation de l'eau assurant les échanges, c'est à dire le renouvellement (tableau 8.

| Grands Réservoirs | Volumes d'eau stockés | | | |
|--|-----------------------|---------|-----------------|-------|
| | Totaux | | Eau douce | |
| | Km ³ | % | Km ³ | % |
| OCEANS | 1.340.000.000 | 96,4 | | |
| GLACES Calottes glaciaires, Glaciers et neiges Éternelles | 24.000.000 | 1,72 | 24.000.000 | 60 |
| EAUX SOUTERRAINES Aquifères : | | | | |
| tranche 0-200 m | 10.000.000 | | | |
| tranche 0-2000 m | 24.000.000 | 1,72 | 16.000.000 | 40 |
| tranche 0-5000 m | 60.000.000 | | | |
| Humidité du sol | 16.500 | 0,001 | 16.500 | 0,04 |
| EAUX DE SURFACE DES CONTINENTS | | | | |
| Lacs, grands réservoirs | 176.400 | 0,013 | 90.000 | 0,22 |
| Lits des cours d'eau | 2.120 | 0,00015 | 2.120 | 0,005 |
| ATMOSPHERE | 13.000 | 0,001 | 13.000 | 0,03 |
| EAU BIOLOGIQUE | 1.120 | 0,0001 | 1.120 | 0,003 |
| GLOBE Hydrosphère | 1.390.000.000 | | 40.000.000 | |

Tableau 8 : Capacités des grands réservoirs d'eau à la surface de la terre. D'après les travaux soviétiques (UNESCO. 1978)

Le cycle de l'eau assure la circulation de l'eau sous 3 états : vapeur, liquide et solide, sur la terre. Les précipitations, sur la surface du sol, se répartissent en 2 fractions inégales. L'une s'écoule en surface alimentant les eaux de surface : rivières, lacs et océans. L'autre pénètre, par infiltration, dans le sol et le sous-sol ou, après des pertes par évapotranspirations, elle recharge les aquifères, dont les sources contribuent à l'écoulement. Au cours de toutes ces phases, la reprise de l'eau par évaporation et évapotranspiration engendre les nuages, puis les précipitations, fermant ainsi le cycle.

Le réservoir des glaces des calottes glacières, glaciers et neiges éternelles, représente 60% des eaux douces terrestres. Le réservoir souterrain, sur les continents, constitué des aquifères représenterait 40% du volume des eaux douces [17. Il constitue une importante quantité d'eau bien distinguée géographiquement (tableau 9).

| Grands continents | Surfaces [millions de Km ²] | Stocks d'eau [10 ⁶ Km ³] | | | Totaux |
|-------------------|---|---|------------|-------------|--------|
| | | (0à100)m | (100à200)m | (200à2000)m | |
| Europe | 10,5 | 0,2 | 0,3 | 1,1 | 1,6 |
| Asie | 43,5 | 1,3 | 2,1 | 4,4 | 7,8 |
| Afrique | 30,1 | 1 | 1,5 | 3 | 5,5 |
| Amérique du Nord | 24,2 | 0,7 | 1,2 | 2,4 | 4,3 |
| Amérique du Sud | 17,8 | 0,3 | 0,9 | 1,8 | 3 |
| Australie | 8,9 | 0,1 | 0,2 | 0,9 | 1,2 |
| Totaux | 135 | 3,6 | 6,2 | 13,6 | 23,4 |

Tableau 9 : *Volumes d'eau stockée dans le réservoir souterrain des grands continents.*

D 'après les travaux soviétiques (UNESCO, 1978.

La circulation de l'eau à la surface de la terre ou cycle global de l'eau assure les échanges entre les quantités d'eau stockées sous 3 états, vapeur, solide et liquide dans 5 réservoirs (tableaux 8, 9 et figure 11).

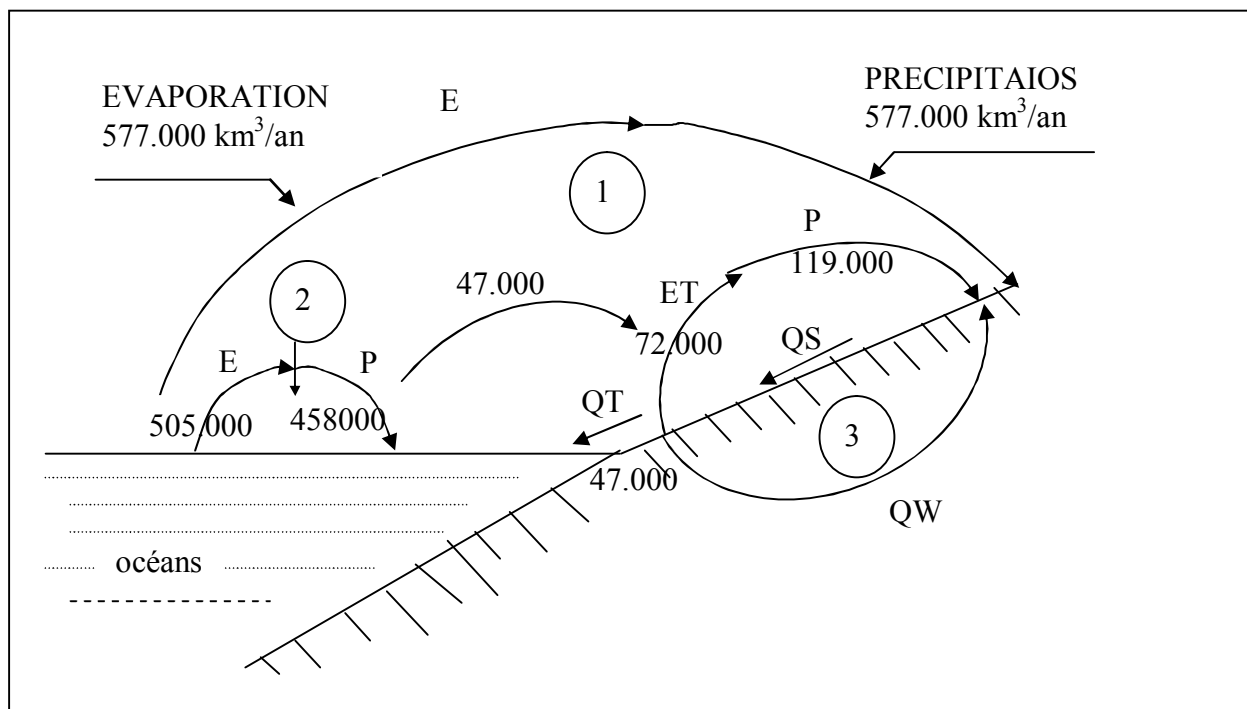


Fig. 11 : Cycle de l'eau et quantités d'eau en mouvement en km³/an.

Le cycle global (1) se subdivise en cycle de 2^{ème} ordre, océanique (2) et continental. (3). Des échanges de 47.000 km³/an équilibrent le bilan de ces 2 cycles secondaires.

Les évaluations précises de la capacité des grands réservoirs et des principales composantes du cycle de l'eau, sont difficiles. C'est pourquoi les données varient avec les auteurs (tableau 10). Les imprécisions les plus grandes concernent les eaux souterraines [17].

| Continents | Volumes d'eau en milliers de Km ³ . | | | | | | | | |
|---------------------------|--|------|------|------------------------------|------|------|--------------|------|------|
| | Baumgartner 1975 | | | Monographie soviétique, 1978 | | | Lvovich 1974 | | |
| | P | ET | QT | P | ET | QT | P | ET | QT |
| Europe | 6,6 | 3,8 | 2,8 | 8,3 | 5,3 | 3,0 | 7,2 | 4,1 | 3,1 |
| Asie | 30,7 | 18,5 | 12,2 | 32,2 | 18,1 | 14,1 | 32,7 | 19,5 | 13,2 |
| Afrique | 20,7 | 17,3 | 3,4 | 22,3 | 17,7 | 4,6 | 20,8 | 16,6 | 4,2 |
| Australie | 7,1 | 4,7 | 2,4 | 7,1 | 5,6 | 2,5 | 6,4 | 4,4 | 2,0 |
| Amérique du Nord | 15,6 | 9,7 | 5,9 | 18,3 | 10,1 | 8,2 | 13,9 | 7,9 | 6,0 |
| Amérique du Sud | 28,0 | 16,9 | 11,1 | 28,4 | 16,2 | 12,2 | 29,4 | 19,0 | 10,4 |
| Antarctique | 2,4 | 0,4 | 2,0 | 2,3 | 0 | 2,3 | - | - | - |
| Total pour les continents | 111 | 71 | 40 | 119 | 72 | 47 | 113 | 72 | 41 |
| OCEANS | 385 | 425 | -40 | 458 | 505 | -47 | 412 | 453 | -41 |
| MONDE | 496 | 496 | 0 | 577 | 577 | 0 | 525 | 525 | 0 |

Tableau 10 : Bilan global moyen annuel des grands domaines du cycle de l'eau : continents, océans et globe. D'après les documents publiés depuis 1970 (UNESCO, 1978).

Où,

P , précipitations ;

ET , évaporation ou évapotranspiration potentielle ;

QT , écoulement total naturel moyen.

Ainsi le cycle de l'eau dans la nature peut être représenté par la relation suivante :

$$P=E+V_e+V_i \quad (2.1.)$$

où,

E - l'écoulement;

V_e - l'évaporation ;

V_i - l'infiltration.

Cette relation caractérise, sous forme générale, le bilan hydraulique des portions isolées de la surface de la terre. Les grandeurs qui y entrent et leurs relations mutuelles ne sont pas constantes et dépendent du climat, du relief, de la nature de la végétation et des conditions géologiques.

2.3. Théorie de l'origine et de la formation des eaux souterraines :

Il y a plusieurs théories de l'origine des eaux souterraines. La théorie d'infiltration, l'une des plus anciennes, explique la formation des eaux souterraines par l'infiltration des précipitations atmosphériques dans les terrains. Cette théorie a été énoncée pour la première fois au 18^e siècle par le physicien Français Mariotte. Pendant longtemps, la théorie d'infiltration a été prédominante et universellement admise. Cependant avec l'accumulation des connaissances sur l'extension et la constitution des eaux souterraines dans les différentes conditions naturelles, ses faiblesses apparaissent.

A la fin du 19^e siècle et au début du 20^e de nouvelles théories ont été avancées. L'hydrogéologue Allemand O. Volger exprima l'idée que les eaux souterraines se forment en règle générale non pas par infiltration mais du fait de la pénétration de l'air dans les terrains et la condensation de la vapeur d'eau qu'il contient. Ainsi était formulée une nouvelle hypothèse de l'origine des eaux souterraines faisant intervenir la condensation.

Au début du 20^e siècle, la théorie juvénile de formation des eaux, avancée par le géologue Autrichien E. Suess, a reçu un accueil assez large. D'après elle, les eaux souterraines proviennent de la vapeur d'eau et des émanations gazeuses qui se dégagent du magma dans les profondeurs de la terre; en s'élevant vers les couches de la surface de l'écorce terrestre, elles se condensent et forment ce qu'on appelle les eaux juvéniles.

Il faut enfin citer encore une théorie connue dans la littérature sous le nom de théorie des eaux relictées. D'après cette théorie, les eaux souterraines des zones profondes sont des eaux résiduelles des bassins anciens qui ont été enterrés dans les terrains de remblaiement et ont conservé leur aspect primitif jusqu'à l'époque actuelle. Cette théorie a suscité des objections violentes de la part de la majorité des savants soviétiques. Ces derniers se penchent actuellement sur les problèmes de formation de différents types d'eaux souterraines ainsi que sur les lois de leur répartition dans l'écorce terrestre.

D'après les savants de différents pays, la prépondérance dans la formation des eaux souterraines peu profondes revient à l'infiltration des précipitations atmosphériques, à l'absorption des eaux de ruissellement, au processus de la condensation de la vapeur d'eau. Suivant la nature des terrains aquifères et les conditions climatiques, les eaux souterraines peu profondes peuvent être soit douces soit salées.

2.4. Identification hydrodynamique de l'aquifère :

2.4.1. Notions sur l'aquifère :

Un aquifère (acque = eau ; fera = je porte) est une formation hydrogéologique perméable permettant l'écoulement significatif d'une nappe d'eau souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables, par des moyens économiques.

L'aquifère est un système dynamique caractérisé par sa configuration et sa structure, les fonctions de son réservoir et ses comportements.

Sa configuration et sa structure permettent de distinguer 3 types hydrodynamiques :

- à nappe libre,
- à nappe captive,
- à nappe semi-captive.

L'aquifère est constitué de 2 phases principales en interactions : le réservoir et l'eau souterraine.

- Le réservoir par sa structure, remplit 3 fonctions vis à vis de l'eau souterraine : réservoir, conduite et milieu d'échanges géochimiques.

Phase solide, milieu poreux ou fissuré, constitue la trame de la structure, squelette solide ou matrice. (Exemples : grains de sable d'une formation sableuse, roche fissurée de la craie...)

- L'eau souterraine présente, en réponse à des incitations extérieures, 3 comportements : hydrodynamique (apports de quantité d'eau ou variation de pression ou de charge), hydrochimique (apports de chaleur, de substances minérales ou organiques) et

hydrobiologique (par les microorganismes). Ces comportements provoquent la régulation des débits de l'eau souterraine et déterminent sa qualité.

Phase liquide, dont la fraction mobilisable (eau gravitaire) constitue la nappe d'eau souterraine alimentant les sources, rivières et captages.

2.4.2. Configuration de l'aquifère. Types hydrodynamiques :

La configuration ou enveloppe porte sur ses dimensions et les caractéristiques de ses limites géologiques et hydrodynamiques ou conditions aux limites.

La base de l'aquifère, appelée substratum, est constituée par une formation hydrogéologique imperméable. Par contre sa limite supérieure est de 3 types :

- hydrodynamique avec fluctuations libres : aquifère à nappe libre ;
- géologique imperméable : aquifère à nappe captive ;
- géologique semi-captive : aquifère à nappe semi-captive.

2.4.2.1. Aquifère à nappe libre. Surface piézométrique (fig. 12) :

L'altitude du niveau d'eau dans un forage ou dans un puits est appelée niveau piézométrique, noté H. Souvent ce niveau est mesuré dans des ouvrages de petit diamètre, appelés piézomètres. L'ensemble des niveaux piézométriques, mesurés en différents points à une date donnée, détermine la surface piézométrique. Elle est représentée sur des cartes piézométriques par des courbes d'égal niveau piézométrique ou courbes hydroisohypes (figure 18).

La surface piézométrique constitue la limite supérieure de l'aquifère. C'est une limite hydrodynamique. Cette surface peut s'élever ou s'abaisser librement dans la formation hydrogéologique perméable (fluctuations de la surface piézométrique) d'où la dénomination d'aquifère à nappe libre. L'ancien terme d'aquifère phréatique (phreos = puits) parfois utilisé est déconseillé.

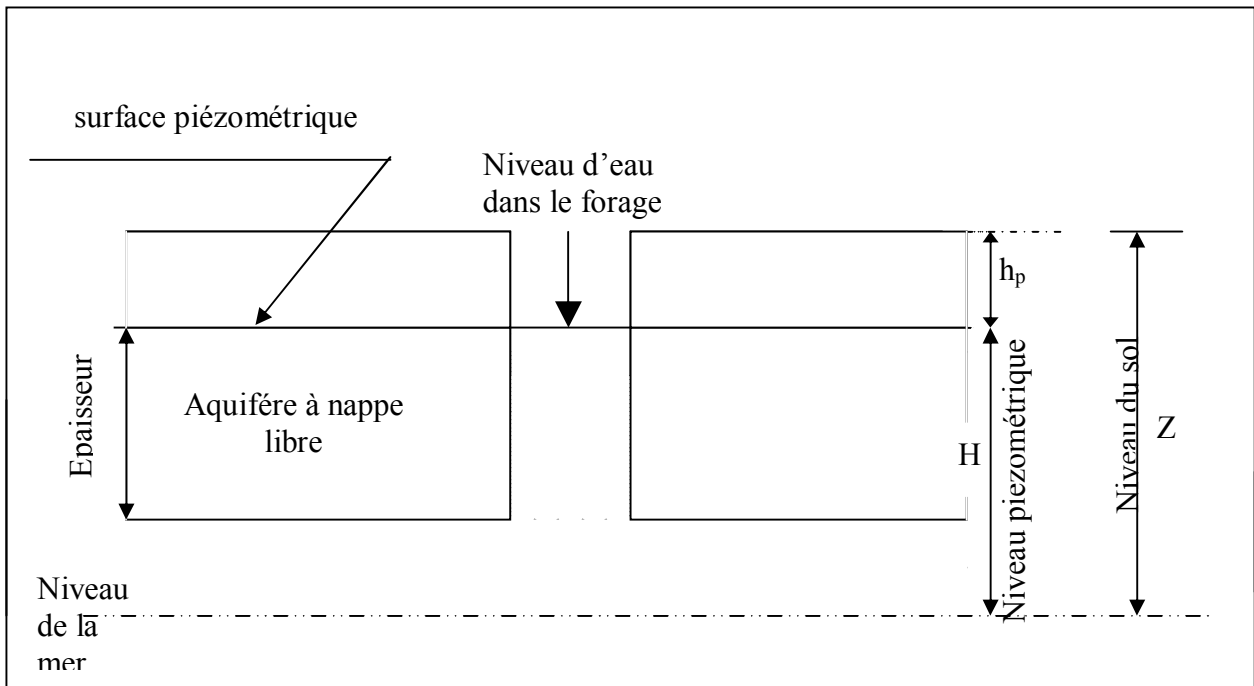


Fig. 12 : Aquifère à nappe libre. Surface piézométrique.

$$H=Z-h_p \quad (2.2.)$$

où

Z- altitude ;
 h_p - niveau statique ;
H- niveau piézométrique.

2.4.2.2. Aquifère à nappe captive :

Dans les aquifères plus profondes les eaux souterraines sont emprisonnées dans la formation hydrogéologique perméable, entre 2 formations imperméables fixes : le substratum à la base et le toit au sommet.

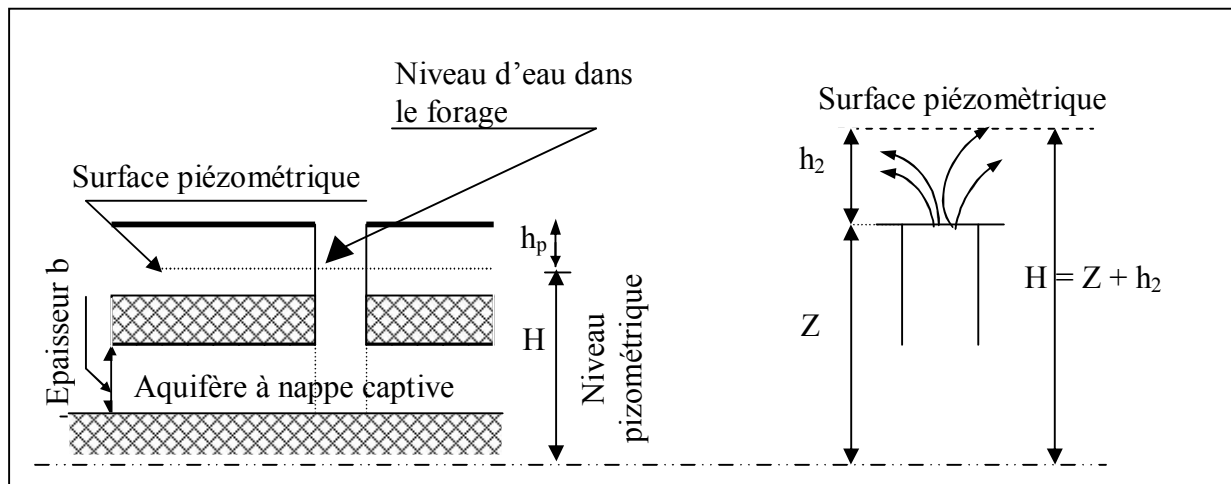


Fig 13 : Aquifère à nappe captive.

h_z - Niveau d'eau au dessus du sol.

Etant donné la situation en profondeur, l'aquifère (réservoir et eau) subit une pression, dirigée de haut en bas, égale au poids de la colonne de terrains de densité moyenne 2,5 (soit 2,5 bars par tranche de 10m) qui le surmonte jusqu'à la surface du sol. La pression atmosphérique étant négligeable, est équilibrée par la pression de couche ou de pore qui règne à l'intérieur de l'aquifère. Lorsqu'un sondage perce le toit de l'aquifère, la substitution au poids de la colonne de terrain de celui d'une colonne d'eau (densité 1) entraîne une chute de pression dans l'aquifère. D'où la décompression du réservoir et de l'eau qui est expulsée. Son niveau se stabilise à une altitude qui représente le niveau piézométrique, H , déterminée par la différence de charge entre la zone d'alimentation et l'ouvrage considéré. Ce type est l'aquifère à nappe captive.

Les eaux souterraines sont dites ascendantes. Si le niveau piézométrique se situe au dessus de la surface du sol, l'eau jaillit naturellement. C'est l'artésianisme.

Comme pour les aquifères à nappe libre, l'ensemble des niveaux piézométriques permet de tracer la surface piézométrique. Mais celle-ci, fictive, n'est pas matérialisée sur le terrain.

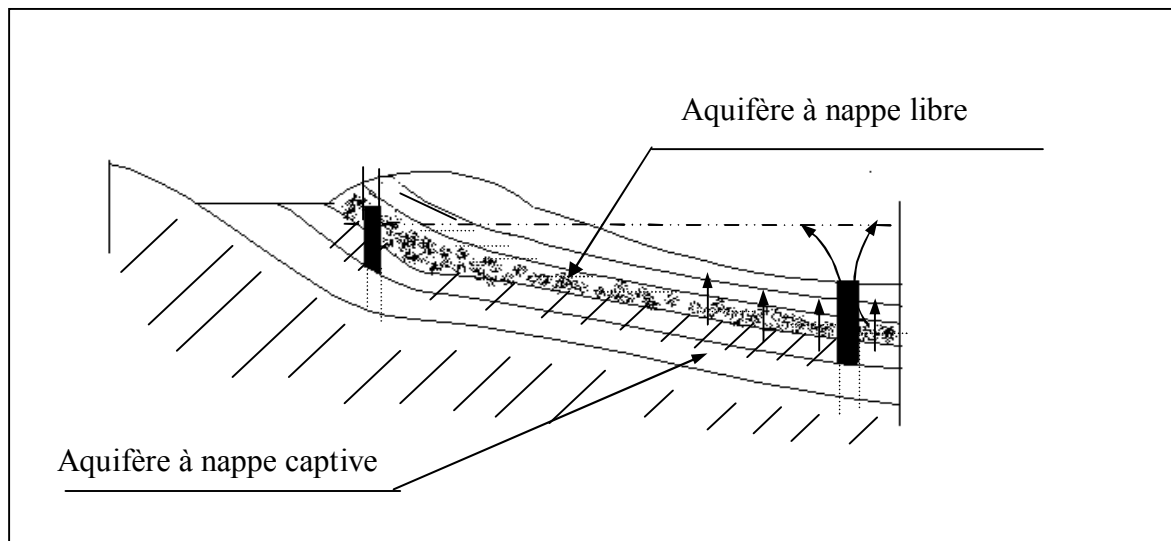
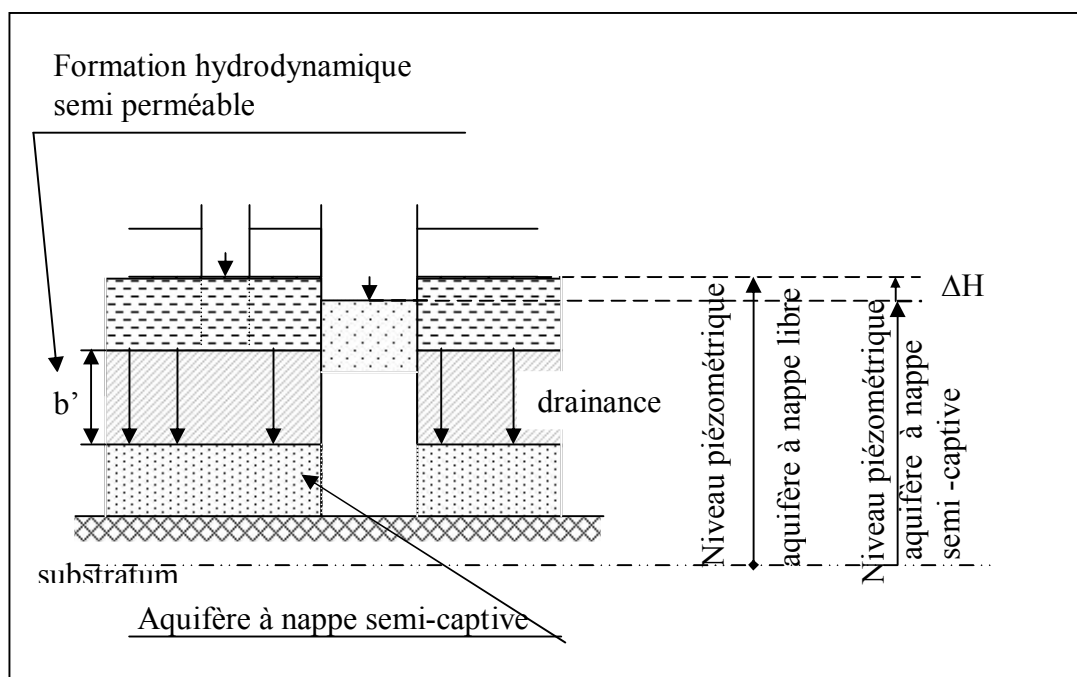


Fig 14 : L'artésianisme.

2.4.2.3. Aquifère à nappe semi-captive :

Le toit ou le substratum (ou les 2) de l'aquifère sont souvent constitués par une formation hydrogéologique semi-perméable. Celle-ci permet, dans certaines conditions hydrodynamiques favorables (différences de charges) des échanges d'eau (ou de pressions) avec l'aquifère superposé ou sous-jacent, appelé drainance. Ce phénomène implique un aquifère à nappe semi-captive.

Une combinaison de formations hydrogéologiques semi perméables intercalées entre des formations perméables, identifie un aquifère multicouche.



2.5. Le sable et le grès :

2.5.1. Le sable :

2.5.1.1. Description :

Le sable est formé de grains libres entre eux : c'est une roche meuble. Sa couleur est variable , blanche , rouge , jaune...

On distingue plusieurs sortes de sables :

- le sable de plage : il contient des grains transparents qui ne réagissent pas à l'acide mais qui raient le verre : ce sont des grains de quartz. Il renferme en plus, divers fragments ; sur certains de ces fragments l'acide provoque une forte effervescence, ce sont des débris de coquillages marins.

Un tel sable est appelé sable calcaire.

- le sable de l'oued : **il a une composition très variable mais en général, il renferme des grains de quartz de même couleur que la roche qui entoure l'oued.**

- le sable de l'erg : il est surtout formé de grains de quartz arrondis qui ne sont pas transparents mais opaques .

Le sable de l'oued et le sable de l'erg, très riches en grains de quartz sont des sables siliceux .

Il existe d'autres sables ; citons : les sables ferrugineux , les sables argileux....

Le sable est une roche formée de grains qui sont souvent de nature siliceuse.

Le sable se laisse traverser facilement par l'eau : c'est une roche perméable.

On comprend alors pourquoi les terrains sablonneux sont presque toujours secs et pauvres en végétation , seules les plantes à très longues racines peuvent y vivre . ces terrains pour être cultivables doivent être irrigués.

