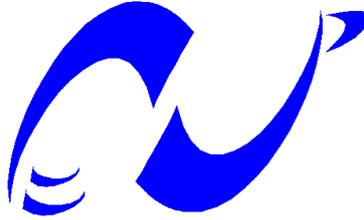


*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**  
**DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE**



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

**Projet de fin d'études**

*Présenté par*  
***Bilel TAIBI***

*Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat*  
***En HYDRAULIQUE***

**Thème**

**Contribution à l'amélioration de l'exploitation  
de la mine de Chaabet El-Hamra par l'étude  
des rabattements de la nappe**

*Dirigé par :*

**Dr : A. BERMAD**

**Promotion Juin 2012**

## Remerciement

*Je remercie tous d'abord Allah et clément de m'avoir donné le foie et le courage pour terminer ce projet de fin d'études, pour les efforts qui nous a donné, pour pouvoir réaliser ce modeste travail*

*Je tiens à présenter mes remerciements les plus sincères à mon promoteur Monsieur **A.Bermad** pour sa collaboration, générosité, sa patience et ses précieux conseils pour l'établissement de ce travail.*

*Je remercie Monsieur **S.Ouazouaz** pour son aide et ses encouragements.*

*Je remercie l'ensemble des enseignants du département d'hydraulique.*

*Je remercie pour la même occasion les gens de L'ENOF de Sétif pour leurs aides et leur gentillesse*

*Je remercie les membres de jury qui m'ont honoré de leurs présence et avoir pris la Paine d'étudier et d'apporter leurs critiques constructives à ce modeste travail.*

*Enfin je remercie tous mes amis pour leurs soutiens.*

*A tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réussite de ce travail, je leurs dis.*

*Merci, Merci, Merci ...*

# Dédicaces

*A*

♥ *Mes très chers parents qui m'ont soutenu pour réaliser ce travail;*

♥ *Mon cher frères Ferhat, sa femme et ses petits-enfants Hadil et Hatem ;*

♥ *Mon cher frère Walid ;*

♥ *Mes chères sœurs ;*

♥ *Ma grande famille ;*

♥ *Tous mes amis de la cité universitaire BOURAOUI Amar et de l'Ecole Nationale Polytechnique.*

♥ *Tous les enseignants du département de l'Hydraulique de l'Ecole Nationale Polytechnique.*

*Je dédie ce modeste travail*

## **Résumé :**

Un travail n'est nécessaire que s'il répond à un besoin ou à une question, dans notre cas il s'agit de répondre aux aspirations de l'exploitation minière de la mine de Chaabet El-Hamra à Sétif, dont la majeure partie des réserves exploitables du zinc dans la mine se trouve sous le niveau hydrodynamique de la nappe, trouver une solution sécuritaire et économique pour assécher la mine par la méthode du rabattement artificiel utilisant un système de pompage menu par une série de forages et un réseau piézométrique pour le contrôle des variations du niveau d'eau, et réutiliser les eaux d'exhaure qui sont de bonne qualité pour alimenter les habitants de la ville d'Ain Azel par une eau douce et agréable pour la santé.

**Les mots clés :** mine, niveau hydrodynamique, nappe, pompage, forage, qualité.

## **Abstract**

Work is required only if it meets a need or a question, in our case it is to meet the aspirations of mining, including most of the exploitable reserves of zinc in the mine is under the hydrodynamics of the water level, so we must find a safe and economical solution to drain the mine by the method of using an artificial drawdown pumping system menu with a series of boreholes and a piezometric network for the control, and reusing drainage waters which are of good quality to feed the inhabitants of the town of Ain Azel by a soft and pleasant water for health.

**Keywords :** mine, hydrodynamic level, tablecloth, pumping, drilling, quality.

## **ملخص:**

يتوجب على كل مشروع تلبية حاجة، أو إجابة عن تساؤلا، في حالتنا نتطلع لتلبية متطلبات أعمال منجم الشعبة الحمراء بمنطقة عين أزال بسطيف، نظرا لتركز معظم احتياطات الزنك لهذا المنجم تحت مستوى المياه الجوفية التي أصبحت عائقا لتطور الأعمال بالمنجم. و في هذا الصدد اقترحنا طريقة لضخ المياه، عن طريق مجموعة من الآبار الأرتوازية، و شبكة ببيزومترية لغرض مراقبة تغيرات مستوى المياه. كما سنقوم بإعادة استغلال المياه المستخرجة بعد التأكد من صلاحيتها و حسن نوعيتها لتزويد سكان المنطقة بالمياه الصالحة للشرب.

**الكلمات المفتاحية :** منجم، مستوى المياه الجوفية، الضخ، الآبار الأرتوازية، نوعية المياه.

# Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	1
------------------------------------	---

## **Chapitre I : Généralités sur l'hydrogéologie**

<b>I.1. Introduction</b> .....	3
<b>I.2. Notions fondamentales sur l'eau, les aquifères et les nappes</b> .....	4
I.2.1. Définitions.....	4
I.2.2. Concept d'aquifère.....	4
I.2.3. Types d'aquifère.....	8
<b>I.3. Paramètres hydrogéologiques</b> .....	10
I.3.1. Porosité et indice des vides.....	11
I.3.2. Teneur en eau, masses et poids volumique, densité.....	11
I.3.3. Degré de saturation.....	12
I.3.4. Perméabilité.....	12
I.3.5. Transmissivité.....	14
I.3.6. Diffusivité.....	15
I.3.7. Coefficient d'emmagasinement.....	15
I.3.8. Résistance hydraulique verticale.....	15
I.3.9. Facteur de drainance.....	15
I.3.10. Facteur d'égouttement.....	16
I.3.11. Viscosité et viscosité cinématique de l'eau.....	16
I.3.12. Compressibilité de l'eau.....	16
<b>I.4. Charge hydraulique et piézométrie</b> .....	16
I.4.1. Définition.....	16
I.4.2. Principe de l'écoulement.....	17
I.4.3. Mesure de la charge hydraulique ou de la pression interstitielle.....	18
<b>I.5. Equation de l'écoulement</b> .....	18
I.5.1. Régime permanent.....	18
I.5.2. Régime transitoire.....	19

## **Chapitre II Présentation de la zone d'étude**

<b>II.1. Introduction</b> .....	20
<b>II.2. Localisation géographique</b> .....	20
<b>II.3. Cadre climatique</b> .....	23
II.3.1. Pluviométrie.....	23
II.3.2. Température.....	24
II.3.3. Grêles et gelées.....	25
II.3.4. Vents.....	25
<b>II.4. Cadre hydrogéologique</b> .....	25
<b>II.5. Cadre géologique</b> .....	28

II.5.1. Introduction.....	28
II.5.2. Géologie du gisement.....	28
II.5.3. Tectonique de la région.....	32

### **Chapitre III**

### **Les essais de pompage**

<b>III.1. But des essais.....</b>	<b>34</b>
<b>III.2. Exécution d'un pompage d'essai.....</b>	<b>35</b>
III.2.1. Procédés de mesures.....	35
III.2.2. Durée du pompage d'essai.....	35
III.2.3. Interprétation des données.....	35
<b>III.3. Méthodes d'interprétation des essais de pompage.....</b>	<b>36</b>
III.3.1. Régime permanent en nappe captive.....	37
III.3.2. Régime transitoire en nappe captive.....	41
III.3.3. Régime permanent en nappe libre.....	55
III.3.4. Régime transitoire en nappe libre.....	56

### **Chapitre IV :**

### **Détermination des paramètres hydrodynamiques et estimation de la durée du rabattement**

<b>IV.1. Introduction.....</b>	<b>61</b>
<b>IV.2. Rappels et définitions.....</b>	<b>62</b>
<b>IV.3. Essais de pompage.....</b>	<b>62</b>
IV.3.1. Traitement des données.....	63
IV.3.2. Détermination des paramètres hydrodynamiques.....	65
<b>IV.4. Prévisions des venues d'eau " Profil 10 au profil 15".....</b>	<b>68</b>
<b>IV.5. Estimation de la durée du rabattement.....</b>	<b>73</b>
IV.5.1. Introduction.....	73
IV.5.2. Calcul du débit d'un forage.....	74
IV.5.3. Détermination du nombre de forages.....	75
IV.5.4. Emplacement des forages.....	75
IV.5.5. Caractéristiques des forages.....	76
IV.5.6. Caractéristiques des pompes.....	76
IV.5.7. Calcul du rabattement en fonction du temps avec cinq forages.....	77
<b>IV.6. Conclusion.....</b>	<b>82</b>

### **Chapitre V :**

### **Qualité et utilisation de l'eau extraite**

<b>V.1. Introduction.....</b>	<b>83</b>
<b>V.2. Paramètres chimiques.....</b>	<b>83</b>
<b>V.3. Caractéristiques des paramètres chimiques.....</b>	<b>84</b>
V.3.1. Conductivité électrique (CE).....	84
V.3.2. Nitrates (NO <sub>3</sub> ).....	84



## Liste des tableaux

<i>Tableau I.1 : Les différentes nappes et leurs caractéristiques</i> .....	10
<i>Tableau II.1 : Les coordonnées du site</i> .....	20
<i>Tableau II.2 : Résumé stratigraphique de la région d'Ain Azel</i> .....	29
<i>Tableau II.3 : Colonne stratigraphique du gisement de Chaabet El-Hamra</i> .....	30
<i>Tableau IV.1 : Résultats donnant les valeurs de T et S</i> .....	66
<i>Tableau IV.2 : Valeurs de T et S en 1993</i> .....	67
<i>Tableau IV.3 : Prévisions des venues d'eau par profil</i> .....	71
<i>Tableau IV.4 : Valeurs de la perméabilité selon la granulométrie</i> .....	72
<i>Tableau IV.5 : Le niveau d'eau à rabattre pour chaque profil</i> .....	74
<i>Tableau IV.6 : Caractéristiques des forages</i> .....	76
<i>Tableau IV.7 : Caractéristiques électriques et hydrauliques du GEP des forages</i> .....	77
<i>Tableau IV.8 : Variation du rabattement en fonction du temps t et de la distance</i> .....	78
<i>Tableau IV.9 : Délais de Rabattement pour chaque profil</i> .....	80
<i>Tableau V.1 : Concentrations acceptables et admissibles des substances qui influent sur la potabilité</i> .....	87
<i>Tableau V.2 : Concentrations admissibles des substances toxiques</i> .....	88
<i>Tableau V.3 : Substances comportant un risque pour la santé</i> .....	88
<i>Tableau V.4 : Mesures des paramètres physico-chimiques</i> .....	88
<i>Tableau V.5 : Paramètres de pollution</i> .....	89
<i>Tableau V.6 : Cations et anions</i> .....	89
<i>Tableau V.7 : Métaux lourds</i> .....	89
<i>Tableau V.8 : Calcul du débit journalier moyen</i> .....	91
<i>Tableau V.9 : Calcul du débit horaire moyen</i> .....	92
<i>Tableau V.10 : Calcul du débit d'apport</i> .....	92
<i>Tableau V.11 : Calcul du débit d'adduction</i> .....	93
<i>Tableau V.12 : calcul du volume du réservoir</i> .....	94
<i>Tableau VI.1 : Réserves géologiques du gisement de Chaabet El Hamra (Evaluation de l'EREM)</i> .....	99
<i>Tableau VI.2 : Réserves géologiques du gisement de Chaabet El Hamra (Expertise SIDAM)</i> .....	100
<i>Tableau VI.3 : Réserves exploitables de la mine (évaluation de l'ORGM)</i> .....	101

<i>Tableau VI.4 : Réserves exploitables de la mine (évaluation de SIDAM)</i> .....	102
<i>Tableau VI.5 : Réserves géologiques selon l'ENOF</i> .....	102
<i>Tableau VI.6 : Réserves récupérable selon l'ENOF</i> .....	103
<i>Tableau VI.7 : Réserves géologiques et exploitable par profil selon l'ENOF</i> .....	103
<i>Tableau VI.8 : Détermination de la quantité nette du zinc</i> .....	103
<i>Tableau VI.9 : Frais des moyens matériels</i> .....	105
<i>Tableau VI.10 : Frais de réhabilitation des ouvrages miniers et préparation des chantiers</i> .....	107
<i>Tableau VI.11 : Frais total de production</i> .....	108
<i>Tableau VI.12 : Le coût d'un forage</i> .....	108
<i>Tableau VI.13 : Le coût d'un piézomètre</i> .....	110
<i>Tableau VI.12 : Le coût des équipements d'un forage</i> .....	111
<i>Tableau VI.14 : Le coût total du système d'exhaure</i> .....	111
<i>Tableau VI.15 : La rentabilité du projet</i> .....	112

## Liste des figures

<i>Figure I.1. : La répartition des eaux dans un aquifère.....</i>	<i>6</i>
<i>Figure I.2 : L'eau gravitaire et l'eau de rétention.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure I.3 : Aquifère à nappe libre.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure I.4 : Aquifères à nappe captive.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure I.5 : Allure des courbes de descente pour diverses sortes d'aquifères.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure I.6 : Porosité et indice des vides.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure I.7 : Dispositif expérimental de Darcy.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure I.8 : Dispositif de laboratoire avec écoulement latéral.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure I.9. : les deux types les plus fréquents des piézomètres: a) piézomètre hydraulique; b) piézomètre à capteur de pression.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure II.1 : Situation géographique de la région d'étude en .....</i>	<i>21</i>
<i>Figure II.2 : Carte topographique et toponymique avec localisation des sites de l'unité Kherzet –Youcef.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure II.2 : Situation géographique de la région d'étude dans la Wilaya de Sétif.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure II.4 : Variation de la pluviométrie moyenne mensuelle interannuelle dans la région d'Ain Azel durant la période 1988-2001.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure II.5 : Températures moyennes mensuelles de la région d'Ain Azel durant la période 1988-2001.....</i>	<i>24</i>
<i>Figure II.6 : Niveaux aquifères dans la région de Chaabet El-Hamra.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure II.7 : Coupe hydrogéologique de la mine de Chaabet El-Hamra.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure II.8 : La répartition des profils le long de la minéralisation.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure II.9 : Coupe géologique de la région d'Ain Azel.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure II.10 : La série géologique minéralisée de Chaabet El-Hamra.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure III.1 : Coupe schématique d'un essai de pompage dans un aquifère.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure III.2 : Coupe schématique d'un essai de pompage en aquifère à nappe captive.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure III.3 : Coupe schématique d'un pompage en nappe captive dans un large puits....</i>	<i>39</i>
<i>Figure III.4 : Exemple d'une représentation des mesures piézométriques en fonction des distances dans un papier semi-log.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure III.5 : Exemple d'interprétation des essais de pompage suivant le 2<sup>ème</sup> mode opératoire de la méthode de Thiem.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure III.6 : Courbe standard de Theis.....</i>	<i>43</i>

<b>Figure III.7 :</b> Courbe types de Theis : $w(u)$ fonction de $u$ et $w(u)$ fonction de $1/u$ .....	44
<b>Figure III.8 :</b> Exemple d'un courbe rabattement – temps sur un papier bi-logarithmique (méthode de Theis).....	45
<b>Figure III.9 :</b> Exemple de la superposition des graphes et le choix du point (méthode de Theis).....	45
<b>Figure III.10 :</b> Abaque de Chow, donnant la relation entre $F(u)$ , $w(u)$ et $u$ .....	46
<b>Figure III.11 :</b> Exemple d'interprétation par la méthode de Jacob.....	49
<b>Figure III.12 :</b> Exemple sur le graphe rabattement – distance.....	49
<b>Figure III.13 :</b> Coupe schématique d'un arrêt de pompage, le cas d'une remontée.....	51
<b>Figure III.14 :</b> La descente et la remontée d'une nappe.....	52
<b>Figure III.15 :</b> Exemple d'un graphe Rabattement résiduel – Temps.....	53
<b>Figure III.16 :</b> Le cône de rabattement dans une nappe libre.....	56
<b>Figure III.17 :</b> Coupe schématique d'un pompage en nappe libre.....	57
<b>Figure IV.1 :</b> Les deux parties exploitables du site.....	61
<b>Figure IV.2 :</b> Emplacement des puits d'essais.....	63
<b>Figure IV.3 :</b> Graphes rabattement – temps.....	66
<b>Figure IV.4 :</b> Courbe de rabattement dans une nappe libre.....	69
<b>Figure IV.5 :</b> Situation initiale du niveau hydrostatique.....	73
<b>Figure IV.6 :</b> Zone à assécher.....	74
<b>Figure IV.7 :</b> Emplacement des forages.....	75
<b>Figure IV.8 :</b> Emplacement des forages et des piézomètres.....	76
<b>Figure IV.9 :</b> Rabattement en fonction du temps pour chaque profil.....	80
<b>Figure IV.10 :</b> Evolution de cône de dépression dans le temps.....	81
<b>Figure IV.11 :</b> Le niveau d'eau par rapport à la minéralisation après 24 mois.....	81
<b>Figure V.1 :</b> Graphe du débit consommé non cumulé en fonction du temps.....	95
<b>Figure V.2 :</b> Graphe du débit consommé cumulé en fonction du temps.....	95
<b>Figure V.3 :</b> Schéma synoptique du réseau d'adduction de Chaabet El-Hamra.....	96
<b>Figure VI.1 :</b> Répartition des deux parties exploitables de la mine.....	101
<b>Figure VI.2 :</b> Répartition des réserves en zinc.....	104

## **Liste des abréviations**

**ANRH:** Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

**ENOF:** Entreprise Nationale des Métaux non ferreux.

**ONM:** Office Nationale de la Météo.

**PCO:** Poste Climatique Ordinaire.

**ETM:** Eléments Traces Métalliques.

**EREM:** Entreprise de Recherche Minière.

**SONAREM:** Société Nationale de la Recherche et d'Exploitation Minière.

**SIDAM:** Bureau d'étude Canadien.

**ADE:** Algérienne Des Eaux.

**ORGM:** Office National de Recherche Géologique et Minier.

# Introduction générale

## Introduction générale

La présence d'eau dans un terrain est souvent la cause des problèmes et d'accidents. Il est donc important de bien appréhender cette question pour assurer la sécurité des ouvrages. Tout serait simple sans eaux. La plupart des accidents en géotechniques sont dus à la présence d'eau.

Lors des travaux d'exploitation minière les eaux souterraines sont souvent une cause d'entrave pour le fonçage des galeries et l'extraction des matières minérales utiles.

Il faut juste se remémorer l'inondation du 02 Juin 1990 de la mine de Kherzet Youcef (Ain Azel) qui a causé la mort de 19 personnes ensevelis jusqu'à ce jour dans le même endroit et des dégâts matériels considérables, ce qui a poussé les autorités à procéder à la fermeture pure et simple de cette mine.

Le but du présent projet de fin d'études est de trouver une solution économique et sécuritaire pour rabattre le niveau de la nappe qui inonde une partie du corps de la minéralisation de la mine de Chaabet El-Hamra qui se trouve dans la région d'Ain Azel à Sétif.

Pour ce faire on doit réaliser une étude pour déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe aquifère à partir des essais de pompage, d'estimer la durée nécessaire pour assécher la partie inondée de la mine, et faire en sorte de réutiliser les eaux extraites pour l'alimentation en eau potable pour les habitants de la ville d'Ain Azel, après s'être assuré de la bonne qualité de cette eau à partir des analyses qui seront effectuées sur des échantillons prélevés au sein du site étudié.

Après une introduction générale où on a mis l'accent les problèmes de la présence de l'eau dans les terrains, on a scinde notre mémoire en six chapitres :

Dans le premier on a présenté des généralités sur l'hydrogéologie.

Le deuxième chapitre est réservé à la présentation générale de la région d'étude avec toutes les données sur la géographie, la climatologie, l'hydrogéologie et la géologie du site.

L'interprétation des essais de pompage a fait l'objet du chapitre trois.

Dans le chapitre quatre on a déterminé les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère de la région d'étude et l'estimation de la durée de rabattement pour assécher la nappe ;

La question de la qualité et de la réutilisation de l'eau extraite a été traité au chapitre cinq.

Enfin la rentabilité du projet a fait l'objet du chapitre six.

# Chapitre I

## Généralités sur l'hydrogéologie

### I.1. Introduction

L'hydrogéologie dont la base fondamentale est la géologie est une science pluridisciplinaire utilisant les méthodes et moyens de la prospection géophysique, des techniques des forages et des captages, de la chimie des eaux et des roches, de l'hydrodynamique souterraine. Donc c'est une discipline des sciences de la terre orientée vers les applications.

Les hydrogéologues établissent les relations entre la géologie et les eaux souterraines, essaient de situer "l'habitat" de l'eau dans les diverses formations géologiques et préconisent les méthodes de prospection.

Dans le sol, l'eau se trouve soit dans des roches compactés et fissurés, soit dans des formations non cimentées.

Toutes les roches peuvent être aquifères si la porosité et la perméabilité sont suffisantes.

- Les roches sédimentaires ne représentent que 5% du volume de l'écorce terrestre mais elles renferment 95% de l'eau souterraine.
- Les calcaires constituent un élément important de ce type de roche. S'ils sont fissurés, l'eau s'y introduit et par dissolution lente en agrandit les interstices. Ceux-ci constituent alors d'importants réservoirs d'eau.
- Une autre catégorie provient des argiles et des sables, depuis longtemps mis en place par érosion. Sous le poids des couches supérieures, les formations argileuses inférieures deviennent des schistes et les sables se sont transformés en grés. Les schistes et les grés ne sont aquifères que s'ils sont fissurés ou incomplètement cimentés.
- Les formations de sable, de gravier ou des deux à la fois constituent la majeure partie de l'aquifère souterrain. L'importante capacité d'emménagement hydrique et la grande perméabilité en font des matériaux de choix pour les forages d'eau.

En règle générale, les couches les plus récentes (superficielles) sont de meilleurs aquifères que les couches profondes qui sont cimentées et comprimées sous le poids des terrains subjacents.

## I.2. Notions fondamentales sur l'eau, les aquifères et les nappes

### I.2.1. Définitions

Un aquifère (aqua = eau ; fere = je porte) est défini comme une unité géologique totalement ou partiellement saturée en eau, c'est une formation hydrogéologique perméable permettant l'écoulement significatif d'une nappe d'eau souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables, d'où on peut extraire de l'eau par pompage de façon économique.

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

Un **aquitard** est défini comme une unité géologique totalement ou partiellement saturée en eau, d'où on ne peut pas extraire de l'eau par pompage de façon économique, mais qui est assez perméable pour laisser percoler des quantités d'eau appréciables.

Un **aquiclude** est défini comme une unité géologique totalement ou partiellement saturée en eau, dans laquelle l'eau ne circule pas du tout. Dans la réalité, on ne rencontre qu'exceptionnellement un aquiclude. Même si un puits reste sec dans une unité géologique, cette unité laisse cependant percoler des quantités d'eau non négligeables.

### I.2.2. Concept d'aquifère

On distingue trois grands types de terrains selon leur capacité à laisser passer l'eau :

- les terrains semi-perméables ou l'eau circule très lentement
- les terrains imperméables.
- les terrains perméables ou l'eau circule librement.

#### I.2.2.1. Les composantes principales d'un aquifère

Pour former un aquifère la présence de deux constituants, est nécessaire : la formation hydrogéologique perméable ou réservoir, et l'eau souterraine. Le terme, eau souterraine, désigne toute l'eau contenue ou circulant dans le réservoir. La fraction mobile est la nappe d'eau souterraine. A signaler éventuellement des gaz avec essentiellement de l'air.

La première fonction du réservoir est capacitive. Elle caractérise le stockage ou la libération de l'eau souterraine. Ces deux actions sont groupées sous le terme d'emménagement souterrain de l'eau. La libération de l'eau du réservoir est provoquée par l'action de la force de gravité (aquifère à nappe libre) ou par expulsion et décompression (aquifère à nappe captive).

### ***1.2.2.1.1. Le réservoir :***

Il s'agit d'une formation hydrogéologique perméable permettant l'écoulement significatif d'une nappe d'eau souterraine ou son exploitation par captage. Le réservoir représente la trame solide de la structure de l'aquifère. L'eau souterraine mobile s'emmagine et circule dans les vides.

#### **a. classification hydrogéologique des réservoirs selon le type des vides**

Le réservoir est identifié par ses caractéristiques et la genèse de ses vides (pores ou fissures). On établit donc une classification hydrogéologique des réservoirs d'eau souterraine en fonction du type de vides :

**a.1. les réservoirs homogènes**, à perméabilité d'interstices, constitués de roches meubles ou non consolidées (sable, gravier ou de grès). C'est le cas des nappes alluviales en fond de vallée ou dans les bassins sédimentaires.

**a.2. Les réservoirs hétérogènes**, à perméabilité de fissures, constitués de roches fissurées ou consolidées (surtout de calcaire mais également de roches volcaniques).

#### **b. Classification hydrogéologique des réservoirs selon la lithologie**

Basée sur la lithologie et le (ou les) types de vides, elle est importante pour l'étude quantitative de l'infiltration, des fonctions du réservoir et des comportements de l'aquifère. Elle est à la base de l'établissement des colonnes, coupes et cartes hydrogéologiques.

Les deux grands types de vides permettent de distinguer deux grandes catégories de réservoirs :

- Les roches meubles ou non consolidées ;
- Les roches compactes fissurées ou consolidées.

Toutefois les roches compactes présentent souvent des caractères mixtes avec coexistence de pores et de fissures.

### ***1.2.2.1.2. L'eau souterraine :***

L'eau souterraine constitue un milieu continu dans le réservoir dont seule une fraction, l'eau gravitaire, est mobile dans l'aquifère.

#### **a. Types d'eau souterraine**

Il convient de distinguer, pour définir les caractéristiques hydrogéologiques des réservoirs, deux types d'eau souterraine : l'eau gravitaire et l'eau de rétention.

### a.1. L'eau gravitaire

L'eau gravitaire est la fraction de l'eau souterraine libérée par l'action de la force de gravité. C'est l'eau mobilisable. Elle seule circule dans les aquifères, sous l'action des gradients et alimente les ouvrages de captage et les sources. Le volume d'eau gravitaire libéré est fonction du temps d'égouttage et de la granulométrie.

### a.2. L'eau de rétention

L'eau de rétention est la fraction de l'eau souterraine, maintenue dans les vides à la surface des grains ou des parois des microfissures, par des forces supérieures à celles de la gravité. Elle n'est donc pas mobilisable. Attirée fortement à la surface du solide, elle fait corps avec lui et appartient physiquement et mécaniquement à la même phase de l'aquifère, réservoir/eau de rétention.

Le phénomène de rétention de l'eau, à la surface des grains, est la conséquence de la structure moléculaire particulière de l'eau. La molécule d'eau est une très petite molécule angulaire. Elle est constituée de 2 atomes d'hydrogènes et d'un atome d'oxygène chargé négativement. Le défaut de 2 électrons de l'atome d'oxygène la dote d'un moment dipolaire élevé. Ainsi polarisée, elle se comporte comme un minuscule aimant permanent ou dipôle. Au contact des molécules polarisées se développent ainsi des forces d'attraction moléculaire de plusieurs dizaines de milliers de fois la force de gravité.

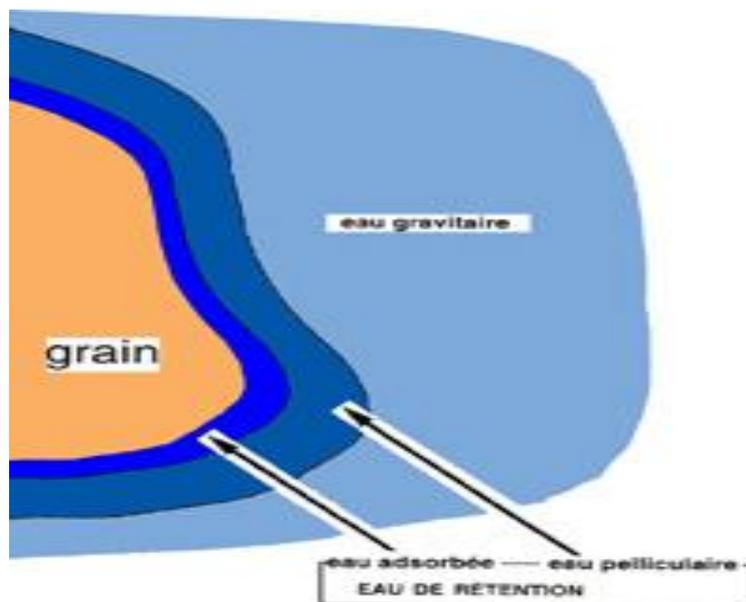
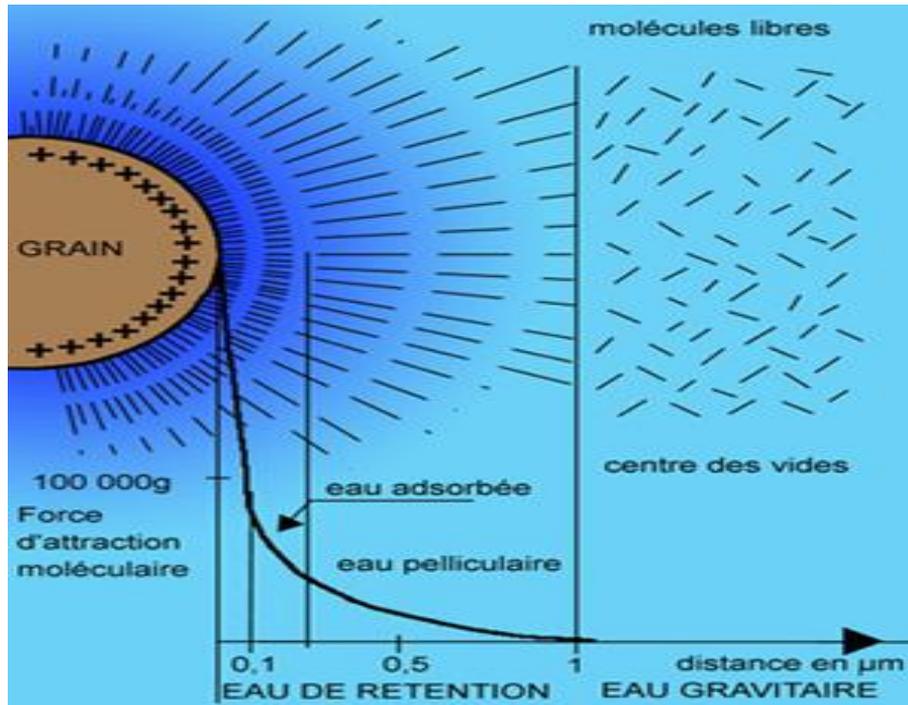


Figure I.1. : La répartition des eaux dans un aquifère.