Le sable qui peut retenir les impuretés de l'eau boueuse est filtrant. L'eau d'une source qui aura traversé des terrains sablonneux , sera donc pure.

Le sable est une roche perméable et filtrante.

2.5.1.2. Origines des différentes sortes de sable :

Le sable de l'oued ou sable fluvial : les montagnes sont lentement détruites par les eaux qui circulent à la surface du sol. Ces eaux arrachent de très nombreux petits débris de roche , de plus elles séparent de gros blocs ,les isolent. Ces blocs vont être fragmentés en galets , puis en graviers et enfin en sable. Tous ces matériaux sont entraînés par les eaux , mais dès que la vitesse du courant diminue , les éléments se déposent ; d'abord les plus lourds et ensuite les plus fins . Ainsi se constituent bancs de sable fluviaux.

Le sable marin : les grains entraînés jusqu'à la mer par les oueds se mélangent à ceux qui provient de la destruction des falaises. Ces grains sont alors :

soit projetés sur le rivage par les vagues ils se mélangent alors avec les débris de coquillage pur former le sable de plage.

Soit entraînés au large , puis déposés sur les fonds marins en couches superposées .

Les grains de quartz du sable marin sont luisants et plus ou moins arrondis car ils ont été usés lors de leur transport par les fleuves et les courants.

Le sable éolien : au Sahara le sable des dunes provient de la dégradation (autrement destruction) des roches riches en quartz (granite, grès ...) qui affleurent dans le désert.

Les débris au cours de leur transport par le vent s'entrechoquent c'est pourquoi les grains de quartz sont ronds . lorsque le vent se calme , les grains se déposent et constituent les dunes .

Au bord de la mer , les vents qui soufflent du large vers la terre poussent le sable des plages vers l'intérieur ; il se forme des dunes littorales .

Le sable transporté par les eaux ou par les vents finit par se déposer .c'est une roche détritique.

Le sable est utilisé dans la maçonnerie . il sert aussi à la fabrication du verre : si l'on mélange du sable siliceux pur avec une substance chimique appelée carbonate de soude et du calcaire et qu'ensuite on chauffe le tout à 1300°C dans un four , on obtient un liquide visqueux et transparent qui en refroidissant donne du verre .

2.5.2 Le grès :

2.5.2.1. Description :

le grès une est roche compacte , diversement colorée. Il est formé de grains de sable collés les uns aux autres par du ciment.

Ce ciment est en général de la silice ou du calcaire parfois de l'argile ou des oxydes de fer ;suivant les cas on parlera de grès siliceux , de grès calcaire , de grès argileux et enfin de grès ferrugineux .Tous les grès sont poreux .

Le grès est une roche très répandue en Algérie . on le trouve souvent en bancs très épais ou strates (grès de TIARET, grès de MEDJENA , grès du TASSILI).

2.5.2.2. origine :

Le grès se forme dans le sable de deux manières différentes :

- Les eaux superficielles qui s'infiltrent et circulent dans les couches de sables dissolvent à la longue , dans la partie supérieure en peu de silice ou de calcaire (des coquillages par exemple).

La silice ou le calcaire se déposent plus bas entre les grains de sable qu'ils cimentent.

- Dans les régions à forte évaporation , l'eau chargée en silice ou en calcaire , qu'elle a dissous en profondeur, remonte dans le sable par capillarité (à la manière du café qui monte dans un morceau de sucre trempant à peine dans la tasse) .

L'eau s'évapore en arrivant vers la surface du sol , la silice ou le calcaire dissous se dépose alors et forme un ciment entre les grains de sable.

2.6. Qualité de l'eau :

Pour être réputée potable, une eau doit respecter certaines caractéristiques précisées dans une circulaire éditée par le Ministère de la santé.

2.6.1. Caractéristiques physiques :

Température : La température optimale des eaux de consommation se situe entre (9 et 12)°C ; il faut éviter de distribuer une eau à plus de 15°C. Les eaux souterraines ont généralement une température comprise entre (10 et 12)°C, mais les eaux profondes sont plus chaudes. Quand aux eaux de rivières, leur température est très variable suivant la saison (0 à 25°C dans les régions tempérées).

Éléments en suspension et colloïdes : Ces éléments donnent à l'eau une turbidité et une couleur. La turbidité est le contraire de la limpidité. On mesure ces 2 caractéristiques en y ajoutant des solutions et les résultats ne doivent pas dépasser une certaine limite afin que l'eau soit potable.

Éléments en solution : Bien que certains éléments en solution puissent influencer sur la couleur de l'eau, la plupart sont mesurés seulement par la minéralisation de l'eau et repérés par son odeur et sa saveur.

La minéralisation de l'eau est la mesure de sa concentration en sels solubles ; elle est généralement d'autant plus forte que l'eau a circulé plus profondément. Pour la plupart des eaux d'alimentation, la minéralisation est due de façon prépondérante à l'anion bicarbonate associé au cation calcium. On mesure la minéralisation en pesant l'extrait sec, qui ne doit pas excéder 2 grammes par litre. Il existe une correspondance entre la minéralisation et la résistivité électrique de l'eau en ohm par cm² sur cm.

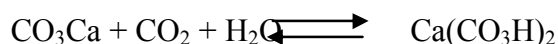
Les qualités organoleptiques de l'eau (saveur et odeur) sont dues à leur teneur en certains éléments qui la rendent désagréables à boire : fer, manganèse, chlore actif, phénol, chlorophénols (saveur) ; matières organiques, hydrogène sulfuré (odeur) ; (H₂S s'élimine par aération).

2.6.2. Caractéristiques chimiques :

Potentiel hydrogène : Le potentiel hydrogène ou pH d'une solution est le logarithme décimal de l'inverse de sa concentration en ions hydrogène ; il est inférieur ou supérieur à 7 suivant que l'eau est acide ou basique. Le pH des eaux naturelles est compris entre 5,5 et 10, les valeurs supérieures n'existent que dans l'eau de mer et les eaux minérales.

Dureté : La dureté de l'eau est essentiellement sa teneur en sels de métaux bivalents, principalement le calcium et le magnésium ; une teneur trop élevée nuit à la cuisson des légumes et à la bonne utilisation des savons ordinaires. La dureté est mesurée par le titre hydrotimétrique TH.

Agressivité : C'est la capacité de l'eau à attaquer le calcaire grâce au CO₂ libre qu'elle peut contenir, par la réaction d'équilibre :



Elle résulte d'un déplacement d'équilibre par addition de CO₂ à l'eau. Pour diminuer son agressivité, on ajoute à l'eau CO₃Ca ou CaO.

Éléments indésirables : Certains éléments ne peuvent être contenus qu'en faible quantité dans l'eau, soit pour des raisons techniques, soit à cause de leur mauvaise tolérance par l'organisme ou même de leur toxicité.

Selon les normes internationales de l'O.M.S (Organisation Mondiale de la Santé) les substances chimiques tolérées en concentration maximale admissible sont :

| | | |
|--------------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| -Matières solides totales :1500 mg/l | -Oxygène dissous minimum :5 mg/l | -PH :6,7 à 9,2 |
| -Fer : 0,1mg/l | -Phosphates :1mg/l | -Mercure : 0,001 mg/l |
| -Cuivre :0,05mg/l | -Silice : 20 à 40 mg/l | -Phénols :0,001 mg/l |
| -Manganèse : 0,5 mg/l | -Matières organiques < 2 g/l | -Fluor : 1mg/l |
| -Zinc : 5mg/l | -Plomb : 0,1 mg/l | -Dureté totale:500mg/l |
| -Calcium : 500mg/l | -Sélénium : 0,01 mg/l | -Nitrates : 50 mg/l |
| -Magnésium : 120 mg/l | -Arsenic : 0,05 mg/l | -Chlorures : 600 mg/l |
| -Sulfates : 400mg/l | -Cyanures : 0,05 mg/l | -Cadmium : 0,01 mg/l |

Tableau n° 11 : Normes de potabilité selon les normes internationales de l'O.M.S.

| Paramètres | Niveau Guide | Concentration Max.admissible | Concentration Min.requise |
|-------------------------------------|--------------|------------------------------|---------------------------|
| PH | 6,5 à 8,5 | 9,5 | 6 |
| Minéralisation totale mg/l | - | 4500 | - |
| Dureté totale | 35 | - | 10 |
| Calcium | 100 | - | 10 |
| Magnésium | 30 | 50 | 5 |
| Sodium | <20 | 100 | - |
| Potassium | ≤10 | 12 | - |
| Aluminium | - | 0,05 | - |
| Alcalinité | 30 | - | - |
| Sulfates | 5 | 250 | - |
| Chlorures | - | - | - |
| Nitrates | - | 50 | - |
| Nitrites | - | 0,1 | - |
| Ammoniaque | 0,05 | 0,5 | - |
| Azote kjeldahl | 0,05 | 0,5 | - |
| Silice | - | - | - |
| Substances extraites au Chloroforme | 0,1 | - | - |

Tableau n° 11 : Normes Européennes de potabilité..

2.6.3. Caractères bactériologiques :

L'eau potable ne doit contenir aucun germe pathogène. Les germes recherchés proviennent de contamination d'origine fécale et sont :

- bacille de coli ou Escherichia coli,
- entérocoque,
- clostridium sulfitoréducteur,
- bactériophages fécaux.

| Paramètres | Niveau Guide | Concentration Max.admissible |
|--|---------------------------|------------------------------|
| Oxygène dissous (O ₂ mg/l) | 50 | - |
| Oxydabilité O ₂ mg/l K MnO ₄ | 1 | 5 |
| D C O (O ₂ mg/l) | 20 | 40 |
| D B O ₅ (O ₂ mg/l) | 50% de la teneur initiale | - |

Tableau 13 : Facteurs bactériologiques.

| Paramètres | Niveau Guide | Concentration Max.admissible | Observation |
|----------------------------------|--------------|------------------------------|--------------------------------------|
| Couleur unité p ^l /mg | 5 | 2 | - |
| Turbidité mg/l | 5 | 10 | Détermination gustative et olfactive |
| Odeur (taux de dilution) | 0 | 2 | Détermination goût |
| Saveur , taux de dilution | 0 | - | Goût |
| Température(O° C) | 12°C | 25°C | - |

Tableau 14 : Facteurs organoleptiques.

| Paramètres | Niveau Guide | Concentration Max.admissible | Observation |
|---|--------------|------------------------------|---|
| Argent µg/l | - | 10 | - |
| Arsenic µg/l | - | 50 | - |
| Baryum µg/l | - | 100 | - |
| Cadmium µg/l | - | 5 | - |
| Cynaruresµg/l | - | 50 | - |
| Chrome total | - | 50 | - |
| Cuivre mg/l | - | 50 à 1500 | Au robinet Après 16 ^h de contact |
| Fluor mg/l | - | 700 à 1500 | - |
| Fer mg/l | 100 | 300 | - |
| Mercure mg/l | - | 1 | - |
| Manganèse mg/l | 20 | 50 | - |
| Nickel mg/l | 5 | 50 | - |
| Phosphore mg/l | 300 | 2000 | Après traitement |
| Plomb mg/l | - | 50 | - |
| Sulfate d'Hydrogène mg/l | - | 0 | - |
| Antimoine mg/l | - | 10 | - |
| Sélénium mg/l | - | 10 | - |
| Zinc mg/l | - | 100 à 2000 | 2000 après 16 ^h de contact |
| Huile miner | - | 10 | - |
| Hydrocarbure | - | 0,2 | - |
| Indice de phénol C ₆ H ₅ OH(µ)g/l | - | 0,5 | - |
| Détergents anionique lauryl,sulfate | - | 0,5 | - |
| Pesticide et produits apparents | - | <0,5 <0,1 | Au total par substance |
| Autres composés organiques monochlorés | - | 1,0 | Insecticide, herbicide, fongicide |

Tableau 15 : Teneurs en éléments indésirables toxiques.

| Paramètre | Bonne | Acceptable | Passable | Médiocre |
|------------------------------|-------|------------|----------|----------|
| Coliformes nbr/100ml | 50 | 5.000 | 50.000 | >5000 |
| E.coli | 20 | 2.000 | 20.000 | >20.000 |
| Streptocoques Fécaux | 20 | 1.000 | 10.000 | >10.000 |
| Ecarl biotique/indice normal | 1 | 3 | 5 | ≥7 |

Tableau 16 : Facteur microbiologique.

2.6.4. Analyses :

Les analyses complètes, nécessaires au choix d'un point d'eau, doivent être effectuées par un laboratoire de première catégorie ; les analyses plus sommaires, dites de surveillance ou de surveillance réduite peuvent être effectuées par des laboratoires de deuxième catégorie, moins bien équipés. Ces dernières analyses doivent être effectuées au moins 3 fois par an : au printemps, en été et en automne.

| Numéro du forage | Profondeur du prélèvement(m)/ Date | PH | Dureté totale/calcaire | Anions, mg/l | | | | Cations, mg/l | | | | Somme des anions et cations mg/l |
|------------------|------------------------------------|-----|------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------------------|-------------------|----------------------------------|
| | | | | HCO ₃ ⁻ | Cl ⁻ | SO ₄ ⁻ | total des anions | Ca ⁺⁺ | Mg ⁺⁺ | K ⁺ +Na ⁺ | Total des cations | |
| 252 | 117/ 1969 | 8.3 | 14.91/ 6.5 | 396.5 | 198.8 | 489.6 | 1084.9 | 94.2 | 124.0 | 170.0 | 388.2 | 1473.1 |
| | 75.0 /Octobre 1969 | 8.0 | 10.03 / 4.25 | 259.3 | 207.3 | 309.6 | 776.2 | 100.2 | 61.0 | 149.7 | 310.9 | 1087.1 |
| | 93.0/Octobre 1969 | 8.8 | 4.65 / 1.25 | 76.2 | 120.7 | 171.8 | 368.7 | 43.0 | 30.4 | 82.3 | 155.7 | 524.4 |
| 312 | 15.0 / 1970 | 7.6 | 19.54 / 6.50 | 396.5 | 435.2 | 654.7 | 1486.4 | 103.2 | 174.9 | 295.8 | 573.9 | 2060.3 |
| 416 | 3.45 / 1970 | 8.1 | 12.60 / 5.40 | 329.4 | 495.2 | 158.4 | 983 | 69.2 | 111.1 | 240.4 | 420.7 | 1403.7 |

Tableau 17 : Résultats d'analyse des échantillons d'eau de la zone d'étude [53].

2.7. Etude expérimentale en milieu poreux (loi de Darcy) :

2.7.1. Aquifère, conduite d'eau souterraine :

La fonction conduite du réservoir permet le transport de quantités d'eau et la transmission d'influences. Elle est imposée par la structure de l'aquifère : paramètres géométriques et hydrodynamiques.

La loi de Darcy établie expérimentalement, est la base de l'hydrodynamique souterraine.

L'écoulement de l'eau souterraine est déterminé par 3 groupes de paramètres hydrodynamiques :

- coefficient de perméabilité, K, et transmissivité, T,
- gradient et charge hydrauliques,
- débit d'une nappe, Q, et vitesse de l'écoulement des eaux souterraines.

L'emménagement de l'eau souterraine gravitaire dans les vides du réservoir est conditionné par le coefficient d'emménagement ; sa circulation par la perméabilité.

. La perméabilité est l'aptitude d'un réservoir à se laisser traverser par l'eau, sous l'effet d'un gradient hydraulique. Elle exprime la résistance du milieu à l'écoulement de l'eau qui le traverse. Elle est mesurée par 2 paramètres : le coefficient de perméabilité, K [m/s] et la perméabilité intrinsèque, k [m²] ou [darcy].

. La productivité d'un captage dans un aquifère est en fonction de son coefficient de perméabilité, K et de son épaisseur, b. C'est pourquoi un paramètre récent, la transmissivité, T, a été créée. Il évalue la fonction conduite de l'aquifère. La transmissivité est égale au produit du coefficient de perméabilité, K, par l'épaisseur de l'aquifère, b. Elle s'exprime en m²/s. $T [m^2/s] = K [m/s] \cdot b[m]$.

. Le coefficient d'emménagement est le rapport entre le volume de l'eau gravifique et le volume global de la formation. Seule l'eau gravifique, celle qui obéit aux lois de la gravité, peut être extraite du terrain qui la contient. En moyenne le coefficient d'emménagement est de l'ordre de (10 à 20)% pour les alluvions sableuses, il atteint rarement 30% dans les formations très grossières exemptés d'argile. Ce paramètre peut être appelé « coefficient de disponibilité » ou de restitution.

2.7.2. Loi de Darcy . Dispositif expérimental de Darcy :

La base fondamentale de calcul de quantités d'eau souterraine ou débit d' une nappe, par l'hydrodynamique souterraine, est la loi expérimentale de Darcy (H. Darcy, 1856).

Le dispositif expérimental comportait des tubes verticaux de 2,5m de hauteur et de 0,35m de diamètre intérieur, remplis de sable naturel sur une hauteur, l (figure). La partie supérieure du tube est alimentée en eau à un niveau maintenu à une altitude constante, H , au dessus d'un plan fixe de référence. Le volume d'eau recueilli à la base, est mesuré en fonction du temps, en secondes ou en heures.

Le poids de la colonne d'eau, de hauteur équivalente à H , est la charge hydraulique, notée h , exprimée en mètres de hauteur d'eau.

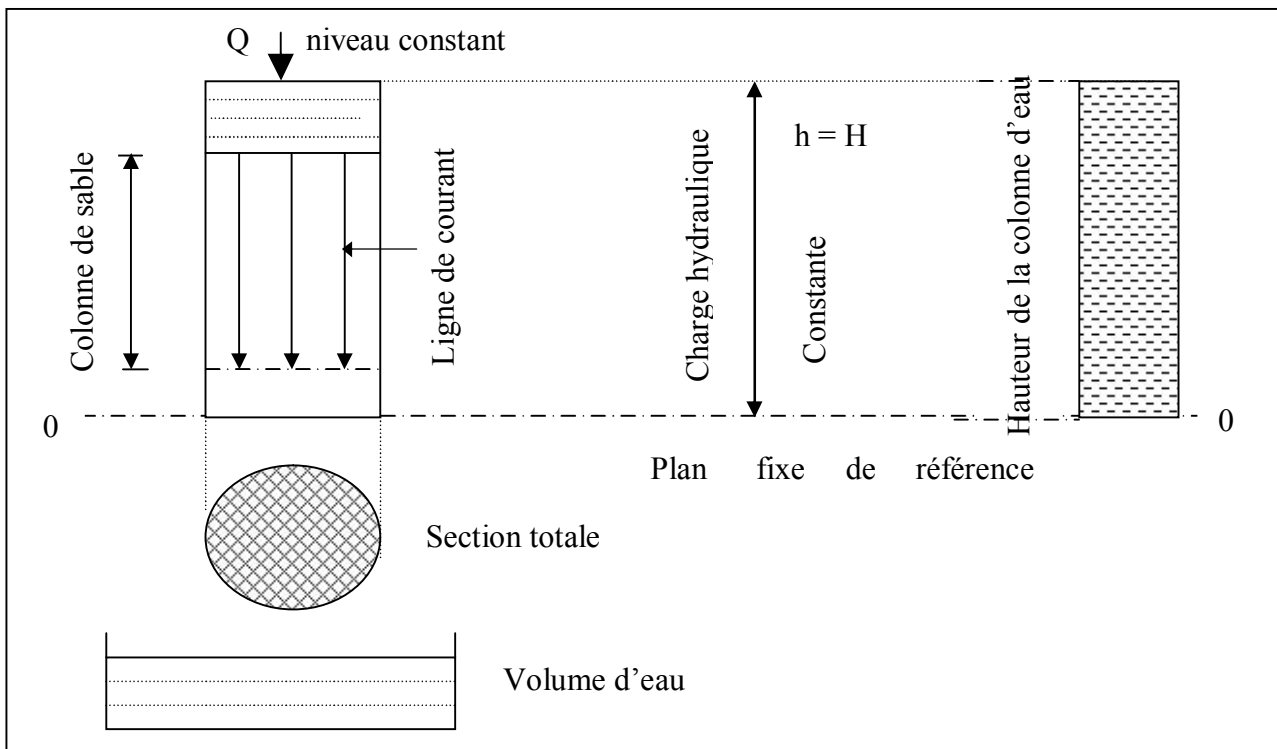


Fig. 16 : Dispositif expérimental de Darcy.

2.7.3. Énoncé de la loi de Darcy :

Avec ce dispositif, H. Darcy, a montré que le volume d'eau, Q en m^3 par seconde, filtrant de haut en bas dans la colonne de sable de hauteur, l en mètres, à travers la section totale, perpendiculaire à la direction verticale d'écoulement, A en m^2 , est fonction d'un coefficient de proportionnalité, K en mètres par seconde, caractéristique du sable et de la perte de charge par unité de longueur du cylindre de sable, h/l sans dimension. D'où l'expression de la loi de Darcy :

$$Q [m^3/s] = K [m/s] \cdot A [m^2] \cdot h/l \quad (2.3.)$$

où

Le terme, K défini par H. Darcy comme un « coefficient dépendant de la perméabilité de la couche » est appelé coefficient de perméabilité. Il a la dimension d'une vitesse et s'exprime en m/s .

Le quotient de la charge, h , par la longueur de la colonne de sable, l , ou perte de charge par unité de longueur, h/l , est défini comme le gradient hydraulique noté i , sans dimension. D'où avec $h/l = i$ l'expression devient :

$$Q = K \cdot A \cdot I \quad (2.4.)$$

Le débit unitaire, q , est le débit traversant l'unité de section.

$$Q [m^3/s] = Q / A = K \cdot I \quad (2.5.)$$

La vitesse de filtration V en m/s est:

$$V [m/s] = Q / A = K \cdot i = q \quad (2.6.)$$

2.7.4. Dispositif de laboratoire avec écoulement latéral :

Un dispositif de laboratoire, avec écoulement latéral, représente mieux la circulation des eaux souterraines dans l'aquifère (figure 17).

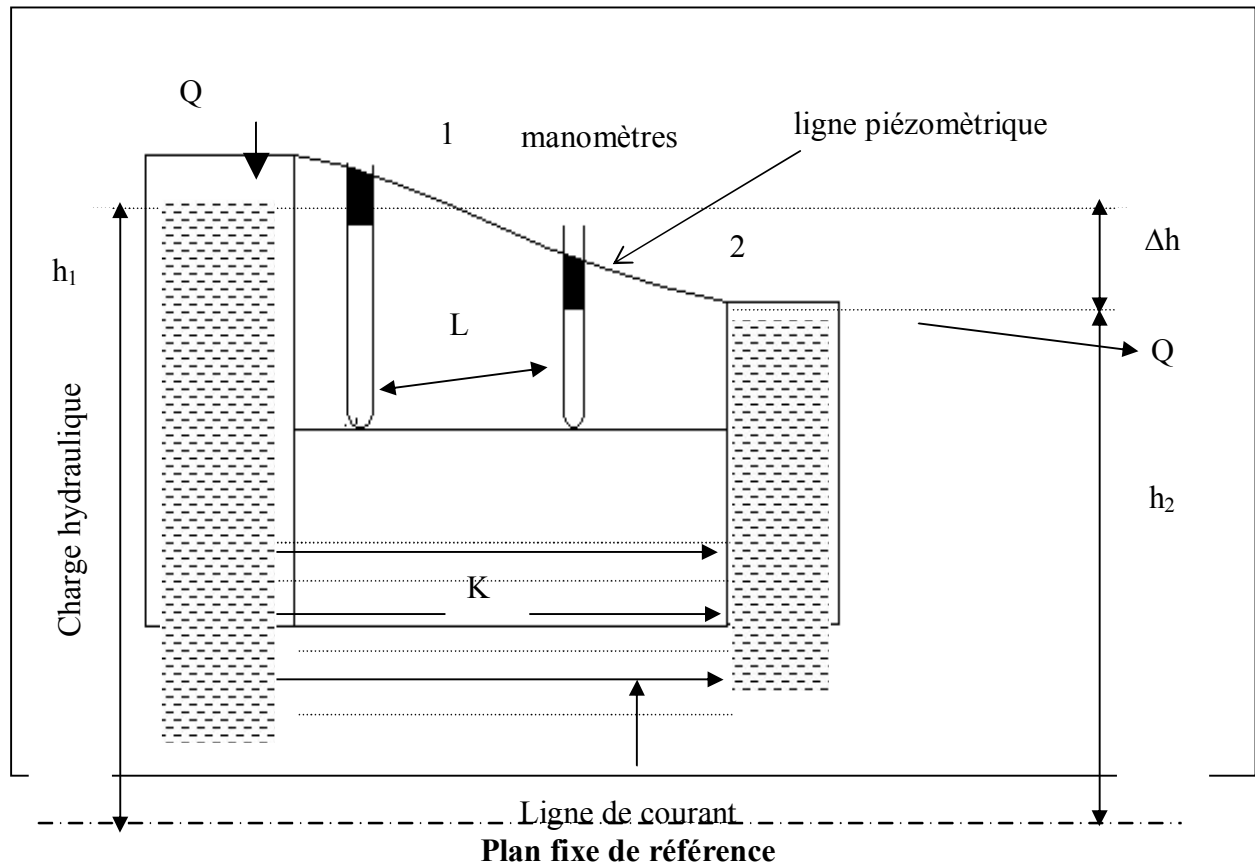


Fig. 17 : Dispositif de laboratoire avec écoulement latéral.

Les résultats obtenus par cette expérience, permettent d'écrire :

$$Q = K(h_1 - h_2) / l \quad (2.7.)$$

où

$(h_1 - h_2) / l$ est le gradient hydraulique i .

$(h_1 - h_2)$ est la différence de charge $\Delta \bar{h}$

$$q = K \Delta h / l = -K i \quad (2.8.)$$

Le signe négatif est introduit devant le membre de droite de l'équation car la charge décroît dans le sens de l'écoulement et q ou v ne peuvent être négatives.

$$Q = K.A(h_1 - h) / l = K.A(\Delta h) / l \quad (2.9.)$$

2.7.5. Généralisation de la loi de Darcy en laboratoire :

La loi de Darcy, établie sur des dispositifs particuliers, a été vérifiée expérimentalement en laboratoire, dans toutes les conditions possibles. C'est à dire pour :

- toutes les directions d'écoulement,
- tous les liquides de différents poids volumiques et viscosités dynamiques,
- tous les milieux aquifères poreux continus, de toutes granulométries et milieux fissurés à microfissures.

Ces études ont permis d'établir 2 expressions généralisées, applicables dans tous les cas [17] :

$$Q=V=-N.d_{10}^2.i.v/\mu \quad (2.11.)$$

$$Q=V=-K.i \quad (2.12.)$$

où

Nd_{10}^2 - caractérise la granulométrie avec N , facteur de forme sans dimension et d_{10} le diamètre

efficace en cm.

μ - est la viscosité dynamique.

$v = \rho.g$ - est le poids volumique, incluant la force de gravité, g , considérée comme constante en un point donné.

i - est le gradient hydraulique. Il est assimilé au gradient de charge et au gradient de potentiel.

K - représente le coefficient de perméabilité au sens large, tenant compte de toutes les caractéristiques du milieu poreux (structure du réservoir) et de l'eau qui le traverse (viscosité dynamique et poids volumique). Le coefficient de perméabilité ainsi défini, ne répond plus à la conception de H. Darcy. En effet il n'est pas une constante physique du milieu poreux, car il varie avec les caractéristiques de l'eau en mouvement. Toutefois il reste valable pour les eaux souterraines normales.

2.7.6. Application de la loi de Darcy sur terrain :

2.7.6.1. Niveau piézométrique, charge et potentiel hydraulique :

Ces 3 paramètres n'ont pas la même signification physique. Le niveau piézométrique est mesuré par une altitude de plan d'eau. La charge hydraulique est le poids de la colonne au dessus du niveau de référence, ou énergie par unité de poids. Le potentiel hydraulique est l'énergie exigée pour porter l'unité de masse au dessus du niveau de référence. Mais seule la mesure du niveau piézométrique est accessible sur le terrain. Les niveaux piézométriques permettent de calculer le gradient hydraulique.

2.7.6.2. Mesure du niveau piézométrique :

La mesure du niveau piézométrique est l'opération principale de l'inventaire de la ressource en eau souterraine. Etant l'altitude du niveau d'eau, en équilibre naturel, dans l'ouvrage, il est calculé par la différence entre la côte du sol (repère sur l'ouvrage), Z et la profondeur de l'eau, h_p .

$$H = Z - h_p \quad (2.13.)$$

Pour une source, c'est l'altitude de l'émergence naturelle $H = Z$.

Dans le cas de sondages artésiens, $H = Z +$ l'élévation du niveau d'eau au dessus du sol.

La profondeur de l'eau dans l'ouvrage, est mesurée par les sondes : ficelle ou ruban avec flotteur, sonde électrique. Leur précision est de l'ordre de plus ou moins 5 mm.

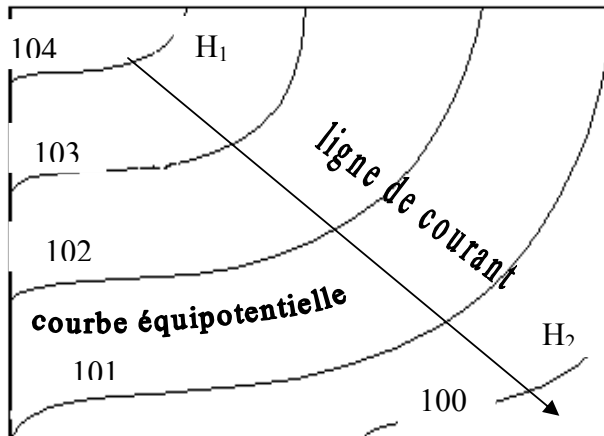
L'altitude du sol (repère sur l'ouvrage) est obtenue, soit par lecture de la carte topographique, soit lorsqu'une plus grande précision est recherchée, par des opérations de nivellement.

2.7.6.3. Calcul du gradient hydraulique : Dans la pratique, le gradient hydraulique est calculé sur le terrain à l'aide des niveaux piézométriques mesurés dans 2 ouvrages d'observation, alignés sur une ligne de courant. L'un en amont, H_1 , l'autre en aval, H_2 , séparés d'une distance l .

Exemple 1: $i = (H_1 - H_2) / l = (112,9 - 111,1) / 1200 = 0,0015$.

Mais la méthode recommandée est celle de l'utilisation des cartes piézométriques, (figure 18).

Les valeurs des gradients hydrauliques, mesurées dans les conditions naturelles sont faibles, 0,001 à 0,00001.



Exemple 2 : $i = (H_1 - H_2)/L = (104 - 100)/3250$

Fig 18 : Carte piézométrique.

2.7.6.4. Conditions de validité de la loi de Darcy :

La loi de Darcy est établie par des expériences de laboratoire répondant à des conditions très strictes. 4 conditions doivent être respectées : continuité, isotropie et homogénéité du réservoir et écoulement laminaire.

Ces conditions de validité peuvent paraître très restrictives si l'on considère les nombreuses variations lithologiques des formations hydrogéologiques (stratification, passage latéral de faciès, schistosité, etc...). Mais en réalité les cas où la loi de Darcy n'est pas applicable sont limités aux formations très hétérogènes, aux réseaux karstiques et lorsque la vitesse d'écoulement est très élevée comme au voisinage des ouvrages de captages.

2.8 EQUIPEMENT DE LA ZONE DE CAPTAGE

L'ensemble massif de gravier et crépines a une importance capitale au cours de la vie du forage . Le meilleur rendement et le coût d'exploitation de l'ouvrage dépendent pour une large part de cet ensemble.

On devra se souvenir que :

- Un massif filtrant à granulométrie surdimensionnée dans une formation de sable fin peut provoquer un ensablement de l'ouvrage.
- Un massif filtrant à granulométrie trop serrée peut conduire à une exploitation partielle du potentiel de la nappe et rend difficile l'extraction de la boue de forage.

Pour déterminer l'ouverture des fentes de crépines et la granulométrie des massifs filtrants, il est indispensable de disposer de la courbe granulométrique des couches de terrains aquifères à capter.

2.8.1 Construction et pose des crépines :

2.8.1.1 Introduction : La crépine est l'élément principal de l'équipement d'un forage d'eau.

- Si sa construction n'est pas adaptée au terrain, elle ne permettra pas d'extraire toute, l'eau exempte de sable, que peut donner la formation.
- Si la matière dont elle est faite se détériore sous l'action souvent agressive des eaux, la durée de vie du forage diminuera .
- Si les fentes sont trop ouvertes ou irrégulièrement exécutées (chalumeau), le sable fin pénétrera toujours et de plus en plus dans l'ouvrage.
- Une crépine est une pièce de précision et son usinage doit permettre d'obtenir des ouvertures calibrées au dixième de millimètre .

Concernant la profondeur totale du forage, on a intérêt à pousser le forage jusqu'au mur de la couche aquifère la plus basse découverte par le forage de reconnaissance, pour les 2 raisons suivantes qui, toutes deux, influent sur le débit :

- On mettra ainsi toute la couche en production .
- On pourra au pompage, rabattre au maximum le niveau d'eau.

2.8.1.2 Construction :

Les principaux types de crépines sont :

- Les crépines à fentes continues, types Johnson.
- Les crépines à persiennes
- Les crépines pontées ou à nervures repoussées.
- Les crépines lanternées
- Les crépines à grains de gravier précollé.

Ces crépines peuvent être en acier ordinaire, en acier inoxydable, en matière plastique, en fibre de verre.

Pendant longtemps, on a pensé que le rôle d'une crépine consistait seulement à contenir les sables et à s'opposer à leur pénétration dans le forage .

On sait maintenant que bien conçue, elle facilite l'opération de développement.

Cette première conception conduisait à employer un tube filtrant, percé de trous, ou muni de fentes, aussi fines que possible ou garni d'un tissu, métallique ou autre, à fines mailles, ou bien encore entouré d'un manchon de gravier collé.

On s'est même souvent contenté de pratiquer sur un tube des fentes grossièrement exécutées au chalumeau ou plus finement à la scie circulaire. Ce sont les crépines lanternées.

Certains constructeurs provoquent des ouvertures « à persiennes » obtenues par poinçonnement et soulèvement d'un des bords de chaque fente, dans une tôle ensuite roulée et soudée, (TNRS). La précision et la régularité des fentes laissent à désirer. D'autres, toujours, par poinçonnement et soulèvement du métal, réalisent des crépines à nervures repoussées qui présentent les mêmes inconvénients .

Les fentes des crépines plastiques en PVC généralement \perp aux génératrices du tube ont le grand avantage de ne pas être affectées à 20° C par les eaux corrosives, les eaux de mer, les acides dilués . Elles sont plus légères, faciles à installer, d'un coût moins élevé que les crépines métalliques dans les petits diamètres . Par contre leur utilisation est limitée par les problèmes de résistance mécanique et par la longueur minimale des fentes . Les crépines en PVC normal ne peuvent être utilisées à de grandes profondeurs (100 m). Il existe également des crépines PVC renforcées qui permettent d'équiper des forages de profondeur moyenne (300m).

Bien d'autres dispositifs sont offerts sur le marché, mais nous devons accorder une mention spéciale aux crépines Johnson dont la conception et l'efficacité sont très nettement supérieures à toutes autres.

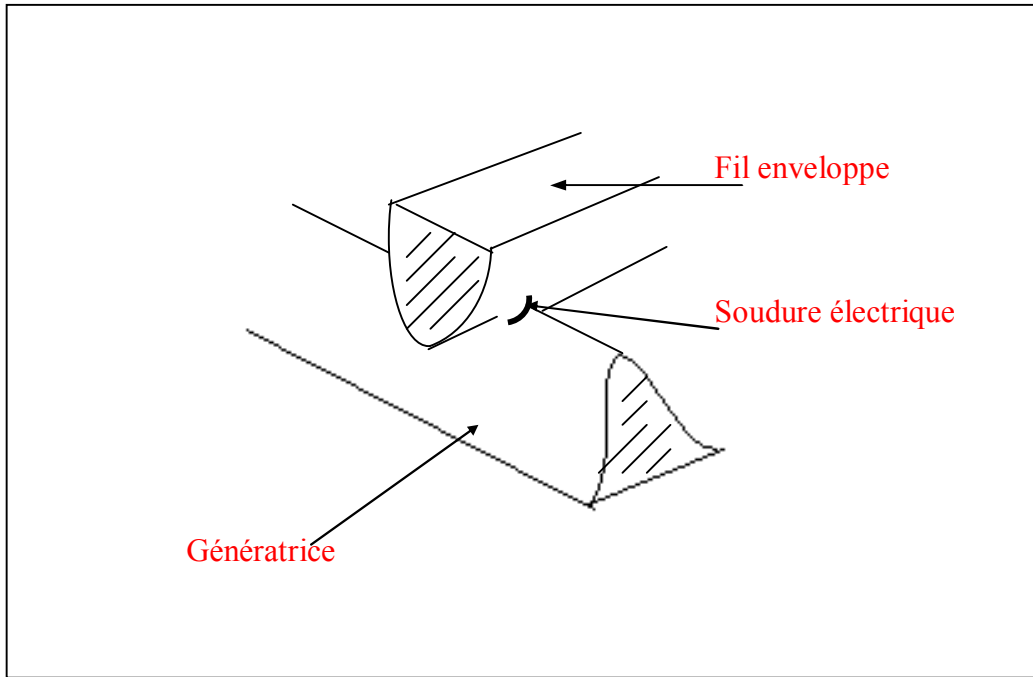


Fig 19 : Conception des crépines Johnson.

Sur une armature de « génératrices » verticales est bobiné en hélice, le fil enveloppe profilé . Ce fil a une section voisine du triangle avec angles arrondis . Il est soudé par un sommet avec chacune des génératrices, de telle sorte que la base du triangle se trouve à la surface extérieure .

Ainsi chaque point de contact entre le fil et les génératrices est électriquement soudé sur la machine qui effectue le bobinage . Cette machine particulièrement ingénieuse, opère jusqu'à 1800 soudures à la minute.

Les explications qui suivent montrent les importants avantages que présente ce mode de construction.2.

2.8.1.2.1. Assemblage des éléments : les différents tronçons de crépines sont, comme les tubes, assemblés entre eux, soit par soudure électrique exécutée sur chantier à la mise en place dans le forage soit par manchons vissés, eux même soudés avec les éléments.

2.8.1.2.2. Coefficient d'ouverture : Le rapport entre la section de passage d'eau et la surface latérale totale de la crépine constitue le coefficient d'ouverture. Or il est clair que de très loin, le système Johnson donne le meilleur coefficient d'ouverture, ce qui signifie que chaque mètre de crépine de ce type laissera passer, toutes autres choses égales, beaucoup plus d'eau que tout autre dispositif.

Pour les crépines Johnson le coefficient d'ouverture est égal à :

$$C = \frac{e}{e+h} \quad (2.14)$$

où

e – Dimension de la fente unique hélicoïdale (intervalle entre 2 spires)

h – Largeur du fil d'enveloppe (base du triangle de la section)

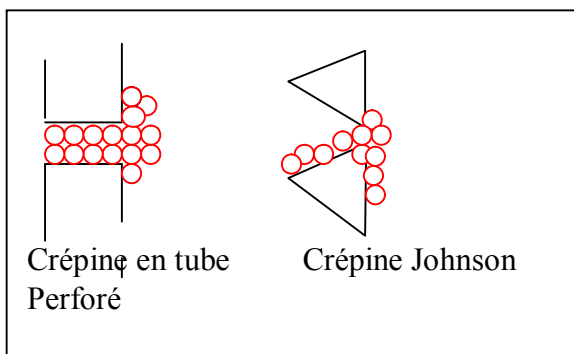
Exple : Pour une ouverture de 1 mm et 1 fil de 1,14 mm, le coefficient d'ouverture d'une crépine Johnson est de $100 \times \frac{1}{1+1.4} = 46\%$ (ou 0,46)

D'après A. MABILLOT [38], une crépine à persiennes ne donnerait pour la même ouverture que (4 à 6)% et une crépine à nervures repoussées ne donnerait que 16% de coefficient d'ouverture.

Les vitesses de pénétration des fluides (liquides ou gazeux) qui sont recommandées dans les crépines Johnson doivent être :

- 0,3 cm/s pour le pétrole
- 30 cm/s pour le gaz
- 3 cm/s pour l'eau
- 1,5 cm/s pour les liquides injectés

2.8.1.2.3. Résistance au colmatage : La régularité et la précision de l'ouverture sont très bien réussies au niveau des crépines types Johnson puisqu'il suffit sur la machine qui les exécute de faire varier le pas de l'hélice du fil enveloppe pour obtenir la dimension requise de l'intervalle entre 2 spires



- Dans une fente à section constante obtenue par perçage, poinçonnage ou à la scie circulaire dans un tube ou une tôle, les grains ont tendance à s'agglutiner et à se bloquer définitivement .

- Il ne peut en être de même avec la méthode Johnson qui à cause

Fig 20 : Types de fentes. du profil triangulaire du fil enveloppe ménage entre 2 spires un vide dont la section va en croissant dans le sens de la pénétration de l'eau . En effet chaque grain ayant pu franchir les lèvres de cet intervalle, ne peut y demeurer et est automatiquement entraîné vers l'intérieur de la crépine .

2.8.1.2.4. Résistance à la corrosion : Sur ce point, il suffit de choisir une matière inoxydable : acier ou matière plastique. La matière qui constitue la crépine doit, pour durer, résister à la fois à la corrosion chimique et à la corrosion électrolytique . Certains constructeurs enrobent le tube perforé d'une couche de caoutchouc ou autre produit plastique, mais on doit redouter que cet enrobage ne résiste pas longtemps à l'action érosive de l'eau sableuse qui pénétrera dans les ouvertures notamment au moment du développement.

2.8.1.2.5. Résistance aux chocs pendant le transport et les manipulations : Toutes précautions doivent être prises au cours de ces opérations pour ne pas endommager les crépines.

2.8.1.2.6. Résistance mécanique : Nous savons que les colonnes de tubage doivent être étudiées pour résister aux différentes fatigues auxquelles elles sont exposées . Il en est de même pour les crépines, mais les 2 risques les plus importants qui les menacent sont le flambage et l'écrasement.

- La crépine travaille au flambage : si pour une cause fortuite, accident ou fausse manœuvre, une crépine « pose » sur le fond du forage, elle supporte tout le poids du train de tiges ou de la colonne de tubage qui la surmonte . Elle est plus mal placée que le tubage de soutènement puisque généralement leur ϕ extérieur est beaucoup plus petit que celui du trou, de telle sorte qu'elles ne s'appuient pratiquement pas sur les parois. Il est donc prudent de connaître à l'avance le poids qu'elles auraient à supporter dans cette hypothèse et de s'assurer que leur construction leur permet de supporter sans risque cette charge verticale. Le constructeur doit donner à ce sujet les renseignements correspondants.

- Ecrasement par pression extérieure centripète : Ce risque peut exister au moment de la mise en production du forage, lorsque l'on vide une colonne de captage auparavant pleine de boue. Les renseignements déjà fournis pour les tubes sont valables pour les crépines, d'autant plus, qu'occupant le point le plus bas de l'équipement tubulaire, elles se trouvent de ce fait exposées aux plus fortes pressions. Les constructeurs sont à même de donner aux utilisateurs les renseignements correspondants . A titre indicatif, le tableau présenté pour les tubages par A. Mabillot [38], qui indique les limites des pressions admissibles, doit être corrigé de la façon suivante :

Les charges critiques de ce tableau doivent être multipliées par le rapport :

$$r=(S-s)/S \quad (2.15)$$

où

S - Surface latérale extérieure totale de la crépine.

s - Section totale des ouvertures ou de la fente unique (pour les crépines hélicodales)

Pour les crépines Johnson, le rapport est égale à =

$$r = h / (e + h) \quad (2.16)$$

où

h – Largeur du fil enveloppe

e – dimension de l'intervalle entre 2 spires (slot)

2.8.1.2.7. Résistance aux agents chimiques : Nous consacrerons un article entier au développement des forages d'eau, opération de 1^{ère} importance pour obtenir le rendement optimum d'un ouvrage. Dès maintenant, on doit observer que certaines crépines, notamment celles qui comportent un manchon extérieur de gravier collé sur tube perforé, s'opposent particulièrement au lavage au jet sous pression ainsi qu'au développement par pistonnage ou tout autre procédé qui risqueraient de provoquer le décollement du manchon.

Les matières constitutives des crépines doivent résister à l'attaque des solutions chimiques acides ou basiques qui peuvent être employées dans certains ouvrages.

Pour ce qui est du lavage au jet, on remarquera que la forme même des vides entre les spires des crépines Johnson ➔ l'action des jets sur la formation en renforçant la pression de ces jets à la sortie.

A MABILLOT [38] présente l'exemple de crépines Johnson suivant :

| ϕ nominal | ϕ extérieur (hors tout) | ϕ intérieur (de passage) | Poids approximatif (pour slot 20=0,5mm) |
|----------------|----------------------------------|-----------------------------------|--|
| 8'' | $7_{1/2} = 190,5$ mm | $6_{5/8} = 168,3$ mm | 16 Kg / m |

Tableau n° 18 : Caractéristiques des crépines Johnson.

Pour réaliser les séries citées sur le tableau, Johnson emploie, généralement, comme fil enveloppe, les profils triangulaires ayant les dimensions suivantes :

Base du triangle = (1,14 – 1,52 – 2,28 – 3,43) mm

Hauteur du triangle = (3,14 – 2,54 – 3,55 – 5,33) mm

Les génératrices peuvent avoir selon le cas, une section circulaire ou une section triangulaire .

Leur nombre varie selon les efforts mécaniques qu'elles peuvent avoir à supporter dans les ouvrages.

Puisque le principe de la construction des crépines Johnson est la soudure électrique, le métal doit permettre d'effectuer cette soudure.

Selon la nature des eaux et la longévité de l'ouvrage, on emploie l'un des métaux suivants utilisés pour l'ossature de la génératrice et du fil enveloppe, (un métal unique pour une même crépine) :

- Acier inoxydable « 304 » ou « 316 »
- Bronze siliceux « E V E R D U R »
- Acier fortement galvanisé.

2.8.1.3 Pose des crépines :

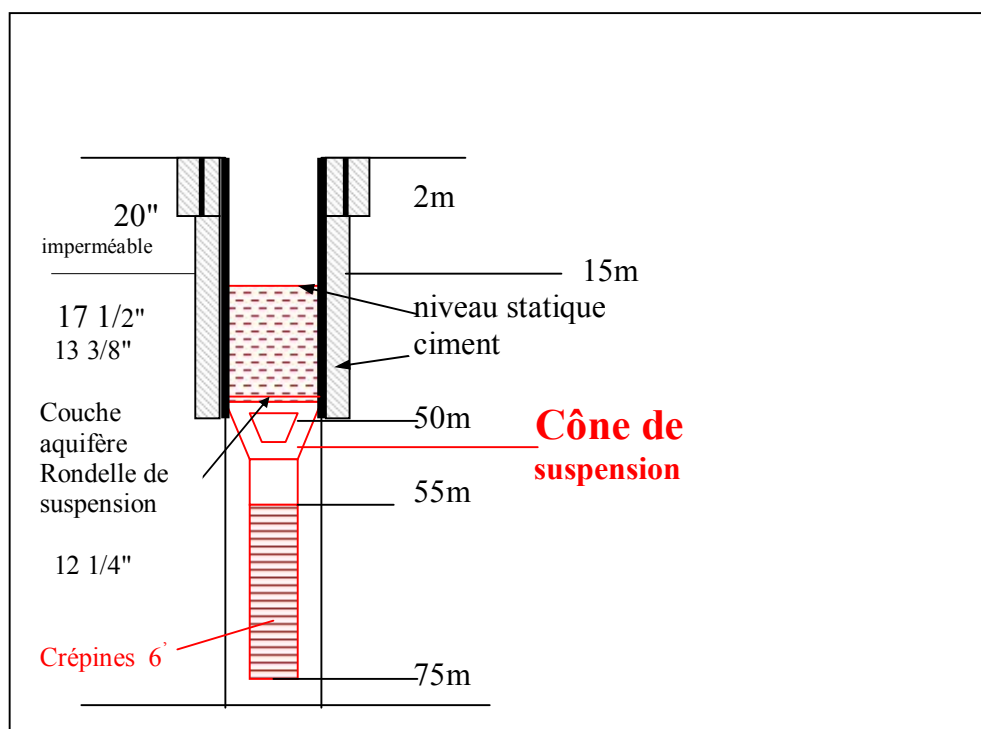


Fig 21 : Pose des crépines.

L'ouvrage étant bien préparé, nettoyé et calibré au ϕ voulu, la pose de la crépine sera plus facile et son fonctionnement plus efficace.

Afin de suspendre la colonne de captage, à la base ou en tout autre point de la colonne de soutènement ; il y a lieu de placer au pied de cette dernière, ou au point choisi, une rondelle de suspension, constituée par un anneau, de fer rond, soudée par points à l'intérieur du tubage.

. Cône de suspension : Cette pièce permet de réaliser la meilleure solution de pose d'une crépine.

Elle présente les avantages suivants :

- suspension de la crépine par le haut (pas de risque de flambage) ;
- facilité de mise en place du gravier ;
- étanchéité de l'espace annulaire (pas de risque de soulèvement du massif de gravier) ;

- possibilité de rajouter du gravier , si nécessaire ;
- facilité de mise en place et d'extraction (ultérieurement) de la crépine ;
- facilité lors du développement du forage ;
- facilité lors du nettoyage de l'intérieur de la crépine.

. L'équipement se compose des éléments suivants :

- cône de suspension : exécuté en tôle, comportant un dispositif d'attache à baïonnette pour la mise en place et éventuellement l'extraction de la crépine, quatre fenêtres pour la mise en place du gravier dans l'espace annulaire et un cercle extérieur qui viendra se poser sur la rondelle de suspension insérée dans le tubage ;
- obturateur , également en tôle et muni aussi d'un dispositif à baïonnette . Cette pièce descendue dans le cône de suspension à la fin du développement , isole l'intérieur de la crépine du massif en gravier ;
- tube d'extension : placé entre le cône de suspension et la crépine, est au même ϕ et en même métal, de préférence, que la crépine ;
- crépines
- sabot

Remarque : Si la crépine et son tube d'extension ne sont pas suspendus au tube de soutènement, mais restent libres à l'intérieur de celui-ci, il y a lieu d'obturer l'espace annulaire entre ces 2 tubes.

Plusieurs dispositifs sont prévus :

- si le jeu entre les tubes est peu important (moins de 1 pouce sur le rayon), on peut placer en tête soit un joint en plomb qui sera évasé et serti par un tampon cône, descendu au bout des tiges, soit un joint souple en matière plastique ou en caoutchouc qu'on pourra descendre après coup dans l'espace annulaire en le poussant par un tube dans l'intercolonne ;
- si le jeu est important, la seule solution est de poser un anneau de ciment prenant appui sur le massif en gravier. On peut utiliser une couronne percée de trous et descendue autour du tube d'extension au bout des tiges . On injecte le volume de laitier prévu et on remonte le tout pour important lavage.
- Arceaux de centrage : Il est recommandé de placer en 1 ou plusieurs points de la colonne de captage (crépines et tubes d'extension), des arceaux de centrage, ou centreurs à lames, constitués, des 2 bagues fixées sur la crépine (ou le tube) et réunies par 3 ou 4 lames . L'écartement des bagues règle le ϕ extérieur .

2.8.2 Longueur et position des crépines :

La longueur de la crépine est fonction de l'épaisseur de la formation à capter, du niveau de rabattement, de la nature, et de la stratification de la couche aquifère.

La crépine sera donc placée, dans les parties ayant les meilleures caractéristiques hydrauliques. Les éléments nécessaires servant à positionner les crépines seront tirés des travaux de reconnaissance préliminaires à savoir :

- diagraphies instantanés, pertes de boue, ... ,
- carottage,
- analyse granulométrique des échantillons,
- perméabilité sur échantillons en laboratoire,
- logs géophysiques.

On recommande de choisir des longueurs de crépines selon les 4 cas suivants qui peuvent se présenter :

2.8.2.1. Nappe artésienne en terrain homogène :

Dans ce type d'aquifère on crépinera 80% à 90% de son épaisseur en s'assurant que le rabattement ne descende pas sous le niveau du toit de cette couche aquifère . En respectant ces règles, on peut espérer obtenir 90 à 95% de la capacité spécifique qui serait obtenue si l'on crépinait la totalité de la couche aquifère.

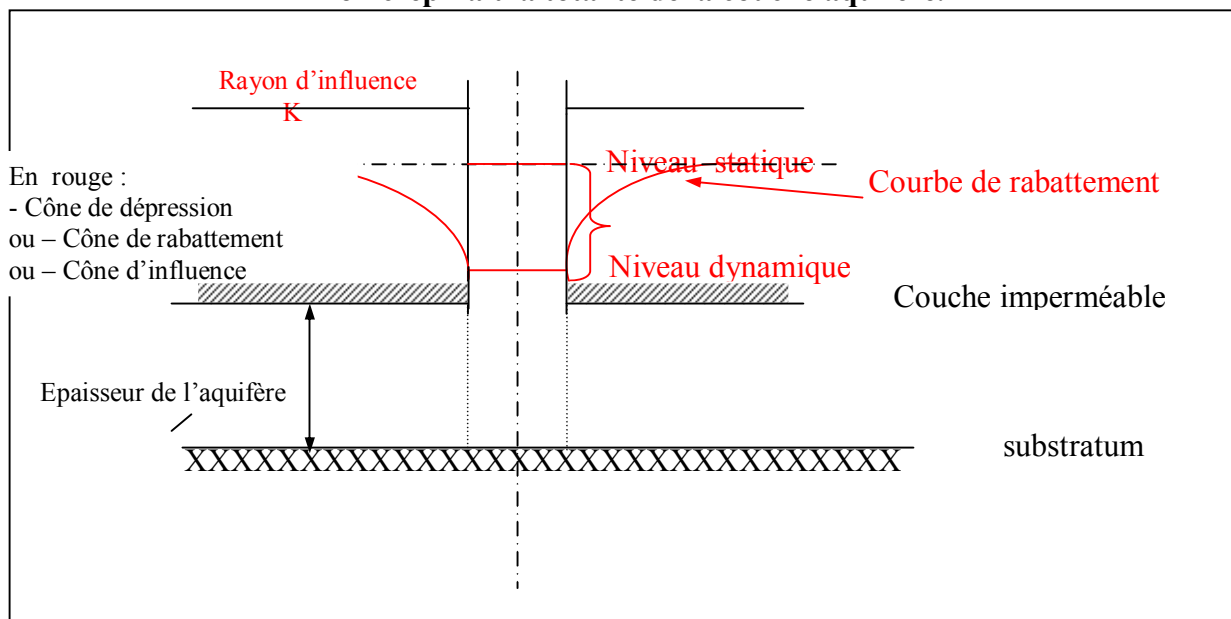


Fig 22 : Longueur des crépines pour les nappes captives.