Les forces d'attraction moléculaire décroissent, très rapidement, de la surface des grains vers le centre des vides. Les liaisons deviennent de plus en plus lâches et l'eau peut être libérée du réservoir par des forces de plus en plus faibles. Les molécules devenues libres, à une distance très faible de la surface du grain (1 à 2 microns) peuvent être déplacées par la force de gravité. Cet état n'étant pas constant, cette conception explique, en partie, l'accroissement en fonction du temps, du volume d'eau gravitaire obtenue par égouttage.



*Figure I.2 : L'eau gravitaire et l'eau de rétention.*

On peut ainsi séparer deux phases dans la classe de l'eau de rétention :

- L'eau adsorbée constitue un film continu, mince pellicule d'une épaisseur de l'ordre du dixième de micron, soit l'empilement de quelques dizaines de molécules. En pourcentage du volume total, elle augmente en fonction de la granulométrie : 2 à 5% dans les sables gros, 10 à 15 dans les sables fins et 40 à 50 dans les argiles.
- L'eau pelliculaire représente une pellicule de l'épaisseur de l'ordre du micron. Elle peut se déplacer à la surface des grains sous l'action de l'attraction des molécules d'eau voisines.

### I.2.3. Types d'aquifères

La configuration des aquifères, porte sur les caractéristiques de ses limites géologiques et hydrodynamiques : on parle de conditions aux limites. En simplifiant, on assimile la base de l'aquifère à une formation imperméable (substratum). Pour sa limite supérieure, on distingue trois types :

Hydrodynamique avec fluctuation libre : **aquifère à nappe libre** ;

Géologique imperméable : **aquifère à nappe captive** ;

Géologique semi perméable : **aquifère à nappe semi-captive**.

#### I.2.3.1. Aquifère à nappe libre

Une nappe libre est alimentée directement par les pluies qui ruissellent et pénètrent dans le sol en pouvant entraîner avec elles des substances polluantes provenant des activités de surface (agriculture, industrie, assainissement collectif et industriel, décharges).

Un aquifère à nappe libre est formé d'une couche perméable partiellement remplie d'eau et surmontant une couche relativement imperméable. La limite supérieure s'appelle surface libre (ou niveau phréatique) ; elle est à la pression atmosphérique. L'eau d'un puits pénétrant une telle nappe ne monte généralement pas au-dessus de la surface libre, sauf s'il y a un écoulement vertical.

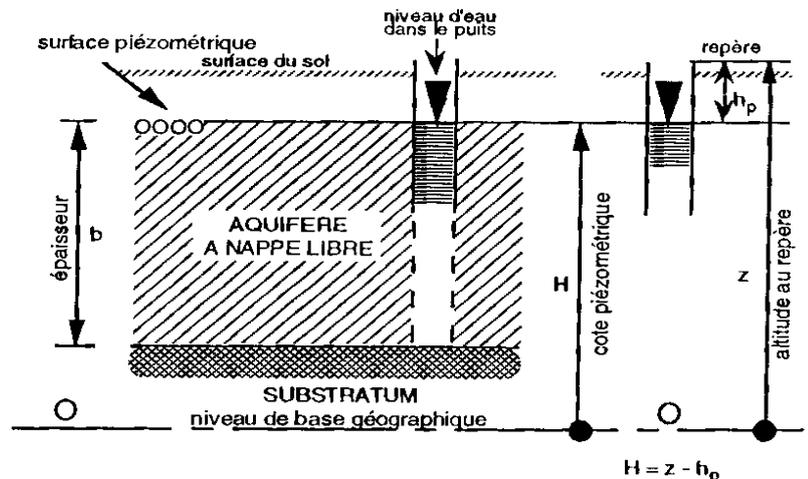


Figure I.3 : Aquifère à nappe libre.

#### I.2.3.2. Aquifère à nappe captive.

Un aquifère à nappe captive est une couche complètement saturée dont les limites supérieures et inférieures sont étanches. Naturellement, les couches parfaitement étanches sont rares dans la réalité ; aussi, de tels aquifères sont-ils moins répandus qu'on ne le croit généralement. Dans une nappe captive, la pression de l'eau est normalement supérieure à la pression atmosphérique, et l'eau s'élève donc dans les puits au-dessus du toit de l'aquifère dans le cas d'un écoulement vertical. Le débit d'eau extrait par pompage d'un aquifère à nappe captive provient presque exclusivement du mouvement de l'eau souterraine dans l'aquifère.

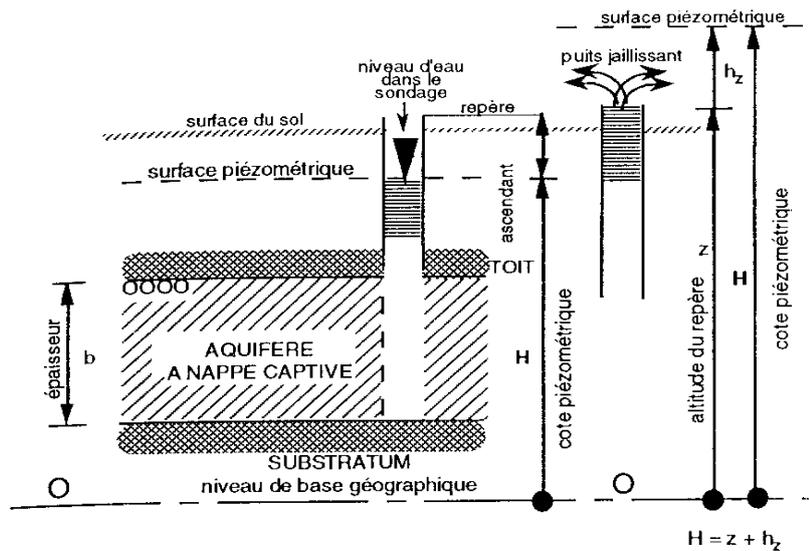


Figure I.4 : Aquifères à nappe captive.

### I.2.3.3. Aquifère à nappe semi-captive ou à drainance

Un aquifère à nappe semi-captive ou à drainance est une couche complètement saturée, mais dans la limite supérieure est semi-perméable et la limite inférieure est toit étanche, soit semi-perméable. Généralement le rabattement de la surface libre dans la couche semi-perméable est très faible devant celui de l'aquifère.

L'importance du mécanisme de drainance repose sur le fait que des volumes importants d'eau peuvent traverser des horizons imperméables ou semi-perméables lorsque la superficie de cet horizon est grande et qu'il existe une différence de pression de part et d'autres de cet horizon. Ce phénomène permet des échanges importants entre nappes superposées ou sous-jacentes au travers du substratum ou du toit en cas de différence de charge. On parle alors de nappes semi-captives avec substratum et toit semi-perméables.

### I.2.3.4. Aquifère à nappe semi-libre

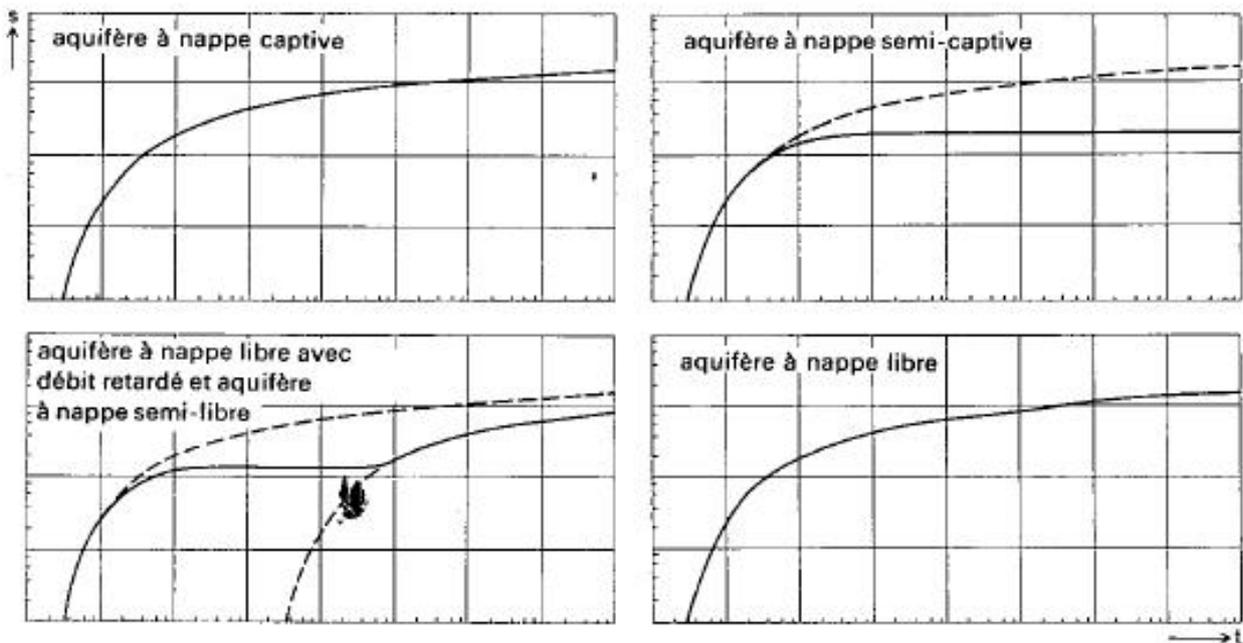
Si la couche à granulométrie fine d'un aquifère à nappe semi-captive a une perméabilité assez grande pour qu'on ne soit plus en droit de négliger la composante horizontale de l'écoulement, la nappe a un comportement intermédiaire entre celui de la nappe semi-captive et celui de la nappe libre, ou il existe une surface sur laquelle la pression de l'eau est égale à la pression atmosphérique et limitée par un plancher semi-imperméable.

Donc la classification des nappes est en fonction des caractéristiques de leur toit. On peut donc donner les critères suivants :

**Tableau I.1** : Les différentes nappes et leurs caractéristiques.

TOIT	Nappe correspondante
Etanche	Captive
Semi-perméable, de façon qu'on puisse négliger l'écoulement horizontal	Semi-captive
Moins perméable que l'aquifère principal, mais l'écoulement horizontal n'est pas négligeable	Semi-libre
Identique à l'aquifère principal	Libre (avec débit retardé)

La figure suivante présente les courbes de descente sur le papier bi-logarithmique, dans un puits captant les différents aquifères décrit ci-dessus :

**Figure I.5** : Allure des courbes de descente pour diverses sortes d'aquifères.

### I.3. Paramètres hydrogéologiques

Les paramètres de la fonction réservoir de l'aquifère peuvent être mesurés en laboratoire et sur le terrain. En laboratoire, le complexe eau/réservoir ou aquifère, est caractérisé par un paramètre hydrodynamique important, la porosité efficace. Sur le terrain, les pompes d'essai, l'étude des fluctuations de la surface piézométrique, déterminent les paramètres hydrodynamiques de l'emmagasinement souterrain, dont le principal est le coefficient d'emmagasinement.

### I.3.1. Porosité et indice des vides

La porosité est le rapport du volume des vides (c'est-à-dire le volume occupé par l'air, l'eau ou les deux simultanément) au volume total du sol, elle est exprimée en pourcentage.

$$\text{Porosité} = \frac{\text{Volume des vides}}{\text{Volume total}}$$

La porosité efficace, exprimée en pourcentage, est le rapport du volume d'eau gravitaire que le réservoir peut contenir à l'état saturé, puis libéré sous l'effet d'un égouttage complet, à son volume total.

$$\text{Porosité efficace} = \frac{\text{Volume de l'eau gravitaire}}{\text{Volume total}}$$

Dans le volume unité, les grains solides occupent donc un volume égal à  $(1 - n)$ . Ce volume s'appelle **compacité** ou  $n$  est la porosité. On utilise également l'indice des vides  $e$  qui fait double emploi avec la porosité  $n$  mais dont l'utilisation est plus commode dans certains problèmes. L'indice des vides est le rapport du volume des vides au volume des grains solides.

$$\text{Indice des vides} = \frac{\text{volume des vides}}{\text{volume des grains solides}}$$

$$e = n / (1 - n)$$

$$n = e / (1 + e)$$

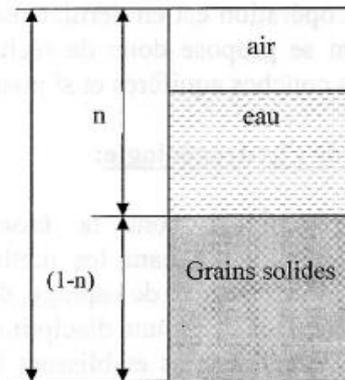


Figure I.6 : Porosité et indice des vides.

### I.3.2. Teneur en eau, masses et poids volumique, densité

– Masse volumique de solide ( $\rho_s$ ) =  $\frac{\text{masse du solide } (M_s)}{\text{volume du solide } (V_s)}$  ( $kg/m^3$ )

– Masse volumique du liquide ( $\rho_w$ ) =  $\frac{\text{masse du liquide } (M_w)}{\text{volume du liquide } (V_w)}$  ( $kg/m^3$ )

– Masse volumique du sol sec ( $\rho_d$ ) =  $\frac{\text{masse du solide } (M_s)}{\text{volume total } (V_t)}$  ( $kg/m^3$ )

**Poids volumique** : il exprime le produit de la masse volumique et la gravité, on note  $\gamma = \rho g$ .

**Densité des grains solides** : c'est le rapport de la masse volumique des grains solides par la masse volumique du corps utilisé comme référence, l'eau.

$$G \text{ ou } G_s = \frac{\text{masse volumique des grains solides}}{\text{masse volumique de l'eau}} = \frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

**Teneur en eau massique :**  $w(\%) = (M_w/M_s) * 100$

**Teneur en eau volumique :**  $\theta = V_w / V_t$

### I.3.3. Degré de saturation

Le degré de saturation  $S_r$  indique la quantité d'eau que contient le sol. C'est le rapport du volume occupé par l'eau au volume total des vides. Lorsque le terrain est sec  $S_r = 0$  ; lorsque le terrain est saturé  $S_r = 1$ .

$$\text{Degré de saturation} = \frac{\text{Volume de l'eau}}{\text{Volume des vides}}$$

$$S_r(\%) = (V_w/V_v) \quad (S_r = 100\% \text{ si } V_a = 0 \text{ avec } V_a \text{ est le volume d'air})$$

Ou d'autre définition équivalente  $S_r(\%) = \theta / \theta_{max}$

### I.3.4. 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.

L'écoulement de l'eau souterraine est déterminé par trois groupes de paramètres hydrodynamiques ; coefficient de perméabilité et transmissivité ; gradient et charge hydraulique ; débit d'une nappe et vitesse d'écoulement des eaux souterraines. La base fondamentale de calcul du débit d'une nappe, par l'hydrodynamique souterraine, et la loi expérimentale de Darcy (H. Darcy 1856).

#### I.3.4.1. Enoncé de la loi de Darcy

Avec le dispositif expérimental, Darcy a montré que le débit d'eau,  $Q$  en  $m^3/s$ , filtrant de haut en bas dans la colonne de sable de hauteur,  $l$  en m, 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 m/s 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 :

$$Q [m^3/s] = K [m/s] \cdot h/l$$

Le terme  $K$ , défini par Darcy comme étant un coefficient dépendant de la perméabilité de la couche est appelé coefficient de perméabilité.

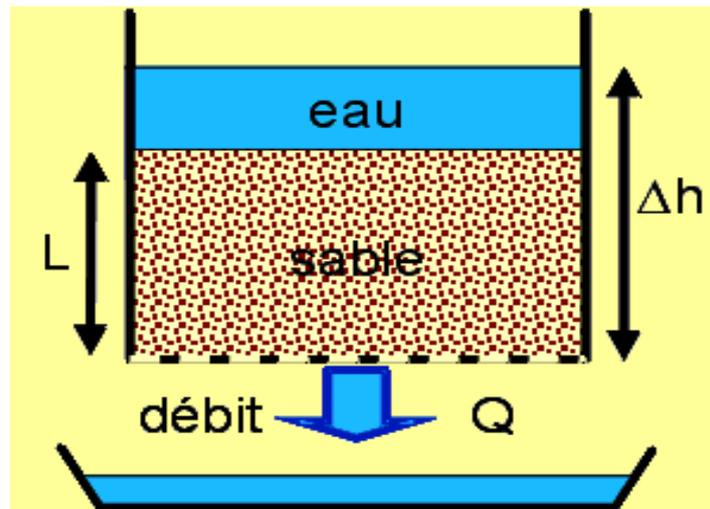


Figure I.7 : Dispositif expérimental de Darcy.

Le quotient de la charge,  $\Delta h$ , par la longueur de la colonne de sable,  $l$ , ou perte de charge par unité de longueur,  $\Delta h/l$ , est défini comme le gradient hydraulique, noté  $i$ , sans dimension.

D'où avec  $\Delta h/l = i$  l'expression devient  $Q = K.A.i$ .

#### I.3.4.2. Calcul du gradient hydraulique :

Dans la pratique, le gradient hydraulique est calculé sur le terrain à l'aide des niveaux piézométriques mesurés dans deux 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  $l$ .

$$i = (h_1 - h_2) / l$$

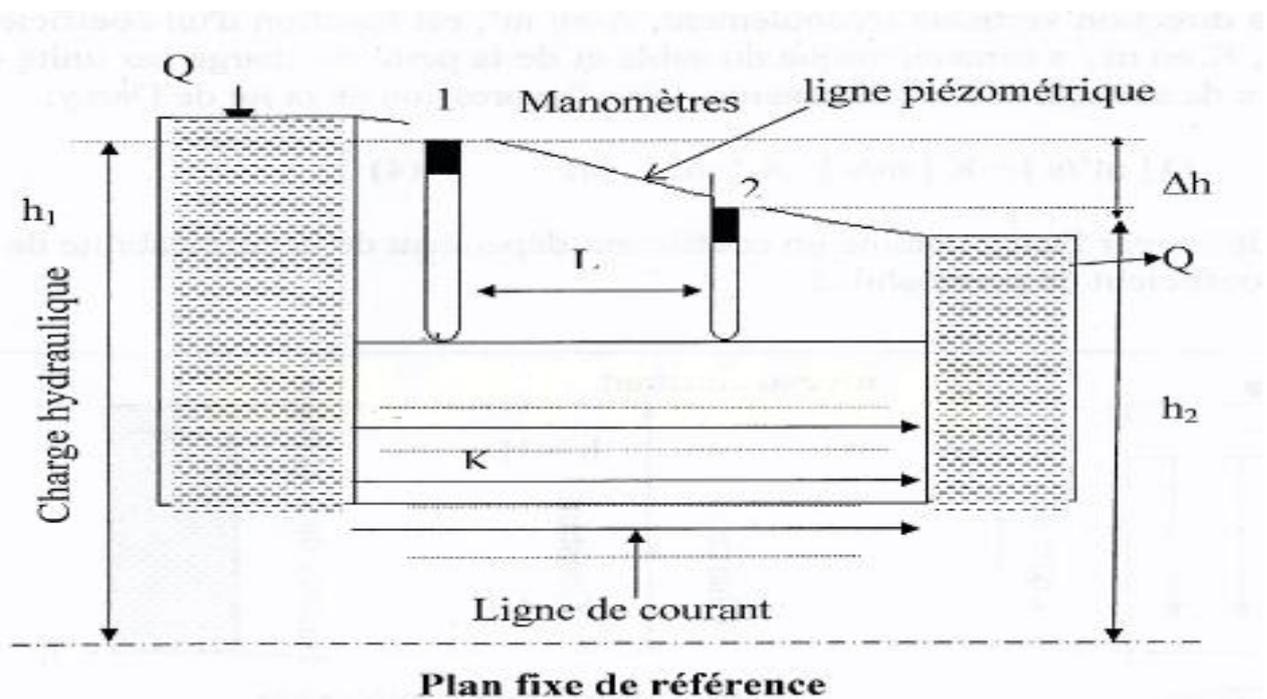


Figure I.8 : Dispositif de laboratoire avec écoulement latéral.

### I.3.4.3. 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 de l'eau, en équilibre naturel, dans l'ouvrage, il est calculé par la différence entre la cote du sol (repère sur l'ouvrage),  $Z$  et la profondeur de l'eau,  $hp$ .

$$H = Z - hp$$

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

Dans le cas de sondage artésien,  $H = Z +$  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.

### I.3.4.4. Coefficient de perméabilité

Les valeurs de ce coefficient sont très faibles ; de quelque mm/s pour les réservoirs perméables à 10.000 fois plus faibles pour les formations imperméables. Ces valeurs s'échelonnent, dans une gamme de  $10^1$  à  $1.10^{-11}$  m/s.

### I.3.5. Transmissivité

La productivité d'un captage dans un aquifère est 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 régit le débit d'eau qui s'écoule, par unité de longueur,  $L$ , d'un aquifère, sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique,  $i$ . 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  $m^2/s$ .

$$T [m^2/s] = K [m/s]. b [m]$$

L'expression de la loi de darcy (écoulement latéral),  $Q = K.A.i$  avec  $A = L.b$ , devient :

$$Q [m^3/s] = T [m^2/s]. L [m] . i$$

$$i = (h_1 - h_2) / l$$

$h_1, h_2$  : niveaux piézométriques de deux forages,

$L$  : distance entre les deux forages.

### I.3.6. Diffusivité

La diffusivité, noté  $T/S$ , régit la propagation d'influence dans l'aquifère. Elle est égale au quotient de la transmissivité,  $T$ , par le coefficient d'emmagasinement,  $S$ . Elle s'exprime en  $m^2/s$ .

$$\text{Diffusivité} = T [m^2/s] / S$$

### I.3.7. Coefficient d'emmagasinement

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

Le coefficient d'emmagasinement des zones captives d'une nappe dépend de l'élasticité des roches et de l'eau, et sa grandeur est de l'ordre de  $10^{-4}$  à  $10^{-6}$ .

Le coefficient d'emmagasinement des nappes libres équivaut en pratique à la porosité efficace de la roche, car dans une nappe libre les effets de l'élasticité de la roche et de l'eau sont généralement négligeables.

Il faut faire attention au fait que les pores trop petits ne jouent aucun rôle dans la porosité efficace, car dans ce cas les forces de rétention sont supérieures au poids de l'eau. Pour les sables, cette porosité efficace est de l'ordre de 0,1 à 0,2.

### I.3.8. Résistance hydraulique verticale

La résistance hydraulique verticale, encore appelée *paramètre inverse de drainance* ou *résistance à l'écoulement verticale*, est la propriété des aquifères à nappe semi-captive. C'est le rapport entre l'épaisseur saturée  $D'$  de la couche semi-captive et sa perméabilité verticale  $k'$ , soit  $D'/k'$ . Elle caractérise la résistance de la couche semi-perméable à la drainance vers le haut ou vers le bas. On la désigne par le symbole  $c$ , qui a pour dimension le temps. Si  $c = \infty$  on est dans une nappe captive.

### I.3.9. Facteur de drainance

On appelle drainance les phénomènes d'échange d'eau entre la nappe principale et la couche semi-perméable. Le facteur de drainance est noté  $= \sqrt{kDc}$ , il détermine la répartition de ces échanges dans la nappe semi-captive. En d'autres termes, il permet de connaître la provenance de l'eau tirée d'un puits captant l'aquifère. Le facteur  $L$  a la dimension d'une longueur.

### I.3.10. Facteur d'égouttement

Le facteur d'égouttement,  $B = \sqrt{kD/aS_Y}$ , utilisé dans les nappes libres avec débit retardé, peut se comparer au facteur de drainance des nappes semi-captives, quoiqu'il soit défini d'une façon différente. Ainsi une grande valeur de B témoigne d'un drainage rapide. Ce paramètre a la dimension d'une longueur. Pour  $B = \infty$ , le débit est immédiatement libéré dès l'abaissement de la surface libre; on a alors affaire à une nappe libre sans débit retardé.

Le coefficient  $I/a$  est appelé *indice de retard de Boulton*; c'est une constante empirique. S est le coefficient d'emménagement après un temps de pompage assez long, encore appelé *coefficient d'emménagement retardé*.

### I.3.11. Viscosité et viscosité cinématique de l'eau

La viscosité est une propriété matérielle qui intervient dans les relations entre les contraintes internes d'un fluide en mouvement et les paramètres cinématiques qui décrivent ce mouvement. Selon le modèle de comportement du matériau, ou selon son équation constitutive qui peut relier les contraintes, les déformations, les vitesses de déformation, la température, la masse volumique du fluide, et éventuellement d'autres paramètres.

### I.3.12. Compressibilité de l'eau

Pour diminuer de 1% un volume d'eau liquide à la température ambiante, il faut une pression de 25 Mpa (Scheller, 1962). On considère l'eau comme un fluide incompressible dans la plupart des problèmes hydrogéologiques.

## I.4. Charge hydraulique et piézométrique

### I.4.1. Définition

En tout point où existe une goutte d'eau, on peut définir la charge hydraulique  $h$  de cette goutte par :

$$h = z + u/\gamma_w + v^2/2g$$

Où  $z$  est l'élévation,  $u$  est la pression de l'eau (dite interstitielle dans un milieu poreux),  $\gamma_w$  est le poids volumique de l'eau (environ  $9,8 \text{ kN/m}^3$ ),  $v$  est la vitesse du fluide par rapport au solide qui la contient, et  $g$  est la gravitation terrestre (environ  $9,8 \text{ ms}^{-2}$ ).

La définition de la charge hydraulique requiert trois références ou repères : un repère d'élévation (ce repère doit être unique pour le problème étudié), un repère de pression (on choisit la pression atmosphérique, c'est à dire  $p_{\text{atm}} = 0$ ), et un repère de vitesse (repère attaché à la matière solide dans laquelle l'eau circule).

Si l'on multiplie les deux membres de l'équation de définition de la charge par  $mg$ , on voit apparaître dans le membre de droite :

$$mgh = mgz + mg u/\gamma_w + mgv^2/2g$$

Le terme  $mgz$  qui représente l'énergie potentielle de gravitation ;

Le terme  $mg u/\gamma_w$  qui représente l'énergie potentielle de pression ;

Le terme  $mv^2/2$  qui représente l'énergie cinétique.

La charge hydraulique représente donc une énergie disponible par unité de masse d'eau dans le champ de gravitation terrestre. Energie qui provient de l'élévation, de la pression et de la vitesse de l'eau.

#### I.4.2. Principe de l'écoulement

L'écoulement se produit de la zone de forte charge hydraulique vers la zone de faible charge hydraulique (transfert d'énergie). Il n'y a pas d'écoulement souterrain dans une zone où la charge hydraulique est constante. Une telle zone (volume, surface, courbe) est appelée équipotentielle. Ainsi, dans un volume d'eau immobile, soit A un point de la surface libre : la pression  $u_A$  est égale à la pression atmosphérique, qui est nulle par définition. La charge en A,  $h_A$ , est donc égale à l'élévation  $Z_A$ , et toutes les gouttes du volume d'eau immobile ont une charge égale à  $h_A = Z_A$ .

Par exemple :

$$h_B = z_B + u_B/\gamma_w = h_A = z_A + u_A/\gamma_w = z_A$$

D'où :

$$u_B = \gamma_w (z_A - z_B)$$

Il en résulte deux règles simples :

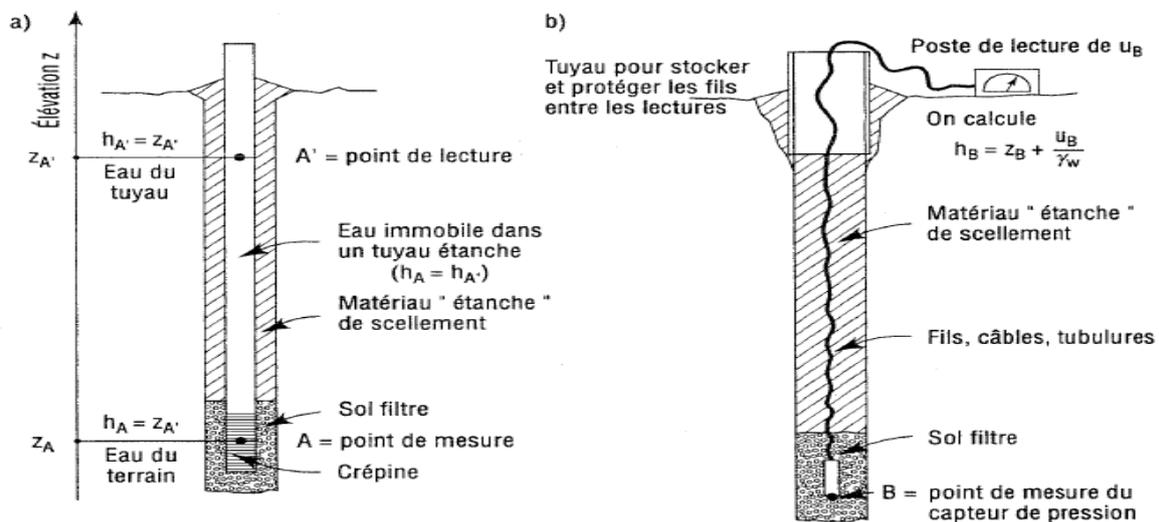
- Dans un volume d'eau immobile, toutes les gouttes d'eau ont la même charge hydraulique qui est égale à l'élévation de la surface libre.
- Dans un volume d'eau immobile, la pression en tout point est égale au produit du poids volumique de l'eau par la différence d'élévation entre la surface libre et le point considéré.