88

Forage artésien non jaillissant. (Nappe captive)

Dans le passé et par souci d'économie, lorsque un aquifère avait une puissance supérieure à 15 m, le crépinage se réalisait en plaçant plusieurs tronçons de crépines séparés par des éléments pleins . Actuellement, le prix des crépines étant moins élevé et les demandes d'eau de plus en plus importantes, on crépine la totalité de l'aquifère sans éléments pleins .

Il peut être nécessaire de rabattre la nappe au dessous du niveau du toit de la couche aquifère . Dans ce cas, on se trouve dans les conditions d'une nappe non artésienne, pendant la durée du pompage.

2.8.2.2. Nappe artésienne en terrain hétérogène stratifié :

Dans ce cas, (80 à 90)% des couches les plus perméables doivent être crépinées

2.8.2.3. Nappe libre en terrain homogène :

Théoriquement et par expérience , il est recommandé dans une couche inférieure à 45 mètres de puissance de crépiner au moins le tiers inférieur sans dépasser une hauteur de 50% au maximum . Cependant, dans une couche aquifère plus puissante, on peut crépiner 80% de cet aquifère pour obtenir une capacité spécifique plus importante.

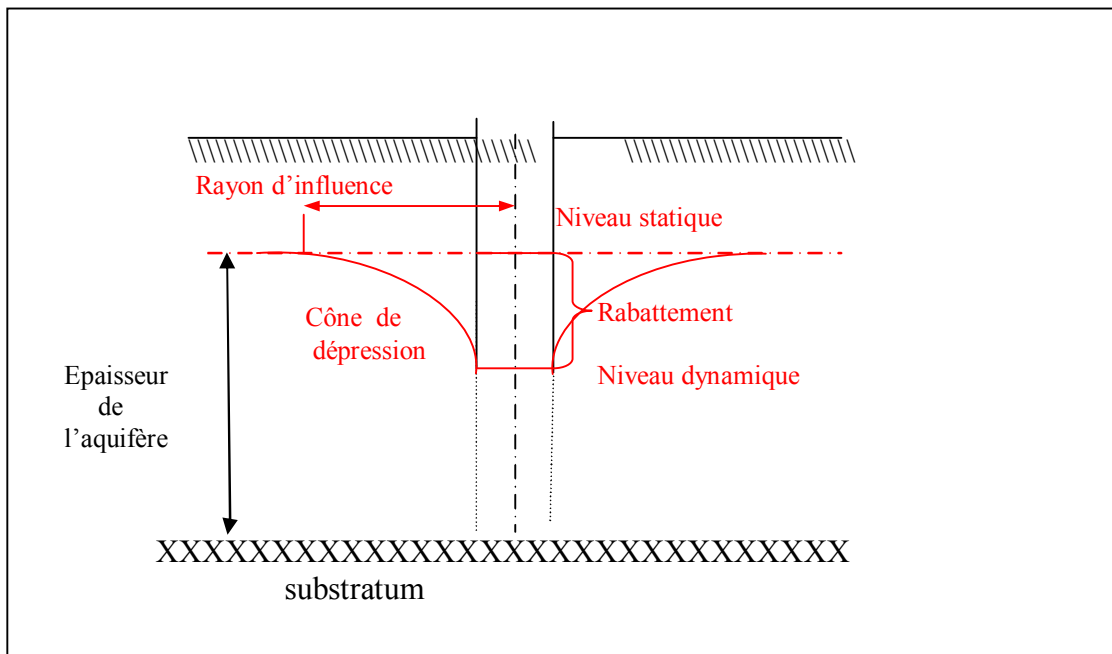


Fig 23 : Longueur des crépines pour les nappes libres.

Il est recommandé de ne pas rabattre la nappe au dessous du sommet de la crépine.

2.8.2.4. Nappe libre en terrain hétérogène stratifié :

En principe, on doit positionner la crépine dans les couches les plus perméables afin de permettre un rabattement maximum dans les meilleures conditions d'exploitation . La longueur totale crépinée devrait être de l'ordre du tiers de l'épaisseur de l'aquifère, mais ceci suppose que les couches perméables soient relativement importantes et régulières. Lorsque les couches très perméables sont relativement minces, il est alors nécessaire de

capter les autres couches moins aquifères avec des ouvertures de crépine adaptées à ces différentes couches.

Quatre exemples de crépinage en terrain hétérogène (couches aquifères multiples) pour nappes libres :

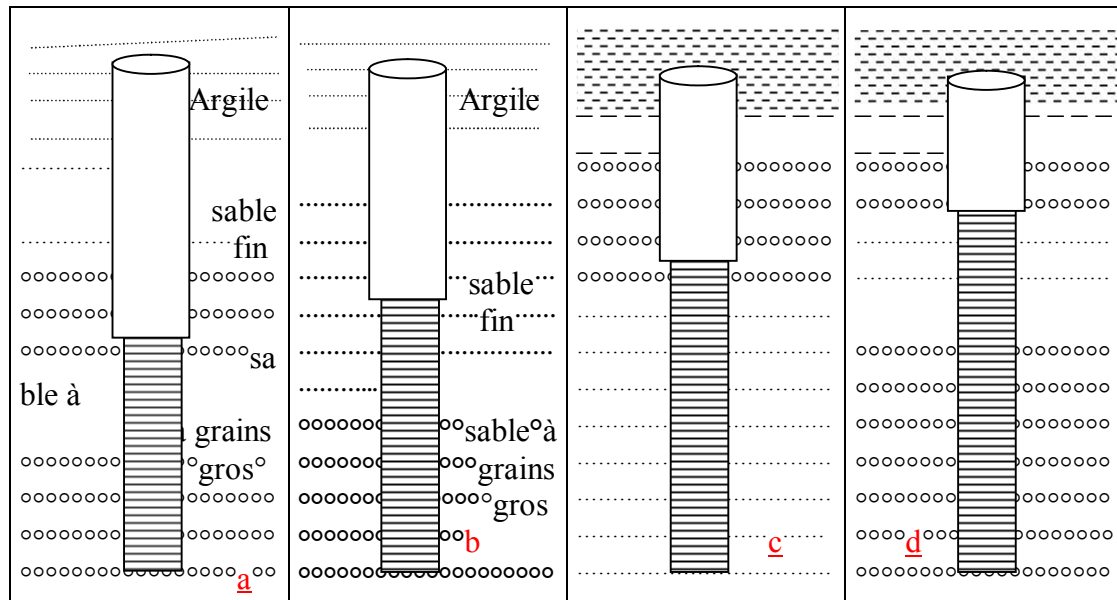


Fig 24 : Colonne de captage pour nappe libre en terrain hétérogène.

Schéma a : sable fin surmontant une épaisse couche sable à grains gros ou de gravier.

Crépiner seulement 70 à 80% du sable grossier.

Schéma b : forte couche de sable fin surmontant une mince couche de sable à grains gros ou de gravier.

Crépiner toute la couche à grains gros et environ la moitié de la couche de sable fin, naturellement avec des ouvertures différentes.

Schéma c : sable à grains gros surmontant une couche d'égale épaisseur de sable fin.

Crépiner tout le sable fin et la moitié au moins de la couche supérieure avec des ouvertures différentes.

Schéma d : Sable fin en sandwich entre 2 couches de matériaux à grains gros.

Crépiner toutes les 2 couches inférieures et le tiers ou la moitié de la couche supérieure avec des ouvertures appropriées.

2.8.3 Relation, débits – diamètres - coefficients d'ouverture des crépines de forage :

Ce qui conditionne la relation entre ces 3 grandeurs, c'est la vitesse de l'eau à son entrée dans la crépine. Il résulte de nombreuses observations que la meilleure valeur de cette vitesse est 03 centimètres par seconde.

Pour cette vitesse, la perte de charges au passage de l'eau dans les ouvertures ou pour Johnson, dans la fente unique hélicoïdale, est négligeable.

Les risques d'incrustation, inversement proportionnels à la vitesse de circulation, comme les risques de corrosions ou d'érosion, qui lui sont directement proportionnels, se trouvent pour cette vitesse de 3 cm/S , réduits au minimum.

La formule qui lie les 3 grandeurs : débit, diamètre, coefficient d'ouverture, est la suivante :

$$Q = \pi \cdot DC \cdot 0,03 \cdot 3600 \quad (2.14)$$

$$Q = 340 \cdot DC \quad (2.15)$$

Q_1 - débit en mètres cubes / heure pour un mètre de crépine.

D - diamètre extérieur en mètres de la crépine.

C - coefficient d'ouverture (nombre décimal (exemple 0,20)

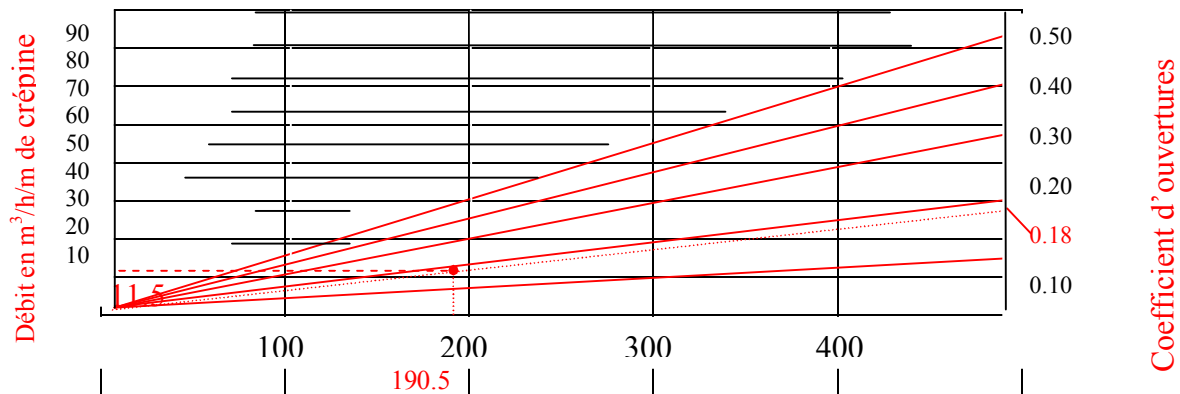


Fig 25 : *Abaque présentant la relation entre le débit, le diamètre et le coefficient d'ouverture des crépines.*

Il faut bien préciser que la formule précédente, basée sur une vitesse d'entrée de l'eau dans la crépine de 3 cm/S , donne le débit théorique que pourrait fournir chaque mètre de crépine si celle ci était plongée dans de l'eau pure.

Cette condition n'existe pas dans les forages d'eau, et chacun devra selon son expérience et la nature du terrain aquifère, multiplier Q_1 , par un coefficient inférieur à l'unité pour tenir compte du fait que chacune des fentes de la crépine même s'il s'agit d'une crépine Jonson, se trouvera garnie de grains plus ou moins gros.

On doit penser aussi que après un certain temps d'utilisation, le forage peut se trouver plus ou moins colmaté par des incrustations .

Pour ces diverses raisons, on peut suggérer de prendre comme coefficient de réduction :0,50 à 0,75 pour le débit Q_1 .

Exemple :

Un forage de reconnaissance a fourni les renseignements suivants :

- ouverture après analyse granulométrique = 0,50 mm ;
- débit prévisible = 60 m³ / heure ;
- épaisseur de l'aquifère = environ 25 m ;

On sait que compte tenu des dimensions des groupes électropompes à moteurs immergés, couramment utilisés en forage d'eau, nous avons dressé le tableau suivant qui permet de choisir les ϕ intérieurs d'après les débits prévus.

| Diamètres intérieurs minima des tubages [pouces] | Débits maxima prévus [m ³ / heure] |
|--|---|
| 4" | 3 |
| 6" | 50 |
| 8" | 140 |
| 10" | 250 |

Tableau 19 : Relation, débit de la pompe immergée – diamètre intérieur de la chambre de pompage.

Ce tableau montre que pour 60 m³/H, le forage devra être tubé en 8" ; la crépine pourra être exécutée en fil de 2,28, le plus couramment employé. Pour une ouverture de 0,50 mm (slot 20), et de fil 2,28 ; le coefficient d'ouverture est de 0,18.

Nous enregistrons cette valeur sur l'échelle correspondante (voir abaque) et nous joignons ce point à l'origine 0.

Si nous prenons une crépine de ϕ nominal de 8 " correspondant au tubage choisi, le tableau présenté par [38] pp 56, nous donne le ϕ extérieur de cette crépine soit 190,5 mm valeur que nous portons sur l'axe des abscisses.

L'ordonnée passant par ce point coupe la ligne 0-0,18 précédemment tracée en 1 point qui nous donne la valeur de cette ordonnée soit 11,5.

Nous voyons que la crépine nous donnerait en eau claire 11,5 m³ / heure /mètre. Pour assurer le débit prévu soit 60 m³ / heure il suffirait, toujours en eau pure, d'une longueur de 60/11,5 = 5,20 mètres.

En affectant ce résultat du coefficient 0,75, une crépine de 5,20/0,75 = environ 6,10 mètres conviendrait . Nous savons que la longueur maximum de crépines Johnson est de 6 mètres, nous choisirons cette dimension .

Comme l'aquifère est épais de 25 mètres, nous placerons la crépine à la base de la couche, ce qui permettra de rabattre au maximum en installant la pompe au dessus du sommet de la crépine, soit à 7 mètres du fond de l'ouvrage .

La formule aurait donné.

$$Q_1 = 340 \times 0,1905 \times 0,18 = 11,56 \text{ m}^3/\text{H/m}.$$

2.8.4 Structure des sols [47] :

2.8.4.1 Granulométrie : Lorsqu'on regarde un sol de près, on s'aperçoit immédiatement qu'il est formé de particules de dimensions très variées. En effet un sol peut contenir des cailloux de 10 cm et plus, comme des particules d'ultra-argile de dimensions inférieurs au micron. Le but de l'analyse granulométrique est d'étudier la taille de ces particules et de mesurer l'importance relative de chacune des fractions de sol de dimensions bien définies : gros éléments, gravier, sable, limon, argile.

La classification de l'hydrogéologue suédois Atterberg est la plus ancienne des classifications utilisées. C'est aussi la plus simple et l'une des plus répandues. Elle suit une progression géométrique de raison 1/10.

| | |
|--------------|---------------------|
| Enrochements | Plus de 200mm |
| Cailloux | 20mm à 200mm |
| Gravier | 2mm à 20mm |
| Sable gros | 0.2mm à 2 mm |
| Sable fin | 0.02mm à 0.2mm |
| Limon | 2 μ à 20 μ |
| Argile | 0.2 μ à 2 μ |
| Ultra-argile | Moins de 0.2 μ |

Tableau 20: Classification Atterberg.

Cette classification semble bien adaptée, elle mérite toutefois d'être retouchée en ce qui concerne la définition des limons ; au dessous d-e 60 μ les grains ne sont plus visibles à l'œil nu et possèdent déjà la plupart du temps des propriétés qui les rapprochent plus des limons que des sables. La classification du Massachusetts Institute of Technology (MIT) adoptée par les normes allemandes, apporte cette retouche à la classification d'Atterberg sans pratiquement rien modifier d'autre.

| | |
|----------------|---------------------|
| Pierres | Plus de 63mm |
| Gravier gros | 20mm à 63mm |
| Gravier moyen | 6mm à 20mm |
| Gravier fin | 2mm à 6mm |
| Sable gros | 0.6mm à 2mm |
| Sable moyen | 0.2mm à 0.6mm |
| Sable fin | 0.06mm à 0.2mm |
| Limon grossier | 20 μ à 60 μ |

| | |
|-------------|---------------------|
| Limon moyen | 6 μ à 20 μ |
| Limon fin | 2 μ à 6 μ |
| Argile | 0.6 μ à 2 μ |

Tableau 21: Classification MIT

2.8.4.2 Coefficient de Hazen : La granulométrie d'un sol peut être caractérisée par un coefficient d'uniformité ou coefficient de Hazen qui est égal au rapport d_{60}/d_{10} (on rappelle que d_y est l'ouverture du tamis au travers duquel passe $y\%$ du poids des grains). Selon que ce coefficient d'uniformité est plus ou moins voisin de 1, on parle d'une granulométrie serrée ou étalée.

Pour Caquot et Kérisel, une granulométrie est étalée dès que le coefficient d'uniformité dépasse 2. Il faut noter toutefois que cette définition varie suivant les auteurs (les normes allemandes par exemple adoptent la valeur 5).

A la suite des travaux de Hazen, on admet que la perméabilité d'un sol dépend, en première approximation, du coefficient d'uniformité et du diamètre d_{10} qui a reçu le nom de diamètre efficace.

La courbe granulométrique reste le moyen le plus sûr pour représenter la granulométrie.

2.8.5 Analyse granulométrique :

2.8.5.1 Mesures de laboratoire (par tamisage) : Par définition, le diamètre d'une particule est égal à l'ouverture intérieure des mailles du plus petit tamis la laissant passer . On commence toujours par faire passer l'échantillon dans une étuve à 105° jusqu'à ce que son poids soit devenu constant. Cette opération a pour but de déterminer le poids exact de l'échantillon. On procède ensuite au tamisage proprement dit. Lorsque les particules ont une dimension supérieure à 100 μ , on utilise des passoirs dont les trous ont un diamètre variant de 12.5mm à 100mm, puis des tamis dont l'ouverture intérieure des mailles varie de 100 μ à 5mm.

Lorsque la dimension des particules est inférieure à 100 μ , le tamisage n'est plus possible. On a recours alors à la sédimentométrie. Cette méthode est basée sur la loi de Stokes qui exprime la vitesse de décantation d'une particule sphérique dans un liquide visqueux en fonction du diamètre de la particule.

2.8.5.2 Elaboration de la courbe : L'analyse granulométrique des couches aquifères granulaires est fortement recommandée car elle permet de déterminer les paramètres nécessaires à l'identification du sol de donner un ordre de grandeur des perméabilités. On peut estimer qu'en ce qui concerne les forages d'eau, la perméabilité dans les terrains alluvionnaires ne devient intéressante qu'à partir de $K=10^{-4}$ m/s (terrains perméables ou très perméables, sable moyen ou gravier sans limon).

On peut classer les terrains granulaires en 4 grandes catégories.

- Classe A : sable fin
- Classe B : sable fin et gros sable
- Classe C : gros sable
- Classe D : sable et gravier fin.

On améliorera la productivité d'un forage en réduisant le coefficient d'uniformité, c'est à dire, en éliminant le plus possible les éléments fins de la formation aquifère qui occupent l'espace entre les grains les plus grossiers, par une opération de développement du forage.

Ouverture des crépines [slots]:

L'eau souterraine est, le plus souvent, contenue dans les formations sableuses et parfois dans les calcaires fissurés ou karstiques. Les sables régularisent le flux hydraulique et le débarrassent de ses impuretés solides. Les terrains sableux ou à granulométrie plus grossière sont presque tous aquifère . On conçoit que la productivité d'un ouvrage varie selon la perméabilité du terrain qui l'entoure immédiatement .

La zone la plus importante est celle qui est directement en contact avec la crépine. C'est celle où la vitesse d'écoulement de l'eau dans le terrain est la plus grande.

Nous verrons que l'opération dite de développement a précisément pour but d'augmenter la perméabilité du terrain en contact avec la crépine . Pour cela on cherche à retirer de cette zone les éléments trop fins qui s'y trouvent, soit en les évacuant en surface soit en les refoulant plus loin dans la formation .

Pour que cette double action soit possible il faut que les fentes de la crépine aient une ouverture dimensionnée de telle sorte qu'elles ne laissent passer que les grains trop fins indésirables .

Le choix des grains à éliminer ne peut se faire que par l'analyse granulométrique . La dimension des fentes sera donc définie par l'étude des courbes granulométriques établies d'après les échantillons recueillis pendant le forage de reconnaissance.

A - Cas d'une formation homogène (couche unique) composée de sable fin uniforme :

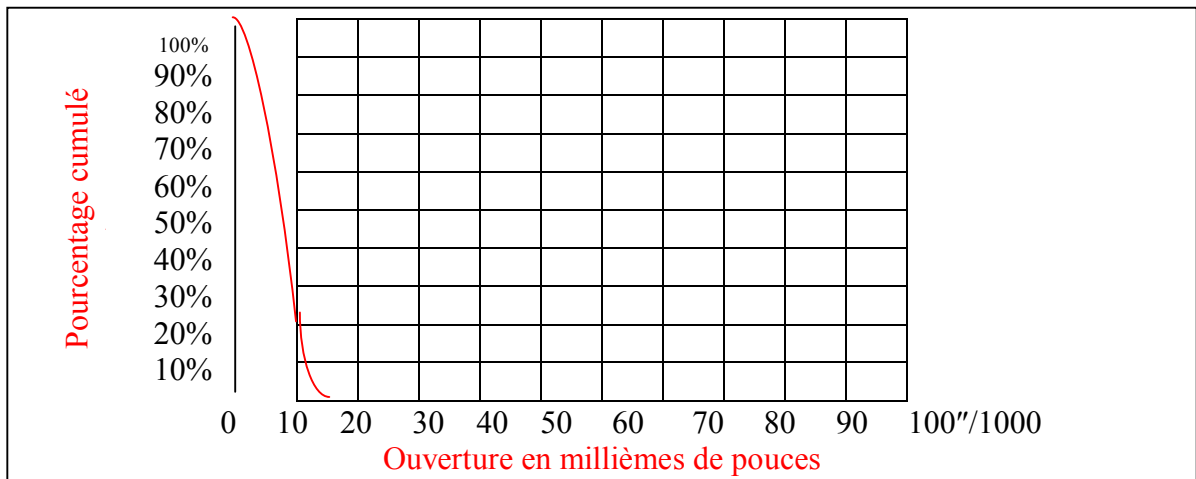


Fig 26 : Courbe granulométrique.

Pour la classe A, l'ouverture doit être telle que la crépine retienne pendant le développement (40 à 50) % des sables. On prendra 40 % si l'eau n'est pas très corrosive, sinon, on peut aller jusqu'à 50 % car la corrosion pourrait à la longue augmenter quelque peu la largeur de la fente . Si l'on n'est pas très sûr de la représentativité de l'échantillon , il est préférable de tabler sur un coefficient de rétention de 50%. La dimension (largeur) de l'ouverture est donnée par la valeur de l'abscisse correspondant à l'ordonnée choisie (40 ou 50) % . Sur la courbe ci-dessus, cette dimension serait de 6 ou 8 millièmes de pouce, soit environ 0,15 à 0,20 millimètres.

$$\text{Slot 6} = (6/1000) = 0,006 \cdot 25,4 = 0,1524 \approx 0,15 \text{ mm}$$

Pour la courbe de la classe A, on trouverait une valeur sensiblement équivalente si l'on ne met pas de gravier additionnel.

B - Pour une formation hétérogène stratifiée (plusieurs couches) : que l'on rencontre souvent, l'ouverture variera afin d'être en rapport avec le terrain qui lui fait face selon la règle précédente, appliquée à chacune des couches . Cependant l'on observera les 2 règles suivantes :

Première règle : Si les matériaux fins sont situés au dessus des gros, ce qui est fréquent en forage d'eau , il convient de prolonger d'au moins 0,60 m vers le bas (dans la portion d'éléments grossiers), la section de crépine dont l'ouverture est adaptée aux matériaux fins.

Deuxième règle : Dans ce cas (matériaux fins au dessus des gros), l'ouverture à choisir pour les éléments grossiers (couche inférieure) ne doit pas être supérieure au double de celle adaptée aux matériaux fins.

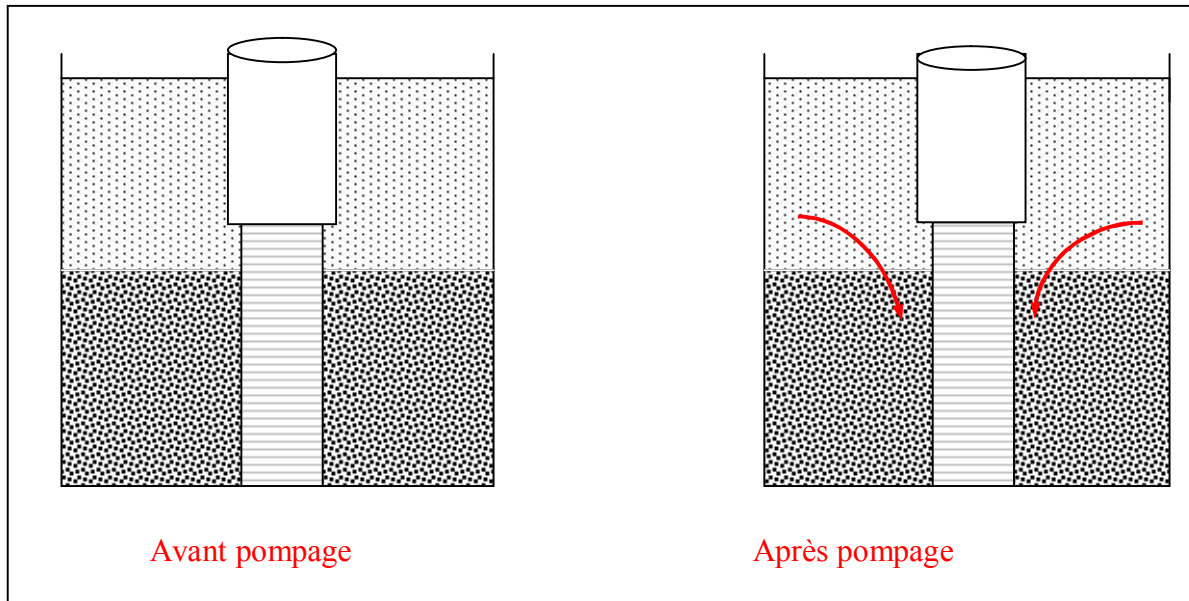


Fig 27 : *Ouverture des crépines pour terrain hétérogène.*

L'observation de ces règles réduira les risques de venues de sable au pompage et palliera l'incertitude dans laquelle on peut se trouver et de situer avec précision la côte où se produit le changement de terrain.

2.8.6 *Gravier additionnel :*

2.8.6.1 *Terrain constitué par du sable très fin et uniforme :* Dans ce cas, l'introduction d'un massif annulaire de gravier additionnel permettra de choisir une ouverture plus grande pour la crépine.

Par exemple si l'on aboutissait à une ouverture de slot $6 = 0,006'' = 0,15 \text{ mm}$ (classe A), on pourrait passer avec le gravier additionnel au slot 30 ou 40, ce qui améliorerait largement le débit, réduirait la vitesse de circulation de l'eau à l'entrée de la crépine et diminuerait les risques d'érosion .

Voici comment on peut définir les caractéristiques du gravier additionnel et l'ouverture à donner dans ce cas à la crépine :

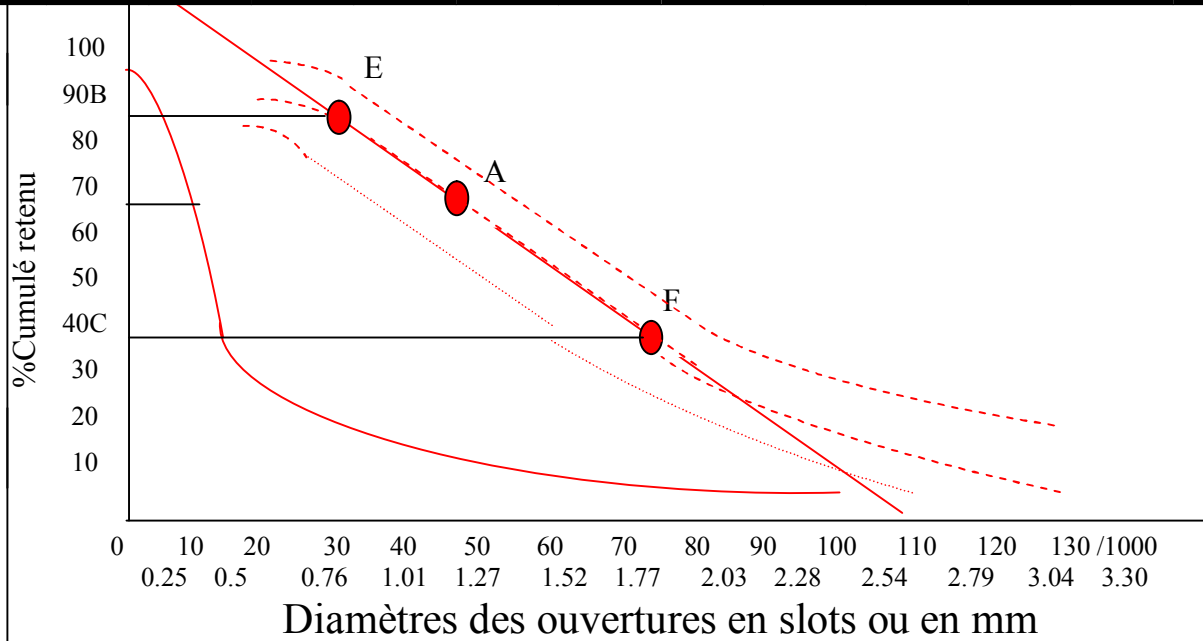


Fig 27 : Ouverture des crépines et dimensions du gravier.

On multiplie la valeur de l'abscisse à 70% par un nombre compris entre 4 et 6 ; 4 si le matériau est très uniforme ; 6 dans le cas contraire. Nous prenons 6 pour notre exemple et nous obtenons le point A, premier point de la courbe du gravier additionnel. Le coefficient d'uniformité d'un bon gravier additionnel doit être de 2 à 2,5 . Nous prenons 2,5, valeur limite supérieure . Nous savons que ce coefficient est représenté par le quotient de l'abscisse à 40 % par l'abscisse à 90%.

Nous fixons le point D de telle sorte que :

$$BD=BC/(2,5-1)=BC/1,5 \quad (2.16)$$

La droite DA constitue la portion caractéristique du gravier additionnel . Nous retenons les valeurs des abscisses à 90% et à 40 % , soit BE = 0,65 mm environ et CF=1,65 mm environ. Notre gravier sera donc défini comme suit :

10 % d'éléments plus fins (en poids) que 0,65 mm et 40 % d'éléments plus gros que 1,65 mm avec une tolérance de + 8 % .

Nous avons dit que la mise en place du gravier additionnel dans une formation de sable très fin et uniforme permet de choisir une plus grande ouverture pour la crépine . Voyons comment on peut fixer la dimension de l'ouverture dans ce cas.

Puisque le gravier additionnel est très uniforme ; il suffit que la crépine laisse passer les éléments les plus fins qui représentent 10% du poids du gravier. On prendra donc comme ouverture la valeur de l'abscisse à 90% de la courbe du gravier.

Pour l'exemple choisi, cette valeur est donnée par BE soit environ $26/1000'' = 0,026'' = 0,66 \text{ mm}$.

Si nous n'avions pas mis de gravier, l'ouverture (abscisse à 40% de la courbe du terrain) eût été de $12/1000'' = 0,012'' = 0,30 \text{ mm}$.

On voit qu'il sera possible de réduire de moitié la vitesse d'entrée à la crépine ou pour la même vitesse et si la formation le permet de doubler le débit.

2.8.6.2 Nappe aquifère épaisse et artésienne : Le massif en gravier permettra de réduire le diamètre de la crépine, d'augmenter sa longueur, en maintenant les parois et en mettant en production, selon les règles précédentes, le maximum de hauteur de la couche.

2.8.6.3 Terrain constitué par des grès mal « cimentés » : Le massif de gravier servira à tenir le terrain et à éviter sa désagrégation pendant le développement et la production.

2.8.7. Mise en place du gravier : Le gravier est mis en place dans un forage :

- soit par gravité ;
- soit par un circuit continu sous pression.

Avant de décrire les différentes méthodes de mise en place des massifs de gravier, il nous paraît nécessaire d'attirer l'attention sur le phénomène de « ségrégation » du gravier et de ses conséquences lors de sa mise en place dans le forage.

Ainsi donc, avant une opération de mise en place du massif de gravier, on choisira une méthode qui évitera la séparation des éléments fins, des éléments plus grossiers.

Un mélange de sable et gravier dont le coefficient d'uniformité est supérieur à 2,5 est difficile à mettre en place sans que se produise une séparation indésirable des éléments fins des éléments grossiers.

Il est démontré qu'un élément d'un diamètre donné, tombe dans l'eau 4 fois plus vite qu'un élément de même nature mais de diamètre 2 fois plus petit . Dans ce cas, dans un massif de gravier mis en place dans 1 forage, les éléments à gros grains se situeront en fond du forage alors que les éléments fins se situeront dans la partie haute du filtre . Ceci aura pour conséquence de pomper du sable au travers des éléments grossiers du filtre situé au fond du forage, alors que la zone à éléments fins ne laissera passer qu'un débit réduit . Dans un tel cas, la mauvaise mise en place du massif de gravier réduira considérablement son efficacité alors même que sa granulométrie avait été parfaitement déterminée . Dans ce cas, il est préférable, pour éviter la « séparation » de recourir au 2^{ème} procédé (circuit continu sous pression).

2.8.7.1. Introduction du gravier par gravité :

Cette méthode concerne surtout les forages peu profonds . Elle consiste à mettre le gravier en place en utilisant un tube conducteur, muni en sa partie supérieure d'une trémie, servant à l'alimentation

continue de ce gravier . Ce tube conducteur aura un ϕ de 2" ou plus ; il sera placé au fond du forage puis remonté au fur et à mesure de la montée du gravier, dans l'espace annulaire autour de la crépine, dont on contrôlera en permanence la position .

L'introduction régulière du gravier dans la trémie se fait en parallèle avec un fort débit d'eau ce qui facilite le passage du gravier dans le tube et évite la formation de bouchons dans

celui-ci.

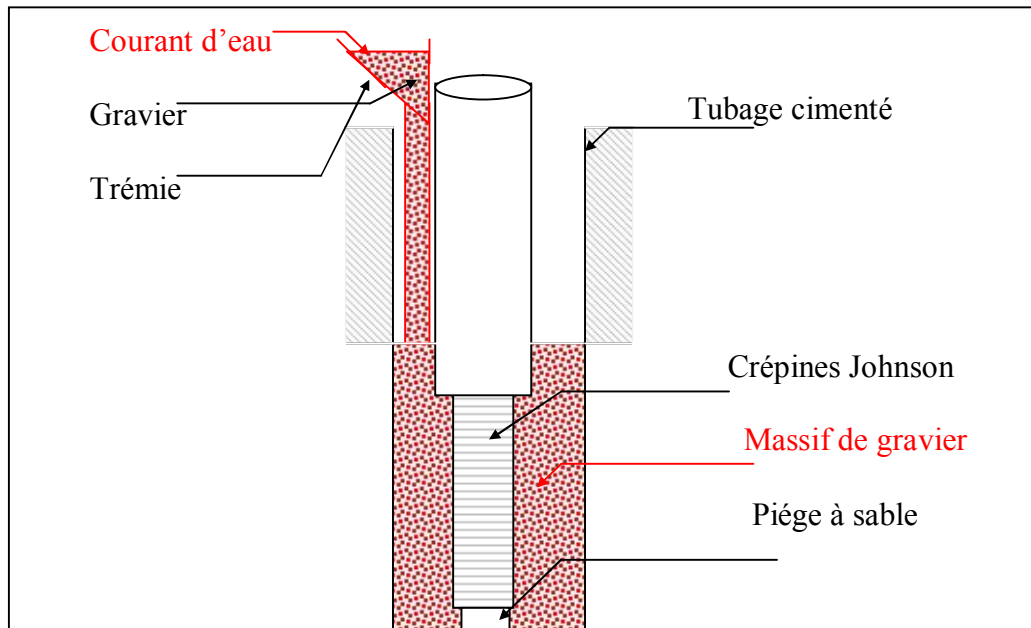


Fig 29 : Mise en place du gravier (par gravité).

2.8.7.2. Introduction du gravier en circuit continu sous pression :

Pour les forages profonds, généralement de plus faibles diamètres, il n'est pas possible d'utiliser le tube à entonnoir et le moyen le plus utilisé consiste à introduire le gravier dans une boue légère ou dans de l'eau, en circulation inversée, en utilisant la pompe à boue.

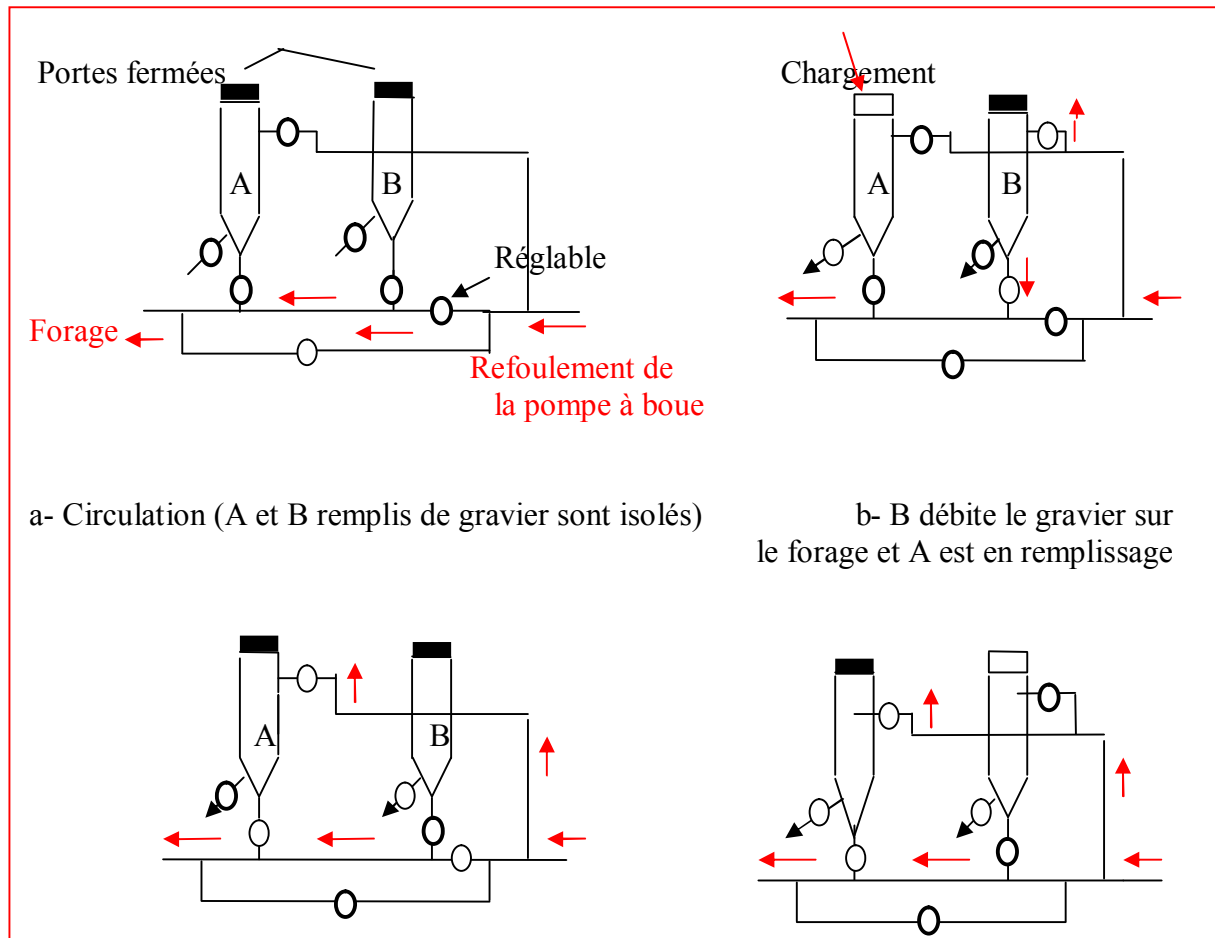


Fig 30 : Mise en place du gravier (sous pression).

L'équipement de surface se compose de 2 réservoirs cylindriques verticaux à fond conique et à couvercle ouvrant mais étanche dans sa position fermée. 8 vannes à fermeture et ouverture rapides sont nécessaires. Tout le dispositif est monté en série comme l'indique la figure entre la pompe et l'espace annulaire du forage. A l'entrée du forage il doit se trouver un manomètre et nous verrons qu'il est préférable qu'il soit enregistreur. En surface l'espace annulaire entre le tubage de soutènement du forage et le tube distributeur de gravier doit être hermétiquement fermé par un presse étoupe ou mieux par un obturateur SHAFFER (Blow out preventer).

Le gravier suspendu dans la boue légère ou l'eau de circulation, refoulé par la pompe, s'installe de bas en haut autour de la crépine. Une décantation se produit, le gravier se dépose et la boue traverse seule la crépine et sort du forage par le tube distributeur qui repose par sa portée conique sur le cône de suspension, au dessous des fenêtres. La boue sortant du tube distributeur est reprise par la pompe et remise en circulation.

L'opération s'effectue en circuit continu, elle se déroule de la façon suivante :

Les vannes du schéma sont représentées par des cercles noirs pleins si elles sont complètement fermées, un cercle blanc indique une vanne complètement ouverte. L'une des vannes est réglable, elle est représentée par un cercle à demi noirci . Sur chacun des 2 réservoirs le couvercle fermé est représenté par un rectangle noir, le rectangle blanc indique que le couvercle est ouvert pour permettre le chargement en gravier.

La première partie (phase1) représente l'opération de contrôle de la circulation. Les 2 réservoirs à ce moment sont isolés du circuit par la fermeture de toutes leurs vannes. L'examen des autres phases du schéma permet de comprendre facilement la succession des opérations, un réservoir étant en remplissage pendant que l'autre se vide sous la pression de la pompe.

Chaque réservoir est muni à la base d'une vanne de vidange crépinée qui peut laisser passer l'eau contenue dans le gravier pendant le remplissage sans que le gravier lui-même ne puisse sortir.

Entre les schémas a et b, on a rempli les 2 réservoirs de gravier. L'opération peut se faire à la pelle ou mieux avec des sacs, d'autant qu'un gravier de qualité est souvent livré en sacs . A la phase 2, c'est le réservoir de gauche A qui envoie son gravier dans le forage, toutes les vannes du réservoir B étant fermées. La phase 3 montre que pendant que B débite sur l'ouvrage, on en profite pour remplir le réservoir A . La phase 4 indique, que B est en remplissage pendant que A se vide.

Dans le forage, le niveau du gravier s'élève de manière continue dans l'espace annulaire. Pendant ce temps, remarque très importante ; la section libre de passage de la boue à travers la crépine diminue progressivement et la pression de refoulement (manomètre) augmente régulièrement.

Pour éviter que la crépine ne soit exposée à une importante surpression ; on prévoit à l'avance un tronçon de crépine de 1,5 m de même diamètre et même ouverture que la crépine principale. Il sera installé au dessus d'1 tube plein de 3 m de longueur vissé à la crépine principale . Enfin encore au dessus, le tube plein d'extension.

Le tout est supporté par le cône de suspension ou même placé simplement dans le forage .

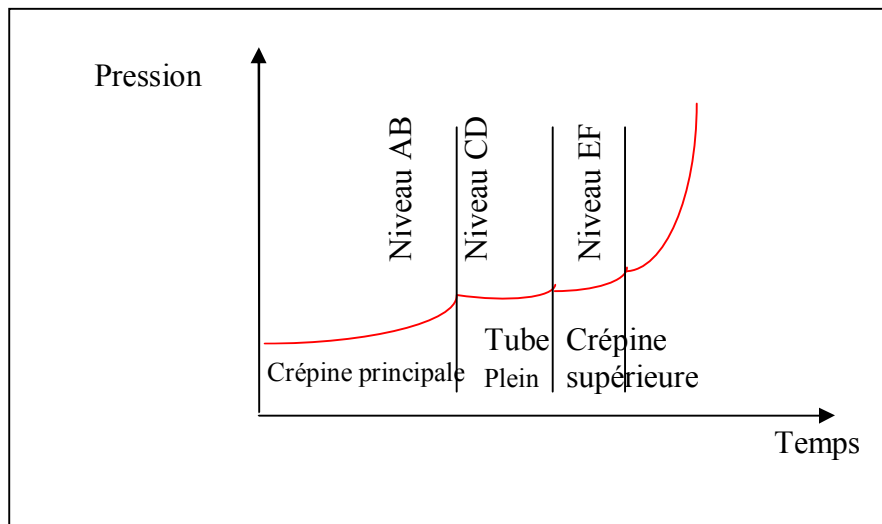


Fig 31 : Fin de l'opération de la mise en place du gravier (sous pression).

Pour comprendre le fonctionnement du système, reportons nous au graphique ci-dessus (non dimensionnel). En abscisse figurent les temps et en ordonnées les pressions relevées par le manomètre (si possible enregistreur) placé à l'entrée du mélange boue (ou eau) et gravier dans l'espace annulaire.

Un premier signal avertisseur est donné par l'apparition du palier; on sait qu'à ce moment, le gravier recouvre entièrement la crépine inférieure et l'on doit alors arrêter la pompe.

Cependant si l'on désire ajouter encore un peu de gravier, ce qui est recommandé, on peut le faire prudemment à débit réduit et l'on dispose pour cela de tout le temps correspondant au palier de la courbe.

Enfin l'opération doit obligatoirement être arrêtée dès l'apparition du début de la remontée de la courbe. Le niveau du gravier a alors atteint sa côté critique.

Plus le débit de la pompe à boue sera réduit, plus longues seront les phases successives de la courbe des pressions.

D'ailleurs il est recommandé de procéder aussi lentement que possible pour injecter le gravier dans 1 forage ; il paraît prudent de ne pas chercher à introduire plus de 2000 Kg de gravier à l'heure.

Il importe pour cela, comme pour la cimentation, de connaître au préalable le volume total de gravier à mettre en place.

Connaissant la contenance de chacun des 2 réservoirs, on en déduit le nombre d'opérations à effectuer, ce qui permet déjà de situer, approximativement, la position du niveau du gravier dans l'espace annulaire en comptant le nombre de réservoirs déjà vidés de leur contenu. Cette position se trouve ensuite précisée par la courbe.

Bien veiller à ce que l'injection soit continue et s'efforcer de réduire les temps morts de manœuvres des vannes entre 2 vidanges des réservoirs, d'où l'intérêt d'utiliser des vannes à ouverture et à fermeture rapides.

L'opération de mise en place de gravier étant achevée, le tube distributeur sera remonté et l'obturateur sera installé dans le cône de suspension .

On pourra aussitôt procéder au lavage au jet, puis au développement de la formation.

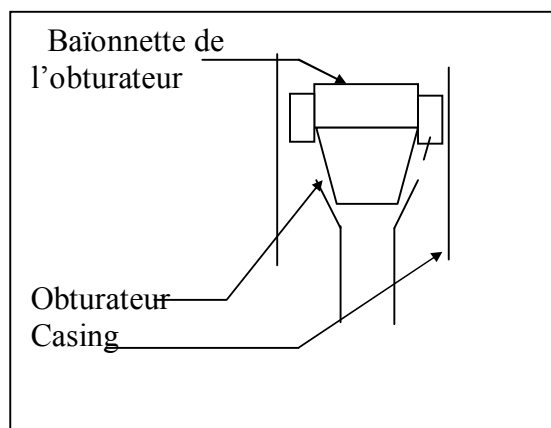


Fig 32 : Raccord baïonnette.

2.8.8. Le Développement :

La dernière phase de l'équipement d'un forage est la mise en place de la crépine et éventuellement celle du gravier additionnel.

L'ouvrage pourrait être mis en service à ce moment mais :

- nous n'en tirerons pas toute l'eau que pourrait fournir la formation aquifère ;
- nous risquerions fort de pomper beaucoup de sable, d'endommager gravement le matériel de pompage et souvent de provoquer des affaissements du sol autour du forage.

A ces 2 maux, il existe un seul remède ; c'est le développement.

. Nous avons déjà vu que l'on peut améliorer la productivité d'un forage en éliminant le plus possible les éléments fins de la formation qui occupent les espaces entre les grains grossiers.

. Faire cela, c'est précisément, opérer un développement.

2.8.8.1. La zone sensible est la crépine et le terrain adjacent :

La zone située tout autour de la crépine et sur toute sa hauteur, est vraiment la zone sensible et souvent même la zone critique de l'ouvrage. C'est cette zone qu'il convient d'améliorer par le développement.

On sait qu'il vaut mieux employer une crépine un peu plus ouverte, permettant avec un développement approprié de retirer de la formation adjacente, les sables fins qui s'y trouvent en les forçant à pénétrer dans la crépine.

Lorsque le terrain situé dans la zone sensible autour de la crépine aura été débarrassé de ses éléments fins indésirables, il se trouvera stabilisé et c'est lui qui jouera en profondeur le rôle d'un filtre progressif, efficace.

Ainsi, l'on voit que le développement stabilise la formation. En outre, non seulement la crépine n'est plus un obstacle au passage de l'eau, mais elle permet de constituer, grâce au développement du terrain qui l'entoure, une zone plus perméable procurant une capacité spécifique accrue, sans entraînement de sable.

On sait que (après choix de l'ouverture et du gravier), la crépine doit laisser passer pendant le développement 10% seulement du gravier additionnel.

Ainsi l'on voit que :

- le développement est une opération importante et profitable. Il a pour but d'augmenter la perméabilité du terrain adjacent à la crépine, ce qui permet :
- d'améliorer la capacité spécifique ;
- d'éliminer de la zone critique les éléments fins indésirables et de stabiliser la formation..

Certains terrains, cependant, n'ont pas besoin d'être développés et d'ailleurs ils ne pourraient l'être : Ce sont les formations de calcaires fissurés ou Karstiques. Il en est de même pour les terrains alluvionnaires uniformes composés, exclusivement d'éléments grossiers sans sables fins ni argile. Ces terrains sont cependant assez rares.

2.8.8.2. Conditions à remplir :

Le développement ne peut s'effectuer qu'après la mise en place de la crépine .

Il en résulte que celle-ci doit être conçue pour permettre cette opération. Elle ne doit pas faire obstacle au flux de développement .

Les crépines munies d'un fourreau de gravier collé s'opposent formellement au développement, lequel d'ailleurs tendrait à provoquer le décollement et la destruction de ce fourreau.

Les crépines lanternées ne s'opposent pas à l'opération, mais elles en réduisent l'efficacité puisque le flux ne peut agir sur la formation qu'aux seuls points, où se trouvent les fentes .

Les crépines à nervures repoussées freinent également le flux de développement puisque le pont de métal qui se trouve à chaque ouverture brise le jet sous pression venant de l'intérieur de la crépine.

Il est clair que les crépines à fente hélicoïdale continue conviennent mieux que toute autre puisque la section de contact avec le terrain ou le gravier additionnel est nettement plus grande que dans n'importe quel autre système.

Enfin il y a lieu d'éliminer le cake déposé par la boue à la bentonite sur les parois du forage. Cette opération doit être faite de préférence avant la mise en place du gravier additionnel (Raclage) .

Nous remarquons l'intérêt d'utiliser un produit spécial, le REVERT, pour remplacer la boue à la bentonite dans les dernières passes du forage.

2.8.8.3 Procédés et outillages à employer pour développer un forage :

05 moyens s'offrent à nous : on pourra employer sur le même forage, l'une quelconque de ces méthodes, ou successivement, plusieurs d'entre elles :

- surpompage ;
- pompage alterné ;
- pistonnage ;
- développement pneumatique ;
- lavage sous pression.

2.8.8.4 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 du flux et du reflux provoquée par de grands volumes d'air introduits dans l'ouvrage avec celle de mise en production par « air lift » (éjecteur ou émulseur)

[38].

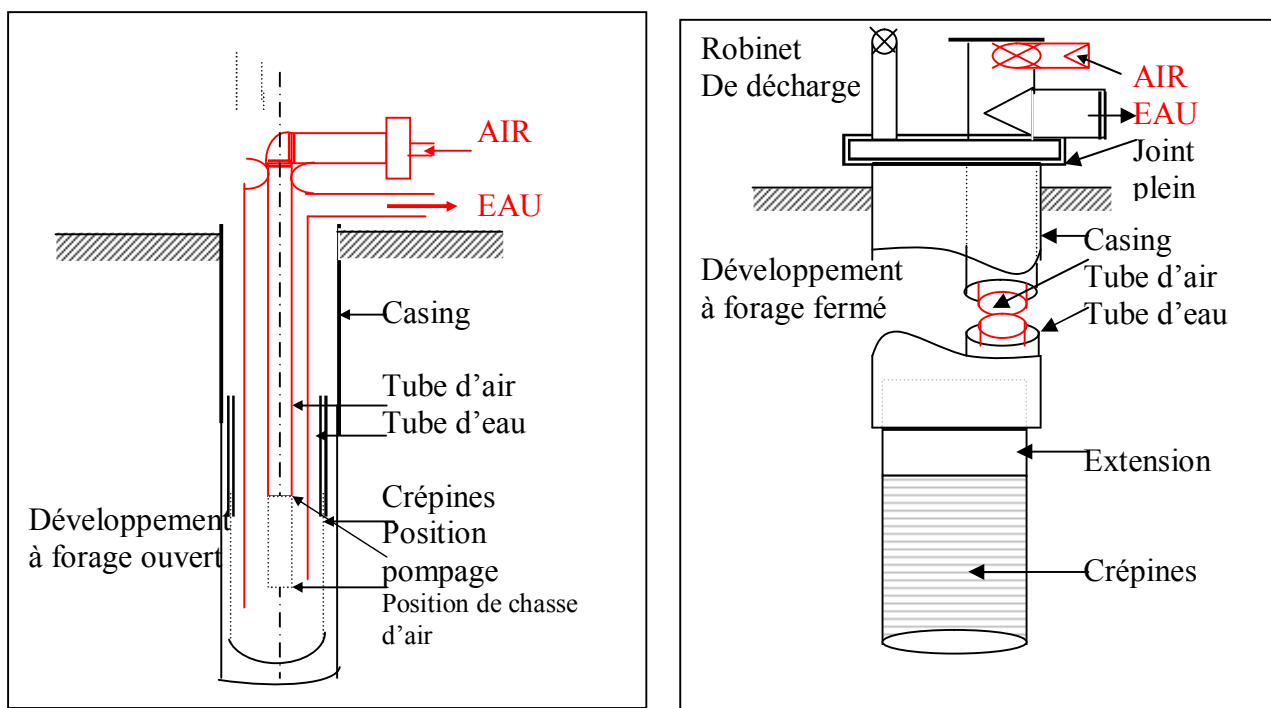


Fig 33 : Développement pneumatique.

2.8.8.4.1. Méthode à forage ouvert (fig. 33, de gauche) :

L'opération consiste à alterner les phases de pompage à l'air lift et de soufflage brusque. Cette dernière phase est réalisée en descendant le tube d'air à l'intérieur de la crépine. Pour faciliter la manœuvre, le robinet d'air doit être du type « à boisseau » à ouverture et fermeture rapides « au quart de tour ».