Ces deux règles ne s'appliquent qu'aux eaux immobiles. Ainsi, si l'on observe que l'eau d'un lac atteint une certaine élévation, on peut utiliser cette élévation pour calculer la charge et la pression de l'eau dans le lac. Mais on ne peut pas l'utiliser pour calculer les charges et les pressions dans les alluvions sous le fond de lac parce que l'eau circule dans les alluvions soit pour alimenter le lac, soit pour le décharger.

### I.4.3. Mesure de la charge hydraulique ou de la pression interstitielle

Les appareils qui mesurent la charge hydraulique ou la pression de l'eau interstitielle sont appelés piézomètres, et parfois manomètres dans les essais de laboratoire. On décrit ici les deux appareils les plus fréquents, le piézomètre hydraulique (parfois appelé puits de surveillance), et le piézomètre à capteur de pression, installé dans des trous de forage.

Le piézomètre hydraulique comprend une crépine prolongée d'un tuyau étanche, il est donc en contact avec l'écoulement souterrain au niveau de la crépine. Quand l'eau est immobile à l'intérieur du tuyau (eau isolée de l'eau de terrain pour créer un volume équipotentiel), l'élévation de la surface libre de l'eau dans le tuyau (point de lecture) est égale à la charge dans le terrain naturel au centre de la zone filtre qui est le point de mesure.



**Figure 1.9:** les deux types les plus fréquents des piézomètres: a) piézomètre hydraulique; b) piézomètre à capteur de pression.

## I.5. Equation de l'écoulement

Il y a deux sortes d'équations de l'écoulement : celles du *régime permanent* et celles du *régime transitoire*.

### I.5.1. Régime permanent

Le régime est permanent quand il y a équilibre entre le débit sortant du puits et le débit entrant par ailleurs dans la nappe. Un exemple est celui d'une nappe libre dont la surface libre est stable et dont le toit est une couche semi-perméable recouvrant elle-même une nappe semi-captive où l'on pompe. En fait, on dira que le régime permanent est atteint si, dans les

piézomètres, l'évolution du rabattement dans le temps devient négligeable, ou si le gradient hydraulique devient constant aux abords du puits. (Dans ce dernier cas, la littérature française emploie plutôt le terme de régime "quasi-permanent"; par la suite, on ne fera plus la distinction et l'on appellera l'ensemble "régime permanent").

### **I.5.2. Régime transitoire**

Le régime transitoire, ou de non-équilibre, se produit entre le début du pompage et le moment où l'on atteint le régime permanent. Par conséquent, si l'on pompe à débit constant dans une nappe parfaitement captive, horizontale, infinie et d'épaisseur constante, on observera toujours un régime transitoire. Dans la réalité, on considérera que l'écoulement vers un puits est en régime transitoire tant que, dans les piézomètres, l'évolution des rabattements causés par le pompage seul est mesurable dans le temps, ou bien tant que le gradient hydraulique varie de façon mesurable.

## Chapitre II

### Présentation de la zone d'étude

## II.1. Introduction

La connaissance du climat, de la géomorphologie, de la litho-stratigraphie et de la tectonique d'un bassin versant, s'avère importante pour expliquer l'hydrogéologie, ainsi que l'origine d'écoulement des eaux souterraines et leur ruissellement en surface.

## II.2. Localisation géographique

Le gisement de CHAABET EL-HAMRA est situé à vol d'oiseau, à environ 250 km au Sud-Est d'Alger et à 50 km au Sud de Sétif, dans la région de Chouf-Bouarket à 4.5 km d'Ain-Azel et à 12 km au Sud-Est du complexe minier de Kherzet Youcef, et à moins de 100 km de la Mer Méditerranée. La région d'Ain Azel est constituée dans sa majeure partie d'une plaine, orientée dans le sens NE-SO, qui s'étend sur une surface endoréique d'environ 3 000 hectares. Elle est encadrée par deux limites naturelles et artificielles plus au moins nettes, qui sont respectivement la faille montagneuse connue sous le nom de Kherzet Youcef à l'Ouest et de Sebkhet El-Hamiet au Nord-Est. Ses flancs septentrionaux, orientaux et méridionaux sont limités par des routes à grande circulation et des chemins locaux.

L'ensemble est entouré par les franges septentrionales des Monts Hodna de l'Ouest à l'Est en passant par le Sud : le massif boisé de Hadjar Labiod (1317 m), le massif de Boutaleb (plus de 1400 m d'altitude) et une zone plate dans laquelle se développe une série de collines plus ou moins basses mais parfois abruptes (1074 à 1138 m). Quant à la partie Nord, le paysage, qui apparaît bien ouvert sur les grandes plaines sétifiennes, est marqué par la présence de quelques reliefs dominant Sebkhet El-Hamiet.

La mine de Chaabet El-Hamra a été mise en exploitation en 1994 et produit du concentré de zinc.

*Tableau II.1 : Les coordonnées du site.*

Point	Coordonnées Lambert		Coordonnées cartésiennes	
	X	Y	Longitude	Latitude
1	754 170	279 800	05° 30' 38", Est	35 41' 55", Nord
2	755 700	280 400		

L'altitude du gisement varie de 950 à 1 200 mètres.



Figure II.1 : Situation géographique de la région d'étude.

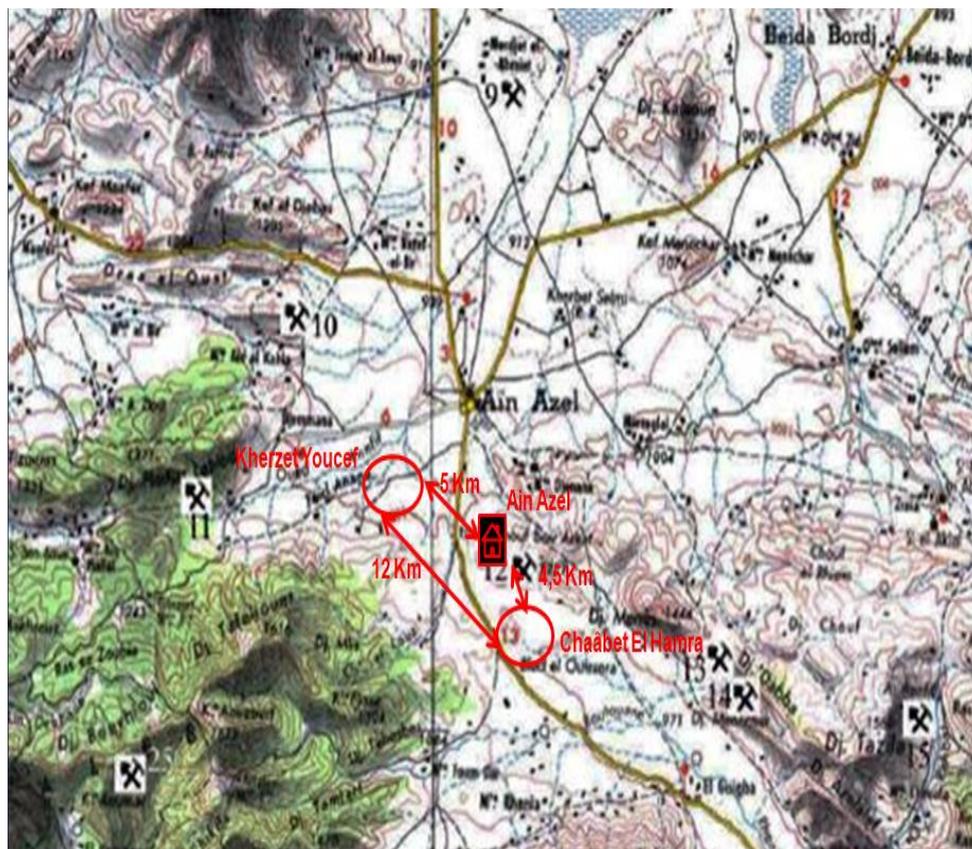
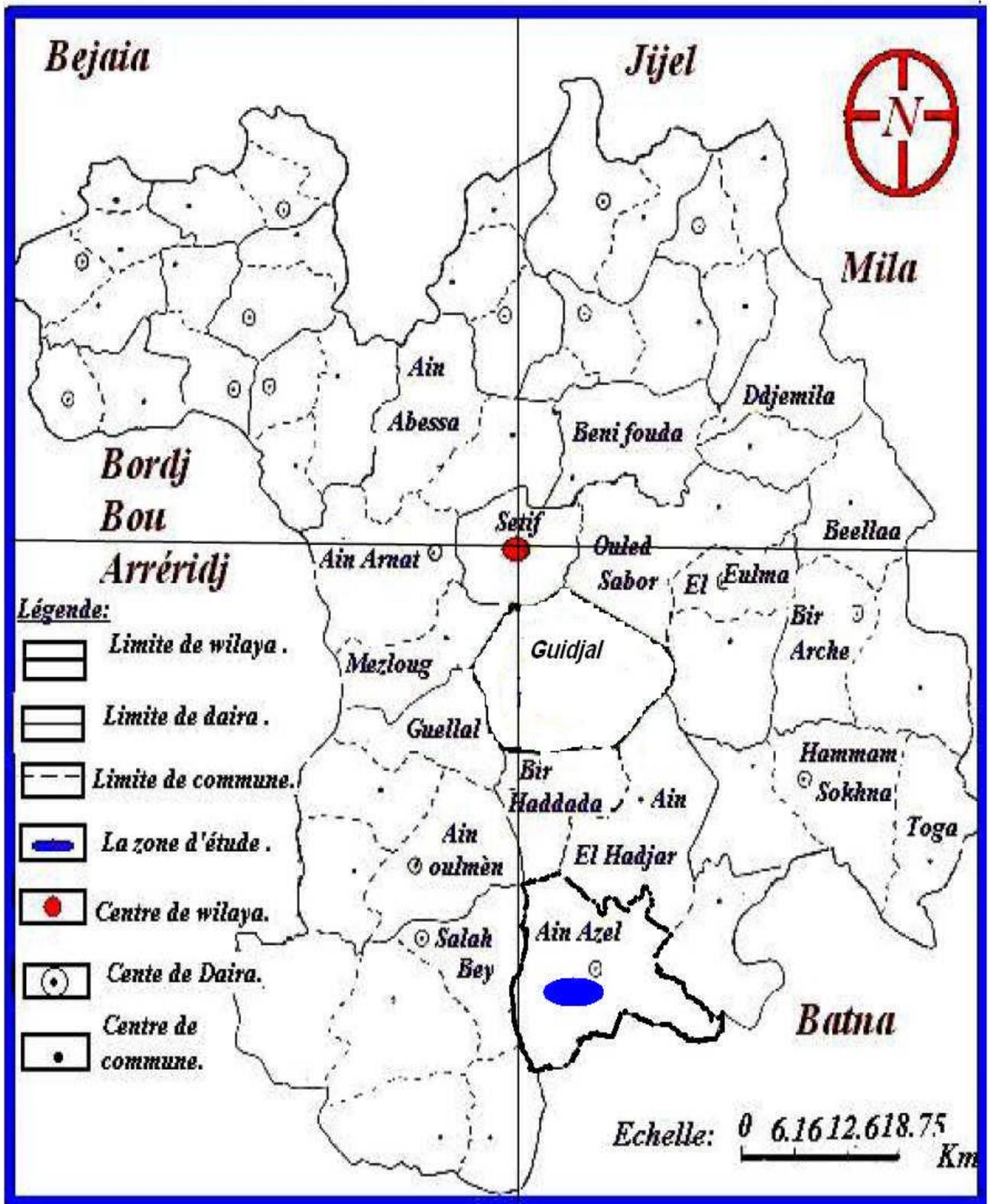


Figure II.2 : Carte topographique et toponymique avec localisation des sites de l'unité KHERZET – YUCEF.



325

Figure. II.3 : Situation géographique de la région d'étude dans la Wilaya de Sétif.

### II.3. Cadre climatique

La région d'Ain Azel fait partie du climat méditerranéen, à étage bioclimatique semi-aride et sous étage froid, avec deux périodes bien distinctes : une période humide s'étalant sur 8 mois et une période sèche qui s'étend sur 4 mois. (ANRH, 2006).

Les vents dominants sont marqués par un sirocco dont la durée moyenne est de 67,8 jours ; ce dernier agit sur les plantes en les desséchant et augmente l'aridité du climat.

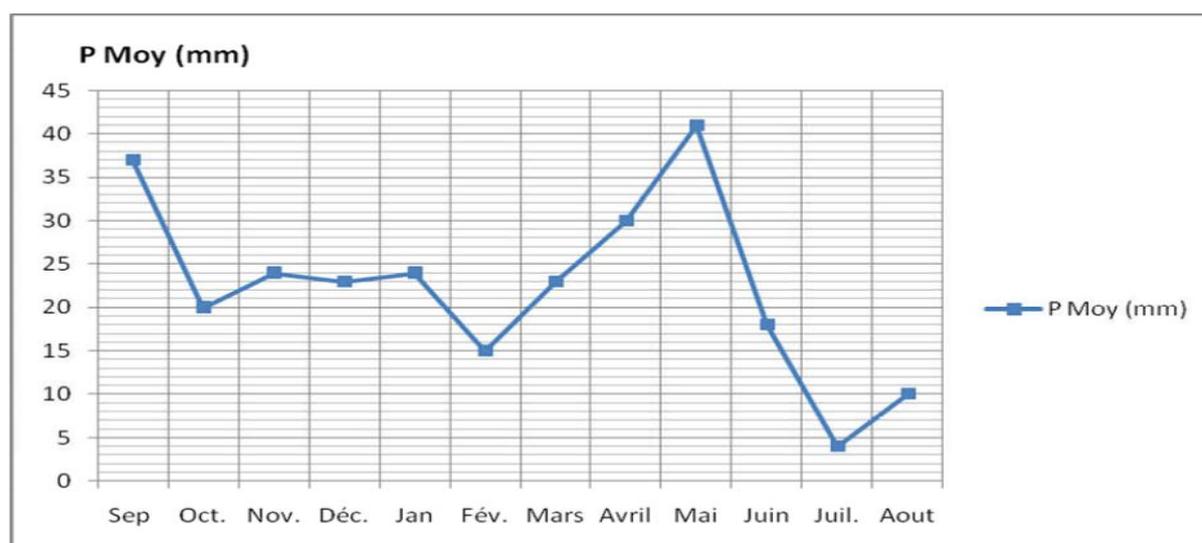
Ajouté à cette situation météorologique générale, le climat local est également caractérisé par une situation géographique spécifique, car il est soumis à l'influence de la chaîne montagneuse Hodnéenne.

La caractérisation climatique de la commune d'Ain Azel a été faite sur la base des données d'un poste climatologique de l'Office Nationale de la Météo (O.N.M), situé dans la commune elle-même, et qui est donc représentative du climat local. La station, localisée par une latitude 35°49 N et une longitude 05°31 E, se trouve à 960 m d'altitude.

C'est un poste climatologique ordinaire (PCO), ne mesurant que deux paramètres : les précipitations et les températures (Max et Min). La banque de données disponible et complète concerne la période de 1988 à 2001.

#### II.3.1. Pluviométrie

Les moyennes mensuelles interannuelles des précipitations enregistrées au niveau de la station d'Ain Azel durant la période 1988-2001 sont reprises par la figure ci-dessous.

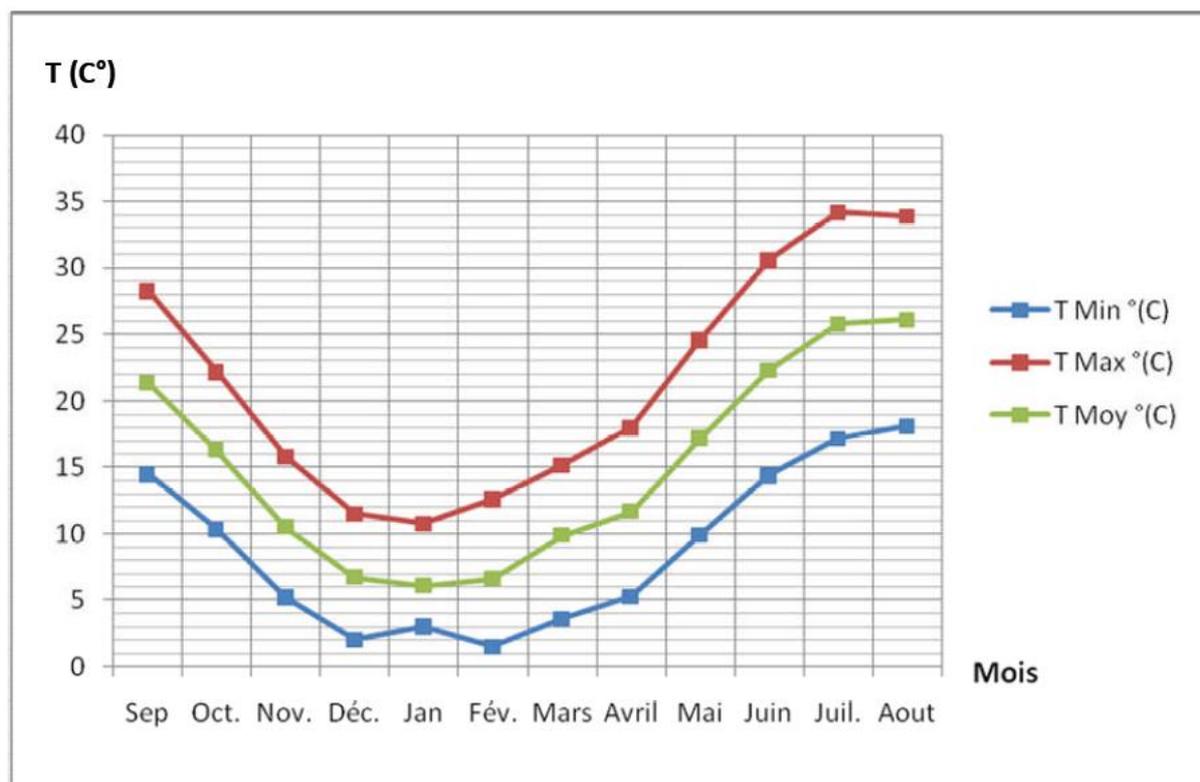


*Figure II.4 : Variation de la pluviométrie moyenne mensuelle interannuelle dans la région d'Ain Azel durant la période 1988-2001.*

Le total moyen interannuel de précipitations enregistré au niveau de la station d'Ain Azel durant la période 1988-2001 est de l'ordre de 269 mm; ce qui montre que la région est caractérisée par une faible pluviométrie par rapport à la ville de sétif qui atteint les 400 mm.

### II.3.2. Température

La température est l'un des éléments les plus importants pour caractériser le type de climat et déterminer son régime d'humidité. La figure suivante reprend la température mensuelle interannuelle enregistrée au niveau de la station d'Ain Azel durant la période 1988-2001.



*Figure II.5 : Températures moyennes mensuelles de la région d'Ain Azel durant la période 1988-2001.*

D'après le graphe, la région d'Ain Azel est caractérisée par un climat frais en périodes automnale et hivernale avec des températures minimales allant de 2 à 5°C, et une période printanière et estivale assez chaude avec une température dépassant 30°C.

On constate également une montée rapide de température entre les deux mois de Mai et Juin (de 17 à 22,3 °C), et une baisse importante enregistrée entre le mois de Septembre et Octobre (de 21,4 à 16,3 °C) ; cette caractéristique annonce une limite nette entre la période chaude et froide.

On constate aussi d'après les deux figures 2 et 3, que la région d'étude est caractérisée par une saison sèche de Juin à Novembre et une saison relativement humide de Décembre à Mai.

### II.3.3. Grêles et gelées

La plus grande partie de la grêle tombe pendant l'hiver et au début du printemps. En effet, une fonte rapide de grêles et gelées provoque un important écoulement d'eau venant s'ajouter à celui de l'eau des précipitations.

Pour les gelées, annuellement, il gèle en moyenne 67 jours de Novembre à Mai avec un maximum de 17 jours durant le mois de Janvier. (O. Djaziri 2012)

### II.3.4. Vents

Le vent transporte des apports diffus aériens chargés en éléments traces métalliques (ETM), qui se déposent de façon régulière et peuvent être absorbés directement par les plantes, mais la majorité pénètre dans les sols à partir de la surface.

Les Hautes Plaines Sétifiennes sont soumises à des vents plus ou moins violents avec des directions différentes selon les saisons. Les vents dominants représentent le Sirocco (vent chaud et sec) qui prédomine en période estivale provenant du Nord -Ouest et du Nord-Est.

La plaine d'Ain Azel se trouve exposée aux effets néfastes de ce phénomène ; ce qui a été observé sur la ceinture végétation du complexe minier. (O. Djaziri 2012).

## II.4. Cadre hydrogéologique

### II.4.1. Hydrogéologie du gisement

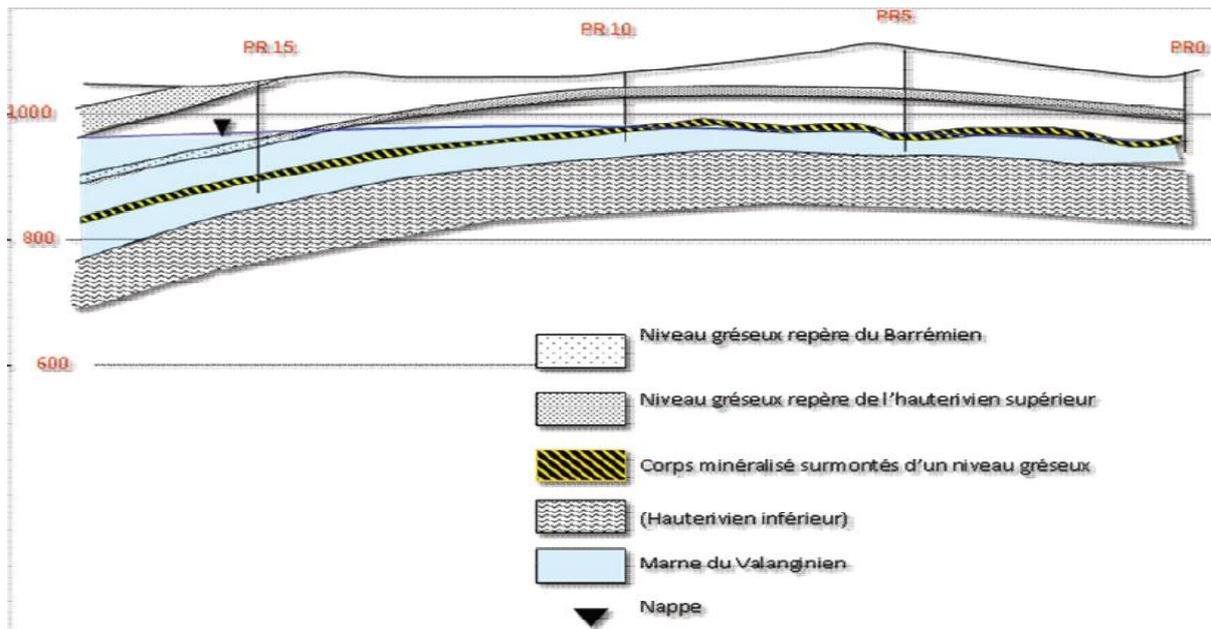
L'hydrogéologie du gisement Chaâbet El-Hamra fait partie de l'hydrogéologie de la région d'Ain Azel.

Les données géologiques et hydrogéologiques ont confirmées la présence de deux nappes au-dessus de la minéralisation, l'une dans les formations Hauteriviennes et l'autre dans les formations Barrémiennes.

- **la nappe du Barrémien** se trouve dans la partie Nord-Ouest du gisement, située dans la couche dolomie-gréseuse. Les caractéristiques de cette nappe ne sont pas encore connues, ce qui impose de faire une étude hydrogéologique avant d'entamer l'exploitation de la partie inférieure du gisement.
- **La nappe Hauterivienne** se localise dans la partie centrale du gisement et est contenue dans les formations carbonatées à perméabilité de fissures.

ETAGE	LOG	Conséquence Hydrogéologique	
Miocène 30 m		Perméable	<b>Non étudié</b>  Inexistant dans la partie centrale du gisement Exploité par les fellahs
Aptien 60 m			
Barrémien 200 m		Semi -Perméable	<b>Etudié sommairement</b>  Situé au dessus du Niveau Statique dans la partie centrale du gisement exploité par les fellahs
		Perméable	
Hautérvien Supérieur 120 m		Perméable	<b>Etudié</b>
		Semi -Perméable	
Hautérvien Inférieur 120		Perméable	
Valanginien		Imperméable	<b>Etudié</b>

Figure II.6 : Niveaux aquifères dans la région de Chaâbet El-Hamra (ENOF, 1993)

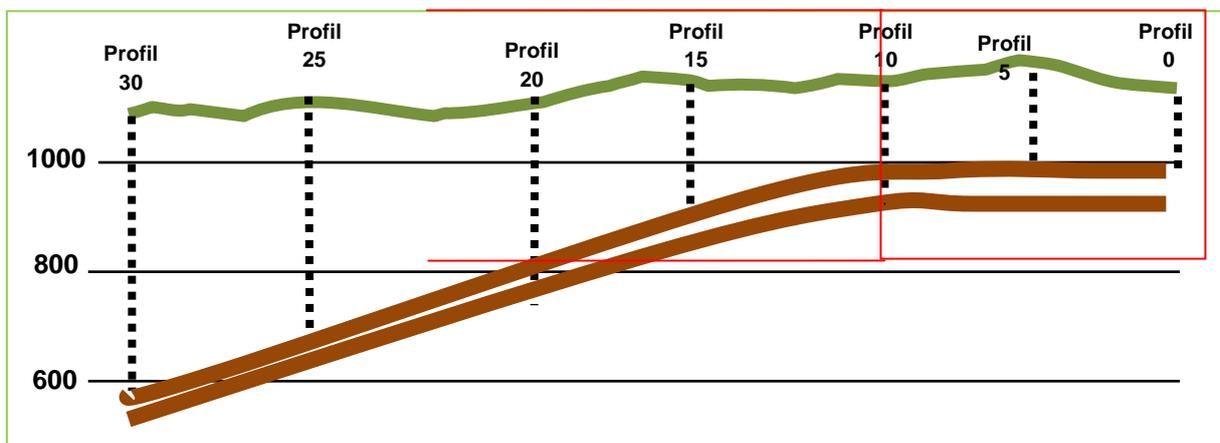


**Figure II.7 :** Coupe hydrogéologique de la mine de Chaâbet El-Hamra (profil 0 à 15)  
(ENOF, 2003).

Le minerai zincifère du gisement de Chaâbet El-Hamra est composé de deux corps, appelés corps n°1 pour le corps supérieur qui se trouve au-dessus du corps de la minéralisation et corps n°2 pour le corps inférieur qui est situé en-dessous de la minéralisation.

Ces deux corps sont allongés en bande sur une longueur de 2 700 m et 100 à 400 m en pendage.

Les deux corps de minerai plongent d'un double pendage de 10° vers le N.O et S.E. qui devient plus important à partir du profil 14. La minéralisation se trouve à 100 m (côte 985) au Pr 0 et à 400 m (côte 594) au Pr30. (Allure du gisement Pr 0 – Pr 30).



**Figure II.8 :** Répartition des profils le long de la minéralisation (ENOF 1993).

Les deux corps sont stratiformes, subparallèles et séparés par un intercalaire constitué d'une dolomie à minéralisation pauvre et parfois stérile de puissance variant entre 05 à 12 m entre le Pr0 et le Pr 10 et 02 à 04 m entre le Pr 10 et le Pr 30. Parfois, ce niveau est absent de telle sorte que les deux corps, 1 et 2, se confondent en un seul corps de minerai continu.

## **II.5. Cadre géologique**

### **II.5.1. Introduction**

Le gisement de Chaâbet El Hamra est localisé dans la partie Sud des hautes plaines sétifiennes. Les monts du Hodna appartiennent à l'avant pays autochtone de la chaîne alpine de l'Algérie orientale. Aire où se sont manifestées plusieurs tectoniques tangentielles. Qui ont donné naissance à des recouvrements importants et où sont impliqués des terrains d'âge miocène.

### **II.5.2. Géologie du gisement :**

Sur le plan structural, la région d'Ain Azel comprend deux ensembles structuraux :

- Au Nord et à l'Est, se trouve la chaîne des Bibans (Hautes Plaines Sétifiennes) ;
- Au Sud et à l'Ouest, s'allongent les monts du Hodna dont l'altitude moyenne est comprise entre 900 et 1000 mètres.

#### **II.5.2.1. La stratigraphie locale de la région :**

La stratigraphie du massif de Hodna se caractérise par des séries sédimentaires définies du Trias au Quaternaire.

Tableau II.2 : Résumé stratigraphique de la région d'Ain Azel.

EPOQUE	PERIODE		ELEMENTS LITHOLOGIQUES
Trias		Infralias	<ul style="list-style-type: none"> <li>- évaporites,</li> <li>- "argiles-marnes" bariolées,</li> <li>- lambeaux</li> <li>- calcaréo-dolomitiques</li> </ul>
<b>Jurassique</b>			
	Jurassique supérieur		- calcaire à intercalations marneuses
	Jurassique inférieur - moyen	Lias	<ul style="list-style-type: none"> <li>- marnes jaunâtres, blanchâtres, verdâtres ou rouge-violacées</li> <li>- dolomie et calcaire dolomitique</li> </ul>
		Dogger	- Calcaire à intercalations marneuses
<b>Crétacé</b>			
	Crétacé supérieur		<ul style="list-style-type: none"> <li>- marnes</li> <li>- calcaires</li> </ul>
	Crétacé inférieur		<ul style="list-style-type: none"> <li>- marnes</li> <li>- grès</li> <li>- argiles</li> <li>- calcaires</li> </ul>
<b>Néogène</b>			
	Pliocène		<ul style="list-style-type: none"> <li>- conglomérats</li> <li>- grès</li> <li>- argiles</li> <li>- marnes</li> </ul>
	Miocène		<ul style="list-style-type: none"> <li>- conglomérats</li> <li>- grès</li> <li>- argiles</li> <li>- marnes</li> <li>- gypses</li> </ul>
Quaternaire	Glacis des hautes plaines		<ul style="list-style-type: none"> <li>- cailloux</li> <li>- graviers</li> <li>- blocs à remplissage limoneux-argileux</li> </ul>
	Terrasses des basses plaines		- argiles, de limons et de sables

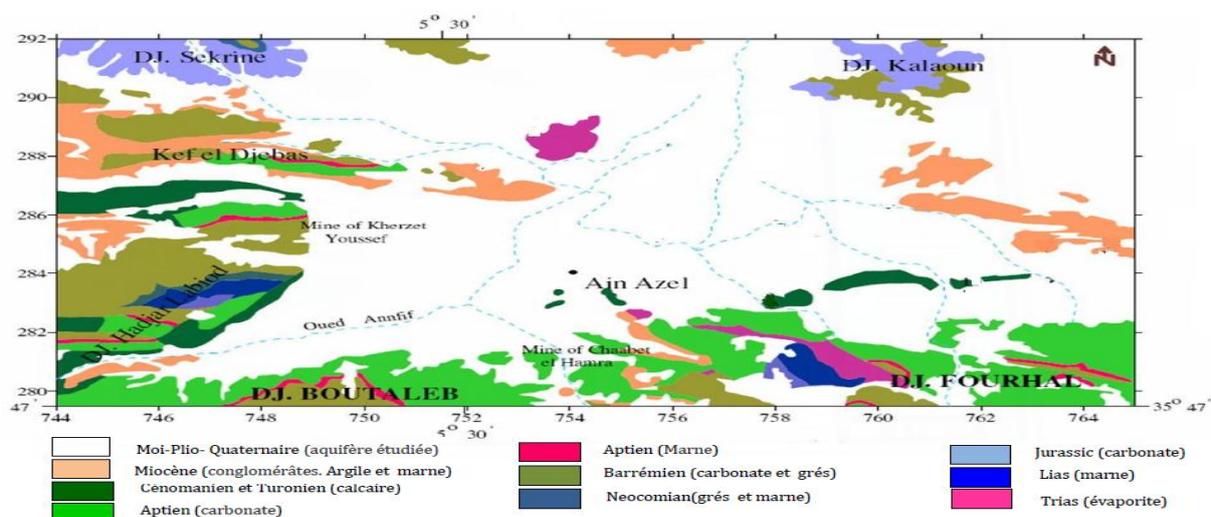


Figure II.9 : carte géologique de la région d'Ain Azel. (ENOF 1993).

## II.5.2.2. Stratigraphie du gisement

Tableau II.3 : Colonne stratigraphique du gisement de Chaâbet El Hamra.

Période	Étage	Lithologie
quaternaire		graviers, sables et argiles non-consolidés
Tertiaire	Néogène	Calcaires bioclastiques Conglomérats grès ferrugineux
	Crétacé	Cénomanién
Albien		calcaires détritiques Marneux, en alternance de bancs minces et épais
Aptien		Dolomies et calcaires Grès calcaireux Calcaires organogènes et grès
Barrémien		Calcaires à intercalations d'argilites Dolomies gréseuses avec marnes
hauterivién		Dolomies Minéralisation zincifère d'intérêt économique
Valangénién		Calcaires noirs avec passes de grès Grès avec marnes et dolomie

La minéralisation zincifère d'intérêt industriel est localisée dans la partie inférieure du Hauterivién, dont la puissance varie de 100 à 150m. Cet étage est subdivisé en deux niveaux :

**a. Hauterivién inférieur** : Ce niveau, d'une puissance totale variant de 70 à 120 m, est à son tour divisé en trois termes :

- 1) Composé de dolomies grises massives, à grains fins, parfois gréseuses, souvent à petites inclusions et nodules, de couleur blanchâtre, et parfois de calcarénites noires dans la partie supérieure de 2 à 5 m du toit ; ce terme est discontinu et son épaisseur est de 1 à 2 m.

- 2) Représenté par une superposition, de bas en haut, de marnes grises-verdâtres (0,5 à 2 m), d'aleurites gris-brun (2 à 5 m), de dolomies grises (2 à 10 m), de dolomies gréseuses (3 à 8 m) et de marnes bariolées (5 à 10 m).
- 3) Egalement caractérisé par des dolomies à grains fins de couleur brunâtre ou fortement hématitisées (l'hématite est sous forme de nids et de filonnets dans la masse dolomitique).

**b. Hauterivien supérieur** : ce niveau, d'une puissance globale variant de 80 à 120 m, est subdivisé en cinq termes :

- 1) Formé de grés, parfois en alternance avec des argiles, de marnes et aleurolites verdâtres, avec toujours à la base de l'alternance un niveau calcaire gris-clair, dont une partie, de 1 à 3m d'épaisseur, est dolomitisée.
- 2) Représenté par des dolomies massives à grains fins plus ou moins hématitisées.
- 3) Représenté par un calcaire gris argileux (parfois renfermant des passées argilo-marneuses ou siliceuses) dont l'épaisseur varie de 10 à 15 m.
- 4) Constitué de dolomies à grains fins, de couleur gris-brun, souvent argileuses, dont la puissance totale varie de 15 à 20 m.
- 5) Caractérisé par une irrégularité de composition et de puissance ; essentiellement représenté par des calcaires gris en alternance grossière avec des marnes et des aleurolites ; dans la partie inférieure de ce terme, les calcaires sont remplacés par des dolomies recristallisées.

LA SERIE MINERALISEE DE CHAABET EL HAMRA					
CORPS	N° COUCHE	LITHOLOGIE	PUISS (m)	DESCRIPTION	
HAUTERIVIEN INFERIEUR	COROS N° 1		0.80	Grès Organogène Marne noire à aspect schisteux	
		6		1.50	Dolomie bréchique faiblement minéralisée Dolomie à monéralisation disséminée de sphalerite
				0.20	Joint marneux
				2.00	Dolomie grise à minéralisation en veinules de moitié stériles sphalerites et nids de baryte par endroits la couche est à
		5		2.00	Dolomie à minéralisation disséminée de sphalerite
			4		
	COROS N° 2			4 - 10	L'intercalaire stérile
		3		0.20	Sphalerite massive à joint argileux
				1.60	Dolomie à minéralisation bréchique de sphalerite
				0.40 - 2.00	Dolomie st stérile
		2		1.60	Dolomie à veines de sphalerite
				0.20	Sphalerite massive
				1.50 - 2.00	Dolomie à concrétion stérile
		1		0.80	Minéralisation bréchique
	0.70		Dolomie stérile Sphalerite massive (par endroit toute la couche est minéralisée)		
	0.50		Dolomie à concrétions		

Figure II.10 : La série géologique minéralisée de Chaabet El-Hamra (ENOF)

### II.5.3. Tectonique de la région

Dans les Monts du Hodna, on distingue deux unités tectoniques séparées par le front Sud Sétifien :

- L'allochtone Sud Sétifien au Nord est constitué d'un vaste empilement d'écaillés limitées par des cisaillements ;
- L'autochtone Hodnéen au Sud, dont fait partie le Djebel Hadjar Labiod, est affecté essentiellement par une tectonique assez complexe liée à l'orogénèse alpine.

### II.5.3.1. Failles

L'analyse du réseau de failles permet de distinguer plusieurs familles d'accidents tectoniques qui affectent les terrains carbonatés du Jurassique et du Crétacé. Ainsi, on distingue :

- Des failles de direction NE-SW et NW-SE très nettes au Djebel Boutaleb et Djebel Hadjar Labiod.
- Des failles de direction EW, de plus grande importance, affectent surtout les formations de Djebel Hadjar Labiod et Djebel Foughal. Elles se sont formées lors du plissement au moment de la formation du grand anticlinal du Hodna. D'après J. Bertraneu (1955).
- Une faille importante de direction N-S (faille de Kherzet Youcef) affecte le Crétacé du Djebel Hadjar Labiod sur son flanc Est.

### II.5.3.2. Plis

Les plis ont généralement une orientation E-W à WSW-ENE. La direction WNW-ESE correspond à des synclinaux à larges rayons de courbure, représentant l'ensemble de hauts reliefs avec des axes de directions :

- NW-SE tels que ceux observés au niveau de Djebel Sekrine, Djebel Kalaoun, Djebel Gouzi et Djebel Foural.
- NE-SW rencontrés au niveau de Djebel Hadjar Labiod et Djebel Boutaleb.

### II.5.3.3. Structures diagraphiques

Les affleurements du Trias se situent généralement dans la zone de convergence de deux directions de fractures (E-W et NW-SE ou NE-SW).

D'après R. Guiraud (1973), la mise en place du Trias est liée principalement à des contraintes compressives.

# Chapitre III

## Les essais de pompage

### III.1. But des essais

Un pompage d'essai a deux buts principaux. Tout d'abord, on peut l'exécuter pour déterminer les caractéristiques hydrodynamiques d'un aquifère. C'est ce qu'on appelle souvent un "essai de nappe", car c'est avant tout la nappe que l'on teste plutôt que la pompe ou le puits. Un essai est convenablement programmé et exécuté avec soin doit fournir des informations capitales pour résoudre bon nombre de problèmes régionaux ou locaux de l'écoulement souterrain.

Mais on peut aussi exécuter un pompage d'essai pour obtenir des renseignements sur les caractéristiques du puits. On peut alors déterminer le débit spécifique du puits égal au rapport du débit sur le rabattement, pour choisir ainsi le type de pompe et estimer le coût du pompage. Le débit spécifique est une façon de mesurer la productivité du puits. Dans ce cas, on baptise l'essai "essai de puits", puisque l'on teste davantage le puits que la nappe.

Le principe d'un essai de nappe est assez simple. On pompe à un certain débit durant un temps donné dans le puits d'essai crépiné à travers l'aquifère. On mesure l'influence de ce pompage sur le niveau piézométrique dans ce puits et dans quelques piézomètres installés au voisinage. On peut alors calculer les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère en appliquant des formules appropriées sur les rabattements mesurés dans les piézomètres, leur distance au puits et le débit de pompage.

La démarche à suivre pour un essai de puits dont on veut connaître le rendement est somme toute plus simple que pour un essai de nappe, car on n'a pas besoin de piézomètre et il suffit de mesurer le débit et le rabattement dans le puits.

Etant donné que le coût élevé d'un pompage d'essai est souvent peu en rapport avec les crédits limités dont on dispose pour une étude régionale, il est souvent impossible d'effectuer tous les essais de nappe souhaitables. Cependant, au cas où l'on aurait besoin de connaître la répartition spatiale des caractéristiques de l'aquifère, on pourrait se contenter des résultats des essais de puits, à condition d'accepter une marge d'erreur parfois importante. Les méthodes analytiques décrites dans le chapitre suivant s'appliquent d'abord aux essais de nappe, mais on prêtera quelque attention à la façon de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères par les essais de puits, bien qu'en toute rigueur ces essais ne permettent que de vérifier la productivité de l'ouvrage.

## **III.2. Exécution d'un pompage d'essai**

### **III.2.1. Procédés de mesures**

Il y a deux sortes de mesures à prendre durant un pompage d'essai :

- Les mesures des niveaux d'eau ;
- Les mesures des débits.

#### **i. Mesure des niveaux d'eau**

Le travail principal, au cours d'un essai de pompage, est la mesure de la profondeur de l'eau dans tous les piézomètres et dans les puits où l'on pompe, ces mesures doivent être effectuées à maintes reprises, et de façon aussi parfaite que possible.

#### **ii. Mesure du débit de pompage**

Une des opérations à effectuer durant l'essai de la nappe est la mesure du débit de pompage. Il est préférable que ce débit soit constant, car on évitera ainsi des calculs compliqués. Le débit de pompage doit être mesuré avec soin et à intervalle réguliers.

### **III.2.2. Durée du pompage d'essai**

Il est difficile de répondre à la question de la durée d'un essai continu, car elle dépend du type de nappe à tester et du degré de précision recherché dans les propriétés hydrodynamiques. Le pompage se poursuit jusqu'à ce que le cône dépression soit stabilisé. Au début de l'essai, le cône évolue rapidement, car l'eau pompée provient de l'emménagement de l'aquifère entourant les abords du puits, mais au fur et à mesure que le pompage continue, le cône s'étend et s'abaisse avec des vitesses de plus en plus faibles, lors de la descente du niveau d'eau l'écoulement étant en régime transitoire et lorsque le niveau se stabilise donc le régime permanent est atteint. En réalité, le cône continue à évoluer jusqu'à ce que la réalimentation de la nappe soit égale au débit pompé.

Dans certains puits, les conditions d'équilibre ou du régime permanent apparaissent quelques heures seulement après le début de pompage. Dans d'autres, elles se manifestent au bout de quelques jours voir quelques semaines. Mais dans certains cas, le régime permanent ne s'établit jamais, même si l'on pompe durant plusieurs années. [Pompage d'essai].

### **III.2.3. Interprétation des données**

Après le pompage d'essai, on est en possession de toutes les informations telles que le débit du puits, le rabattement dans tous les piézomètres et dans les puits, l'allure générale du niveau piézométrique etc.... on doit alors passer à l'analyse des résultats. Cette analyse comprend :

- La mise en graphique des données ;

- La correction des rabattements dans le cas des mouvements régionaux de la nappe qui ne sont pas dus au pompage, ou des variations atmosphériques s'il y a lieu ;
- La détermination de la catégorie de l'aquifère où s'est déroulé l'essai.

### **III.3. Méthodes d'interprétation des essais de pompage**

L'interprétation des essais de puits est un outil indispensable pour connaître l'état du puits et du réservoir dans un rayon plus ou moins étendu avec les différents paramètres qui agissent sur la production tel que : la perméabilité, le skin, la pression moyenne de la couche, le KH etc..... La connaissance de ces paramètres permet de faire les prévisions de la production et de déduire la meilleure manière de développer le gisement.

Voici la liste des hypothèses de base valables pour toutes les méthodes d'interprétation :

- L'aquifère a une extension latérale apparemment illimitée.
- L'aquifère est homogène, isotrope et d'épaisseur uniforme dans la zone influencée par le pompage d'essai.
- Avant le pompage, la surface piézométrique est (presque) horizontale dans la zone influencée par le pompage.
- On pompe à un débit constant.
- Le puits d'essai pénètre entièrement l'aquifère et l'eau arrive en écoulement horizontal sur l'épaisseur de la nappe.

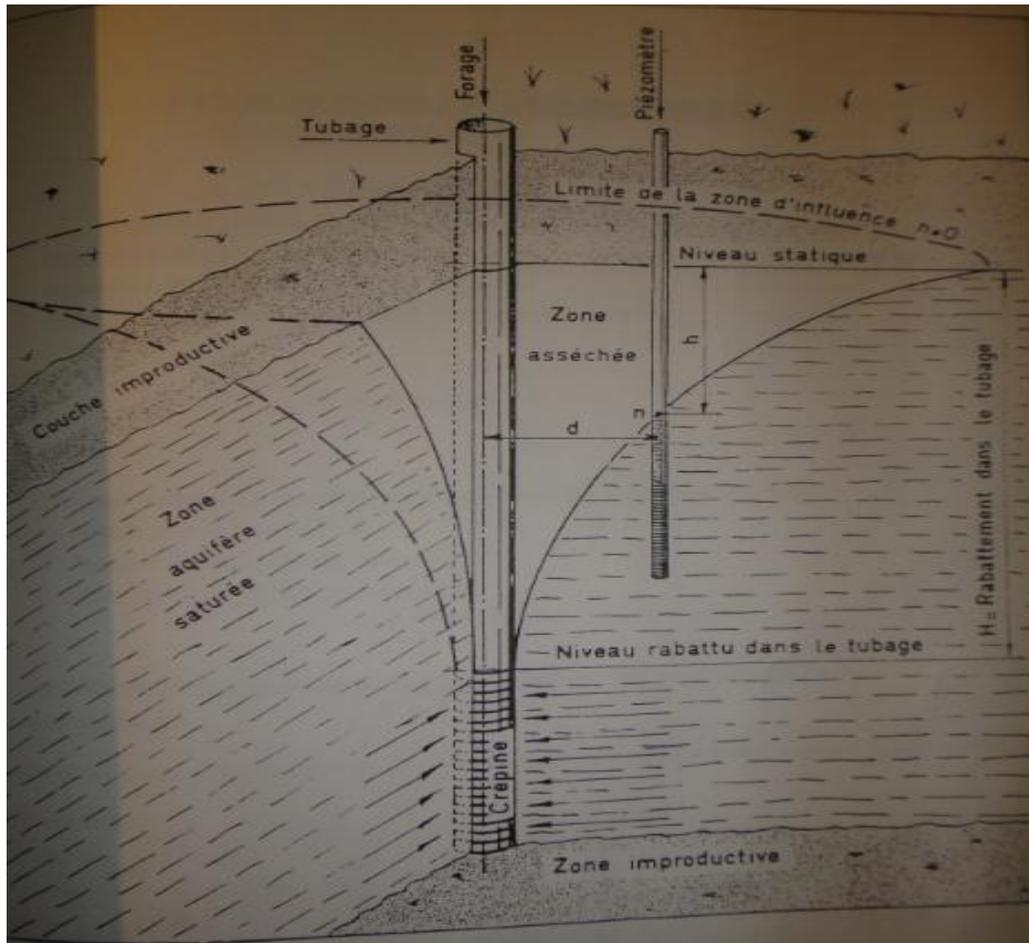


Figure III.1 : Coupe schématique d'un essai de pompage dans un aquifère.

### III.3.1. Régime permanent en nappe captive

Pour l'interprétation des essais de pompage en régime permanent dans une nappe captive, on utilise la méthode suivante :

#### III.3.1.1. Méthode de Thiem :

On doit satisfaire aux hypothèses et aux conditions suivantes :

- Les hypothèses énumérées précédemment ;
- La nappe est captive ;
- L'écoulement vers les puits est en régime permanent.

THIEM (1906) fut l'un des premiers à utiliser plusieurs piézomètres pour mesurer le coefficient de perméabilité d'un aquifère. Il démontra que, dans un aquifère satisfaisant aux conditions précédentes, le débit du puits peut s'exprimer par la formule :

$$Q = \frac{2 \pi K H (h_2 - h_1)}{\ln(r_2/r_1)} \quad (1)$$

Dans laquelle :

$Q$  : est le débit de pompage, en  $\text{m}^3/\text{heure}$  ;

$K$  : est le coefficient de perméabilité, en  $\text{m}/\text{heure}$  ;

$E$  : est l'épaisseur de la nappe, en  $\text{m}$  ;

$K \cdot H$  : est la transmissivité de l'aquifère, en  $\text{m}^2/\text{heure}$  ;

$r_1$  et  $r_2$  : sont les distances, en mètre, entre le puits d'essai et les piézomètres,

$h_1$  et  $h_2$  : sont les hauteurs respectives de l'eau, en mètre, dans les piézomètres.

Cette équation, connue sous le nom d'équation d'équilibre ou de *Thiem*, permet de déterminer la transmissivité d'un aquifère à nappe captive à partir d'un puits de pompage, si les valeurs de  $h$  sont mesurées dans au moins deux piézomètres.

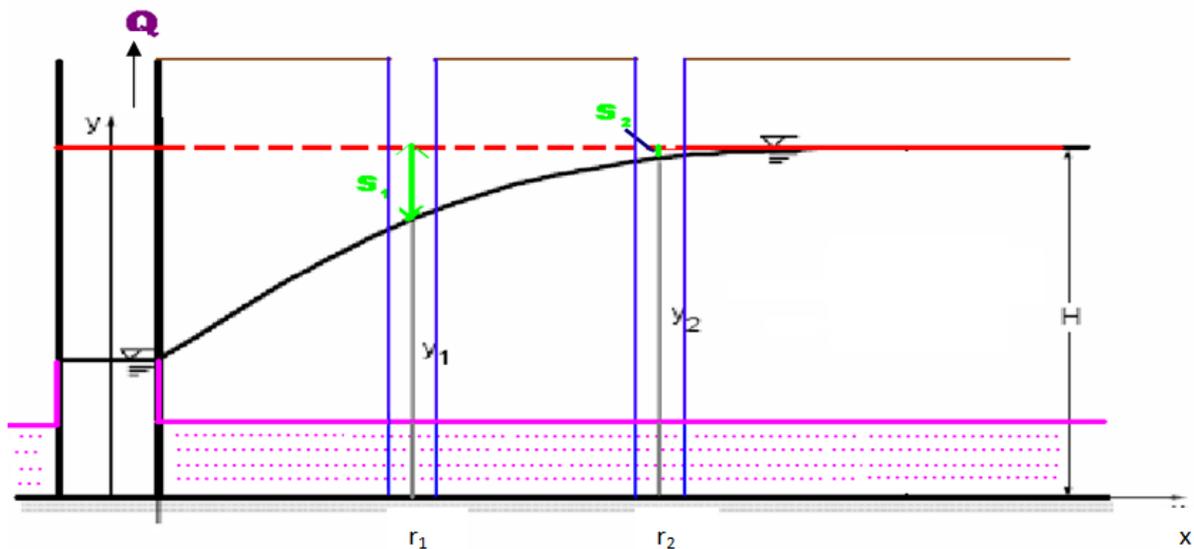
On a :

$$h = H - s$$

Alors l'équation (1) devient :

$$Q = \frac{2 \pi K H (s_1 - s_2)}{\ln(r_2/r_1)} \quad (2)$$

Dans laquelle :  $s_1$  et  $s_2$  (en mètre) sont les rabattements stabilisés dans chaque piézomètre.



**Figure III.2 :** Coupe schématique d'un pompage en aquifère à nappe captive.

La formule du débit exprimée en logarithme décimal est écrite sous la forme :

$$Q = \frac{2.73 K H (s_1 - s_2)}{\log_{10}(r_2/r_1)}$$

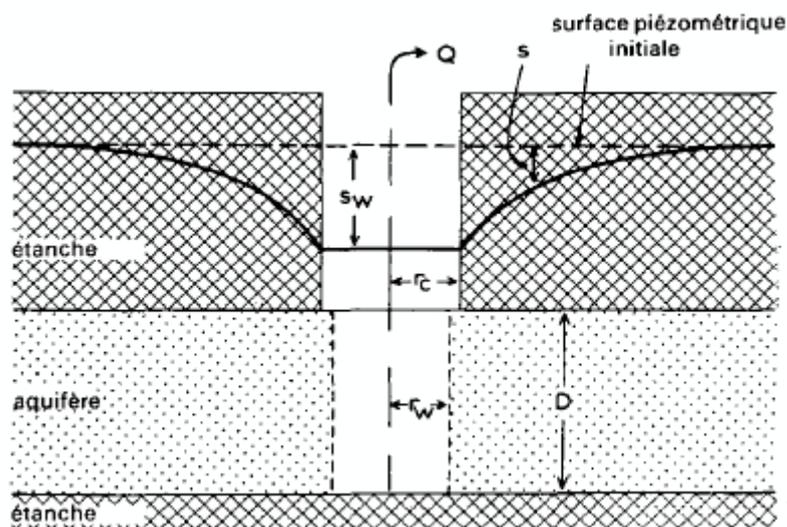
Dans le cas où l'on dispose d'un seul piézomètre situé à une distance  $r_1$  du puits, on a :

$$Q = \frac{2 \pi K H (s_w - s_1)}{\ln(r_1/r_w)} \quad (3)$$

Dans laquelle ;  $s_w$  est le rabattement stabilisé dans le puits d'essai dont le rayon vaut  $r_w$ , en mètres.

L'équation (3) est d'un usage restreint car les conditions hydrauliques locales à proximité immédiate du puits influencent fortement la valeur de  $s_w$ . Par exemple, les pertes de charge dues au passage de l'eau à travers la crépine du puits et l'écoulement vers la prise de la pompe faussent la valeur de  $s_w$ .

Par conséquent, on ne doit utiliser l'équation (3) qu'avec de grandes précautions, et seulement quand les autres méthodes ne peuvent pas s'appliquer. Mieux vaut utiliser plusieurs piézomètres implantés à des différentes distances du puits d'essai, de façon que les rabattements soient appréciables et puissent être facilement mesurés.



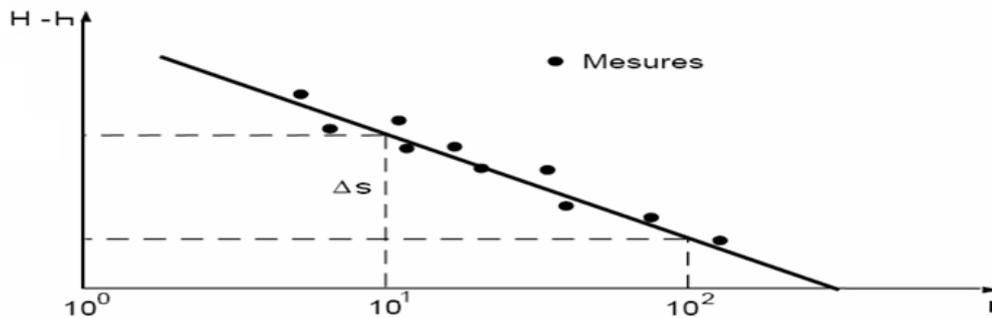
**Figure III.3 :** Coupe schématique d'un pompage en nappe captive dans un large puits.

#### **1<sup>er</sup> mode opératoire :**

- Porter sur une feuille de papier semi-logarithmique les rabattements observés dans chaque piézomètre en fonction du temps correspondant : les rabattements sont portés sur l'échelle verticale linéaire et le temps sur l'échelle horizontale logarithmique.
- Construire la courbe de descente pour chaque piézomètre, qui est la courbe qui s'ajuste le mieux à l'ensemble des points.
- Remplacer le rabattement  $s$  dans l'équation (2) par les valeurs numériques du rabattement pour deux piézomètres, ainsi que les valeurs correspondantes de  $r$  et la valeur connue de  $Q$ . On peut alors résoudre l'équation par rapport à la transmissivité  $T = K \cdot H$ .
- Recommencer cette opération pour tous les couples possibles de piézomètres.

#### **Exemple :**

En portant sur papier semi-logarithmique des mesures piézométriques ( $s = H-h$ ) prises à des positions  $r$  du centre du puits, on obtient le graphique suivant :



**Figure III.4 :** Exemple d'une représentation des mesures piézométriques en fonction des distances dans un papier semi-log.

Théoriquement, les résultats doivent être en bon accord entre eux. Cependant dans la pratique, les calculs donnent des valeurs plus ou moins égales de la transmissivité, dont la moyenne donne le résultat final.

On utilise la formule de Thiem ; dont la transmissivité  $T=K \cdot H$

$$Q = \frac{2.73 T (H - h)}{\log_{10}(R/r)}$$

Dans un cycle logarithmique 10 – 100,  $\log_{10}(R/r)=1$  et la différence de hauteur piézométrique  $\Delta s$  est mesurée à partir des valeurs correspondantes respectivement à  $r=10$  et  $r=100$ , donc la transmissivité s'écrit :

$$T = \frac{Q}{2.73 * \Delta s}$$

Et le rayon d'influence  $R$  est lu sur le graphique à l'endroit où la droite logarithmique intercepte l'abscisse.

### **2<sup>ème</sup> mode opératoire**

- Porter sur un papier semi-logarithmique les rabattements maximaux du régime permanent ( $s$ ) de chaque piézomètre en fonction de leur distance ( $r$ ) au puits de pompage ;
- Tracer la droite qui s'ajuste le mieux à l'ensemble des points ; on l'appelle *droite rabattement-distance* ;
- Mesure la pente ( $\Delta s$ ) de cette droite, c'est-à-dire la différence de rabattement maximal correspondant à un cycle log de  $r$ , soit  $r_2/r_1 = 10$  ou  $\log(r_2 / r_1) = 1$ . L'équation (2) se réduit alors à :

$$Q = 2.73 T \Delta s \quad (4)$$

- Reporter les valeurs numériques de Q et de  $\Delta s$  dans l'équation (4) et résoudre par rapport à T.

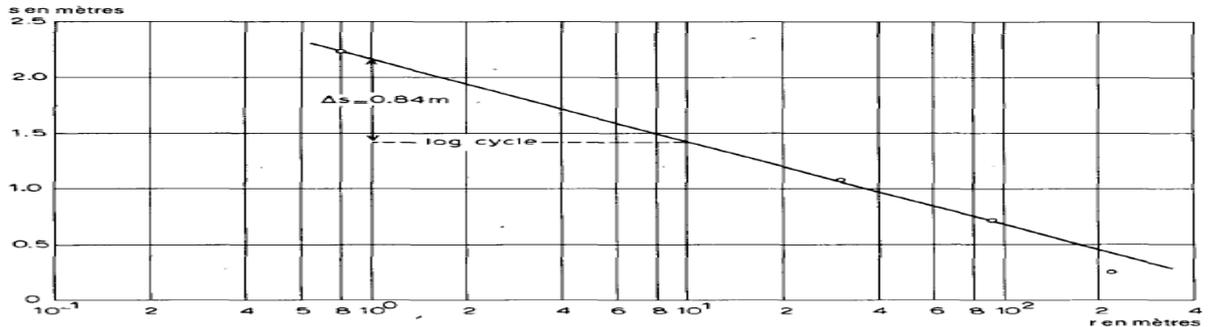


Figure III.5 : Exemple d'interprétation des essais de pompage suivant le 2<sup>ème</sup> mode opératoire de la méthode de Thiem.

### Remarque

On doit faire attention au fait que le régime permanent a été défini ici en supposant que les variations de rabattement en fonction du temps sont négligeables, ou que le gradient hydraulique est devenu constant.

### III.3.2. Régime transitoire en nappe captive

Un grand progrès a été fait par **THEIS** (1935) qui fut le premier à développer les formules du régime transitoire, comprenant le temps et le coefficient d'emmagasinement.

Theis découvrit que lorsqu'on pompe à débit constant dans un puits parfait captant un aquifère d'extension latérale illimitée, l'influence du prélèvement de l'eau se propage vers l'extérieur avec le temps. Si en chaque point de la zone d'influence on multiplie l'abaissement de la charge hydraulique par le coefficient d'emmagasinement, et si l'on fait ensuite la somme de toutes les valeurs obtenues, le chiffre trouvé est égal au volume prélevé. Comme l'eau doit provenir d'une réduction de l'emmagasinement de la nappe, le niveau piézométrique continue à baisser aussi longtemps que l'aquifère reste infini. Donc, il n'existe théoriquement aucun régime permanent. Cependant, la vitesse de l'abaissement diminue constamment au fur et à mesure que la zone d'influence s'étend, et le cas échéant elle devient si faible qu'elle est négligeable, ce que l'on considère en fait comme le régime permanent.