On procède ainsi :

- descendre le pied du tube d'eau à 0,60m environ du sabot de la crépine ;
- **descendre ensuite le tube d'air de façon que sa base soit à environ 0,30m au dessus de celle du 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 0,30m au dessous du sabot du tube d'eau soit 0,60m plus bas que précédemment et à 0,30m du fond de la crépine ;
- 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 ; l'eau éjectée par air lift s'écoule trouble, par le tube d'eau ;
- quand elle est redevenue claire, remonter le tube d'eau de 0,60m à 1m et recommencer les opérations précédentes pour traiter la formation au niveau du sabot du tube d'eau et ainsi de suite sur toute la hauteur de la crépine ;
- il sera alors nécessaire de descendre 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 extraite à ce dernier stade, sort claire, sans sable on peut considérer que l'opération est terminée.

2.8.8.4.2. Méthode à forage fermé (fig. 33, de droite) :

Le casing est hermétiquement fermé par un joint plein que traverse le tube d'eau et qui comporte une ouverture raccordée à un robinet de décharge. Un robinet, 3 voies à boisseau, permet d'opérer les manœuvres indiquées ci-dessous . Le procédé nécessite quelques précautions, car il peut entraîner un ébranlement des tubages en place, une détérioration de la cimentation et des éboulements dans la zone de production.

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 manœuvrer 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 ; l'eau sera refoulée, hors du tube d'eau, au niveau du sol ainsi que à travers la crépine dans la formation adjacente, en brisant les ponts de sable ou de gravier ;
- 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 ; à 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 du forage ;
- répéter ces opérations jusqu'à ce que le forage ne produise plus de sable ;

Il est alors rarement nécessaire de nettoyer le forage, car la grande vitesse d'eau provoque généralement l'expulsion des sables fins.

Il n'en serait pas de même s'il s'agissait de sables grossiers ou graviers qui aurait pu pénétrer à travers une crépine trop ouverte ou de construction peu soignée, dans ce cas, il faudrait extraire à la soupape, les matériaux qui s'y trouveraient.

On remarque que dans ce procédé, le tube d'eau et le tube d'air restent fixes, ce qui n'était pas le cas dans la méthode à forage ouvert.

2.8.8.5. Développement par utilisation d'agents chimiques :

2.8.8.5.1. Acides : En milieu calcaire, la mise en œuvre d'acide chlorhydrique ou sulfamique est souvent très efficace.

Pour qu'une acidification soit efficace, il faut que la roche possède soit des fissures, soit des canalicules, soit des vacuoles ... Il faut également que la roche contienne des minéraux solubles à l'acide tels que les carbonates de calcium et de magnésium . Il n'est pas nécessaire que l'HCL reste longtemps en contact avec la roche car le temps de neutralisation peut être quelque fois relativement court. Cependant, selon les auteurs et surtout selon les caractéristiques de la roche, ce temps d'acidification peut se situer entre moins d'une heure et jusqu'à 20 heures.

On sait que théoriquement un litre d'HCL à 15% attaque 221 gs de $\text{Co}_3 \text{Ca}$ ou 203 gs de dolomie. La solution acide avant d'être injectée a un P^{H} de l'ordre de 1 à 2 . Celui ci ↗ rapidement lorsqu'il est en contact avec la roche, pour atteindre la neutralisation $\text{P}^{\text{H}} = 7$.

Ces roches contiennent parfois des oxydes de fer et d'Al qui sont précipitées respectivement sous un P^{H} de 2,5 et 4 . Ils peuvent se transformer en un composé gélatineux d'hydroxydes capable de bloquer les fissures fines . Pour éviter cet inconvénient on peut ajouter de l'acide citrique ou de l'acide lactique à raison de 10 gs/l de solution acide à 15%, ce qui permet d'éviter la précipitation du fer contenu dans une formation calcaire ayant moins de 1% d'oxyde de fer en poids. Il n'est pas recommandé d'↗ les concentrations d'HCL d'une solution aqueuse car celui-ci a tendance à pénétrer plus profondément dans le terrain, ce qui provoque un plus grand volume de produits dissous formant une bouillie sirupeuse difficile à évacuer .

Il vaut mieux renouveler les opérations et pénétrer ainsi progressivement dans le terrain.

Les opérations d'acidification qui nécessitent 2 ou 3 opérations successives sont courantes pour arriver au résultat espéré.

On nettoiera bien le forage avant toute acidification par quelques heures de pompage afin de bien dégager les fissures.

Les résultats obtenus sont souvent très intéressants et spectaculaires, ainsi à Berroughia par exemple, il a été obtenu une augmentation de débit de 7,5 fois après 4 phases d'acidification et une pression en tête du forage au cours de l'acidification de 1,5 bars.

2.8.8.5.2. Polyphosphates : Ils sont très efficaces car ils disposent le cake de forage et les argiles en provenance du terrain . On les utilise soit avant soit pendant le développement et en leur donnant suffisamment de temps pour agir et pour être efficaces. Cette opération est renouvelée autant de fois qu'il est nécessaire.

Les polyphosphates cristallins utilisés sont le pyrophosphate de soude. . L'hexametaphosphate de soude est un phosphate vitreux d'une mise en œuvre facile.

On utilise les polyphosphates avec un dosage de l'ordre de 1,5 à 2% d'eau contenue dans la crépine (ou 2à 3% d'eau contenue dans le forage) . A cette solution on ajoutera de l'hypochlorite de chaux à raison de 1,5 à 2 /1000 du volume d'eau contenu dans le forage, afin de contrôler une éventuelle prolifération bactérienne.

Les polyphosphates doivent être prémélangés dans une eau chaude, car il se dissolvent difficilement dans l'eau froide . On peut aussi les placer dans 1 panier métallique ou dans une toile suspendue dans l'eau d'1 bac.

L'hexamétaphosphate de soude surdosé peut se transformer au contact de l'eau froide, en une masse gélatineuse qui peut bloquer le forage et être difficile à extraire . L'ajout d'agents mouillants aux polyphosphates peut accroître leur efficacité pour désagréger l'argile (1/000 par exemple) . On évitera d'utiliser ces produits dans des formations contenant des couches minces d'argile alternées avec des couches minces de sable car ils provoquent un mélange des 2 couches contre la crépine. Ce mélange est alors difficile sinon pratiquement impossible à éliminer au cours des pompages.

On utilise ces agents chimiques selon les procédés classiques, par pistonage , air comprimé (*abaissement du niveau d'eau*) ou par jet sous pression. *Cette dernière méthode étant la plus efficace.*

L'opération peut être prolongée pendant plusieurs heures (voie 24 heures) et recommencée plusieurs fois . On extraira les produits dissous et désagregés par cuillérage, air-lift ou pompage.

Il est prévu un dosage optimal de 50 Kg/m³ d'eau contenue dans le puits. Le produit injecté est agité soit par une circulation d'eau à l'aide d'une pompe immergée, soit par pistonage.

Si cette opération est entreprise après une acidification, on s'assurera au préalable, de la neutralité du pH de l'eau.

2.8.9. Colonnes de captage installées dans la région de KSAR-CHELLALA [23] :

| Zone | Nombres de forages | Destination | Nappe | Terrain | Gravier | Crépines |
|-----------|--------------------|----------------------|----------------|---------------|---------|-----------|
| ADJERMAIA | 18 | Irrigation de 400 ha | Albien à 12 m | Sable et grès | Oued | TNRS 12'' |
| METALES | 06 | Irrigation de 50 ha | Albien à 230 m | Grès | Oued | TNRS 6'' |

Tableau 22 : *Crépines installées dans quelques forages de la zone d'étude.*

TNRS – Tôle noire roulée, soudée.

Le pouce est une unité de mesure égale à 25,4 mm ou 2,5 cm.

Certains constructeurs provoquent des ouvertures « à persiennes » obtenues par poinçonnement et soulèvement d'1 des bords de chaque fente, dans une tôle ensuite roulée et soudée, (TNRS).

La précision et la régularité des fentes laissent à désirer.

2.9 Conclusion :

Le gravier additionnel est toujours utile, il est souvent indispensable. Que son rôle soit celui d'un stabilisateur de la formation, ou qu'il soit un élément complémentaire d'une formation trop fine, on peut conclure qu'il y a lieu, en règle générale, de mettre en place ce massif auxiliaire.

CHAPITRE 3.

Analyse Statistique des résultats

3.1. Introduction :

Nous avons consacré ce chapitre à l'analyse des résultats par des tests statistiques.

Pour l'essentiel nous avons utilisé la comparaison de moyennes sur des observations non associées par paires où le $T_{\text{observé}}$ sera comparé à $T_{(1-\alpha/2)}$ tabulé aux seuils de 5 % et de 1% à $2(n-1)$ de la table de Student.

Afin de mieux apprécier les différentes tendances ; nous avons jugé nécessaire de répartir les profondeurs de prélèvement en « classes ».

Ainsi, les comparaisons porteront sur le paramètre granulométrie au niveau des trois zones d'étude (inter et intra zone : comparaison horizontale ; et inter et intra classe : comparaison verticale) .

3.2. Classification de la granulométrie adoptée :

La classification de l'agronome suédois Atterberg modifiée par Massachusetts Institute of technology (MIT) adoptée par les normes allemandes [47] est celle que nous avons retenue.

Elle nous a permis de :

- définir quatre classes de diamètres de grains : gravier fin avec $\phi=(2 \text{ à } 6)\text{mm}$; sable à grains moyens et gros avec $\phi=(0.25 \text{ à } 2)\text{mm}$, sable à grains fins avec $\phi=(0.05 \text{ à } 0.25)\text{mm}$, limons avec $\phi=<0.05\text{mm}$.
- partager la profondeur des forages (12 à 120 m) en 18 classes de même amplitude (6m).

A l'intérieur des classes des profondeurs et pour chaque classe de diamètre, nous enregistrerons les pourcentages des grains de sable retenus par les différents tamis.

3.3 Organisation des données :

3.3.1. Sous forme de tableaux :

Sur des tableaux, nous avons organisé puis résumé les données de départ pour les présenter comme suit :

| Profondeur prélèvement | Numéro de la zone | Numéro de forage | Granulométrie | | |
|---------------------------|----------------------|---------------------|---|--|--------------------|
| | | | (0.25à2)mm Sable à grains moyens, gros. | (0.05à0.25)mm Sable à grains fins. | <0.05mm Limons. |
| (12 à 18) m | 1 | 223 | 3,73 | 23,73 | 72,54 |
| | 1 | 225 | 0,89 | 11,71 | 87,4 |
| | 1 | 230 | 4,22 | 3,52 | 91,24 |
| | 1 | 320 | 0,5 | 2,6 | 73,5 |
| | 3 | 444 | 5,84 | 49,28 | 44,88 |
| | 3 | 457 | 5,1 | 47,5 | 47,4 |
| | 3 | 458 | 12 | 51,4 | 36,6 |
| | 3 | 459 | 5,88 | 50,24 | 46,36 |
| (24 à 30) m | 1 | 313 | 1,56 | 18,77 | 79,67 |
| | 1 | 313 | 4,03 | 31,55 | 64,42 |
| | 2 | 252 | 0,2 | 18,8 | 81 |
| | 2 | 261 | 0,2 | 19,4 | 80,4 |

Tableau n° 23: *Granulométrie à l'intérieur des classes.*

| Entre les classes | | | | | |
|------------------------------|----------------------|----------------------------|---|--|--------------------|
| Profondeur de Prélèvement | Numéro de la zone | Granulométrie (mm) | | | |
| | | (2à6)mm gravier fin. | (0.25à2)mm sable à grains gros, et moyens. | (0.05à0.25)mm sable à grains fins. | <0.05mm limons. |
| (12à18)m | 1.2 | 0 | 3,2 | 25,23 | 71,57 |
| (18à24)m | 1.2 | 0 | 1,09 | 12,27 | 86,64 |
| (24à30)m | 1.2 | 0 | 1,47 | 23,26 | 75,27 |
| (30à36)m | 2 | 0 | 0,4 | 75,8 | 23,8 |
| (36à42)m | 2 | 0,06 | 42,66 | 57,28 | 0 |
| (42à48)m | 2 | 1 | 76,6 | 22,4 | 0 |
| (48à54)m | 2 | 0 | 42,2 | 57,8 | 0 |
| (54à60)m | 2 | 0 | 50,4 | 49,6 | 0 |
| (60à66)m | 1 | 0 | 0 | 31,66 | 68,38 |
| (66à72)m | 1 | 12,61 | 11,45 | 11,44 | 64,50 |
| (72à78)m | 1 | 1,45 | 3,44 | 13,59 | 81,52 |
| (78à84)m | 2 | 1,45 | 3,44 | 13,59 | 81,52 |
| (84à90)m | 2 | 0,2 | 4,5 | 55,7 | 39,6 |
| (90à96)m | 2 | 0,2 | 4,5 | 55,7 | 39,6 |
| (96à102)m | 2 | 0 | 5,2 | 71,55 | 19,8 |
| (102à108)m | 2 | 0 | 0,8 | 52,6 | 46,6 |
| (108à114)m | 2 | 0 | 0,8 | 52,6 | 46,6 |
| (114à120)m | 2 | 0 | 0,8 | 52,6 | 46,6 |
| (260m) | 2 | 0 | 6,9 | 67,7 | 25,4 |

Tableau n° 24: *Granulométrie entre les classes.*

Quand on représente des données par une telle distribution, on dit que ces données sont des données groupées.

Bien que le processus de regroupement de données détruise une grande partie de l'information primaire, il en résulte néanmoins une grande clarté par le tableau d'ensemble et la signification essentielle des données qui en résultent.

3.3.2. Sous forme d'histogrammes :

C'est la représentation graphique de la distribution d'effectifs.

- Un histogramme ou histogramme de fréquence est un ensemble de rectangles ayant : (a) comme longueur sur l'axe des x, l'amplitude de classe, toutes les classes ayant même dimension ;
(b) des aires proportionnelles aux effectifs des classes.

3.3.2.1 A l'intérieur de la classe (12 à 18)m pour sable à grains fins :

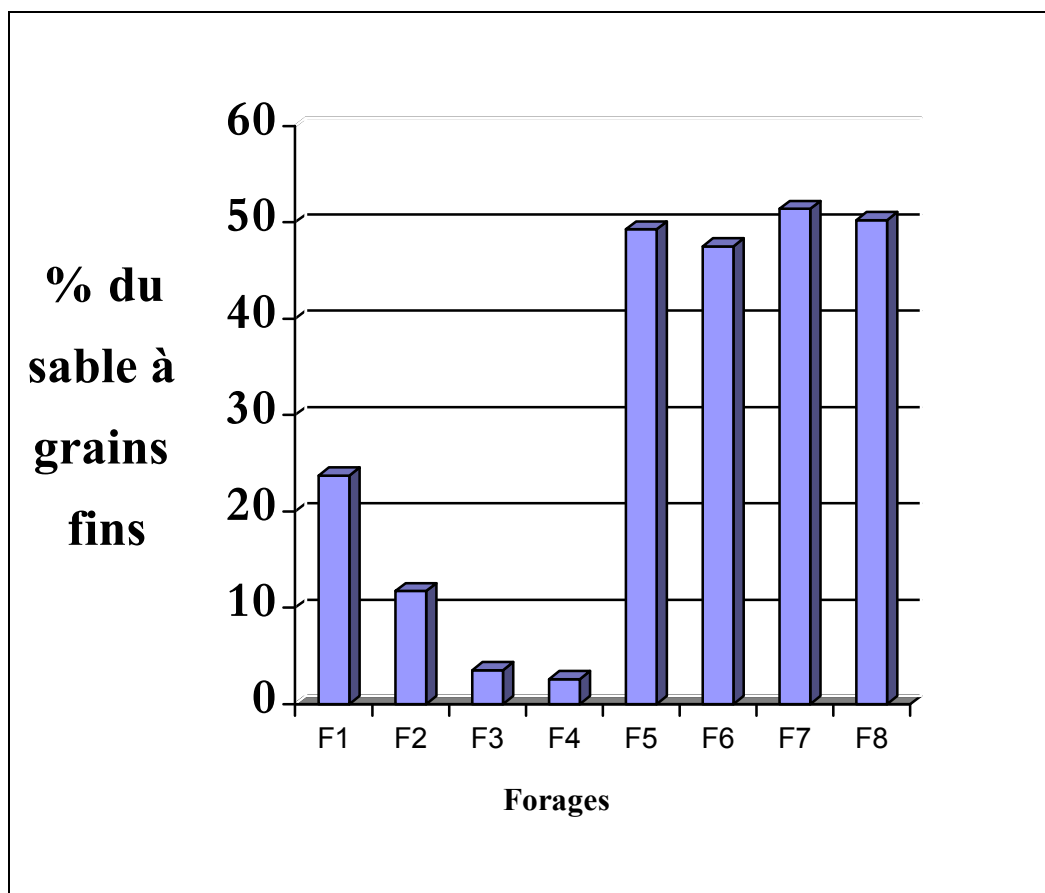


Fig 34 : Sables à grains fins dans l'intervalle (12 à 18m).

- L'axe des abscisses représente les forages de la 1^{ère} et de la 3^{ème} zone.
- L'axe des ordonnées représente le pourcentage des grains fins du sable.

| Abscisse | Numéro du forage | Numéro de la zone |
|----------|------------------|-------------------|
| F 1 | 223 | 1 |
| F 2 | 225 | 1 |
| F 3 | 230 | 1 |
| F 4 | 320 | 1 |
| F 5 | 444 | 3 |
| F 6 | 457 | 3 |
| F 7 | 458 | 3 |
| F 8 | 459 | 3 |

Tableau n° 25 : Légende de la figure 34.

Au crible des graphiques nous remarquons que la zone 1 n'a pas la même granulométrie que la zone 3 (grand écart des pourcentages) ; différence qui doit être confirmée ultérieurement par les tests statistiques adoptés.

3.3.2.2. A l'intérieur de la classe (24 à 30)m pour sable à grains fins :

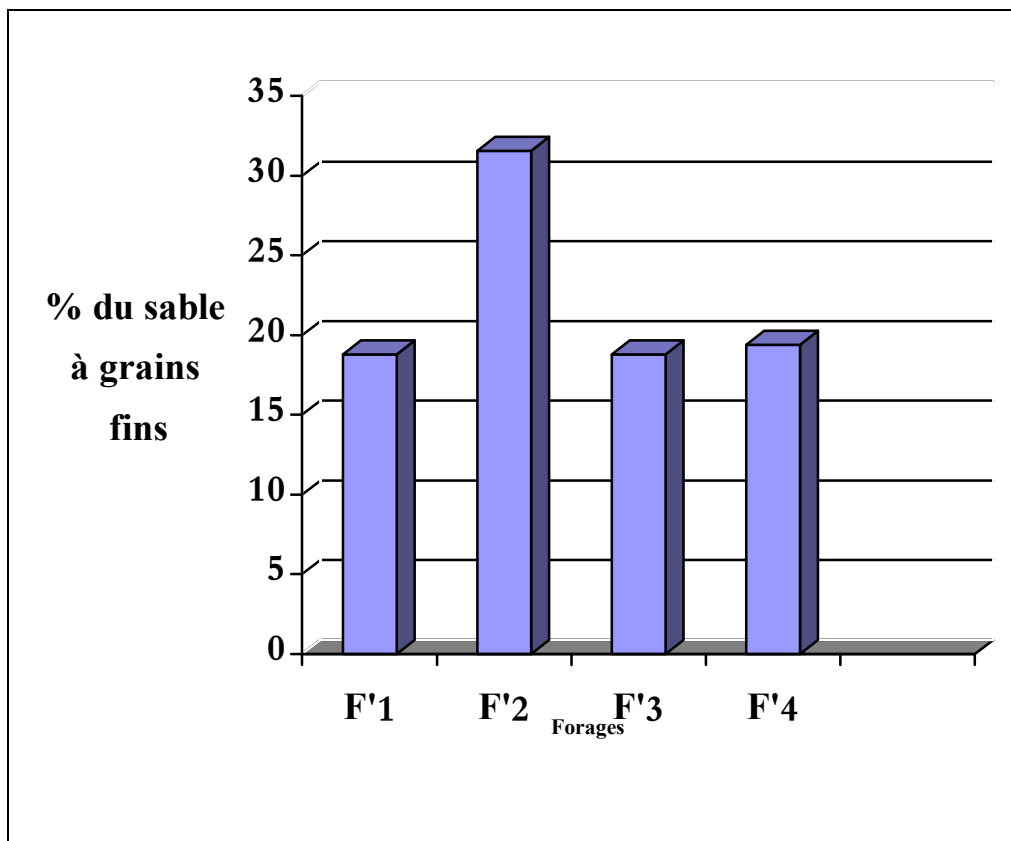


Fig 35 : Sables à grains fins dans l'intervalle (24 à 30m).

- L'axe des abscisses représente les forages de la 1^{ère} et de la 2^{ème} zone.
- L'axe des ordonnées représente les pourcentages des grains fins du sable.

| Abscisse | Numéro du forage | Numéro de la zone |
|----------|------------------|-------------------|
| F'1 | 313 | 1 |
| F'2 | 313 | 1 |
| F'3 | 252 | 2 |
| F'4 | 261 | 2 |

Tableau 26 : Légende de la figure 35.

Contrairement à la zone 1 et 3 qui à première vue semblent différentes au point de vue granulométrie ; la zone 1 a la même granulométrie que la zone 2 (faible écart des pourcentages). Ceci doit être confirmé ultérieurement par les tests statistiques adoptés.

3.3.2.3. Entre les classes (30 à 120) pour sable à grains fins :

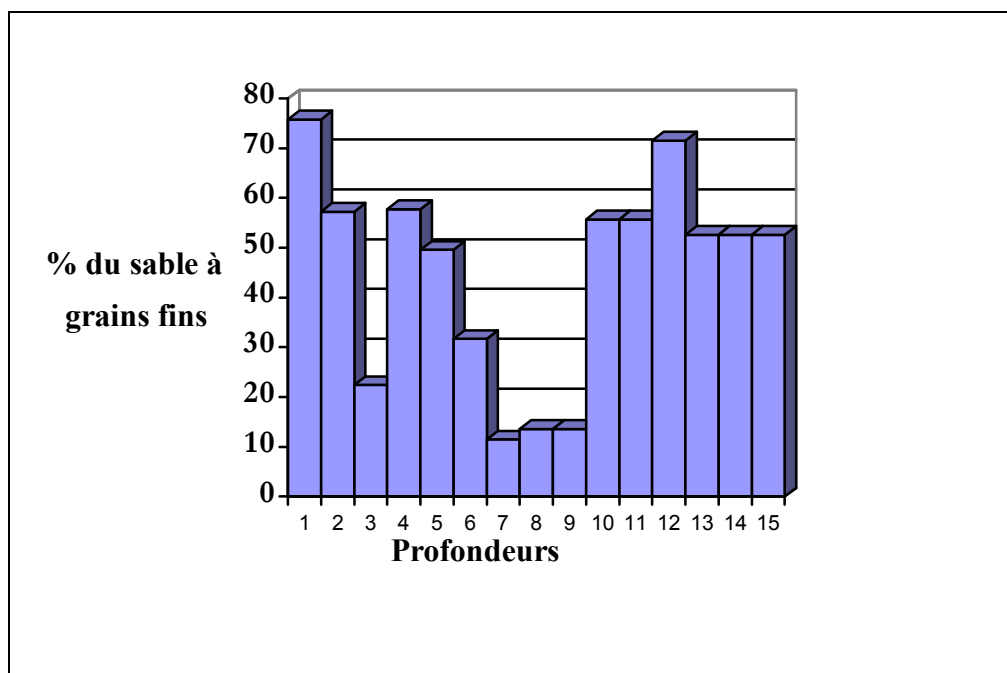


Figure 36 : Sables à grains fins dans l'intervalle (30 à 120m).

Légende :

- L'axe des abscisses représente les intervalles des profondeurs, de 30 à 120 mètres, voir tableau 24.
- L'axe des ordonnées représente les pourcentages des grains fins du sable.

Les tendances illustrées par la figure n° 36 dégagent une différence de granulométrie perceptible entre 66m et 84m ; ce qui n'est pas important ; tandis que le reste du terrain demeure relativement homogène. Nous le confirmerons ultérieurement par les tests statistiques adoptés.

Remarque : Le développement d'un forage, a pour objectif :

- d'évacuer en surface les particules fines de sable, ce qui augmente la perméabilité de la nappe ;
- de provoquer derrière le gravier additionnel un arrangement des grains ceci pour créer un troisième filtre qui est cette fois-ci naturel.

C'est pourquoi, nous avons axé notre travail pour le sable à grains fins.

3.4 Comparaison des moyennes à l'intérieur des classes:

On rappelle que la région d'étude se situe à Ksar Chellala au niveau de laquelle trois zones d'échantillonnage géographiquement éloignées (tableaux 5, 6, 7) ont été retenues.

Dans cette région ; les comparaisons de moyennes pour la variable "granulométrie" porteront sur deux niveaux :

- l'un stratifié horizontalement dans le but de voir s'il nous serait possible d'adapter le même filtre à l'ensemble de la région d'étude (étape 1) ;
- l'autre stratifié dans le sens vertical pour nous renseigner en profondeur de l'homogénéité ou l'hétérogénéité du terrain et nous conduira au choix de la colonne de captage (étape 2).

Les éléments pris en compte à ce titre concernent :

- les limons dont le diamètre des grains est inférieur à 0.05mm ;
- le sable à grains fins dont le diamètre est compris entre (0.05 et 0.25)mm ;
- le sable à grains gros et moyens dont le diamètre est compris entre (0.25 et 2)mm.

Le principe de la méthode statistique est le suivant :

Comparer $T_{\text{tabulé}}$ (table de Student), avec les résultats de calcul $T_{\text{observé}}$ (formule 3.1.) ;

- si $T_{\text{observé}} \geq T_{(1-\alpha/2)}$, alors les moyennes x_1 et x_2 sont différentes ($x_1 \neq x_2$) au seuil choisi.
- Si $T_{\text{observé}} < T_{(1-\alpha/2)}$, alors la différence entre les moyennes n'est pas significative ($x_1 \approx x_2$) au seuil choisi.

3.4.1. Le " T " observé sera déduit par le procédé de calcul suivant :

$$T_{\text{observé}} = |X_1 - X_2| / (SCE_1 + SCE_2)^{1/2} \quad (3.1.)$$

où

SCE_1 et SCE_2 respectivement la somme des carrés des écarts des populations 1 et 2 ;

n , le nombre d'observations ;

\bar{X}_1 et \bar{X}_2 respectivement les moyennes des diamètres des populations 1 et 2.

3.4.2. Le coefficient $T_{\text{tabulé}}$ est déterminé à partir de la table de Student en tenant compte :

- du degré de liberté ;

$$v = 2(n-1) \quad (3.2.)$$

où, n est le nombre d'observations ;

- et d'un seuil égal à 1% ou 5 %.

Nous avons considéré 4 mesures de granulométrie dans la classe (12 à 18)mètres de profondeur et 2 mesures dans la classe (24 à 30) de profondeur et donc, v sera égal à $v=2(4-1)=2*3=6$ pour le premier cas , et $v=2(2-1)=2*1=2$ pour le deuxième cas.

Le seuil choisi est de 5% (0.05) et donc, il faut prendre $T_{(1-\alpha/2)} = T_{(1-0.05/2)} = T_{0,975}$.

| t | v | 2 | 6 |
|-----|---|---------|---------|
| 2,4 | | 0,93077 | 0,97335 |
| 2,5 | | 0,93519 | 0,97674 |
| 3,7 | | 0,96705 | 0,99496 |
| 3,8 | | 0,96860 | 0,99552 |
| 4,2 | | 0,97386 | 0,99716 |
| 4,4 | | 0,97602 | 0,99772 |

Tableau 27 : Extrait de la table de Student.

La table de Student nous donne les résultats suivants :

- entre (12 et 18)mètres de profondeur $T_{0,975} = 2,45$;
- entre (24 à 30)mètres de profondeur $T_{0,975} = 4,3$.