L'équation de Theis en régime transitoire, peut s'écrire par la formule :

$$s(r, t) = h_0 - h(r, t) = C \int_0^t \frac{e^{-\frac{r^2 S}{4T\tau}}}{\tau} d\tau \quad \text{non intégrable}$$

Les conditions aux limites sont repoussées à l'infini et la condition initiale est :

$$\forall r \quad h(r, 0) = h_0 \quad s(r, 0) = 0$$

$$\forall t \geq 0 \quad h(\infty, t) \rightarrow h_0 \quad s(\infty, t) = 0$$

Calculant avec cette solution le débit traversant un cylindre de rayon  $r$

$$Q(r, t) = -2 \pi r T \frac{\partial}{\partial r} \left[ C \int_0^t \frac{e\left(-\frac{r^2 S}{4 T \tau}\right)}{\tau} d\tau \right] = \pi r^2 C S \int_0^t \frac{e\left(-\frac{r^2 S}{4 T \tau}\right)}{\tau^2} d\tau$$

**Rappel**

$$\left( e\left(-\frac{r^2 S}{4 T \tau}\right) \right)' = \frac{r^2 S}{4 T \tau^2} e\left(-\frac{r^2 S}{4 T \tau}\right) = \frac{r^2 S}{4 T} \cdot \frac{e\left(-\frac{r^2 S}{4 T \tau}\right)}{\tau^2}$$

$$\int e\left(-\frac{c}{x}\right) d\left(\frac{1}{x}\right) = -\frac{1}{c} e\left(-\frac{c}{x}\right)$$

$$Q(r, t) = 4 \pi T C e\left(-\frac{r^2 S}{4 T \tau}\right) \quad \text{si } r \rightarrow 0 \quad Q \rightarrow 4 \pi T C$$

Donc

$$C = \frac{Q}{4 \pi T}$$

La solution obtenue est donc celle du pompage à débit constant dans un puits à rayon négligeable.

$$s(r, t) = h_0 - h(r, t) = \frac{Q}{4 \pi T} \int_0^t \frac{e\left(-\frac{r^2 S}{4 T \tau}\right)}{\tau} d\tau$$

On pose :

$$u = \frac{r^2 S}{4 T t} \quad \text{et par conséquent,} \quad S = \frac{4 T t u}{r^2} \quad (5)$$

$$s = \frac{Q}{4 \pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-y}}{y} dy = \frac{Q}{4 \pi T} w(u) \quad (6)$$

$s$  : le rabattement, mesuré dans un piézomètre situé à une distance  $r$ , en (m), du puits de pompage ;

$Q$  : le débit constant de pompage, en  $\text{m}^3/\text{heure}$  ;

$S$  : le coefficient d'emmagasinement, sans dimension ;

$T$  : la transmissivité de l'aquifère, en  $\text{m}^2/\text{heure}$  ;

$t$  : le temps, en heure, depuis le début de pompage.

$$w(u) = -0.5772 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \dots$$

Le symbole  $w(u)$ , qui est une façon abrégée d'écrire la fonction exponentielle intégrale, est généralement appelé 'fonction de puits de Theis'.

Grâce à l'équation (5), on peut voir que si  $(s)$  est mesuré pour une ou plusieurs valeurs de  $(r)$  et pour différentes valeurs du temps  $(t)$  et si le débit  $(Q)$  est connu, on peut calculer  $S$  et  $T$ . La présence de deux inconnues et la nature même de la fonction exponentielle intégrale rendent impossible toute solution explicite.

Cependant, il existe plusieurs méthodes graphiques d'approximation.

### III.3.2.1. Méthode de Theis

En plus des hypothèses énumérées précédemment, (dans la section III.3), on doit satisfaire aux conditions suivantes:

- La nappe est captive.
- L'écoulement vers le puits est en régime transitoire, c'est-à-dire que l'évolution du rabattement n'est pas négligeable dans le temps, ou encore que le gradient hydraulique ne reste pas constant.
- L'eau provenant de l'emmagasinement est libérée instantanément avec la baisse de la charge hydraulique.
- Le diamètre du puits de pompage est très faible, c'est-à-dire que l'on peut négliger l'emmagasinement dans le volume du puits.

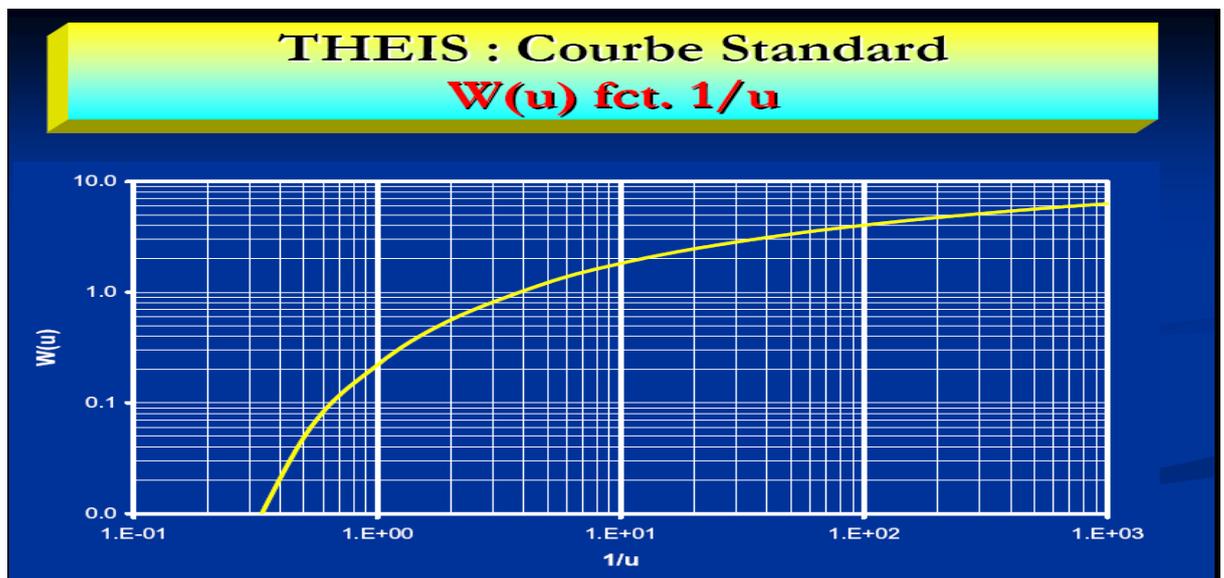


Figure III.6 : Courbe standard de Theis.

#### Mode opératoire

- Construire une courbe « courbe type » de la fonction de puits de Theis sur une feuille bi-logarithmique en portant les valeurs de  $w(u)$  en fonction de  $u$ , **données dans**

l'annexe I. on obtient la courbe type « normale ». Cependant, il est souvent plus pratique d'utiliser la courbe « renversée », obtenue en portant les valeurs de  $w(u)$  en fonction de  $1/u$  (figure III.5) :

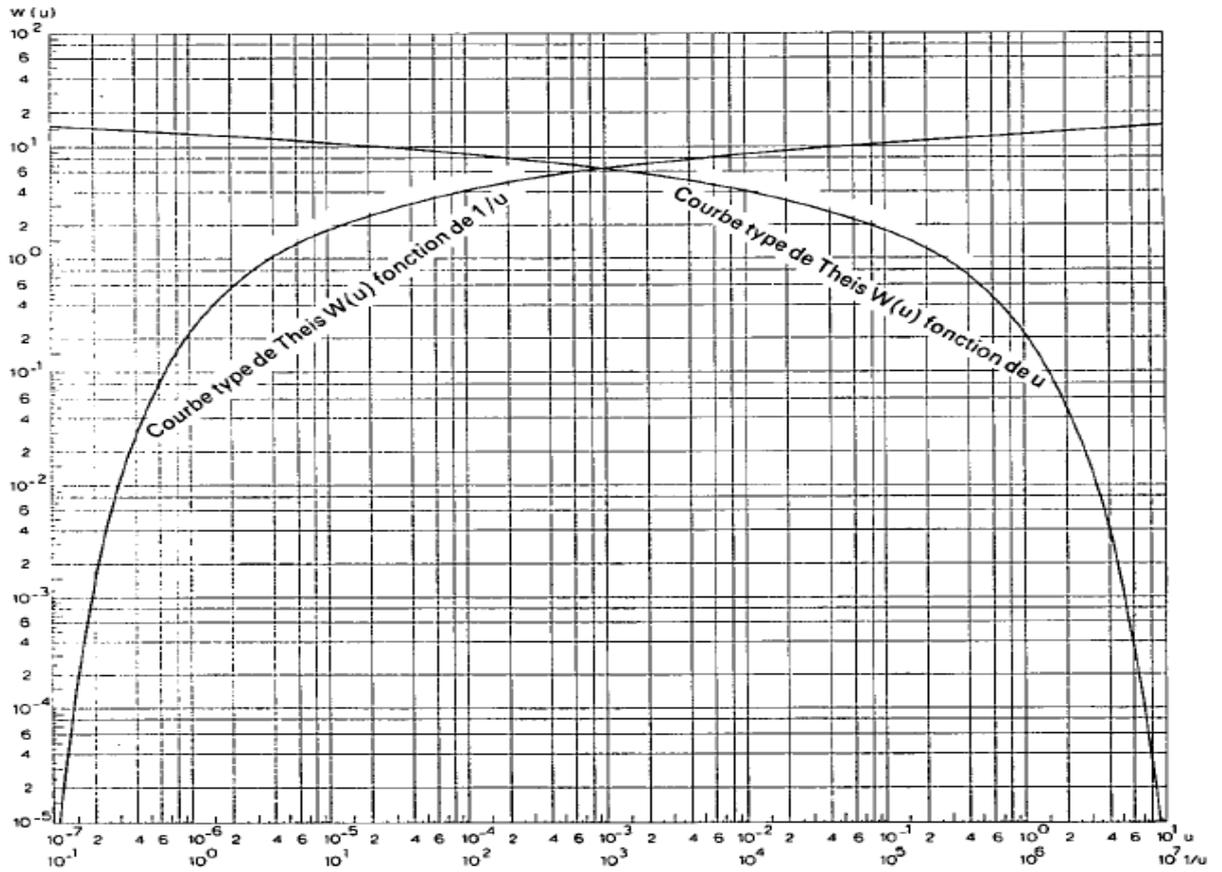


Figure III.7 : Courbe types de Theis :  $w(u)$  fonction de  $u$  et  $w(u)$  fonction de  $1/u$ .

- Tracer le graphique rabattement  $s(m)$  fonction du temps, sur un papier bi-logarithmique (même échelle que celle du graphique standard), mais ne pas relier les points expérimentaux.

**THEIS : “ Rabattement – Temps “  
Log(s) fct. Log(t)**

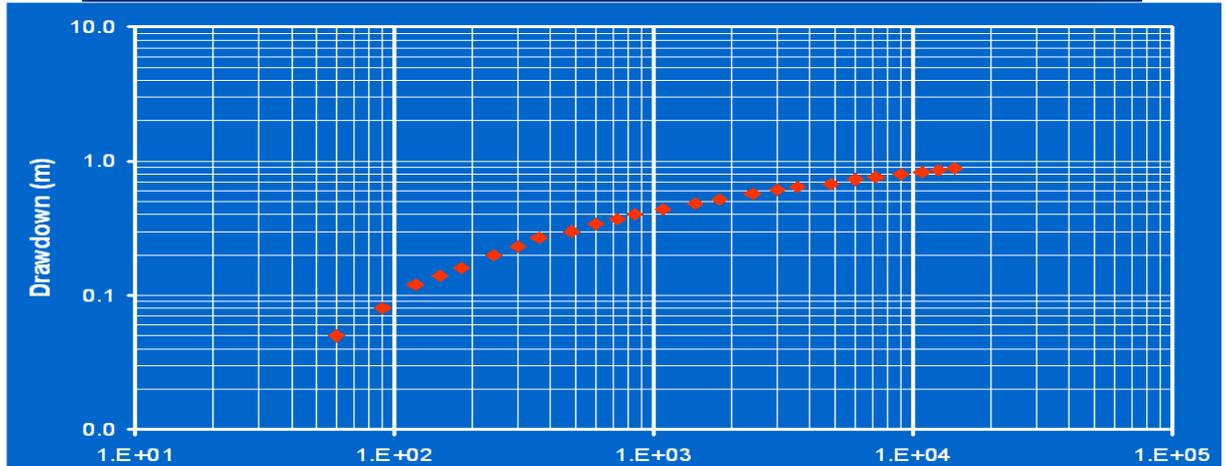


Figure III.8 : Exemple d’une courbe rabattement – temps sur un papier

bi-logarithmique (méthode de Theis).

- Superposer les deux graphes jusqu’à obtenir le meilleur ajustement.
- Choisir un point arbitraire commun aux deux courbes, que l’on appellera point pivot, et chercher pour ce point les coordonnées  $w(u)$ ,  $1/u$ ,  $s$ ,  $t$ . On prend  $w(u)=1$  et  $1/u=1$ .

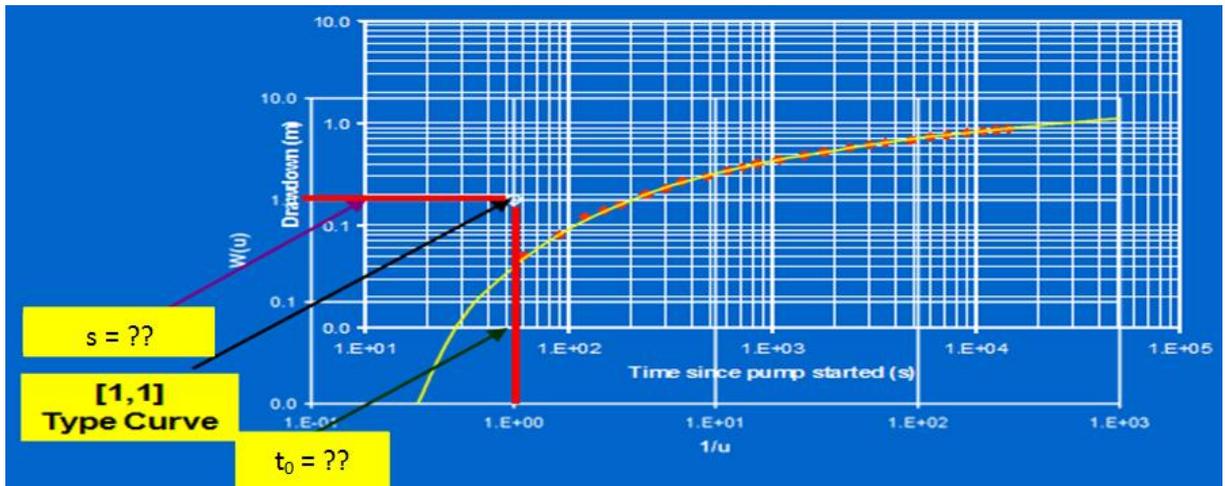


Figure III.9 : Exemple de la superposition des graphes et le choix du point

(méthode de Theis).

- Porter les valeurs de  $w(u)$ ,  $s$  et  $Q$  dans l’équation (6), et résoudre par rapport à  $T$ .

$$T = \frac{Q}{4 \pi s} w(u)$$

- Calculer le coefficient d’emmagasinement  $S$  dans l’équation (5)  $T$ ,  $t/r^2$  et  $u$  par leurs valeurs.

Cette méthode permet dans tous les cas de calculer la transmissivité  $T$ , mais ne permet pas de calculer le coefficient d'emmagasinement  $S$  que si l'on connaît  $r$ , distance à laquelle a été mesuré le rabattement  $s$ , ceci n'est possible si l'on dispose d'au moins un piézomètre.

#### IV.2.2. Méthode de CHOW

Chow (1952) développa une méthode dont l'intérêt est qu'on n'a pas besoin de tracer la courbe de la méthode de Theis, sans pour autant être limité aux faibles valeurs de  $r$  et aux grandes valeurs de  $t$ .

On doit satisfaire aux mêmes hypothèses et conditions que pour la méthode de Theis, car on s'appuie directement sur l'équation (6) de Theis :

$$s = \frac{Q}{4\pi T} w(u)$$

Afin de calculer les valeurs de  $W(u)$  et  $u$  correspondant au rabattement  $s$  mesuré au temps  $t$ , CHOW (1952) introduisit la fonction :

$$F(u) = \frac{w(u) e^u}{2.30} \quad (7)$$

$F(u)$  se calcul facilement, comme on le verra plus bas. La relation  $F(u)$ ,  $w(u)$  et  $u$  est donnée dans l'abaque de la figure suivante (les valeurs de  $F(u)$  et  $w(u)$  fonction de  $u$  sont données dans l'annexe II) :

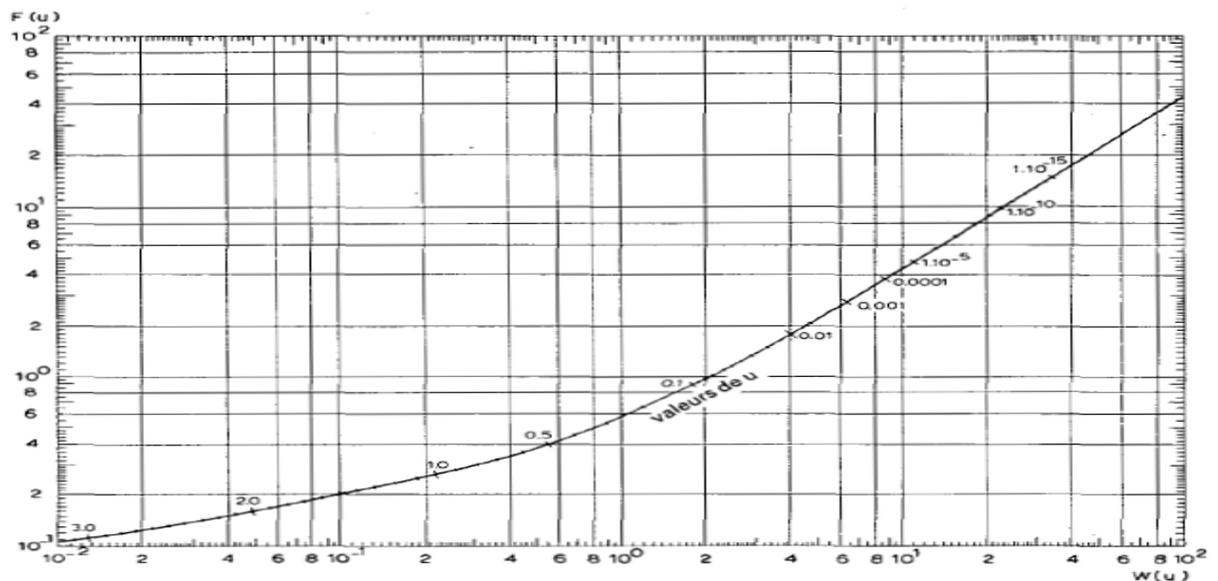


Figure III.10 : Abaque de Chow, donnant la relation entre  $F(u)$ ,  $w(u)$  et  $u$ .

#### Mode opératoire

- Pour l'un des piézomètres, porter sur un papier semi-logarithmique le rabattement  $s$  en fonction du temps  $t$  ( $t$  en échelle logarithmique).

- Sélectionner un point quelconque A de la courbe passant par l'ensemble des points et tracer la tangente en A à la courbe.
- Lire sur l'axe des rabattements s, la valeur du rabattement au point A, soit  $s_A$ , et calculer la pente de la tangente, c'est-à-dire la différence de rabattement pour un cycle log du temps, soit  $\Delta s_A$ .
- Calculer la valeur de  $F(u)$  au point A à partir de :

$$F(u) = \frac{s_A}{\Delta s_A}$$

- Connaissant  $F(u)$ , trouver la valeur correspondante de  $w(u)$  et de  $u$  à partir de l'abaque de la figure 08.
- Noter la valeur de  $t_A$  sur l'axe des temps de la courbe d'essai et porter les valeurs numériques appropriées dans les équations (5) et (6) pour trouver les valeurs de T et de S.

**Remarque :**

Si  $F(u) > 2.0$ ,  $w(u) = 2.30 F(u)$  et  $u$  s'obtient à partir de l'Annexe I (abaque de Theis).

### III.3.2.3. Méthode de Cooper-Jacob

La méthode de COOPER-JACOB (COOPER et JACOB, 1946) s'appuie elle aussi sur la formule de Theis; cependant les conditions de son application sont plus restrictives que celles de la méthode de Theis ou de Chow.

Dans la formule de Theis (6) on peut remplacer la fonction exponentielle intégrale par un développement en série convergente. Ainsi, le rabattement s s'écrit :

$$s = \frac{Q}{4 \pi T} \left( -0.5772 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \dots \right)$$

A partir de  $u = \frac{r^2 S}{4 T t}$ , on voit que  $u$  décroît quand le temps de pompage augmente.

Ainsi, pour de grandes valeurs de  $t$  et/ou de faibles valeurs de  $r$ , les termes à droite de  $\ln(u)$  dans la série de l'équation ci-dessus deviennent négligeables, et si  $u < 0.01$ , le rabattement peut s'exprimer sous la forme asymptotique :

$$s = \frac{Q}{4 \pi T} \left( -0.5772 - \ln\left(\frac{r^2 S}{4 T t}\right) \right)$$

Après arrangement et passage au logarithme décimal, cette équation se réduit à :

$$s = \frac{2.30 Q}{4 \pi T} \log\left(\frac{2.25 T t}{r^2 S}\right) \quad (8)$$

On doit satisfaire aux hypothèses et conditions suivantes :

- Les mêmes conditions que celles de la méthode de Theis ;
- Les valeurs de  $u$  sont faibles ( $u < 0.01$ ), c'est-à-dire que  $r$  est petit ou que  $t$  est grand.

### *1<sup>er</sup> mode opératoire : (courbe rabattement – temps)*

La formule de Jacob peut être utilisée en observant les variations du rabattement  $s$  dans un même tube piézométrique, en fonction du temps.

En reprenant la formule (8) :

$$s = \frac{2.30 Q}{4 \pi T} \log\left(\frac{2.25 T t}{r^2 S}\right) = \frac{2.30 Q}{4 \pi T} \log(t) + \frac{2.30 Q}{4 \pi T} \log\left(\frac{2.25 T}{r^2 S}\right)$$

La droite sera de la forme :  $s = a * \log(t) + b$

Normalement, tous les points ont tendance à s'aligner sur une droite.

Les étapes à suivre donc :

1. Mettre en graphique les points expérimentaux  $s = f(\log t)$  ;
2. Ajuster une droite aux points expérimentaux ;
3. Déterminer l'ordonnée à l'origine  $t_0$  sur l'axe des temps pour  $s = 0$ , et la pente de  $\Delta s$  de la droite (après choisir un cycle  $\log$ ) ;
4. Calculer la transmissivité  $T$  et le coefficient d'emmagasinement  $S$ , dont la pente est  $\Delta s = \frac{2.30 Q}{4 \pi T}$  alors :

$$T = \frac{2.30 Q}{4 \pi \Delta s} \quad (9)$$

On prolonge cette ligne jusqu'à l'axe des abscisses, et le point d'intersection a pour coordonnées  $s = 0$  et  $t = t_0$ . Si l'on porte ces valeurs dans l'équation (8), on obtient :

$$0 = \frac{2.30 Q}{4 \pi T} \log\left(\frac{2.25 T t_0}{r^2 S}\right)$$

Et comme  $\frac{2.30 Q}{4 \pi T} \neq 0$ , alors ;  $\log\left(\frac{2.25 T t_0}{r^2 S}\right) = 0$ , donc ;  $\frac{2.25 T t_0}{r^2 S} = 1$

Soit

$$S = \frac{2.25 T t_0}{r^2} \quad (10)$$

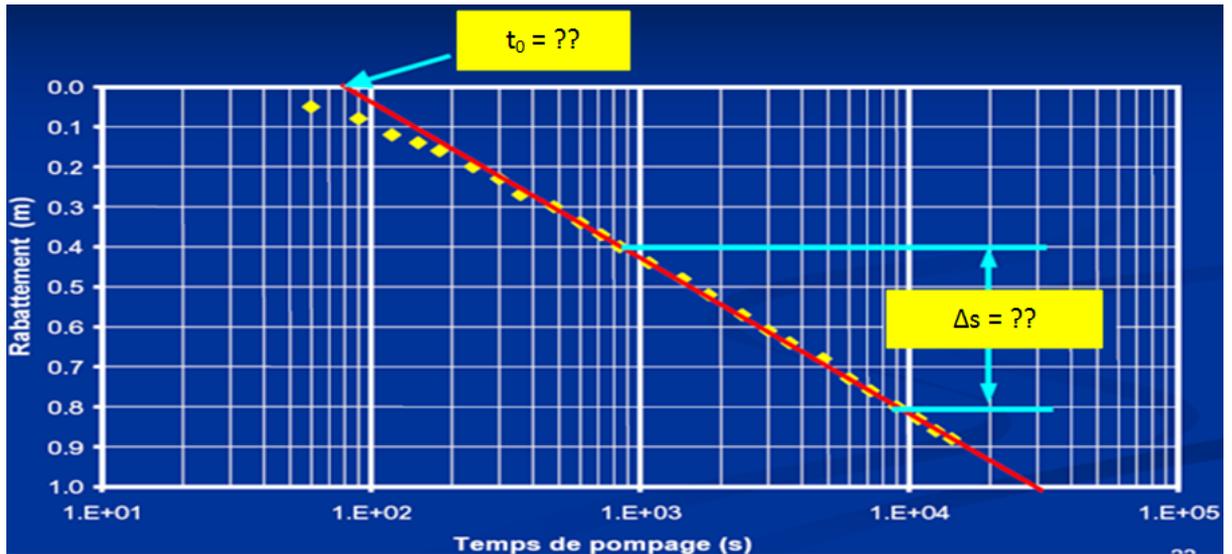


Figure III.11 : Exemple d'interprétation par la méthode de Jacob.

2<sup>ème</sup> mode opératoire : (courbe rabattement – distance)

La formule de JACOB peut être utilisée en observant les rabattements de plusieurs tubes piézométriques à un même moment; t est alors constant, à différentes distances du puits.

En utilisant la formule (8) :

$$s = \frac{2.30 Q}{4 \pi T} \log\left(\frac{2.25 T t}{r^2 S}\right) = \frac{2.30 Q}{4 \pi T} \log\left(\frac{2.25 T t}{S}\right) - \frac{2.30 Q}{2 \pi T} \log(r)$$

La droite sera de la forme :  $s = a * \log(r) + b$

Normalement, tous les points ont tendance à s'aligner sur une droite.

Les étapes à suivre donc :

1. Mettre en graphique les points expérimentaux  $s = f(\log r)$  ;
2. Ajuster une droite aux points expérimentaux ;
3. Déterminer l'ordonnée à l'origine  $r_0$  sur l'axe des temps pour  $s = 0$ , et la pente de  $\Delta s$  de la droite (après choisir un cycle log) ;
4. Calculer :  $T = \frac{2.30 Q}{2 \pi \Delta s}$  et  $S = \frac{2.25 T t}{r_0^2}$

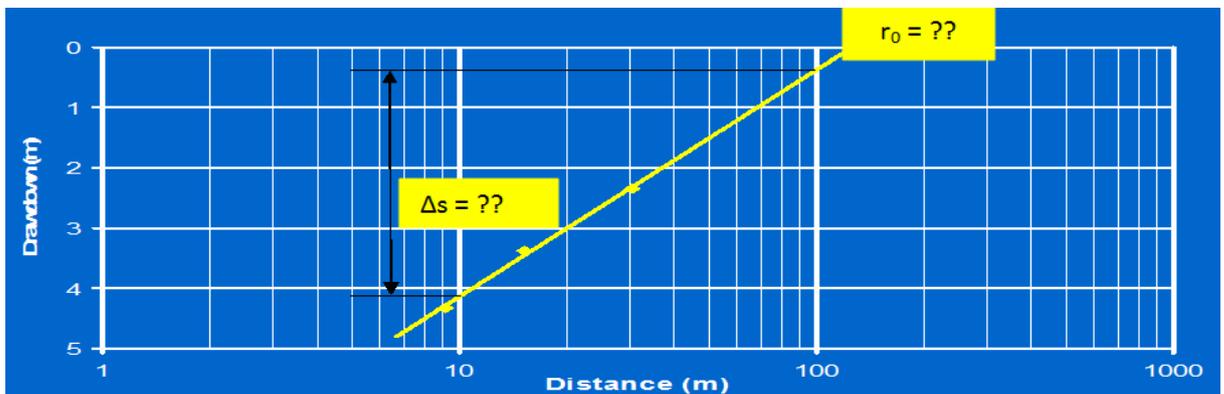


Figure III.12 : Exemple sur le graphe rabattement – distance.

**3<sup>ème</sup> mode opératoire : (courbe Rabattement – Temps – Distance)**

La formule de JACOB peut être utilisée en observant les rabattements de plusieurs tubes piézométriques à des instants différents, et à différentes distances du puits.

Utilisant la formule (8) :

$$s = \frac{2.30 Q}{4 \pi T} \log\left(\frac{2.25 T t}{r^2 S}\right) = \frac{2.30 Q}{4 \pi T} \log\left(\frac{t}{r^2}\right) + \frac{2.30 Q}{4 \pi T} \log\left(\frac{2.25 T}{S}\right)$$

La droite sera de la forme :  $s = a * \log(t/r^2) + b$

Normalement, tous les points ont tendance à s'aligner sur une droite.

Les étapes à suivre donc :

1. Mettre en graphique les points expérimentaux  $s = f(\log(t/r^2))$  ;
2. Ajuster une droite aux points expérimentaux ;
3. Déterminer l'ordonnée à l'origine ( $t/r_0^2$ ) sur l'axe des temps pour  $s = 0$ , et la pente de  $\Delta s$  de la droite (après choisir un cycle log) ;
4. Calculer :  $T = \frac{2.30 Q}{4 \pi \Delta s}$  et  $S = 2.25 T (t/r^2)_0$

**4<sup>ème</sup> mode opératoire : (capacité spécifique – temps)**

On observe les rabattements dans un seul tube piézométrique en fonction du temps; r est alors constant.

La formule de Jacob peut aussi s'écrire :

$$s = \frac{2.30 Q}{4 \pi T} \log\left(\frac{2.25 T t}{r^2 S}\right) \rightarrow \frac{s}{Q} = \frac{2.30}{4 \pi T} \log\left(\frac{2.25 T t}{r^2 S}\right)$$

Aussi l'équation de Jacob donne :

$$\frac{d(s/Q)}{d \log t} = \Delta s = \frac{2.30}{4 \pi T} \rightarrow T = \frac{0.183}{\frac{d(s/Q)}{d \log t}}$$

On trace alors une courbe  $s/Q$  en fonction de  $\log t$ , ce qui permet de calculer T à partir de la pente de la droite qui ajuste l'ensemble des points expérimentaux. Ainsi on peut calculer S lorsqu'on prolonge la droite jusqu'au point où  $s/Q = 0$ , à l'instant  $t_0$ .

**5<sup>ème</sup> mode opératoire : (Capacité spécifique – Distance)**

On observe les rabattements de plusieurs tubes piézométriques à un même moment; t est alors constant.

Aussi l'équation de Jacob donne :

$$\frac{d(s/Q)}{d \log r} = \Delta s = \frac{2.30}{2 \pi T} \rightarrow T = \frac{0.376}{\frac{d(s/Q)}{d \log r}}$$

On établit alors une courbe  $s/Q$  en fonction de  $r$ , alors on tire  $T$ .

### 6<sup>ème</sup> mode opératoire : (Capacité spécifique – Temps - Distance)

On observe les rabattements  $s/Q$  de plusieurs tubes piézométriques à divers temps  $t$ ; ces piézomètres sont situés à des distances  $r$  différentes.

On a alors :

$$T = \frac{0.183}{\frac{d(s/Q)}{d (\log t/r^2)}}$$

On porte donc les points de  $s/Q$  en fonction de  $\log (t/r^2)$ , pour chaque piézomètre.

Les points obtenus pour chaque piézomètre à différents temps  $t$  doivent s'aligner avec les mêmes points obtenus sur les autres piézomètres.

On obtient ainsi une courbe dont la portion rectiligne permet, de la même manière, de déterminer  $T$ .

La droite asymptotique coupe l'axe des temps en un point défini par :

$$\left(\frac{t}{r^2}\right)_0 = \frac{2.25 T}{s} \text{ on tire donc facilement: } S = \frac{2.25 T}{\left(\frac{t}{r^2}\right)_0}$$

#### III.3.2.4. Méthode de la remontée de Theis

Une fois le pompage achevé, le niveau d'eau cesse de descendre pour remonter vers sa position d'origine. On mesure la remontée par le rabattement résiduel  $s_r$ , c'est-à-dire la différence entre le niveau original de l'eau avant le pompage et le niveau mesuré à un certain moment  $t_r$  de la remontée;  $t_r$  représente le temps écoulé depuis l'arrêt du pompage.

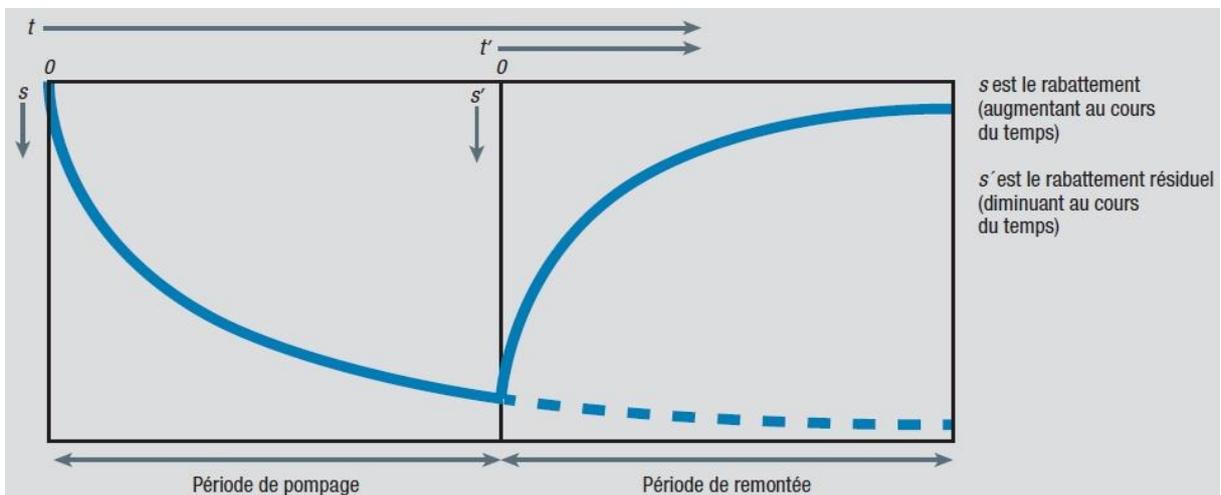


Figure III.13 : Coupe schématique d'un arrêt de pompage, le cas d'une remontée.

Les résultats de la remontée permettent eux aussi le calcul de la transmissivité et sont donc un moyen de contrôle des résultats de l'interprétation de l'essai durant la période de pompage. En outre, la remontée présente l'avantage que le débit  $Q$  est constant et égal à la moyenne des débits du pompage. Ceci fait que les variations de rabattements dues aux fluctuations du débit ne se retrouvent plus à la remontée.

La méthode de la remontée de Theis peut s'utiliser pour mesurer les propriétés hydrodynamiques d'un aquifère, dans la mesure où les hypothèses et les conditions de la méthode de Jacob sont satisfaites.

Si  $u = \frac{r^2 S}{4 T t_r}$  est suffisamment petit, le rabattement résiduel de la remontée vaut, selon Theis (1935) :

$$s_r = \frac{Q}{4 \pi T} \left( \ln \frac{4 T t}{r^2 S} - \ln \frac{4 T t_r}{r^2 S_r} \right) \quad (11)$$

Avec

$s_r$  = rabattement résiduel, en mètre ;

$r$  = distance en mètre entre le piézomètre et le puits de pompage ;

$S_r$  = coefficient d'emmagasinement de la remontée, sans dimension ;

$S$  = coefficient d'emmagasinement durant le pompage, sans dimension ;

$t$  = temps en heures de la descente, depuis le début de pompage ;

$t_r$  = temps en heures de la remontée, depuis l'arrêt de pompage ;

$Q$  = débit de remontée = débit de pompage en  $m^3$ /heures.

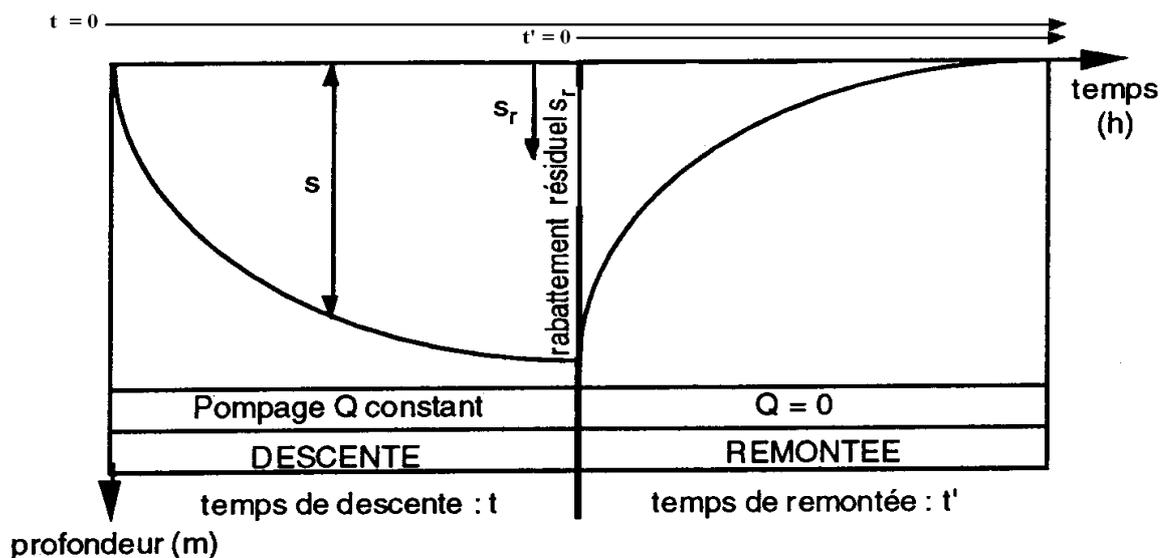


Figure III.14 : La descente et la remontée d'une nappe.

### Mode opératoire

Si  $S$  et  $S_r$  sont constants et égaux, l'équation (11) s'écrit :

$$s_r = \frac{2.30 Q}{4 \pi T} \log \frac{t}{t_r} \quad (12)$$

Pour l'un des piézomètres ou pour le puits d'essai, on porte donc  $s_r$  en fonction de  $t/t_r$  sur un papier semi-logarithmique ( $t/t_r$  en échelle logarithmique) et l'on trace la ligne droite passant par l'ensemble des points. La pente de cette droite est égale  $\Delta s = \frac{2.30 Q}{4 \pi T}$  ; par conséquent on peut lire la valeur  $\Delta s_r$ , différence de rabattement résiduel par cycle log de  $t/t_r$ , que l'on porte dans l'équation (13) :

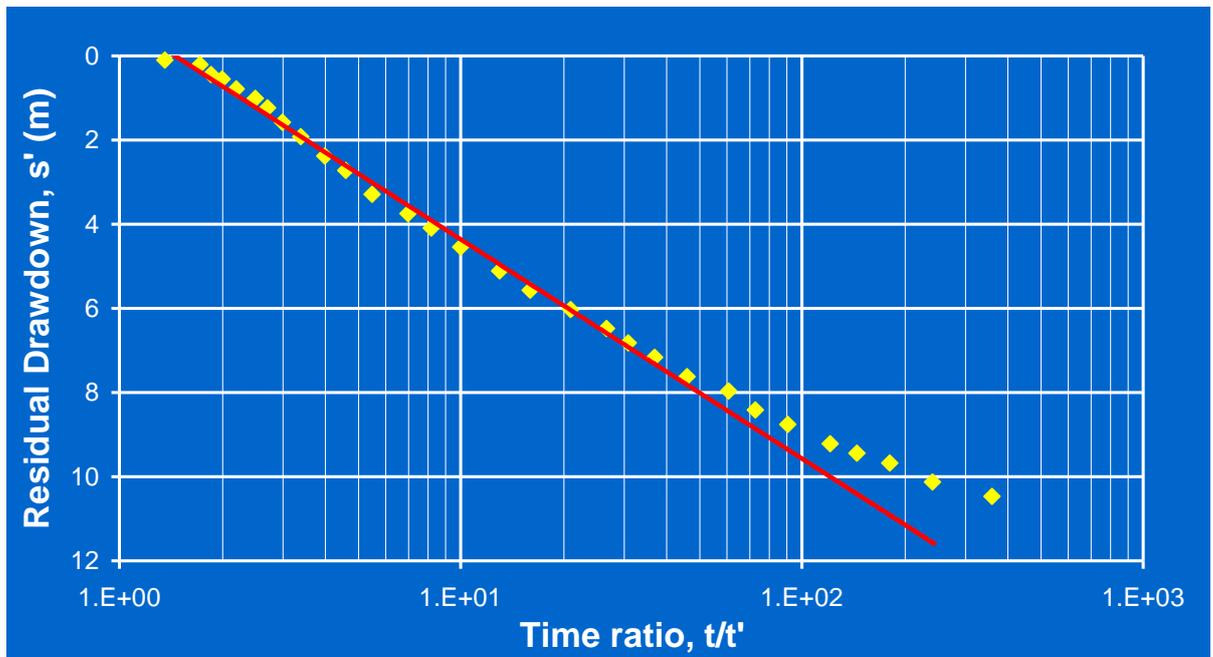
$$T = \frac{2.30 Q}{4 \pi \Delta s_r} \quad (13)$$

- On ne peut pas obtenir de valeur du coefficient d'emmagasinement  $S$  par cette méthode.
- Si  $S$  et  $S_r$  sont des constantes inégales, la droite passant par les points de la remontée rencontre l'axe des temps où  $s_r = 0$ , au point  $t/t_r = (t/t_r)_0$ .

En ce point, l'équation (11) devient :

$$0 = \frac{2.30 Q}{4 \pi T} \left[ \log \left( \frac{t}{t_r} \right)_0 - \log \left( \frac{S}{S_r} \right) \right]$$

Comme  $\frac{2.30 Q}{4 \pi T} \neq 0$ , il s'ensuit que  $\log(t/t_r)_0 - \log(S/S_r) = 0$ , d'où  $(t/t_r)_0 = S/S_r$ , ce qui nous permet de connaître le rapport des coefficients d'emmagasinement.



**Figure III.15 :** Exemple d'un graphe Rabattement résiduel – Temps.

### III.3.2.5. Remontée de la nappe avec la méthode de JACOB

Applicable à l'étude de la remontée d'une nappe immédiatement après l'arrêt d'un pompage de courte durée (nappe non stabilisée).

Le raisonnement mathématique pour déterminer les effets de l'arrêt du pompage est basé sur le principe de superposition : on combine une « poursuite fictive » du pompage au débit initial  $Q$  avec une « injection fictive » d'eau au même débit soit un pompage au débit  $-Q$ .

Le rabattement se mesure dans le piézomètre d'observation.

La formule de JACOB devient:

$$s = \frac{2.30 Q}{4 \pi T} \log\left(\frac{2.25 T (t_a + t_r)}{r^2 S}\right) - \frac{2.30 Q}{4 \pi T} \log\left(\frac{2.25 T t_r}{r^2 S}\right)$$

D'où

$$s = \frac{2.30 Q}{4 \pi T} \log\left(\frac{(t_a + t_r)}{S}\right)$$

$t_a$  : temps écoulé depuis l'origine du pompage jusqu'à son arrêt ;

$t_r$  : le temps compté après cet arrêt ;

$s$  : la continuation de l'enregistrement du rabattement dans le piézomètre de contrôle ;

$Q$  : valeur de débit du pompage ayant créé le rabattement initial.

On trace la courbe expérimentale de l'essai, rabattement  $s$  en fonction de  $\log((t_a + t_r) / t_r)$ , donc, tous les points ont tendance à s'aligner sur une droite, dont la pente est :

$$\Delta s = \frac{2.30 Q}{4 \pi T} \quad d'où \quad T = \frac{2.30 Q}{4 \pi \Delta s}$$

Cette méthode permet de vérifier le résultat obtenu pour la transmissivité  $T$  lors de la descente de la nappe.

### III.3.2.6. Remontée de la nappe avec la méthode de POUCHAN

Applicable à l'étude de la remontée d'une nappe immédiatement après l'arrêt d'un pompage de longue durée (nappe stabilisée), sans piézomètre de contrôle, car on mesure directement dans le puits de pompage.

La formule précédente donne après l'arrêt de la pompe :

$$s = \frac{2.30 Q}{4 \pi T} \log\left(\frac{(t_a + t_r)}{S}\right)$$

Jacob donne au moment de l'arrêt de pompage :

$$s_a = \frac{2.30 Q}{4 \pi T} \log\left(\frac{2.25 T t_a}{r^2 S}\right)$$

- $s_a$  : le rabattement au moment de l'arrêt de la pompe ;  
 $t_r$  : le temps compté après l'arrêt de pompage,  
 $t_a$  : temps écoulé depuis l'origine du pompage jusqu'à son arrêt, et il est très grand.  
 $s$  : la continuation de l'enregistrement du rabattement dans le puits de pompage.

Exprimons :

$$s_a - s = \frac{2.30 Q}{4 \pi T} \log \left( \frac{2.25 T t_a}{r^2 S} \frac{t_r}{t_a + t_r} \right) = \frac{2.30 Q}{4 \pi T} \log \left( \frac{2.25 T t_r}{r^2 S \left( 1 + \frac{t_r}{t_a} \right)} \right)$$

D'où

$$s_a - s \approx \frac{2.30 Q}{4 \pi T} \log \left( \frac{2.25 T t_r}{r^2 S} \right)$$

On trace la courbe expérimentale de l'essai avec  $t_r$  (en fait  $\log(t_r)$ ) en abscisse et  $(s_a - s)$  en ordonnée. On doit avoir une droite dont la pente est :

$$\Delta(s_a - s) = \frac{2.30 Q}{4 \pi T} \quad \text{donc} \quad T = \frac{2.30 Q}{4 \pi \Delta(s_a - s)}$$

### III.3.3. Régime permanent en nappe libre

Les méthodes d'interprétation des pompages d'essai dans les nappes libres sont relativement anciennes, et s'appuient sur les travaux de Dupuit. Dupuit (1863) montra que pour trouver une solution à l'équation différentielle de l'écoulement permanent d'une nappe libre dans laquelle pompe un puits, il était nécessaire de faire les hypothèses suivantes:

- la vitesse de l'écoulement est proportionnelle à la tangente du gradient hydraulique, alors qu'en réalité, elle est proportionnelle au sinus ;
- l'écoulement est horizontal et uniforme en tout point d'une coupe verticale passant par l'axe du puits ;

De plus, il a supposé qu'une surface cylindrique ayant pour axe le puits formait une limite à niveau constant sans laquelle le régime permanent ne pourrait pas être atteint. Cependant, même si une telle limite n'existe pas, il arrive un moment où, après un temps de pompage suffisant, les différences de rabattement deviennent négligeables dans le temps. Dans ces conditions, on peut appliquer les formules du régime permanent sans risque d'erreurs importantes.

### III.3.3.1. Méthode de Thiem – Dupuit

Pour appliquer cette on doit satisfaire les conditions suivantes :

- Les hypothèses énumérées dans la section III.3 ;
- La nappe est libre ;
- L'écoulement vers le puits est en régime permanent.

Alors on peut exprimer le débit d'un puits dans une telle nappe libre par :

$$Q = 2 \pi r K h \frac{dh}{dr}$$

Après intégration de  $r_1$  à  $r_2$  ( $r_2 > r_1$ ), l'équation devient :

$$Q = \pi K \frac{h_2^2 - h_1^2}{\ln(r_2/r_1)} \quad (14)$$

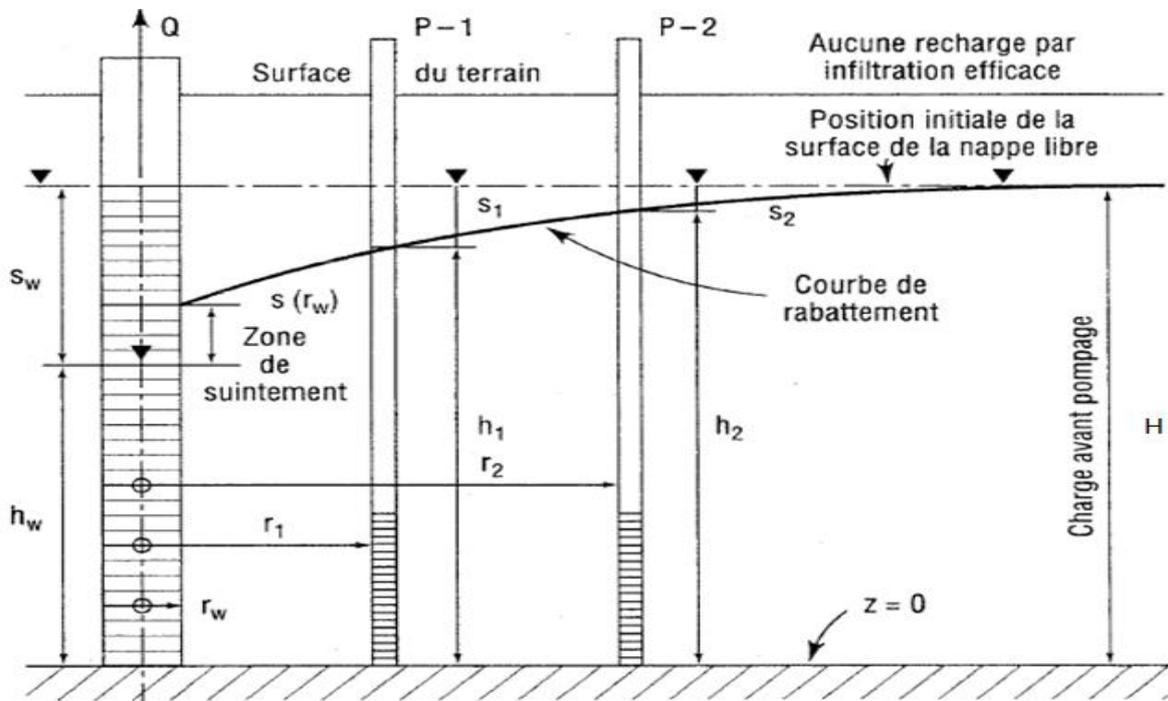


Figure III.16 : le cône de rabattement dans une nappe libre.

### III.3.4. Régime transitoire en nappe libre

Dans une nappe libre le schéma de l'écoulement vers un puits en pompage est identique à celui de l'écoulement vers un puits en nappe captive. Par conséquent, on peut utiliser les méthodes de Theis et Jacob ainsi que la méthode de la remontée de Theis présentées précédemment.

Pour les utiliser on doit satisfaire les hypothèses énumérées précédemment dans la section III.3. et aux conditions suivantes :

- La nappe est libre ;
- L'écoulement vers le puits est en régime permanent ;

- L'eau emmagasinée est libérée au même instant que la chute de la charge hydraulique, c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'effet de débit retardé ;
- Le rayon du puits est extrêmement faible, de façon qu'on puisse négliger la quantité d'eau emmagasinée dans le puits.

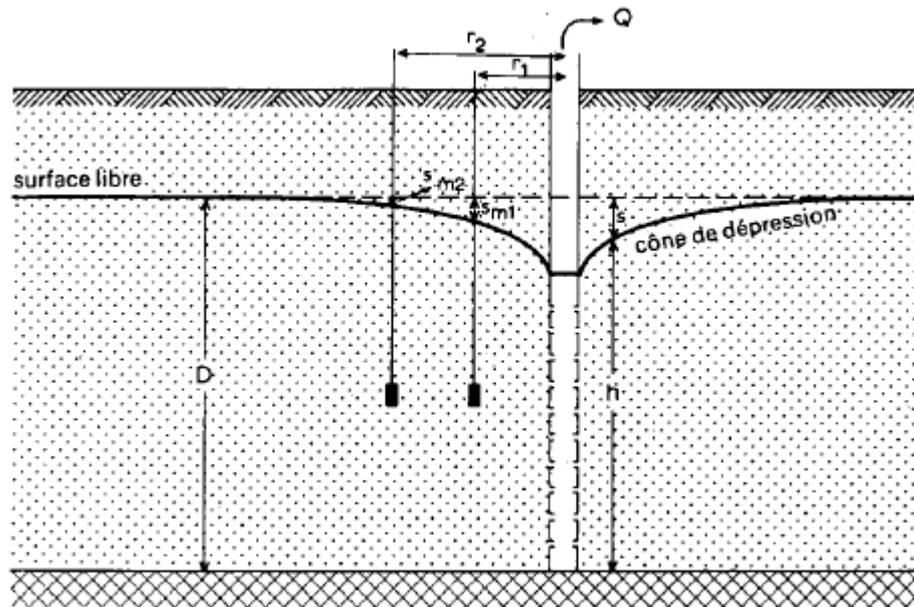


Figure III.17 : Coupe schématique d'un pompage en nappe libre.

### III.3.4.1. Méthode de Theis

En reprenant l'équation (6) :

$$s = \frac{Q}{4 \pi T} w(u)$$

$$\text{Avec : } w(u) = -0.5772 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \dots$$

#### Mode opératoire

- Construire une courbe « *courbe type* » de la fonction de puits de Theis sur une feuille bi-logarithmique en portant les valeurs de  $w(u)$  en fonction de  $u$ , **données dans l'annexe I**. on obtient la courbe type « *normale* ». Cependant, il est souvent plus pratique d'utiliser la courbe « *renversée* », obtenue en portant les valeurs de  $w(u)$  en fonction de  $1/u$  (figure III.7).
- Tracer le graphique rabattement  $s(m)$  fonction du temps, sur un papier bi-logarithmique (même échelle que celle du graphique standard), mais ne pas relier les points expérimentaux.
- Superposer les deux graphes jusqu'à obtenir le meilleur ajustement.

- Choisir un point arbitraire commun aux deux courbes, que l'on appellera point pivot, et chercher pour ce point les coordonnées  $w(u)$ ,  $1/u$ ,  $s$ ,  $t$ . On prend  $w(u)=1$  et  $1/u=1$ .
- Porter les valeurs de  $w(u)$ ,  $s$  et  $Q$  dans l'équation (6), et résoudre par rapport à  $T$ .

$$T = \frac{Q}{4 \pi s} w(u)$$

- Calculer le coefficient d'emmagasinement  $S$  dans l'équation (5)  $T$ ,  $t/r^2$  et  $u$  par leurs valeurs.

### III.3.4.2. Méthode de Jacob

Dans la formule de Theis (6) on peut remplacer la fonction exponentielle intégrale par un développement en série convergente. Ainsi, le rabattement  $s$  s'écrit :

$$s = \frac{Q}{4 \pi T} \left( -0.5772 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \dots \right)$$

A partir de  $u = \frac{r^2 S}{4 T t}$ , on voit que  $u$  décroît quand le temps de pompage augmente.

Ainsi, pour de grandes valeurs de  $t$  et/ou de faibles valeurs de  $r$ , les termes à droite de  $\ln(u)$  dans la série de l'équation ci-dessus deviennent négligeables, et si  $u < 0.01$ , le rabattement peut s'exprimer sous la forme asymptotique :

$$s = \frac{Q}{4 \pi T} \left( -0.5772 - \ln\left(\frac{r^2 S}{4 T t}\right) \right)$$

Après arrangement et passage au logarithme décimal, cette équation se réduit à :

$$s = \frac{2.30 Q}{4 \pi T} \log\left(\frac{2.25 T t}{r^2 S}\right) = \frac{0.183 Q}{T} \log\left(\frac{2.25 T t}{r^2 S}\right)$$

On doit satisfaire aux hypothèses et conditions suivantes :

- Les mêmes conditions que celles de la méthode de Theis ;
- Les valeurs de  $u$  sont faibles ( $u < 0.01$ ), c'est-à-dire que  $r$  est petit ou que  $t$  est grand.

Pour déterminer les valeurs de la transmissivité ainsi que le coefficient d'emmagasinement, on suit les mêmes modes opératoires que la méthode de Jacob dans la section III.3.2.3.

### Remarque

Le rabattement doit être faible vis-à-vis de l'épaisseur de la zone saturée de l'aquifère, sans quoi l'hypothèse de l'épaisseur constant n'est plus vérifiée.

### III.3.4.3. Méthode de la remontée de Theis

Une fois le pompage achevé, le niveau d'eau cesse de descendre pour remonter vers sa position d'origine. On mesure la remontée par le rabattement résiduel  $s_r$ , c'est-à-dire la

différence entre le niveau original de l'eau avant le pompage et le niveau mesuré à un certain moment  $t_r$  de la remontée;  $t_r$  représente le temps écoulé depuis l'arrêt du pompage.

Les résultats de la remontée permettent eux aussi le calcul de la transmissivité et sont donc un moyen de contrôle des résultats de l'interprétation de l'essai durant la période de pompage. En outre, la remontée présente l'avantage que le débit  $Q$  est constant et égal à la moyenne des débits du pompage. Ceci fait que les variations de rabattements dues aux fluctuations du débit ne se retrouvent plus à la remontée.

La méthode de la remontée de Theis peut s'utiliser pour mesurer les propriétés hydrodynamiques d'un aquifère, dans la mesure où les hypothèses et les conditions de la méthode de Jacob sont satisfaites.

Si  $u = \frac{r^2 S}{4 T t_r}$  est suffisamment petit, le rabattement résiduel de la remontée vaut, selon Theis (1935) :

$$s_r = \frac{Q}{4 \pi K H} \left( \ln \frac{4 K H t}{r^2 S} - \ln \frac{4 K H t_r}{r^2 S_r} \right) \quad (11)$$

Avec

$s_r$  = rabattement résiduel, en mètre ;

$K$  = coefficient de perméabilité, en m/heure ;

$H$  = l'épaisseur de la nappe, en m

$r$  = distance en mètre entre le piézomètre et le puits de pompage ;

$S_r$  = coefficient d'emménagement de la remontée, sans dimension ;

$S$  = coefficient d'emménagement durant le pompage, sans dimension ;

$t$  = temps en heures de la descente, depuis le début de pompage ;

$t_r$  = temps en heures de la remontée, depuis l'arrêt de pompage ;

$Q$  = débit de remontée = débit de pompage en  $m^3$ /heures.

### Mode opératoire

Si  $S$  et  $S_r$  sont constants et égaux, l'équation (11) s'écrit :

$$s_r = \frac{2.30 Q}{4 \pi T} \log \frac{t}{t_r} \quad (12)$$

Pour l'un des piézomètres ou pour le puits d'essai, on porte donc  $s_r$  en fonction de  $t/t_r$  sur un papier semi-logarithmique ( $t/t_r$  en échelle logarithmique) et l'on trace la ligne droite passant par l'ensemble des points. La pente de cette droite est égale  $\Delta s = \frac{2.30 Q}{4 \pi T}$  ; par conséquent on

peut lire la valeur  $\Delta s_r$ , différence de rabattement résiduel par cycle log de  $t/t_r$ , que l'on porte dans l'équation (13) :

$$T = \frac{2.30 Q}{4 \pi \Delta s_r} \quad (13)$$

- On ne peut pas obtenir de valeur du coefficient d'emmagasinement  $S$  par cette méthode.
- Si  $S$  et  $S_r$  sont des constantes inégales, la droite passant par les points de la remontée rencontre l'axe des temps où  $s_r = 0$ , au point  $t/t_r = (t/t_r)_0$ .