3.4.1. Entre la zone 1 et 3 : Profondeur 12-18 m :

3.4.1.1. Cas du Limon :

| N° de zone | N° du forage | Limons | $(X_{i1} - X_1)^2$ | N° de la Zone | N° du forage | Limons | $(X_{i2} - X_2)^2$ | T observé | T tabulé |
|------------|--------------|---------------|--------------------|---------------|--------------|---------------|--------------------|-----------|----------|
| 1 | 223 | 72,54 | 74,4769 | 3 | 444 | 44,88 | 1,2544 | | |
| 1 | 225 | 87,4 | 38,8129 | 3 | 457 | 47,4 | 13,2496 | | |
| 1 | 230 | 91,24 | 101,4049 | 3 | 458 | 36,4 | 54,1696 | | |
| 1 | 320 | 73,5 | 58,8289 | 3 | 459 | 46,36 | 6,76 | | |
| | | $X_1 = 81,17$ | $\Sigma = 273,523$ | | | $X_2 = 43,76$ | $\Sigma = 75,4336$ | 6,937 | 2,45 |

Tableau n° 28 : Comparaison entre les zones 1 et 3 (limons).

3.4.1.2. Cas du Sable fin :

| N° de zone | N° du forage | Sable fin | $(X_{i1} - X_1)^2$ | N° de la zone | N° du forage | Sable fin | $(X_{i2} - X_2)^2$ | T Observé | T Tabulé |
|------------|--------------|---------------|--------------------|---------------|--------------|----------------|--------------------|-----------|----------|
| 1 | 223 | 23,73 | 56,1001 | 3 | 444 | 49,28 | 0,105625 | | |
| 1 | 225 | 11,71 | 20,5209 | 3 | 457 | 47,5 | 4,431025 | | |
| 1 | 230 | 3,52 | 161,7984 | 3 | 458 | 51,4 | 3,222025 | | |
| 1 | 320 | 26 | 95,2576 | 3 | 459 | 50,24 | 0,403225 | | |
| | | $X_1 = 16,24$ | $\Sigma = 333,677$ | | | $X_2 = 49,605$ | $\Sigma = 8,1619$ | 6,259 | 2,45 |

Tableau n° 29 : Comparaison entre les zones 1 et 3 (sable fin).

3.4.1.3. Cas du Sable à grains gros et moyens :

| N° de la zone | N° du forage | Sable gros, moyens | $(X_{i1} - X_1)^2$ | N° de la zone | N° du forage | Sable gros moyens | $(X_{i2} - X_2)^2$ | T observé | T Tabulé |
|---------------|--------------|--------------------|--------------------|---------------|--------------|-------------------|--------------------|-----------|----------|
| 1 | 223 | 3,73 | 1,946025 | 3 | 444 | 5,84 | 1,863225 | | |
| 1 | 225 | 0,89 | 2,088025 | 3 | 457 | 5,1 | 4,431025 | | |
| 1 | 230 | 4,22 | 3,553225 | 3 | 458 | 12 | 22,99203 | | |
| 1 | 320 | 0,5 | 3,367225 | 3 | 459 | 5,88 | 1,755625 | | |
| | | $X_1 = 2,335$ | $\Sigma = 10,9545$ | | | $X_2 = 7,205$ | $\Sigma = 31,0419$ | 2,60 | 2,45 |

Tableau n° 30 : Comparaison entre les zones 1 et 3 (sable à grains gros et moyens)

La Comparaison de la granulométrie de la zone 1 et de la zone 3 dans la classe (12 à 18)m nous conduit à la conclusion suivante :

- limons : T calculé = 6,93, ce qui est supérieur à 2,45 ;
- sable à grains fins : T calculé = 6,25, ce qui est supérieur à 2,45 ;
- sable à gros grains : T calculé = 2,60, ce qui est supérieur à 2,45.

Ceci veut dire que T calculé est supérieur à T tabulé et nous démontre que **la zone 1 n'a pas la même granulométrie que la zone 3.**

3.4.2. Entre la zone 1 et 2 : Profondeur 24 – 30 m :

3.4.2.1. cas du limon :

| N° de la zone | N° de la zone | Limons | $(X_{i1} - X_1)^2$ | N° de la zone | N° du forage | Limons | $(X_{i2} - X_2)^2$ | T observé | T tabulé |
|---------------|---------------|----------------|---------------------|---------------|--------------|--------------|--------------------|-----------|----------|
| 1 | 313 | 79,67 | 58,14063 | 2 | 252 | 81 | 0,09 | | |
| 1 | 313 | 64,42 | 58,14063 | 2 | 261 | 80,4 | 0,09 | | |
| | | $X_1 = 72,045$ | $\Sigma = 116,2813$ | | | $X_2 = 80,7$ | $\Sigma = 0,18$ | 1,134 | 4,3 |

Tableau n° 31 : Comparaison entre les zones 1 et 2 (limons).

3.4.2.2. cas du sable fin :

| N° de la zone | N° du forage | Sable fin | $(X_{i1} - X_1)^2$ | N° de la zone | N° du forage | Sable fin | $(X_{i2} - X_2)^2$ | T observé | T Tabulé |
|---------------|--------------|---------------|--------------------|---------------|--------------|--------------|--------------------|-----------|----------|
| 1 | 313 | 18,77 | 40,8321 | 2 | 252 | 18,8 | 0,90 | | |
| 1 | 313 | 31,55 | 40,8321 | 2 | 261 | 19,4 | 0,09 | | |
| | | $X_1 = 25,16$ | $\Sigma = 81,6642$ | | | $X_2 = 19,1$ | $\Sigma = 0,18$ | 0,947 | 4,3 |

Tableau n° 32 : Comparaison entre les zones 1 et 2 (sable fin).

3.4.2.3. cas du sable à gros grains et moyens :

| N° de la zone | N° du forage | Sable gros, moyens | $(X_{i1} - X_1)^2$ | N° de la zone | N° du forage | Sable gros, moyens | $(X_{i2} - X_2)^2$ | T observé | T tabulé |
|---------------|--------------|--------------------|--------------------|---------------|--------------|--------------------|--------------------|-----------|----------|
| 1 | 313 | 1,56 | 1,525225 | 2 | 252 | 0,2 | 0 | | |
| 1 | 313 | 4,03 | 1,525225 | 2 | 261 | 0,2 | 0 | | |
| | | $X_1 = 2,79$ | $\Sigma = 3,05$ | | | $X_2 = 0,2$ | $\Sigma = 0$ | 2,101 | 4,3 |

Tableau n° 33 : Comparaison entre les zones 1 et 2 (sable à grains gros et moyens).

La Comparaison de la granulométrie de la zone 1 et de la zone 2 dans la classe (24 à 30)m nous conduit à la conclusion suivante :

- limon : T calculé = 1,13, ce qui est inférieur à 4,3 ;
- sable à grains fins : T calculé = 0,9, ce qui est inférieur à 4,3 ;
- sable à gros grains : T calculé = 2,10, ce qui est inférieur à 4,3.

Ceci veut dire que T calculé est inférieur à T tabulé et nous démontre que **la zone 1 a la même granulométrie que la zone 2.**

3.4.3. Conclusion :

Les résultats statistiques nous ont confirmé que la zone 1 a la même granulométrie que la zone 2, ce qui nous permet de choisir le même filtre.

La zone 1 ainsi que la zone 2 sont différentes de la zone 3 et ceci exige l'étude d'une autre colonne de captage pour la zone 3.

3.5 Comparaison des moyennes entre les classes :

Coefficient de student :

Nous avons considéré 4 mesures de granulométrie entre les classes (12 à 36)mètres ; (36 à 60)m ; (60 à 84)m et (84 à 120)m de profondeur ; ceci nous donne un degré de liberté , v égal à $v=2(4-1)=2*3=6$.

Si le seuil choisi est de 5% (0,05), il faut prendre $T_{(1-\alpha/2)} = T_{(1-0,05/2)} = T_{0,975} = 2,45$.

Si le seuil choisi est de 1% (0,01), il faut alors prendre $T_{(1-0,01/2)} = T_{0,995} = 3,75$.

3.5.1 Comparaison entre (12 à 36)m et (36 à 60)m :

3.5.1.1. cas du limon :

Pour les limons, la différence est attendue étant donné le grand écart entre les résultats.

A cet effet et dans le but d'alléger le texte nous n'avons pas fait appel aux tests pour le vérifier .

3.5.1.2. cas du sable à grains fins :

| N° de zone | Profondeur | Sable à grains fins | $(X_{i1} - X_1)^2$ | N° de la zone | Profondeur | Sable à grains fins | $(X_{i2} - X_2)^2$ | T observé | T Tabu |
|------------|-------------|---------------------|--------------------|---------------|------------|---------------------|--------------------|-----------|--------|
| 1,2 | (12 à 36) m | 25,23 | 79,3881 | 2 | (36 à 60)m | 57,28 | 110,4601 | | |
| 1,2 | Idem | 12,27 | 478,2969 | 2 | Idem | 22,4 | 593,8969 | | |
| 1,2 | Idem | 23,26 | 118,3744 | 2 | Idem | 57,8 | 121,6609 | | |
| 2 | Idem | 75,8 | 1735,5556 | 2 | Idem | 49,6 | 8,0089 | | |
| | | $X_1 = 34,14$ | $\Sigma = 2411,61$ | | | $X_2 = 46,77$ | $\Sigma = 834,02$ | 0,767 | 3,75 |

Tableau n° 34 : Comparaison entre les classes (12 à 36)m et (36 à 60)m pour sable à grains fins.

3.5.1.3. cas du sable à grains gros et moyens :

| N° de la zone | Profondeur | Sable gros et moyens | $(X_{i1} - X_1)^2$ | N° de la zone | Profondeur | Sable gros et moyens | $(X_{i2} - X_2)^2$ | T observé | T Tabu |
|---------------|-------------|----------------------|--------------------|---------------|------------|----------------------|---------------------|-----------|--------|
| 1,2 | (12 à 36) m | 3,2 | 2,7556 | 2 | (36 à 60)m | 42,66 | 106,19302 | | |
| 1,2 | Idem | 1,09 | 0,2025 | 2 | Idem | 76,6 | 558,61322 | | |
| 1,2 | Idem | 1,47 | 0,0049 | 2 | Idem | 42,2 | 115,88522 | | |
| 2 | Idem | 0,4 | 1,2996 | 2 | Idem | 50,4 | 6,579225 | | |
| | | $X_1 = 1,54$ | $\Sigma = 4,2626$ | | | $X_2 = 52,965$ | $\Sigma = 787,2707$ | 6,33 | 3,75 |

Tableau 35 : Comparaison entre les classes (12 à 36)m et (36 à 60)m pour sable à grains gros et moyens.

La Comparaison de la granulométrie entre les classes (12 à 36)m et (36 à 60)m nous conduit à la conclusion suivante :

- limons : La différence est attendue étant donné le grand écart entre les résultats. A cet effet et dans le but d'alléger le texte, nous n'avons pas fait appel aux tests pour le vérifier.
- sable à grains fins : T calculé = 0,77 ; ce qui est inférieur à 3,75. Donc pas de différence entre les 2 intervalles.
- Sable à grains gros et moyens : T calculé = 6,33 ; ce qui est supérieur à 3,75. Donc la différence existe entre les 2 intervalles.

Pour le sable à grains fins, il n'y a pas de différence car son pourcentage très important, en frontière (30 à 36)m=75,8%, se rapproche beaucoup plus au 2^{ème} intervalle qu'au 1^{er}. Nous en tiendrons compte lors du choix de la colonne de captage.

La granulométrie de 12m à 30m est donc différente de celle de 30m à 60m.

3.5.2. Comparaison entre (60 à 84)m et (84 à 108)m :

3.5.2.1. cas des limons :

| N° de la zone | Profondeur | Limons | $(X_{i1} - X_1)^2$ | N° de la zone | Profondeur | Limons | $(X_{i2} - X_2)^2$ | T observé | T Tabu |
|---------------|------------|---------------|---------------------|---------------|-------------|--------------|--------------------|-----------|--------|
| 1 | (60 à 84)m | 68,38 | 31,36 | 2 | (84 à 108)m | 39,6 | 72,25 | | |
| 1 | Idem | 64,5 | 89,8704 | 2 | Idem | 39,6 | 72,25 | | |
| 1 | Idem | 81,52 | 56,8516 | 2 | Idem | 19,8 | 127,69 | | |
| 2 | Idem | 81,52 | 56,8516 | 2 | Idem | 25,4 | 32,49 | | |
| | | $X_1 = 73,98$ | $\Sigma = 234,9336$ | | | $X_2 = 31,1$ | $\Sigma = 304,68$ | 6,394 | 3,7 |

Tableau n° 36 : Comparaison entre les classes (60 à 84)m et (84 à 108) pour limons.

3.5.2.2. cas du sable à grains fins

| N° de la zone | Profondeur | Sable à grains fins | $(X_{i1} - X_1)^2$ | N° de la zone | Profondeur | Sable à grains fins | $(X_{i2} - X_2)^2$ | T observé | tab |
|---------------|-------------|---------------------|---------------------|---------------|-------------|---------------------|----------------------|-----------|-----|
| 1 | (60 à 84) m | 31,66 | 198,5281 | 2 | (84 à 108)m | 55,7 | 48,476406 | | |
| 1 | Idem | 11,44 | 37,5769 | 2 | Idem | 55,7 | 48,476406 | | |
| 1 | Idem | 13,59 | 15,8404 | 2 | Idem | 71,55 | 78,987656 | | |
| 2 | Idem | 13,59 | 15,8404 | 2 | Idem | 67,7 | 25,376406 | | |
| | | $X_1 = 17,57$ | $\Sigma = 267,7858$ | | | $X_2 = 62,6625$ | $\Sigma = 201,31687$ | 7,212 | |

Tableau 37 : Comparaison entre les classes (60 à 84)m et (84 à 108) pour sable à grains fins.

3.5.2.3. Cas du sable à grains gros et moyens :

| N° de la zone | Profondeur | Sable gros, moyens | $(X_{i1} - X_1)^2$ | N° de la zone | Profondeur | Sable gros, moyens | $(X_{i2} - X_2)^2$ | T observé | tab |
|---------------|-------------|--------------------|--------------------|---------------|-------------|--------------------|--------------------|-----------|-----|
| 1 | (60 à 84) m | 0 | 20,999306 | 2 | (84 à 108)m | 4,5 | 0,600625 | | |
| 1 | Idem | 11,45 | 47,162556 | 2 | Idem | 4,5 | 0,600625 | | |
| 1 | Idem | 3,44 | 1,3053062 | 2 | Idem | 5,2 | 0,005625 | | |
| 2 | Idem | 3,44 | 1,3053062 | 2 | Idem | 6,9 | 2,640625 | | |
| | | $X_1 = 4,5825$ | $\Sigma = 70,7724$ | | | $X_2 = 5,275$ | $\Sigma = 3,8475$ | 0,277 | 3, |

Tableau 38 : Comparaison entre les classes (60 à 84)m et (84 à 108) pour sable à grains gros et moyens.

La Comparaison de la granulométrie entre les classes (60 à 84)m et (84 à 108)m nous conduit à la conclusion suivante :

- limons : T calculé = 6,39 ; ce qui est supérieur à 3,75. La différence existe.
- sable à grains fins : T calculé = 7,21 ; ce qui est supérieur à 3,75. La différence existe.
- sable à grains gros et moyens : T calculé = 0,28. Pas de différence.

Pour le sable à grains gros et moyens, on tiendra compte de cette homogénéité de terrain lors du choix de la colonne de captage.

La granulométrie de 60m à 84m est donc partiellement différente de celle de 84m à 108m.

3.5.3. Comparaison entre (36 à 60) et (60 à 84)m :

3.5.3.1. Cas du limon :

Pour les limons, la différence est attendue étant donné le grand écart entre les résultats.

A cet effet et dans le but d'alléger le texte nous n'avons pas fait appel aux tests pour le vérifier .

3.5.3.2. *Cas du sable à grains fins :*

| N° de la zone | Profondeur | Sable à grains fins | $(X_{i1} - X_1)^2$ | N° de la zone | Profondeur | Sable à grains fins | $(X_{i2} - X_2)^2$ | T observé | tab |
|---------------|-------------|---------------------|---------------------|---------------|------------|---------------------|---------------------|-----------|-----|
| 2 | (36 à 60) m | 57,28 | 110,4601 | 1 | (60 à 84)m | 31,66 | 198,5281 | | |
| 2 | Idem | 22,4 | 593,8969 | 1 | Idem | 11,44 | 37,5769 | | |
| 2 | Idem | 57,8 | 121,6609 | 1 | Idem | 13,59 | 15,8404 | | |
| 2 | Idem | 49,6 | 8,0089 | 2 | Idem | 13,59 | 15,8404 | | |
| | | | | | | | | | |
| | | $X_1 = 46,77$ | $\Sigma = 834,0268$ | | | $X_2 = 17,57$ | $\Sigma = 267,7858$ | 3,047 | |

Tableau 39 : Comparaison entre les classes (36 à 60)m et (60 à 84)m pour sable à grains fins.

3.5.3.3. Cas du sable à grains gros et moyens :

| N° de la zone | Profondeur | Sable gros et moyens | $(X_{i1} - X_1)^2$ | N° de la zone | Profondeur | Sable gros et moyens | $(X_{i2} - X_2)^2$ | T observé | tab |
|---------------|-------------|----------------------|--------------------|---------------|------------|----------------------|---------------------|-----------|-----|
| 2 | (36 à 60) m | 42,66 | 106,193025 | 1 | (60 à 84)m | 0 | 71,5716 | | |
| 2 | Idem | 76,6 | 558,613225 | 1 | Idem | 24,06 | 243,36 | | |
| 2 | Idem | 42,2 | 115,885225 | 1 | Idem | 4,89 | 12,7449 | | |
| 2 | Idem | 50,4 | 6,579225 | 2 | Idem | 4,89 | 12,7449 | | |
| | | $X_1 = 52,965$ | $\Sigma = 787,270$ | | | $X_2 = 8,46$ | $\Sigma = 340,4214$ | 4,59 | |

Tableau 40 : Comparaison entre les classes (36 à 60)m et (60 à 84)m pour sable à grains gros et moyens.

La comparaison entre (36 à 60)m et (60 à 84)m nous conduit à la conclusion suivante :

- limons : La différence est attendue étant donné le grand écart entre les résultats. A cet effet et dans le but d'alléger le texte, nous n'avons pas fait appel aux tests pour le prouver.
- sable à grains fins : T calculé = 3,05 ; ce qui est inférieur à 3,75. Pas de différence.
- sable à grains gros et moyens : T calculé = 4,58 ; ce qui est légèrement supérieur à 3,75. La différence n'est pas importante.

Vu que les limons ne poseront pas de problème au niveau du filtre, nous tiendrons compte uniquement du sable et nous supposons que **la granulométrie de 36m à 60m et de 60m à 84m est presque la même.**

3.5.4. Comparaison entre (36 à 60)m et (84 à 108)m :

3.5.4.1. Cas du limon :

Pour les limons, la différence est attendue étant donné le grand écart entre les résultats.

A cet effet et dans le but d'alléger le texte nous n'avons pas fait appel aux tests pour le vérifier .

3.5.4.2 Cas du sable à grains fins :

| N° de la zone | Profondeur | Sable à grains fins | $(X_{i1} - X_1)^2$ | N° de la zone | Profondeur | Sable à grains fins | $(X_{i2} - X_2)^2$ | T observé |
|---------------|-------------|---------------------|---------------------|---------------|-------------|---------------------|----------------------|-----------|
| 2 | (36 à 60) m | 57,28 | 110,4601 | 2 | (84 à 108)m | 55,7 | 48,476406 | |
| 2 | Idem | 22,4 | 593,8969 | 2 | Idem | 55,7 | 48,476406 | |
| 2 | Idem | 57,8 | 121,6609 | 2 | Idem | 71,55 | 78,987656 | |
| 2 | Idem | 49,6 | 8,0089 | 2 | Idem | 67,7 | 25,376406 | |
| | | $X_1 = 46,77$ | $\Sigma = 834,0268$ | | | $X_2 = 62,6625$ | $\Sigma = 201,31687$ | 1,71 |

Tableau 41 : Comparaison entre les classes (36 à 60)m et (84 à 108)m pour sable à grains fins.

3.5.4.3. Cas du sable à grains gros et moyens :

| N° de la zone | Profondeur | Sable gros et moyens | $(X_{i1} - X_1)^2$ | N° de la zone | Profondeur | Sable gros et moyens | $(X_{i2} - X_2)^2$ | T observé |
|---------------|-------------|----------------------|---------------------|---------------|-------------|----------------------|--------------------|-----------|
| 2 | (36 à 60) m | 42,66 | 106,193025 | 2 | (84 à 108)m | 4,5 | 0,5625 | |
| 2 | Idem | 76,6 | 558,613225 | 2 | Idem | 4,5 | 0,5625 | |
| 2 | Idem | 42,2 | 115,885225 | 2 | Idem | 5,2 | 2,1025 | |
| 2 | Idem | 50,4 | 6,579225 | 2 | Idem | 0,8 | 8,7025 | |
| | | $X_1 = 52,965$ | $\Sigma = 787,2707$ | | | $X_2 = 3,75$ | $\Sigma = 11,93$ | 6,03 |

Tableau 42 : Comparaison entre les classes (36 à 60)m et (84 à 108)m pour sable à grains gros et moyens.

La Comparaison entre (36 à 60)m et (84 à 108)m nous conduit à la conclusion suivante :

- limons : La différence est attendue étant donné le grand écart entre les résultats. A cet effet et dans le but d'alléger le texte, nous n'avons pas fait appel aux tests pour le vérifier.
- sable à grains fins : T calculé = 1,71 ; ce qui est inférieur à 3,75. Pas de différence.
- sable à grains gros et moyens : T calculé = 6,03. La différence existe.

Vu que les limons ne poseront pas de problème au niveau du filtre, nous tiendrons compte uniquement du sable à grains fins dont le pourcentage est supérieur à 50% et nous supposons que la granulométrie de 36m à 60m et de 84m à 108m est presque la même.

3.5.5. Conclusion :

Les résultats statistiques nous ont conduit à choisir la colonne de captage de la manière suivante :

- de 0 mètre à 30 mètres : Faire descendre des tubes pleins.
- de 30 m à 120 m (nous avons une même granulométrie de 108m à 120m) : Faire descendre des crépines dont l'ouverture des orifices ainsi que les dimensions du gravier additionnel dépendent de la granulométrie de cet intervalle.

Ceci nous permet d'éviter d'utiliser plusieurs dimensions au niveau du filtre (crépines et gravier additionnel) ; ce qui facilite la tâche au personnel de chantier lors du stockage et lors de la mise en place des matériaux.

CHAPITRE 4

CHOIX DE LA COLONNE DE CAPTAGE

4.1. Introduction :

Les résultats statistiques concordent avec la géologie et l'hydrogéologie de la région.

Etant donné qu'au niveau de la zone 3, le débit est très faible égal à 0,1 litre par seconde (tableau 45), il ne sera pas utile de proposer un filtre pour cette partie.

Par contre, les zones 1 et 2, ayant la même structure géologique sont en revanche caractérisées par un débit très intéressant pouvant atteindre 120 l/s dans l'Albien (tableaux 43 et 44), et par voie de conséquence sont objet de cette étude.

En forage semi-exploration ou exploration, nous sommes obligés d'analyser un échantillon de terrain de la nappe afin de tracer la courbe granulométrique et de faire le choix de notre filtre.

Par contre, en forage d'exploitation, il suffit d'utiliser les données des forages voisins déjà réalisés afin de faire l'étude statistique et de décider du choix optimal de la colonne de captage.

| Numéro du forage / profondeur du forage | Coordonnées X Y Z | Indice géologique | Numéro de la couches / Profondeur de la base (m) | Description géologique | Indice de l'horizon aquifère | Profondeur du plan d'eau / Niveau statique (m) |
|---|-------------------------------|---|--|--|------------------------------|--|
| 312 / 82 | 485.970 219.800 728.600 | Horizon aquifère abondant en eau dans les dépôts alluviaux du contemporain et du Quaternaire supérieur. (alQ ₃₋₄) | 1 / 3.0 | Limons argileux, gris brunâtre. | | 14.9 / 14.9 |
| | | Horizon aquifère d'une faible abondance en eau dans les dépôts alluviaux- lacustres du Quaternaire moyen. (alpl Q ₂) | 2 / 6.0 | Pierres, cailloux et gravier. | | |
| | | | 3 / 15.75 | Sables, limons, limons argileux, gris jaunâtre et rouge. | | |
| | | Horizon aquifère abondant en eau dans les dépôts du Pliocène-Quaternaire inférieur. (N ₂ - Q ₁) | 4 / 18.20 | Galet et roches erratiques. | | |
| | | | 5 / 26.70 | Conglomérats à ciment calcaire, durs, caverneux. | | |
| | | Horizon aquifère d'une forte abondance en eau dans les dépôts de l'Albien. (Cr ₁ al) | 6 / 82.0 | Grès quartzeux à passées d'argiles. | | |

Tableau 43 : Coupe géologique de la zone 1 [52].

| Numéro du forage / profondeur du forage | Coordonnées X Y z | Indice géologique | Numéro de la couches / Profondeur de la base (m) | Description géologique | Indice de l'horizon aquifère | Profondeur du plan d'eau / Niveau statique (m) |
|---|-------------------------------|---|--|--|------------------------------|--|
| 252 / 259.65 | 497.070 196.665 845.400 | Horizon aquifère abondant en eau dans les dépôts du Pliocène-Quaternaire inférieur. (N ₂ -Q ₁) | 1 / 9.40 | Limons très calcaires à passées de calcaires. | Cr ₁ al | 3 essais de pompage sur les forages isolés. |
| | | Horizon aquifère d'une forte abondance en eau dans les dépôts de l'Albien (Cr ₁ al) | 2 / 85.00 | Grès de granulométrie hétérogène, Quartz à rare passées d'argiles. | | I 68.5 / 68.5 |
| | | | 3 / 93.00 | Marnes et argiles, gris bleuâtre compactes. | | II 136.45 / 73.8 |
| | | 4 / 113.55 | Grès de granulométrie hétérogène, quartzeux faible et de dureté moyenne. | | | III 208.0 / 73.8 |
| | | 5 / 136.45 | Argiles, rouge foncé et gris bleuâtre, à passées de grès et de marnes. | | | |
| | | 6 / 190.00 | Grès de granulométrie hétérogène, quartzeux, faible | | | |
| | | 7 / 208.00 | Argiles, gris bleuâtre à passées de marnes et de grès. | | | |
| | | 8 / 247.55 | Grès à grains moyens et grossiers, quartzeux de dureté moyenne et durs. | | | |
| | | 9 / 259.65 | Argiles et calcaires, gris verdâtre et gris bleuâtre. | | | |

Tableau 44 : Coupe géologique de la zone 2[52].

| Numéro du forage/ Profondeur du forage | Coordonnées X Y z | Indice géologique | Numéro de la couche / profondeur de la base (m) | Description géologique | Indice de l'horizon aquifère | Profondeur du plan d'eau (m) / Niveau statique (m) |
|--|-----------------------------|---|--|---|------------------------------------|---|
| 416 / 97.2 | 477.121 230.120 702.1 | Horizon aquifère d'une faible abondance en eau dans les dépôts alluviaux- lacustres du Quaternaire moyen. (al plQ ₂₋₃) | 1 / 3.5 | Limon fortement calcaires, blanc gris avec concrétion et passées de calcaires. | al plQ ₂₋₃ | - / 3.40 |
| | | | 2 / 9.0 | Sable de granulométrie hétérogène. | | |
| | | | 3 / 18.0 | Conglomérats et calcaires graveleux localement faiblement caverneux. | | |
| | | | 4 / 23.0 | Argiles sableuses, brun rougeâtre, fissurées. | | |
| | | | 5 / 40.0 | Graviers, galet, roches erratiques avec des limons; cimentés jusqu'à l'état des conglomérats à partir de la profondeur de 28m. | | |
| | | 6 / 97.2 | Argiles, jaune vert ; de la profondeur de 43.0 argiles bleuâtres et gris vert avec (la faune analogue à celle décelée dans le profil du forage 401) | Complexe aquifère d'une faible abondance en eau dans les dépôt du Miocène inférieur. N ₁ | | |

Tableau 45: Coupe géologique de la zone 3 [52].

4.2. Modèle granulométrique adopté :

Nous adopterons un modèle curviligne qui traduira mieux la tendance granulométrique, étant donné que sur le plan vertical surtout perceptible à partir de 30m de profondeur, il n'y a pas de différence significative. Pour ce faire, nous tenterons de combiner les granulométries de la zone 1 et de la zone 2.

| | | | | |
|--------------------|---------|------------|------------|------------|
| Diamètres en mm | 0,5 à 1 | 0,25 à 0,5 | 0,1 à 0,25 | 0,05 à 0,1 |
| Pourcentage | 1,3 | 45 | 44,35 | 9,35 |
| Pourcentage cumulé | 1,3 | 46,3 | 90,65 | 100 |

Tableau 46 : Résultats granulométriques de la couche aquifères des zones 1 et 2.

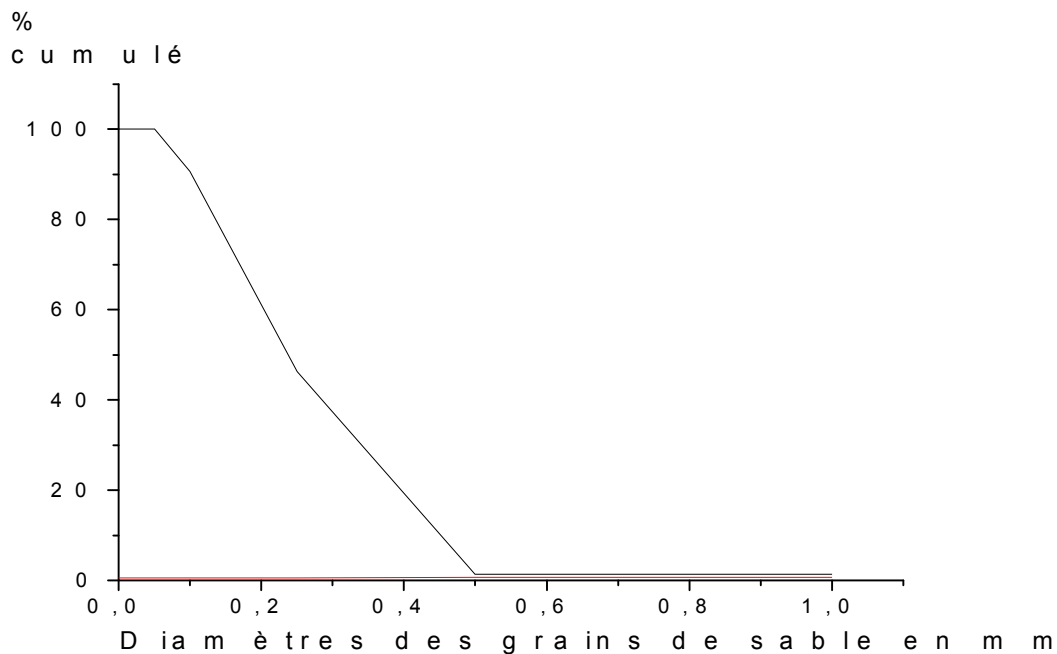


Fig 37 : Courbe granulométrique de la couche aquifère de la zone d'étude.

4.3. Choix de l'ouverture des crépines et des dimensions du gravier additionnel :

En s'appuyant sur les données de la figure, on peut définir les caractéristiques du gravier additionnel et l'ouverture à donner à la crépine en procédant comme suit :

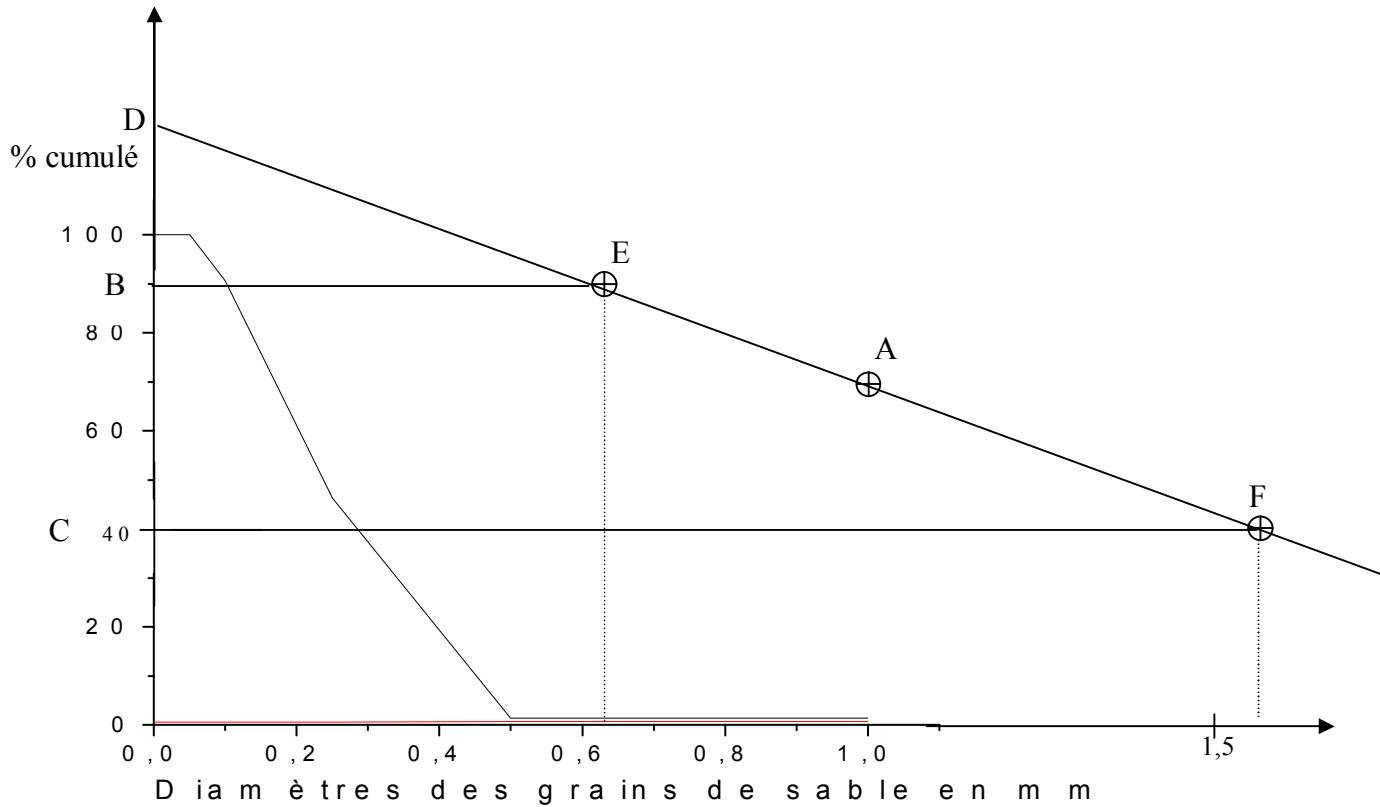


Fig 38 : Ouvertures des crépines et dimensions du gravier de la zone d'étude.

Pour la formation définie par la courbe de la figure , on multiplie la valeur de l'abscisse à 70% par un nombre compris entre 4 et 6 ; 4 si le matériau est très uniforme ; 6 dans le cas contraire. Nous prenons 6 pour notre cas et nous obtenons le point A, premier point de la courbe du gravier additionnel.

En comparant les 2 triangles rectangles BED et CFD (fig), nous pouvons fixer le point D (2^{ème} point de la courbe du gravier additionnel) de la manière suivante :

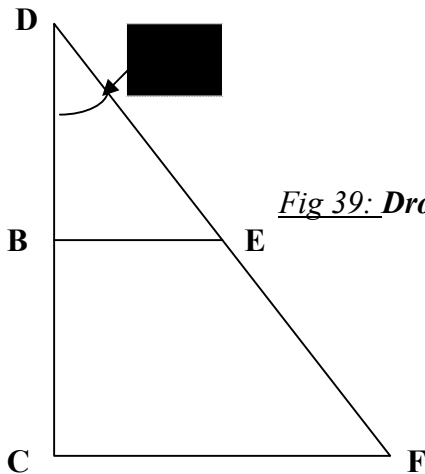


Fig 39: Droite représentant la granulométrie du gravier additionnel

$$\text{Tg}\alpha = \text{BE}/\text{BD} = \text{CF}/(\text{BC} + \text{BD}) \quad (4.1.)$$

d'où

$$BD=BC/(CF/BE-1) \quad (4.2.)$$

comme le coefficient d'uniformité d'un bon gravier additionnel doit être compris entre 2 à 2,5 (nous prenons 2,5, valeur limite supérieure) ; et nous savons que ce coefficient est représenté par le quotient de l'abscisse à 40 % (CF) par l'abscisse à 90% (BE);

alors la droite BD sera égale à :

$$BD=BC/(2,5-1)=BC/1,5 \quad (4.3.)$$

Rq: La droite DA constitue la portion caractéristique du gravier additionnel.

Nous retenons les valeurs des abscisses à 90% et à 40 % , soit $BE=0,64mm$ environ et $CF=1,58mm$ environ.

4.3.1. Dimensions du gravier additionnel :

Le gravier auquel on s'intéresse sera donc défini comme suit :

- 10 % d'éléments plus fins que 0,64 mm ;
- 50% d'éléments avec un diamètre compris entre 0,64 mm et 1,58 mm ;
- et 40 % d'éléments plus gros que 1,58 mm avec une tolérance de + 8 %.

Nous rappelons que la mise en place du gravier additionnel dans une formation de sable très fin et uniforme permet de choisir une plus grande ouverture pour la crépine . Voyons comment on peut fixer la dimension de l'ouverture dans ce cas.

Puisque le gravier additionnel est très uniforme ; il suffit que la crépine laisse passer les éléments les plus fins qui représentent 10% du poids du gravier.

4.3.2. Diamètre de l'ouverture de la crépine :

On prendra donc comme ouverture la valeur de l'abscisse à 90% de la courbe du gravier.

Pour notre cas, cette valeur est donnée par BE soit environ 0,64 mm.

Si nous n'avions pas mis de gravier, l'ouverture (abscisse à 40% de la courbe du terrain) eût été de 0,30 mm.

On voit que la mise en place du gravier, nous permet de doubler le diamètre de l'ouverture des orifices de la crépine ; 0,64mm au lieu de 0,30mm. Il sera donc possible de réduire de moitié la vitesse d'entrée à la crépine ou pour la même vitesse et si la formation le permet de doubler le débit.

4.4. Programme de forage :

Le forage d'exploration doit être réalisé de la manière suivante :

- forage en 12 ¼ de pouces : de 0 à 200 mètres de profondeur ;
- à chaque mètre d'avancement, étude, par l'hydrogéologue ,du terrain détruit ;
- interprétation des résultats diagraphiques (de 0 à 200m) ;
- essais à blanc (à l'aide du compresseur) ;

En analysant toutes ces données, l'hydrogéologue pourra décider de l'équipement de la colonne de captage en passant par les opérations suivantes :

- élargissage en 17 ½ pouces jusqu'à une certaine côte ;
- descente de la colonne de captage en prévoyant une grande chambre de pompage ;
- mise en place du gravier additionnel ;
- développement pneumatique ;
- essais de débit ;
- cimentation.

Pour l'étude que nous entreprenons, on proposera 30 mètres de tubes pleins vissés à 90 mètres de crépines inoxydables ayant un gravier additionnel dont les dimensions ont été déterminées par l'analyse granulométrique.

4.5. Recommandations :

4.5.1. Contrôle et suivi :

La durée de vie d'un forage en exploitation, dépend de la qualité de sa réalisation. C'est pourquoi, le contrôle et suivi par le maître de l'ouvrage est nécessaire. Ceci afin de s'assurer que l'entreprise est en train de respecter les caractéristiques exigées par l'étude. Le service technique doit donc être présent lors des opérations suivantes :

- descente de la colonne de captage, pour vérifier la qualité des tubes et des crépines ainsi que la longueur totale descendue dans le trou ;
- mise en place du gravier additionnel, afin de vérifier la qualité et le volume de gravier mis en place ;
- développement, pour s'assurer que toutes les particules fines de sable ont été évacuées de toute l'épaisseur de la nappe ;
- **essais de débit, afin de respecter le programme de courte et de longue durée pour un choix optimum de pompage ;**
- cimentation, pour vérifier la qualité du ciment sec et le volume du laitier à injecter.

4.5.2. Qualité du gravier additionnel :

4.5.2.1. Le gravier additionnel est toujours utile ,il est souvent indispensable :

Que son rôle soit celui d'un stabilisateur de la formation, ou qu'il soit un élément complémentaire d'une formation trop fine, on peut conclure qu'il y a lieu, en règle générale, de mettre en place ce massif auxiliaire.

4.5.2.2. Qualités requises pour un bon massif de gravier additionnel :

Le matériau doit être propre, bien lavé, il doit être rond ou à angles arrondis . Le gravier concassé ne convient absolument pas et ceci à cause de sa forme. Enfin il doit être siliceux, ou en tout cas non calcaire . En effet s'il était calcaire, il aurait tendance à se cimenter au passage de l'eau, ce qui réduirait sa perméabilité.

D'autre part, si une acidification s'avérait nécessaire en fin d'exécuter de l'ouvrage, le gravier calcaire se trouverait en partie détruit avec tous les risques qui en résulteraient pour la tenue des parois du forage.

4.5.2.3. L'épaisseur du massif de gravier additionnel :

Il résulte de plusieurs expériences que pour être efficace, cette épaisseur, dimension prise selon le rayon ne doit pas être inférieure à 3 " = 75 mm . Par contre il serait absolument inutile de prévoir une épaisseur supérieure à 8" = 200 mm.

4.5.2.4. La hauteur du massif de gravier additionnel :

Pour être certain d'avoir une épaisseur régulière sur toute sa hauteur, il sera nécessaire de centrer la colonne et la crépine dans le trou foré au moyen d'arceaux de centrage.

Le massif doit être placé de telle manière que son niveau supérieur soit nettement au dessus du toit de la couche aquifère la plus haute (plusieurs mètres si possible).

En respectant le programme de forage, nous obtiendrons un ouvrage vertical, bien équipé, et ayant un bon filtre. Ceci offre deux avantages :

- **absence de communication entre les couches, ce qui évite les catastrophes écologiques ;**
- **augmentation de la durée de vie de l'exploitation de l'ouvrage.**

Conclusion générale

L'étude que nous avons entreprise dans le cadre de ce mémoire a permis d'exploiter les résultats de laboratoire du paramètre granulométrie afin de choisir le meilleur filtre de la couche aquifère composée de matériaux meubles (sable et grés).

Ceci pour éviter les venues de sable dont la présence en surface est très néfaste à l'agriculture locale et avoisinante (érosion éolienne). Il ne faut pas aussi oublier que la présence permanente de sable dans l'eau peut causer d'autres dégâts :

- détérioration de l'équipement de pompage ;
- affaissement de terrains à cause de la pression géostatique ;
- **développements (à l'aide du compresseur) fréquents de l'ouvrage à cause de la diminution de débit (présence de sable au fond du trou).**

A la fin du premier chapitre, nous avons pu localiser les nappes importantes concernées par l'étude et dont le débit peut atteindre 120 litres à la seconde, ceci bien sûr en fonction de la qualité de la réalisation et de l'équipement de l'ouvrage :

Il faut noter que ;

- un massif filtrant à granulométrie surdimensionnée dans une formation de sable fin peut provoquer un ensablement de l'ouvrage.
- un massif filtrant à granulométrie trop serrée peut conduire à une exploitation partielle du potentiel de la nappe et rend difficile l'extraction de la boue de forage.

Le second chapitre, consacré à l'évaluation et à la mobilisation des ressources hydriques vise à développer une prise de conscience afin de préserver notre patrimoine selon un modèle de gestion optimisant l'exploitation durable de cette ressource en eau qui peut être renouvelable ou non renouvelable (eaux fossiles de l'albien).

Dans le troisième chapitre, nous avons mis en évidence les valeurs moyennes de la granulométrie de 3 zones éloignées géographiquement, et de faire 2 comparaisons (horizontale et verticale). Ce qui nous a permis de confirmer les études géologiques et hydrogéologiques à savoir que les zones identiques 1 et 2 sont différentes que la zone 3.

Ceci nous autorise à combiner verticalement (de 0 à 260m de profondeur) les résultats de laboratoire du paramètre granulométrie et c'est ainsi que l'analyse statistique divise l'ouvrage en 2 parties :

- de 0 à 30 mètres, terrains semi-perméable ;
- de 30 à 260 mètres, terrains perméables et semi-perméables.

Enfin au crible des résultats statistiques, nous avons proposé une colonne de captage de 30 mètres de tubes pleins et de 90 mètres de crépines inoxydables. Pour l'intervalle de 120m à 260m, on peut utiliser le même filtre mais en tenant compte bien sûr des résultats diagraphiques.

Il aurait été souhaitable de compléter l'étude par le choix du diamètre de la chambre de pompage en fonction des essais de débit mais pour cela il faut disposer de données supplémentaires.

Comme perspectives, nous suggérons ce qui suit :

- La gestion des ressources naturelles et l'élaboration de stratégies de développement exigent la mobilisation de la communauté scientifique et la création de cadres d'échange et de concertation.
- En plus de la coordination entre les différents services techniques dans le domaine de l'eau (DHW, EPE, ANRH, APC) ; il faut associer l'université aux travaux de la recherche appliquée.
- Etablir un contact permanent entre l'Agence nationale des ressources hydriques et l'Observatoire du Sahel et du Sahara qui a pour mission d'être un outil de liaison et un cadre international de partenariat et de concertation dans le domaine de la lutte contre la désertification et de l'atténuation des effets de la sécheresse ;

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **ACILA**. Le forage hydraulique profond. - Journées techniques Tipaza, 1985.
- [2] **AMBERT** (J.C.). – Optimisation d'un forage d'eau. – Courrier Johnson n° 50, 1979.
- [3] **AUDINET** (Michel). – Hydrométrie appliquée aux cours d'eau. – Editions Eyrolles, 61 boulevard Saint Germain Paris 5^{ème}, 1995.
- [4] **BERRANI**. – Interprétations des essais de débit. - Journées techniques Tipaza, 1985.
- [5] **BOUZIANI** (Mustapha). – L'eau, de la pénurie aux maladies. – Editions Ibn Khaldoun, ISBN : 9961-71-071-1, 2000.
- [6] **BENHABIB** (Kamal-eddine). - Eau et stratégie de développement : situation de l'enjeu. - Mutations, publication trimestrielle éditée par la chambre Algérienne de commerce et d'industrie. – Numéro 32, ISSN ; 2000.
- [7] **BLANC-TAILLEUR** (M.) et **LALLEMAND** (J.). – Un bon massif de gravier, une clef du succès pour notre forage. – Revues géologues n° 50-51, 1979.
- [8] **BLANT** (M. G.) et al. - Méthodes modernes de géologie de terrain ; techniques d'échantillonnages. – Editions Technip, 27 rue Ginoux 75737 Paris 15^{ème}, 1983.
- [9] **BONNIN** (Jacques). - Hydraulique urbaine. - Edition Eyrolles, 61 boulevard Saint Germain Paris 5^{ème}, 1977.
- [10] **BURGEAP**. - Etude et mise en valeur des eaux souterraines, 2^{ème} édition. - Editions du Ministère de la coopération et du développement, France, ISBN ; 1981.
- [11] **BURGEAP**. - Matériel et techniques de forage d'eau mis en œuvre en Afrique. Editions du Ministère de la coopération et du développement, France, ISBN ; 1981.
- [12] **CAILLERE** (S.) et **HENIN** (S.). – Minéralogie des argiles. – Masson et compagnie Paris, 1963.
- [13] **CARATINI** (Claude). - Etude géologique de Chellala-Reibell. - Publications du service géologique de l'Algérie, bulletin n° 40 (tomes 1 et 2), ONIG Alger ; 1970.
- [14] **CASSAN** (M.). – Les essais d'eau dans la reconnaissance des sols. - Editions Eyrolles, 61 boulevard Saint Germain Paris 5^{ème}, 1980.
- [15] **CASTANY** (Gilbert). – Faire connaissance avec l'eau propre. – Hachette, Paris, 1980.
- [16] **CASTANY** (Gilbert). – Interprétation des cartes piézométriques et caractéristiques des couches aquifères libres. – Bulletin BRGM n° 3 Orléans, 1966.
- [17] **CASTANY** (Gilbert). - Principes et méthodes de l'hydrogéologie. - Bordas, Paris, 1982.

- [18] **Colloque Européen.** – La gestion de l'eau. – Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 28 rue des Saints pères 75007 Paris, ISBN 2-8597-156-0, 1990.
- [19] **CORNET** (André) et **GOUSKOV** (Nicolas). - Les eaux du crétacé inférieur continental du Sahara Algérien (nappe dite Albienne). – Extrait du 14^{ème} congrès géologique international, Alger ; 1952.
- [20] **COSTET** (J.) et **SANGLERAT** (G.). – Cours pratique de mécanique des sols. –Bordas, Paris, ISBN ; 1981.
- [21] **Décret présidentiel.** - Ratification des statuts de l'observatoire du sahel et du sahara adoptés au Maroc. – Journal officiel n° 425 du 23 décembre 2000.
- [22] **DESJARDINS** (Raymond). – Le traitement des eaux. – Editions de l'école polytechnique de Montréal, 1990.
- [23] **D.H.W. TIARET** (Direction de l'hydraulique de la wilaya de Tiaret). - Essais de débits des forages en production. - Rapports sur les forages réalisés dans les années 1993 à 1995.
- [24] **DJEKBOUB** (Saad). La dégradation des ressources en eau par la pollution. - Mutations, publication trimestrielle éditée par la chambre Algérienne de commerce et d'industrie. – Numéro 32, ISSN ; 2000.
- [25] **DJEKBOUB** (Saad). – Urgence signalée. – Mutations, publication trimestrielle éditée par la chambre Algérienne de commerce et d'industrie. – Numéro 32, ISSN ; 2000.
- [26] **ENGLEMAN** (Robert) et **LEROY** (Pamela). – Sustaining water, population. – Service international, Washington, 1993.
- [27] **FEDER** (Gershon) et **LEMOIGNE** (Guy). - Une gestion équilibrée des ressources en eau. - Finances et développement ; juin 1994.
- [28] **GINOCCHIO** (Roger). – L'énergie hydraulique. – Editions Eyrols, 61 boulevard Saint Germain Paris 5^{ème}, 1978.
- [29] **GRECO** (jacques). – La défense des sols contre l'érosion. – La Maison Rustique Paris, 1978.
- [30] **HABOUR** (Ali). – L'eau, source de vie et / ou de conflit. – Mutations, publication trimestrielle éditée par la chambre Algérienne de commerce et d'industrie. – Numéro 32, ISSN ; 2000.
- [31] **HENRY** (Jacques). – Méthodes modernes de géologie de terrain ; manuel d'analyse structurale. – Editions Technip, 27 rue Ginoux 75737 Paris 15^{ème}, 1983.
- [32] **I.F.P.** (Institut Français du pétrole). - Le formulaire du foreur. –Edition technip, 27 rue Ginoux 75737 Paris 15^{ème}, 1978.

- [33] **KHELIF**. – Techniques du forage profond, conduite du forage et choix d'un programme type de forage et d'équipement d'un puit Albien. - Journées techniques Tipaza, 1985.
- [34] **LALLEMAND (J.)**. – Complétion des forages profonds. – Courrier Johnson 54, 1980.
- [35] **LAUGA (Robert)**. - Pratique du forage d'eau et utilisation des crépines en génie civil et forage profond. – Seasam, 1990.
- [36] **LECOZ (christian)**, **TASSIN (Bruno)**, **THEVENOT (Daniel)**. – Transport des polluants dans les hydrosystèmes. - Presses de l'école nationale des ponts et chaussées ISBN 2-85978-255-9, 49 rue de l'université 75007 Paris, 1996.
- [37] **LESAFFRE (Benoit)**. – Fonctionnement hydrologique et hydraulique du drainage souterrain des sols temporairement engorgés. - Cemagref division irrigation 361, rue J. F. Breton BP 5095, 34033 Montpellier CEDEX 1, 1988.
- [38] **MABILLOT (Albert)**. - Le forage d'eau, guide pratique. – Edité par crépines Johnson France S.A., 1971.
- [39] **MAHMOUD (ALI AYUB) et KUFFNER (Ulrich)**. - La gestion de l'eau dans le Maghreb. - Finances et développement, 1994.
- [40] **MALATERRE (Pierre-Olivier)**. – Equipement pour l'eau et l'environnement. – Cemagref division irrigation 361, rue J. F. Breton BP 5095, 34033 Montpellier CEDEX 1, 1998.
- [41] **NEKRASSOV B.** - Cours d'hydraulique. – Edition MIR, 1978.
- [42] **NILI (Tarzi)**. – Choix de la colonne de captage. - Journées techniques Tipaza, 1985.
- [43] **Office international de l'eau**. – La réalimentation de la nappe. – Diffusion, 11 rue Lavoisier F 75384 Paris CEDEX 8, 1983.
- [44] **O.N.M. (Office national de la météorologie)**. – Observations climatiques de la région de KSAR-CHELLALA sur 11 ans (1990-2000), 2001.
- [45] **PIERSON (M.B.)**. - Optimisation d'un forage d'eau ; crépines Johnson S.A. - Journées techniques Tipaza, 1985.
- [46] **PLUET (Touvy Cauvin)**. – Etude comparative de divers types de filtres dans la construction de puits de petite ou moyenne profondeur. – Journées techniques Tipaza, 1985.
- [47] **SANGLERAT (G.) et COSTET (J.)**. - Cours pratique de mécanique des sols. -3^{ème} édition Dunod, 1981.
- [48] **SPIEGEL (Murray R)**. - Théorie et applications de la statistique de la série Schaum. - Edition Française A.Erga S et J. F. Marcotorchino, 1978.
- [49] **TERZAGHI (K.) et PECK (R.B.)**. – Mécanique des sols appliquée. – Dunod, 1969.

[50] **VATAN** (André). – Manuel de sédimentologie. – Editions Technip, 27 rue Ginoux 75737 Paris 15^{ème}, 1967.

[51] **VSESSOJVZNOJE** (O.). - Rapport général sur les études hydrogéologiques ; textes. - Moscou; 1971.

[52] **VSESSOJVZNOJE** (O.). - Cartes et coupes hydrogéologiques et géophysiques, les résultats d'observations du régime, les courbes de sondages électriques verticaux. – Moscou, 1971.

[53] **VSESSOJVZNOJE** (O.). - Catalogues des ouvrages et résultats des analyses de laboratoires d'eau et des roches. – Moscou, 1971.

[54] **YAHMI**. – Technique du forage des puits d'eau à l'Albien dans le sud Algérien. Journées techniques Tipaza, 1985.