En ce point, l'équation (11) devient :

$$0 = \frac{2.30 Q}{4 \pi T} \left[ \log \left( \frac{t}{t_r} \right)_0 - \log \left( \frac{S}{S_r} \right) \right]$$

Comme  $\frac{2.30 Q}{4 \pi T} \neq 0$ , il s'ensuit que  $\log(t/t_r)_0 - \log(S/S_r) = 0$ , d'où  $(t/t_r)_0 = S/S_r$ , ce qui nous permet de connaître le rapport des coefficients d'emmagasinement.

## Chapitre IV

Détermination des paramètres hydrodynamiques et estimation de la durée du rabattement

#### IV.1. Introduction

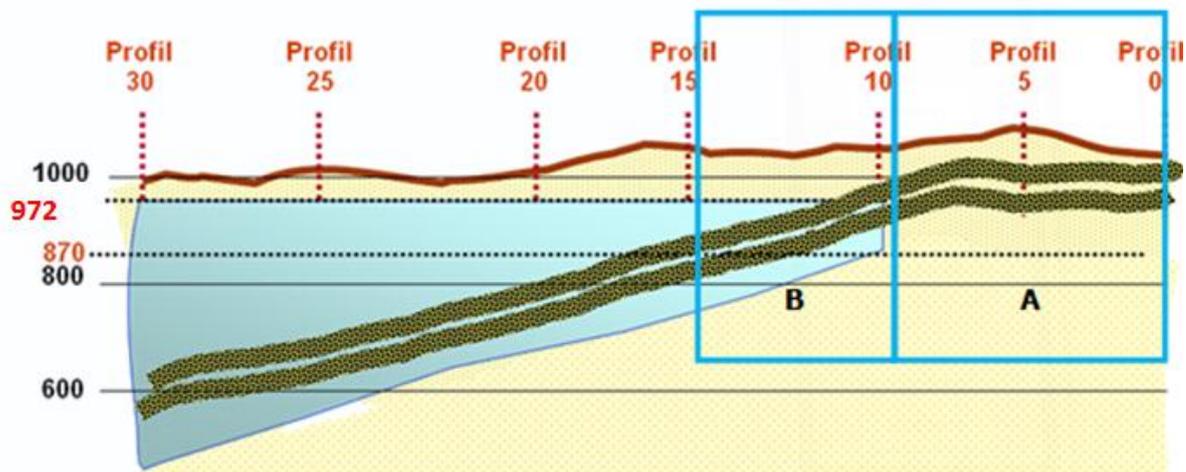
Un travail n'est nécessaire que s'il répond à un besoin ou à une question, dans notre cas il s'agit de répondre aux aspirations de l'exploitant minier.

Actuellement la majeure partie des réserves récupérables de Chaâbet El Hamra est située sous le niveau hydrodynamique.

La préparation et la mise en exploitation des réserves situées sous le niveau d'eau nécessitent au préalable l'assèchement des zones de travail.

Dans la partie centrale, la morphologie des corps minéralisés et la piézométrie nous permettent déjà de scinder le gisement en deux parties distinctes du point de vue hydrogéologique :

- Une partie supérieure située au-dessus du niveau hydrostatique (Pr.0 – Pr.10), donc les travaux miniers seront exécutés sans difficultés inhérentes à l'eau. Ceci a été confirmé par les travaux miniers réalisés.
- Une partie inférieure est située en-dessous du niveau hydrostatique (Pr.10 -Pr.15)



*Figure IV.1 : Les deux parties exploitables du site.*

Les réserves situées au-delà du profil 15 sont exclues du projet d'exploitation en raison :

- de la zone stérile à traverser entre les profils 16 et 24 (800 m)
- des contraintes accrues de l'hydrogéologie.
- du pendage élevé des corps minéralisés à partir du profil 14. Qui atteint 45%
- de leur faible volume de réserves (25% des réserves globales du gisement).

**Problèmes à discuter**

Dans ce qui suit seront abordés les problèmes de venues d'eau dans la partie inférieure qui pourront entraver la bonne marche des travaux d'exploitation minière. Déjà à cause de ces venues d'eau importantes, les travaux sous le niveau hydrodynamique sont à l'arrêt depuis plusieurs années.

Dans le but de reprendre ces travaux miniers ; donc une obligation de faire une étude hydrodynamique et un projet d'exhaure, dont l'objectif est la détermination des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère, afin d'estimer la durée nécessaire pour rabattre le niveau de la nappe sous le mur de la minéralisation

**IV.2. Rappels et définition****• Perméabilité : K**

Elle exprime l'aptitude d'un matériau à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient hydraulique et a pour unité « m/s ».

**• Transmissivité : T**

Elle exprime le produit de la perméabilité par l'épaisseur de l'aquifère dans une section transversale considérée et a pour unité « m<sup>2</sup>/s ».

**• Coefficient d'emménagement : S**

Il exprime le volume d'eau libéré lors d'un pompage, c'est un nombre sans dimension et se présente sous forme de pourcentage. Son concept est très important en hydrogéologie minière puisqu'il traduit la quantité d'eau susceptible d'être libérée par l'aquifère lors de l'avancement des travaux miniers et donc de prévoir les débits d'exhaure.

**• Rayon d'action**

Il s'agit de la distance radiale, depuis l'axe de l'ouvrage exploité, à laquelle le rabattement déterminé est négligeable (en pratique nul).

**IV.3. Essais de pompage**

Afin de déterminer les propriétés hydrodynamiques de la nappe qui inonde la mine de Chaabet El-Hamra ; et selon les sept (07) essais de pompage qui ont été effectués au niveau de deux puits d'essai, dont les débits sont de l'ordre de 15 l/s à 20 l/s. Ces essais ont été exécutés entre les profils 15 et 17 à la fin de l'année 2008.

A partir des données de la descente seulement (temps – rabattement) de ces essais, nous allons déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe aquifère.

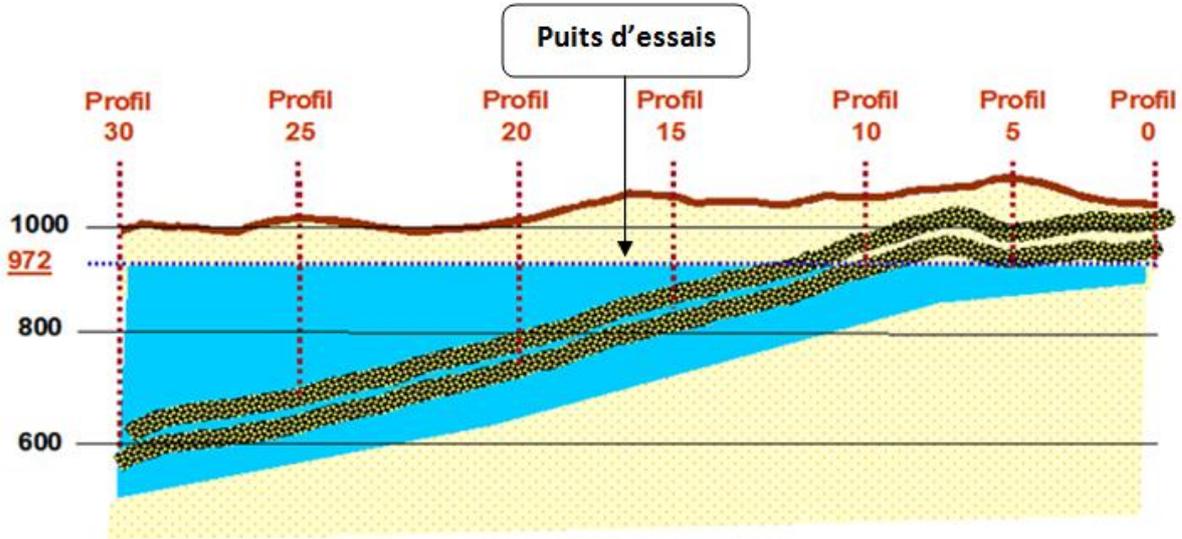


Figure IV.2 : Emplacement des puits d'essais.

#### IV.3.1. Traitement des données

La descente se poursuit donc le régime est toujours transitoire c'est pour cela qu'on adopte l'expression d'hydrodynamique souterraine du régime transitoire établie par C.V Theis en 1935, et transformée par C.E Jacob en 1950 donnant l'expression d'approximation logarithmique.

$$s = \frac{2.30 Q}{4 \pi T} \log \frac{2.25 T t}{r^2 S}$$

Donc

$$s = \frac{0.183 Q}{T} \log \frac{2.25 T t}{r^2 S} \quad (1)$$

s : Rabattement (m).

Q : Débit (m<sup>3</sup>/s).

T : Coefficient de transmissivité (m<sup>2</sup>/s).

t : Temps de pompage (s).

t' : Temps de la remontée (s).

$r$  : Distance entre le piézomètre et le forage (m).

$S$  : Coefficient d'emménagement sans dimension.

La formulation la plus proche pour le traitement des données de l'essai est la méthode de représentation graphique basée sur l'approximation logarithmique de la formule Theis-Jacob

$$s = f(\log t) \quad \text{Descente}$$

Chaque graphe sert à donner des valeurs à la transmissivité et au coefficient d'emménagement.

### Courbe de descente $S = f(\log t)$

Cette méthode vise à suivre le rabattement du niveau d'eau en fonction du temps.

La transformation mathématique de l'expression (1) permet s'écrire :

$$s = \frac{0.183 Q}{T} \log\left(\frac{2.25 T t}{r^2 S}\right) = \frac{0.183 Q}{T} \log(t) + \frac{0.183 Q}{T} \log\left(\frac{2.25 T}{r^2 S}\right)$$

### Calcul de la transmissivité $T$ :

La transformation de l'équation (1) permet d'avoir une équation d'une droite dont la pente est  $\Delta s$ , dont on peut calculer la transmissivité  $T$  :

$$T = \frac{0.183 Q}{\Delta s} \quad (2)$$

### Calcul du coefficient d'emménagement $S$ :

Lorsque la droite représentative coupe l'axe des temps, donc  $s = 0$  et  $\log t = \log t_0$ , donc

$$0 = \frac{0.183 Q}{T} \log\left(\frac{2.25 T t_0}{r^2 S}\right)$$

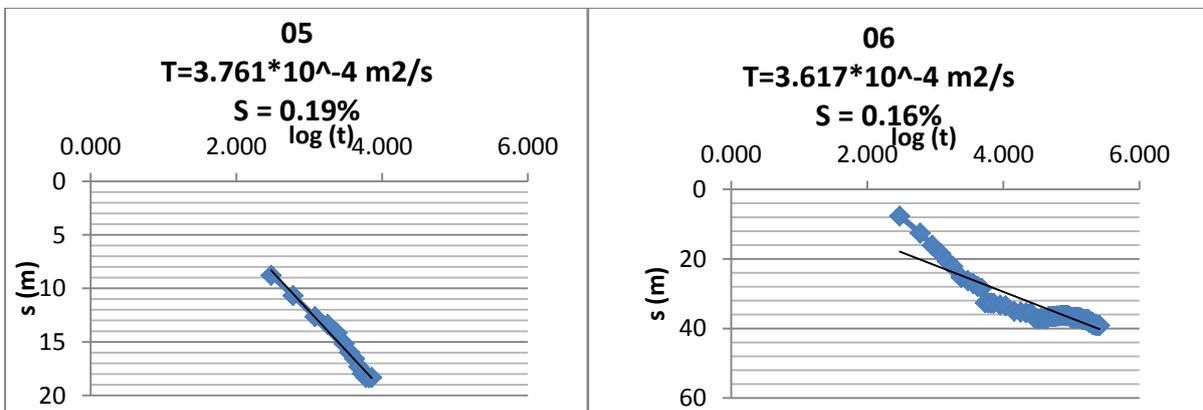
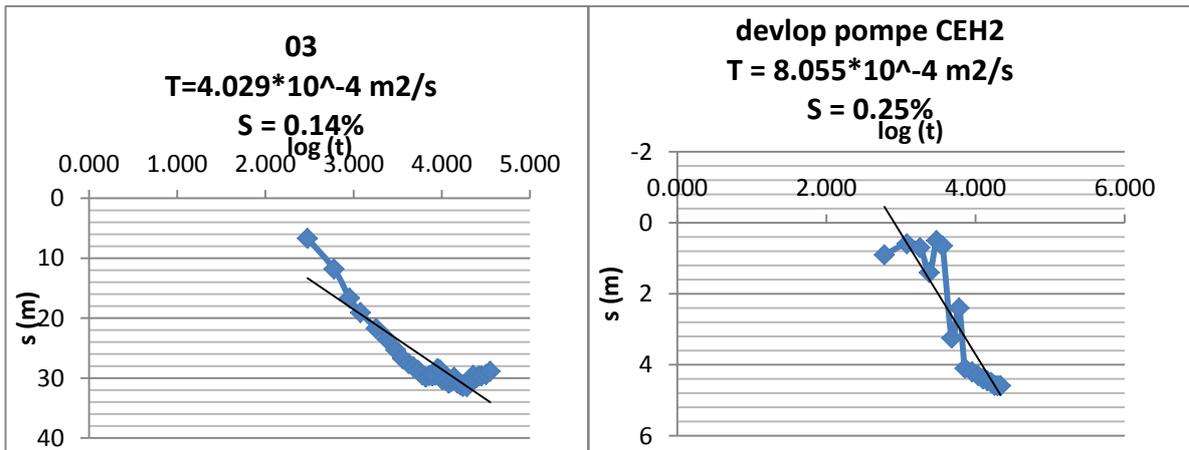
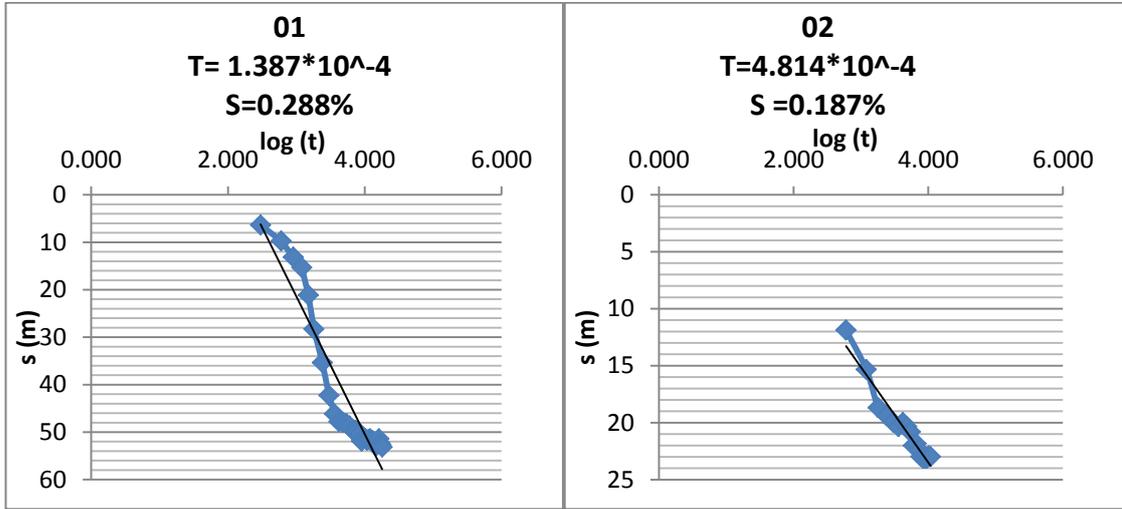
Et comme  $\frac{0.183 Q}{T} \neq 0$ , alors;  $\log\left(\frac{2.25 T t_0}{r^2 S}\right) = 0$ , donc;  $\frac{2.25 T t_0}{r^2 S} = 1$

Soit

$$S = \frac{2.25 T t_0}{r^2} \quad (3)$$

IV.3.2. Détermination des paramètres hydrodynamiques

1. Pour les sondages effectués en 2008



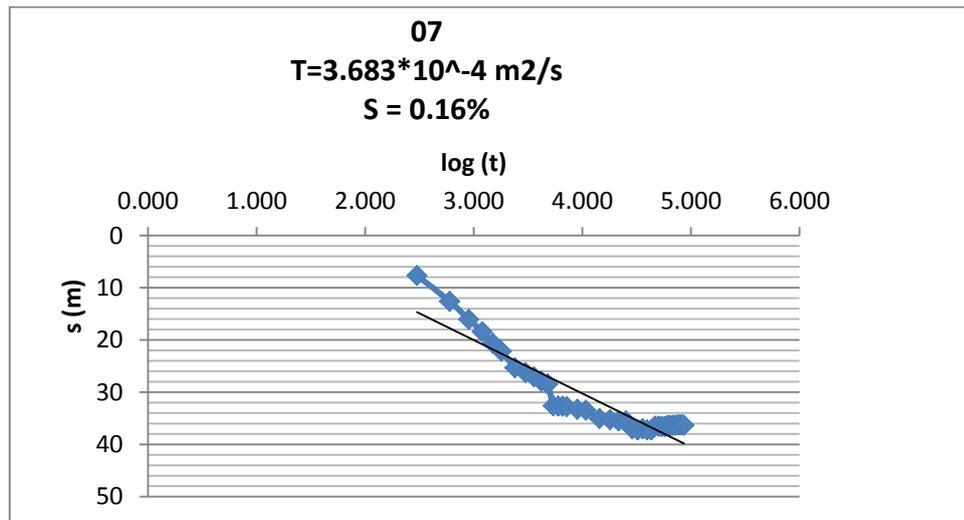


Figure IV.3 : Graphes rabattement – temps.

Tableau IV.1 : Résultats donnant les valeurs de T et S

N° de graphe	Transmissivités (m <sup>2</sup> /s)	Coef d’emmagasinement (%)
01	1.38 * 10 <sup>-4</sup>	0.29
02	4.81 * 10 <sup>-4</sup>	0.19
03	4.02 * 10 <sup>-4</sup>	0.14
04	8.05 * 10 <sup>-4</sup>	0.25
05	3.76 * 10 <sup>-4</sup>	0.19
06	3.61 * 10 <sup>-4</sup>	0.16
07	3.68 * 10 <sup>-4</sup>	0.16

La transmissivité et le coefficient d’emmagasinement de la nappe étudiée sont déterminés à partir de calcul de la moyenne des essais de pompage effectué.

$$T = \frac{\sum T_i}{7} = 4.18 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$S = \frac{\sum S_i}{7} = 0.20 \%$$

Les résultats obtenus seront pris en considération pour les calculs des venues d’eau prévisionnelles.

Pour vérifier la fiabilité des résultats obtenus, on les compare aux résultats des essais effectués en 1993 pour la même zone d'étude par l'ENOF.

## 2. Résultats des essais effectués en 1993

Au début de l'année 1993, un essai de pompage de 72 heures dans un sondage hydrogéologique a été exécuté, le débit de pompage est de l'ordre de  $12\text{m}^3/\text{h}$ . L'essai proprement dit a été précédé par des essais de développement et de nettoyage à l'héxamétaphosphate des ouvrages hydrogéologiques situés dans la partie centrale du gisement (Pr. 0 – Pr. 15).

Les résultats des observations des mesures des niveaux d'eau dans les piézomètres au cours de la descente (72H) et la remontée (24H) sont consignés dans ce qui suit.

Le suivi de débits et des niveaux piézométriques depuis le début de l'exhaure a permis de faire les premières estimations sur les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère, un débit moyen de  $12\text{m}^3/\text{h}$  a été adopté pour les calculs.

Les calculs pour la descente ont abouti aux résultats moyens suivants :

**Tableau IV.2 : Valeurs de T et S en 1993.**

s = f (log t)			s = f (log (t/r <sup>2</sup> ))		
Points de mesure	Valeur de T (*10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s)	Valeur de S (%)	Point de mesure	Valeur de T (*10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s)	Valeur de S (%)
01	4.45	0.190	01	4.91	0.200
02	4.14	0.170	02	4.19	0.170
03	3.85	0.160	03	3.59	0.210
04	4.48	0.150	04	3.82	/
Moyenne	4.23	0.168	Moyenne	4.13	0.193

L'essai de pompage proprement dit sur le sondage hydrogéologique, a donné des valeurs de transmissivité de  $3.59 \cdot 10^{-4}$  à  $4.91 \cdot 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s. les résultats de cet essai seront pris en considération pour les calculs des venues d'eau prévisionnelles.

Nous retenons la transmissivité moyenne (Descente de l'essai de pompage)

$$T_{\text{moyenne}} = \frac{(4.23 \cdot 10^{-4}) + (4.13 \cdot 10^{-4})}{2}$$

$$T_{moyenne} = 4.18 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{s}$$

Le coefficient d'emmagasinement à 0.168% pour  $s = f(\log t)$

et 0.193 % pour  $s = f(\log (t/x^2))$

Donc la moyenne est de

$$S_{moy} = \frac{0.17\% + 0.19\%}{2} = 0.18\%$$

La transmisivité estimée par la remontée a été calculée deux fois, dont les valeurs étaient de :

- $T = 4.00 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
- $T = 3.60 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

On remarque que les résultats trouvés à partir des essais de 1993 et 2008 sont concordants.

#### IV.4. Prévisions des venues d'eau “ Profil 10 au Profil 15 ”

Pour le calcul des venues d'eau la formule du grand puits (formule de Dupuit pour une nappe libre) est utilisée en générale pour les travaux miniers.

En reprenant l'équation (14) dans le chapitre précédant dans la section III.3.3.1 :

$$Q_p = \pi K \frac{H^2 - h_1^2}{\ln(R_a/r_1)} \quad \text{formule de Dupuit}$$

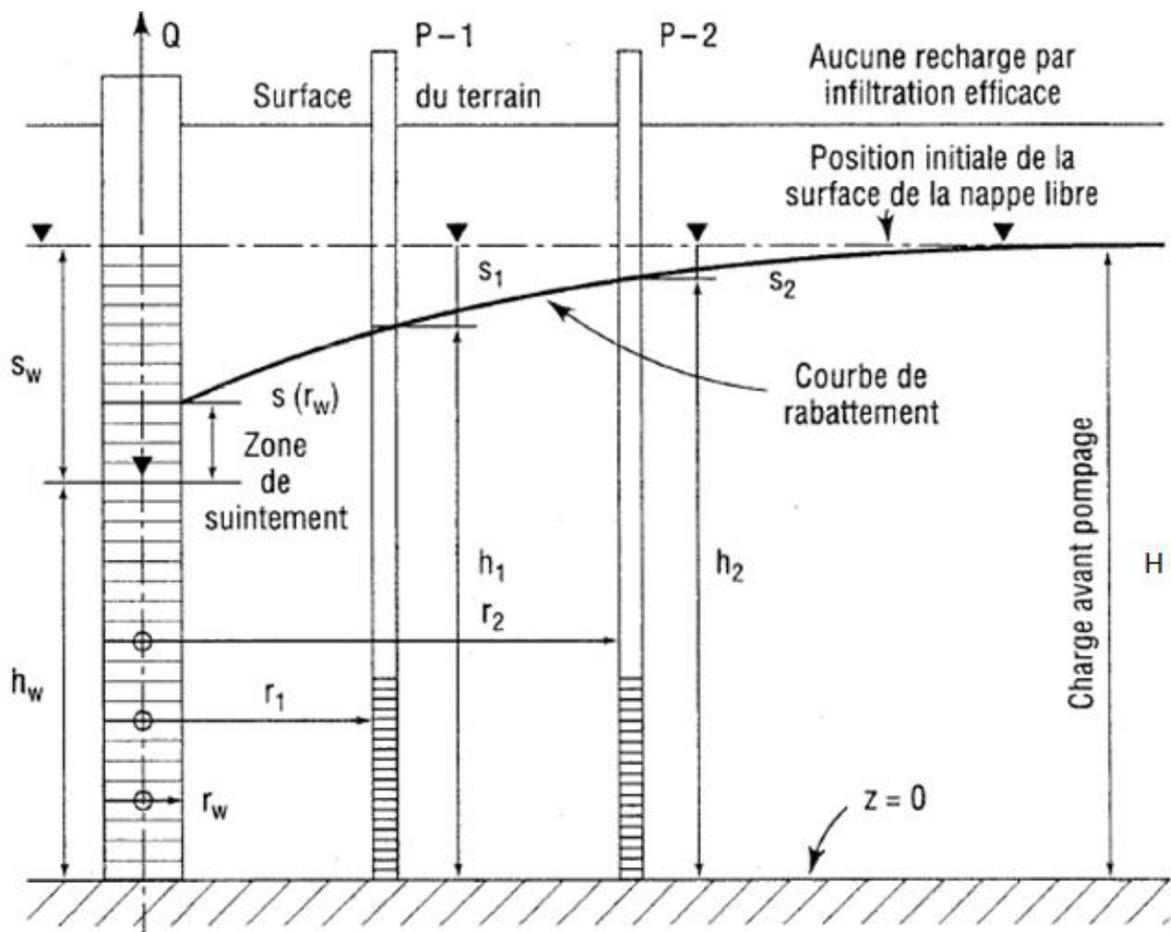


Figure IV.4 : Courbe de rabattement dans une nappe libre.

On a :

$$h = H - s$$

$$Q_p = \pi K \frac{H^2 - (H - s)^2}{\ln(R_a/r)}$$

$$Q_p = \pi K \frac{H^2 - (H^2 - 2Hs + s^2)}{\ln(R_a/r)}$$

Donc :

$$Q_p = \frac{1.366 * K * s * (2H - s)}{\log R_a - \log r} \quad (4)$$

$Q_p$  : débit prévu ( $m^3/h$ ) ;

$K$  : coefficient de perméabilité (m/s) ;

$s$  : rabattement (m) ;

$r$  : rayon des ouvrages miniers (m) ;

$R_a$  : rayon d'action (m) ;

$H$  : épaisseur de la couche aquifère (m) ;

$h$  : la distance entre le substratum imperméable et le niveau dans la galerie (m).

#### a. Données de base

##### Coefficient de perméabilité

$$T = K H \rightarrow K = \frac{T}{H} \quad (5)$$

##### Rayon d'action

Pour le calcul du rayon d'action, il existe deux méthodes :

##### - Méthode de Sichardt

$$R_a = 3\,000 h \sqrt{K} \quad (6)$$

$K$  : Coefficient de perméabilité, en m/s;

$h$  : La charge totale, en m.

Les essais de pompage sont effectués au-delà du profil 15, dont la charge totale de 110 m, donc avec une perméabilité de  $K = T/H = 3.80 * 10^{-6}$  m/s.

Alors  $R_a = 644$  m.

##### - Méthode de Kusakin : c'est la méthode la plus utilisée pour les ouvrages miniers.

$$R_a = r + R \quad (7)$$

$r$  : rayon des ouvrages miniers (rayon fictif), en m.

##### Rayon des ouvrages (fictif)

$$F = \pi r^2 \rightarrow r = \sqrt{\frac{F}{\pi}} \quad (8)$$

Selon la formule de KUSAKIN :

$$R = 575 s \sqrt{K H} \quad (9)$$

On retiendra par la suite des calculs la méthode de Kusakin car elle est plus utilisable pour les ouvrages miniers et elle peut nous donner le rayon d'action pour chaque profil.

### Prévisions des venues d'eau par profil

*Tableau IV.3 : Prévisions des venues d'eau par profil*

Profil	r (m)	H (m)	s(m)	K (m/s)	R <sub>a</sub> (m)	Q <sub>p</sub> prévu (m <sup>3</sup> /h)
Puits	2	35	25	1,19E-05	296	30
P10	25	35	8	1,19E-05	119	43
P11	30	40	30	1,05E-05	383	70
P12	80	55	40	7,60E-06	550	125
P13	105	70	55	5,97E-06	752	161
P14	170	90	70	4,64E-06	993	229
P15	223	110	90	3,80E-06	1281	288
Valeurs à prendre	223	63	43	6,63E-06	729	226

Pour le calcul on retiendra le rayon d'action moyen  $R_a = 729$  m, mais pour le débit on prend pour le calcul le débit du profil 15 ( $Q = 288$  m<sup>3</sup>/h), car nous allons installer notre système de pompage au-delà du profil 15.

### CONCLUSION

Au terme de ce chapitre, les formations hauteriviennes paraissent bien aquifères avec des caractéristiques plus ou moins importantes dont l'ordre de grandeur a été estimé par les calculs précédents.

L'étude hydrodynamique et les essais de pompage, ont permis d'atteindre l'objectif assigné qu'il était la détermination des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère.

- ✓ Le niveau statique de la nappe est rencontré à la cote 972 m.

On retiendra donc pour la suite des calculs à effectuer les paramètres suivant :

- ✓ Les valeurs moyennes des caractéristiques hydrodynamiques de la nappe selon les essais de pompage sont les suivant :

Transmissivité (T) =  $4.18 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Coefficient d’emménagement (S) = 0.2%.

Epaisseur de la couche aquifère (H) = 63 m.

Perméabilité (K) =  $6.63 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ .

Rayon de l’ouvrage (r) = 223 m.

Rayon d’action (R) = 729 m.

Tableau IV.4 : Valeurs de la perméabilité selon la granulométrie.

<b>PERMÉABILITÉ (K)</b>	en m/s ►	$10^1$	1	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$	$10^{-9}$	$10^{-10}$
	en darcy cm/s ►	$10^3$	$10^2$	$10^1$	1	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$
<b>GRANULOMÉTRIE</b>	homogène ►	graviers		sable pur	sable très fin			silt		argiles			
	diamètre des grains en mm ►	2		0.25	0.06			0.002					
	variée ►	graviers gros et moyens	graviers et sables	mélange sable, argile, limons					argiles				
<b>TYPES DE FORMATIONS</b>	roches perméables				semi-perméables					impermeables			

Selon ce tableau on remarque bien qu’avec cette valeur de perméabilité du site de Chaabet El-Hamra on est dans une zone de mélange de sable, argile et limons (sable très fin), donc on est dans une région semi-perméable.

Ces mêmes valeurs sont prises comme référence pour le calcul prévisionnel des venues d’eau par niveau et par profil.

L’évolution des niveaux d’eaux au cours des travaux miniers doit être suivie par un réseau de piézomètres dans les différents compartiments du gisement, car ce dernier à une tectonique très développée.

La piézométrie sera surveillée avec précaution en tenant compte de la protection et de la différence des niveaux entre compartiment.

## IV.5. Estimation de la durée de rabattement

### IV.5.1. Introduction

La possibilité de prolonger et de maintenir l'activité de cette mine, pendant plusieurs années existe, elle nécessite au préalable un rabattement du niveau d'eau de 30 m sous les niveaux à exploiter.

Pour cela, on applique une approche théorique, il s'agit en l'occurrence de rabattre le niveau de la nappe à partir de la surface, la méthode proposée est le rabattement artificiel aux moyens de forages d'exhaure traversant toute la couche aquifère.

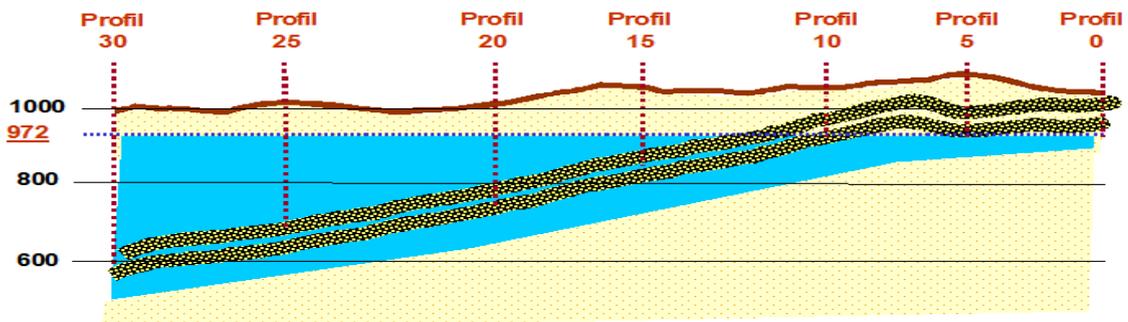
Le principe de base, du rabattement artificiel de 30 m sous les travaux miniers avec un système d'exhaure composé d'une batterie de forages et un réseau piézométrique de surveillance.

Les forages seront situés en dehors des travaux miniers, pour s'assurer que la qualité de l'eau extraite ne sera pas influencée par les travaux dans la mine, et pour contribuer au rabattement de front de taille de la nappe, ce qui implique des travaux miniers à sec et une bonne qualité de l'eau extraite. Pour cela on doit donc placer les forages au-delà du profil 15.

Donc la poursuite des travaux sous le niveau hydrodynamique est conditionnée par la réalisation d'un système de pompage rationnel qui permettra le rabattement du niveau d'eau sous le mur de la minéralisation.

## LE GISEMENT DE CHAABET EL HAMRA

### Situation initial du niveau hydrostatique (côte 972)



*Figure IV.5 : Situation initiale du niveau hydrostatique (ENOF).*

Tableau IV.5 : Le niveau d'eau à rabattre pour chaque profil

	profil 10	profil 11	profil 12	profil 13	profil 14	profil 15
Niveau statique	972	972	972	972	972	972
Ménéralisation	960	953	947	926	914	882
lame d'eau à 0 m*	12	19	25	46	58	90
lame d'eau à 30 m	42	49	55	76	88	120

\* : Lamme d'eau au-dessus du mur de la minéralisation.

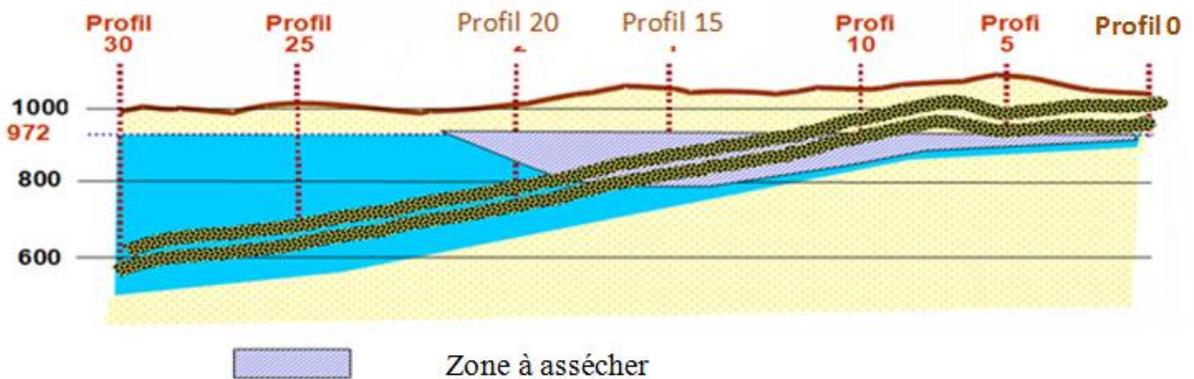


Figure IV.6 : Zone à assécher.

#### IV.5.2. Calcul du débit d'un forage

On utilise la formule (4) du grand puits, qui est généralement utilisée pour les travaux miniers, pour calculer le débit d'un forage avec des points spécifiques où les venues d'eau sont importantes, donc là où on veut installer le système de pompage qui sera entre les profils 15 et 17. Dont les paramètres sont les suivants :

- L'épaisseur moyen  $H = 116$  m ;
- Le rabattement maximal qu'on peut atteindre  $s = 116$  m ;
- Le rayon du forage  $r = 0.20$  m ;
- Le rayon d'action  $R_a = 729$  m
- La perméabilité  $K = 3.73 \cdot 10^{-6}$  m/s

Formule du Thiem – Dupuit (grand puits):

$$Q \text{ (m}^3\text{/s)} = \frac{1.366 * K * s * (2H - s)}{\log R_a - \log r}$$

Application numérique :

$$Q_{\text{Forage}}(\text{m}^3/\text{h}) = 69 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{\text{Forage}}(\text{l/s}) = 19.20 \text{ l/s}$$

#### IV.5.3. Détermination de nombre de forages

Selon la formule de la SONAREM qui est utilisée depuis plus de 50 ans :

$$N = (Q_{\text{prévu}}/Q_{\text{forage}}) + 1 \quad (10)$$

$$N = (288 / 69) + 1 = 5 \text{ Forages.}$$

Cinq forages d'exhaure seront donc implantés pour assécher la partie inférieure de la mine à exploiter.

#### IV.5.4. Emplacement des forages

On propose un système d'exhaure qui puise l'eau directement de l'aquifère et loin des travaux miniers, du point de vue qualité de l'eau on doit implanter les forages en dehors des travaux miniers, pour cette raison les risques de contaminations seront très réduites donc l'eau serait de meilleur qualité que celle pompé à partir des travaux miniers.

Donc les forages doivent être situés entre les profils 15 et 17.

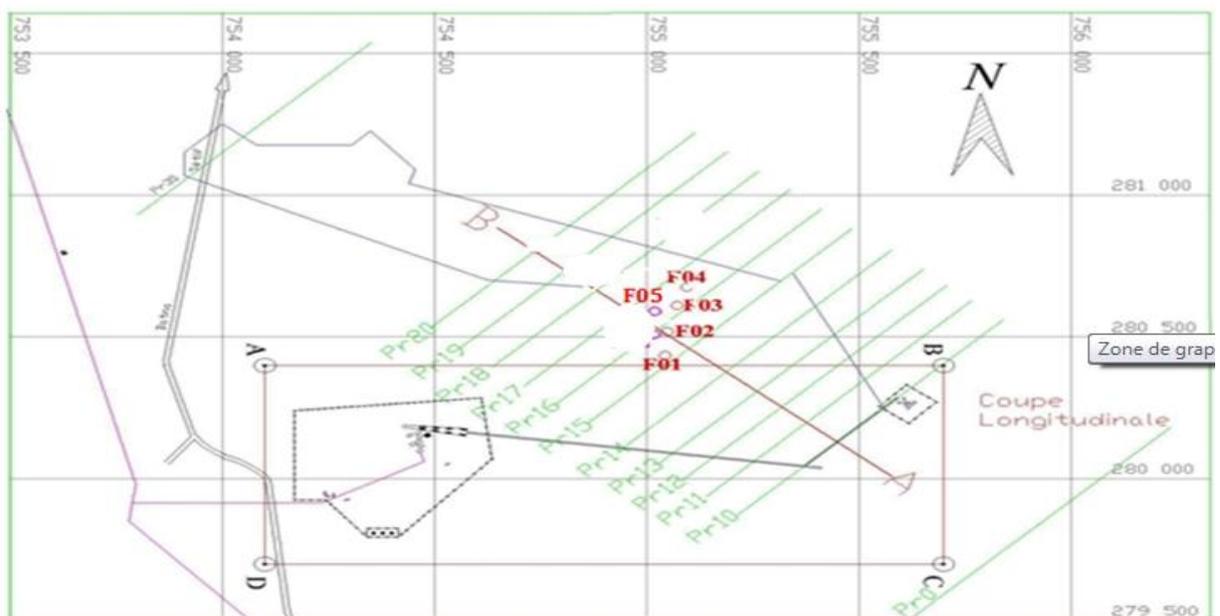


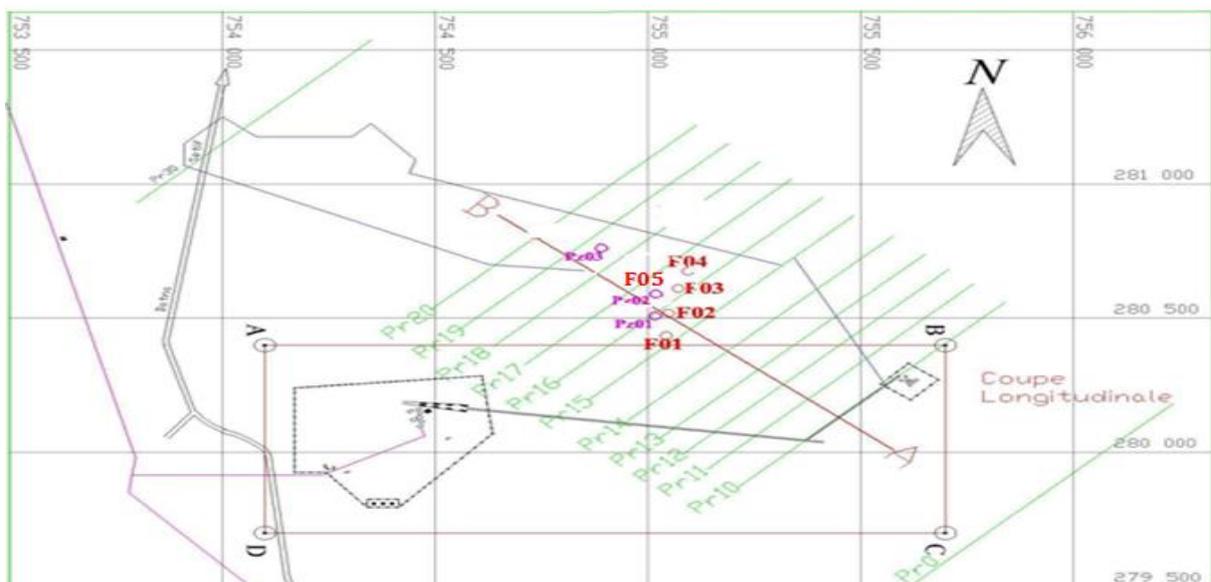
Figure IV.7 : Emplacement des forages.

**IV.5.5. Caractéristiques des forages**

*Tableau IV.6 : Caractéristiques des forages.*

N° forage	Coordonnées			Profondeur (m)
	X	Y	Z	
F01	05 31 15	35 47 22	1 039	250
F02	05 31 16	35 47 25	1 054	250
F03	05 31 17	35 47 28	1 056	250
F04	05 31 18	35 47 30	1 048	250
F05	05 31 14	35 47 24	1 053	250

La poursuite des travaux sous le niveau hydrodynamique nécessite un contrôle des niveaux piézométriques quelque soit la méthode d'exhaure maintenue. Donc l'évolution des niveaux d'eau au cours des travaux miniers doit être suivie par un réseau piézométrique dans les différents compartiments du gisement, on propose un réseau piézométrique de trois piézomètres.



*Figure IV.8 : Emplacement des forages et des piézomètres.*

**IV.5.6. Caractéristique des pompes**

Les forages seront implantés en dehors des travaux miniers et équipés de pompes immergées.

La méthode de calcul utilisée est donnée par le formulaire de l'hydraulique générale

Calcul de la puissance des pompes d'exhaure :

P : Puissance nécessaire en [kW]

$\gamma$  : Poids volumétrique de l'eau [Kg/m<sup>3</sup>] (1000)

H : Hauteur manométrique [m] (250)

Q : Débit [m<sup>3</sup>/s] (0.020)

$\mu$  : Coefficient de rendement de la pompe [0.70 - 0.85]

$$P = \gamma Q H / 100 \mu \quad (10)$$

$$P = 1000 * 0.020 * 250 / 100 * 0.85$$

$$P = 59 \text{ kW}$$

**Caractéristiques électriques et hydrauliques du groupe électropompes (GEP) des forages**

*Tableau IV.7 : Caractéristiques électriques et hydrauliques du GEP des forages.*

<u>Moteur</u>		<u>pompe</u>	
DESIGNATIONS	CARACTERISTIQUES	DESIGNATIONS	CARACTERISTIQUE
TYPE	PO-M08-4G-63	TYPE	XN8-G 11
PUISSANCE	63 kW	HMT	250 m
NBR DE TOURS	2850 Tr/min	DEBIT M <sup>3</sup> /H	95 M3/H
TENSION	380 V	MOT TYPE	885
FREQUENCE	50hz	PUISSANCE	62 kW
INTENSITE	130 A	NOMBRE DE TOURS	2900
FACTEUR DE PUISSANCE	0.87		
IP 68	10 BAR		
MASSE	175 KG		

#### IV.4.7. Calcul du rabattement en fonction du temps avec 5 forages

Le débit prévisionnel des pompes est augmenté de 15 à 20% pour prévoir l'usure suite à un fonctionnement continu, les débits des pompes seraient au moins de 20 l/s chacune.

Sur la base d'un débit de pompage de 360 m<sup>3</sup>/h, avec la prise en compte d'un coefficient de rendement des installations de pompage de 80% ; les délais de rabattement de la nappe de Chaabet El-Hamra seront calculés en fonction du temps et de distance suivant la formule de Theis-Jacob ci-après :

$$s = \frac{0.183 * Q}{T} * \log \frac{2.25 * T * t}{S * r^2}$$

s = Rabattement mesuré en m

Q= Débit de pompage constant en m<sup>3</sup>/s

T = Transmissivité m<sup>2</sup>/s

t = temps écoulé à un instant donné en secondes

S = Coefficient d'emménagement, sans dimension

r = Distance en m

**Tableau IV.8 : Variation du rabattement en fonction du temps t et des distances (r).**

			Pr 10	Pr 11	Pr 12	Pr 13	Pr 14	Pr 15
		distance (m)	612	512	432	352	252	156
		N.S	972	972	972	972	972	972
		Ménéralisation	960	953	947	926	914	882
		lame d'eau à 0 m	12	19	25	46	58	90
		lame d'eau à 30 m	42	49	55	76	88	120
			Rabattement s en m					
t (mois)	t (jours)	t (min)	Pr 10	Pr 11	Pr 12	Pr 13	Pr 14	Pr 15
<b>0.000116</b>	0.0035	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>0.004167</b>	0.125	180	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>0.0083</b>	0.25	360	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>0.0125</b>	0.375	540	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>0.0167</b>	0.5	720	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>0.0208</b>	0.625	900	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.72

<b>0.0333</b>	1	1440	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.67
<b>0.0667</b>	2	2880	0.00	0.00	0.00	0.00	4.17	20.40
<b>0.1000</b>	3	4320	0.00	0.00	0.00	0.00	11.03	27.26
<b>0.1333</b>	4	5760	0.00	0.00	0.00	4.59	15.90	32.13
<b>0.1667</b>	5	7200	0.00	0.00	1.44	8.37	19.68	35.91
<b>0.2000</b>	6	8640	0.00	0.00	4.52	11.45	22.76	38.99
<b>0.2333</b>	7	10080	0.00	1.38	7.13	14.06	25.37	41.60
<b>0.2667</b>	8	11520	0.00	3.64	9.39	16.32	27.63	43.86
<b>0.3000</b>	9	12960	0.00	5.63	11.38	18.31	29.62	45.85
<b>0.3333</b>	10	14400	1.38	7.41	13.16	20.10	31.41	47.64
<b>0.4000</b>	12	17280	4.46	10.50	16.25	23.18	34.49	50.72
<b>0.5000</b>	15	21600	8.24	14.28	20.03	26.96	38.27	54.50
<b>0.6667</b>	20	28800	13.11	19.14	24.89	31.83	43.14	59.37
<b>0.8333</b>	25	36000	16.88	22.92	28.67	35.60	46.91	63.14
<b>1</b>	30	43200	19.97	26.01	31.76	38.69	50.00	66.23
<b>2</b>	61	87840	31.98	38.01	43.76	50.70	62.01	78.24
<b>3</b>	92	132480	38.93	44.97	50.72	57.65	68.96	85.19
<b>4</b>	120	172800	43.43	49.46	55.21	62.15	73.46	89.69
<b>5</b>	151	217440	47.31	53.35	59.10	66.03	77.34	93.57
<b>6</b>	181	260640	50.38	56.42	62.17	69.10	80.41	96.64
<b>7</b>	212	305280	53.06	59.09	64.84	71.78	83.09	99.32
<b>8</b>	242	348480	55.30	61.33	67.08	74.01	85.33	101.56
<b>9</b>	273	393120	57.34	63.37	69.12	76.05	87.37	103.60
<b>10</b>	304	437760	59.16	65.19	70.94	77.87	89.19	105.42
<b>11</b>	334	480960	60.75	66.79	72.54	79.47	90.78	107.01
<b>12</b>	365	525600	62.25	68.29	74.04	80.97	92.28	108.51
<b>13</b>	395	568800	63.59	69.62	75.37	82.31	93.62	109.85
<b>14</b>	426	613440	64.87	70.90	76.65	83.58	94.89	111.13
<b>15</b>	457	658080	66.05	72.09	77.84	84.77	96.08	112.31
<b>16</b>	486	699840	67.10	73.13	78.88	85.81	97.12	113.36
<b>17</b>	517	744480	68.14	74.18	79.93	86.86	98.17	114.40

18	547	787680	69.10	75.13	80.88	87.81	99.13	115.36
19	578	832320	70.03	76.07	81.82	88.75	100.06	116.29
20	608	875520	70.88	76.92	82.67	89.60	100.91	117.15
21	639	920160	71.73	77.76	83.51	90.45	101.76	117.99
22	670	964800	72.53	78.57	84.32	91.25	102.56	118.79
23	700	1E+06	73.27	79.31	85.06	91.99	103.30	119.53
24	731	1E+06	74.00	80.04	85.79	92.72	104.03	120.26
25	761	1E+06	74.68	80.72	86.47	93.40	104.71	120.94
26	792	1E+06	75.36	81.40	87.15	94.08	105.39	121.62
27	823	1E+06	76.01	82.05	87.80	94.73	106.04	122.27
28	851	1E+06	76.57	82.61	88.36	95.29	106.60	122.83
29	882	1E+06	77.18	83.22	88.97	95.90	107.21	123.44

Tableau IV.9 : Délais de Rabattement pour chaque profil.

Profils	Profil 10	Profil 11	Profil 12	Profil 13	Profil 14	Profil 15
Délais de rabattement (mois)	04	04	04	09	10	24

La figure suivante représente les rabattements en fonction du temps pour chaque profil

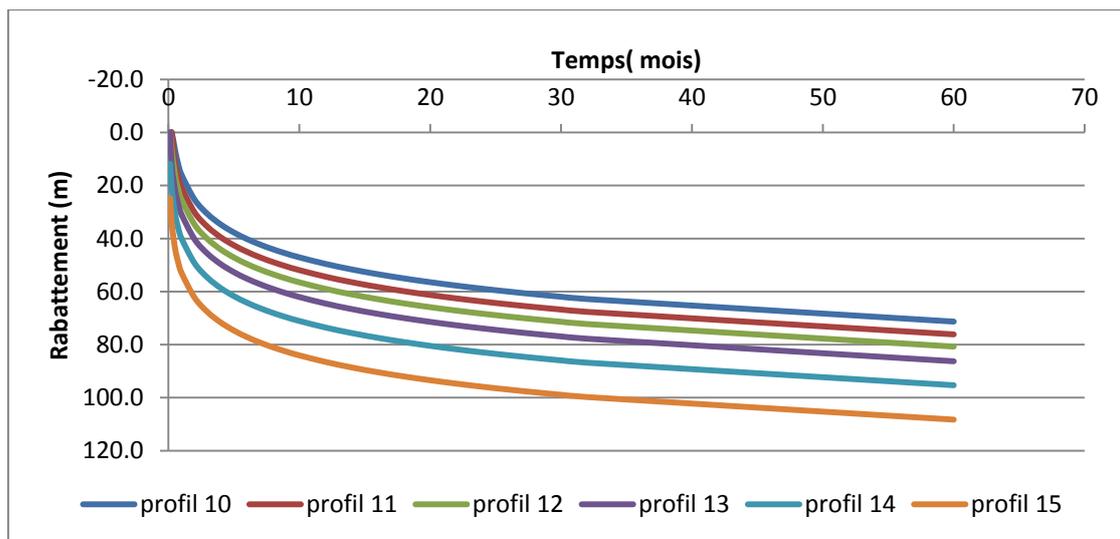


Figure IV.9 : Rabattement en fonction du temps pour chaque profil.

Le pompage provoque aux environs de la mine un rabattement des niveaux d'eau « cône de dépression » ce qui facilite l'exploitation du minerai

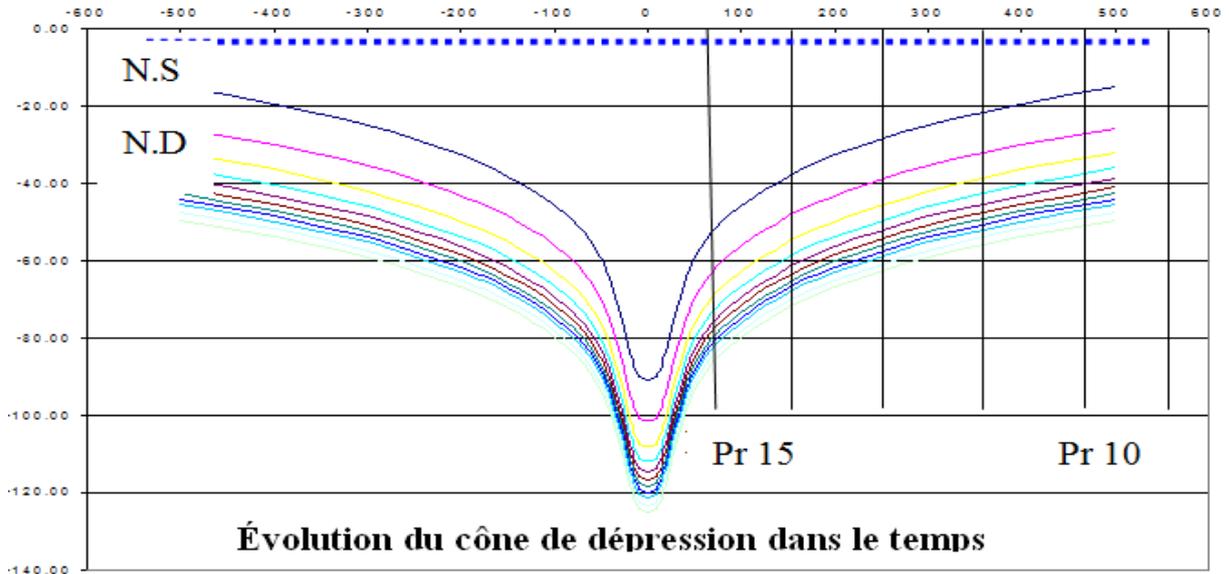


Figure IV.10 : Evolution de cône de dépression dans le temps.

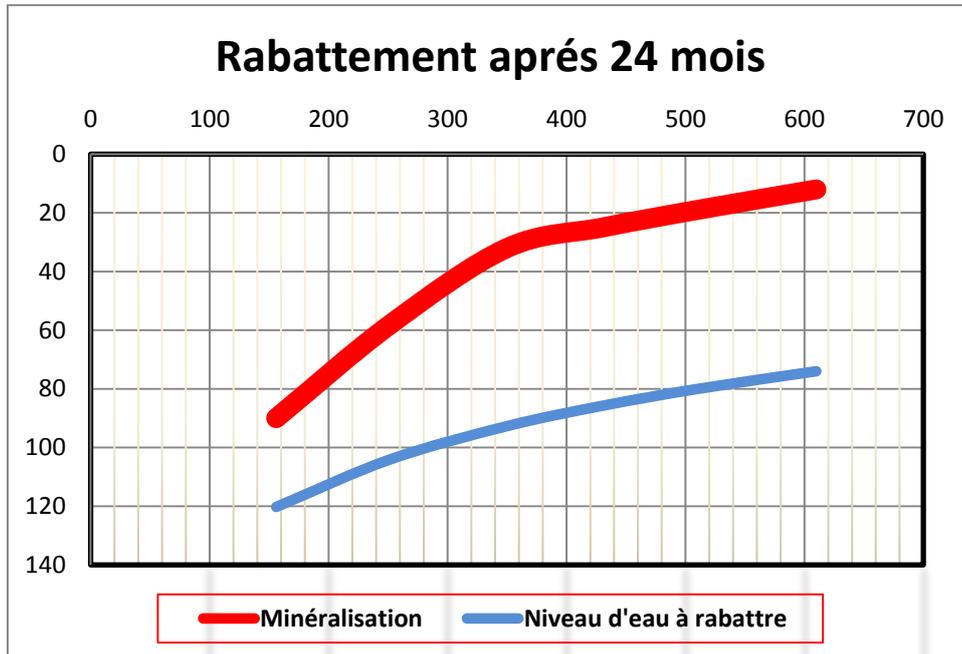


Figure IV.11 : Le niveau d'eau par rapport à la minéralisation après 24 mois.

**IV.5. Conclusion**

- Le délai de rabattement de la nappe à 30 m sous la minéralisation jusqu'au profil 15 est estimé à 24 mois ;
- Le système de pompage mis en place (pompes placées en surface) est un système efficient, car l'installation est facilement accessible pour son exploitation et son entretien. La position des forages réalisés (entre les profils 15 et 17) permet un rabattement du profil 15 sans que ces forages soient perturbés par des travaux miniers.

## Chapitre V

# Qualité et utilisation de l'eau extraite

### V.1. Introduction

Même si la plupart des essais de pompage visent principalement à observer les niveaux d'eau et les débits de pompage, la surveillance de la qualité de l'eau peut aussi être un élément important de l'essai et devrait être prise en compte lors de la planification de l'implantation des forages, parce que la qualité de l'eau et la santé sont étroitement liées.

L'hydrochimie constitue une partie essentielle pour suivre l'évolution de la qualité des eaux souterraines.

L'objectif essentiel de ce chapitre sera de s'assurer que la qualité de l'eau d'exhaure correspond aux normes de potabilité de l'eau, donc les eaux extraites par le système de pompage installé, peuvent être utilisées pour alimenter la région d'Ain Azel.

### V.2. Paramètres chimiques

En général, les principaux ions choisis feront l'objet d'une cartographie automatique. Les éléments chimiques retenus sont les suivants :

- Cations :  $\text{Na}^+$  ;
- Anions :  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  ;
- Et la conductivité électrique CE.

Le choix de ces paramètres est justifié par plusieurs raisons :

- La CE représente la minéralisation des eaux, elle nous informe sur la charge saline des eaux souterraines ;
- Le Sodium est un élément contraignant, sa présence peut être reliée à la proximité de la mer ;
- Les chlorures sont associés à la mer et également à la pollution ;
- Les Nitrates ont pour origine la pollution.

Les eaux souterraines profondes ont une minéralisation plus stable dans le temps et plus importante que les eaux de surface ou de subsurface.

### V.3. Caractéristiques des paramètres chimiques

#### V.3.1. Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique exprimée en ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ ) mesure la minéralisation. Elle dépend de la concentration en diverses substances minérales dissoutes lors de la traversée par l'eau des différentes roches.

#### V.3.2. Nitrates ( $\text{NO}_3^-$ )

Les nitrates en ( $\text{mg}/\text{l}$ ) sont des sels minéraux dissous, dont les plus nocifs sont les composés de l'azote, leur concentration provoque des troubles graves chez les jeunes vertébrés. Rarement rencontrés dans les formations géologiques, les nitrates sont essentiellement d'origine agricole.

#### V.3.3. Chlore ( $\text{Cl}^-$ )

La teneur en chlore en ( $\text{mg}/\text{l}$ ) des eaux est extrêmement variée, elle peut subir des variations provoquées :

- Dans les zones arides par un lessivage superficiel en cas de fortes pluies ;
- En zones côtières par des infiltrations d'eaux de mer dans les nappes, en particulier lors des pompages excessifs ;
- Par des rejets d'animaux et humaines (urines).

#### V.3.4. Sodium ( $\text{Na}^+$ )

Le sodium est un élément constant de l'eau, sa concentration en ( $\text{mg}/\text{l}$ ) est parfois variable, indépendamment des formations géologiques contenant du chlorure de sodium, le sel peut provenir de la décomposition de sels minéraux comme les argiles sodiques, des retombées d'origine marine et de la venue d'eaux salées dans les aquifères.

D'une façon générale, il n'existe pas de dangers dans l'absorption de quantités relativement importantes, sauf pour certains malades.

### V.4. Impact sur l'environnement

Les caractéristiques de l'eau rencontrées dans les gisements du type de Chaâbet El Hamra dépendront en premier lieu de la nature et de la répartition des voies d'eau souterraines, ainsi que de celles des précipitations atmosphériques et des conditions géologiques.

L'eau souterraine en circulation est non seulement un créateur, mais aussi un vecteur d'information. L'étude du comportement des substances dissoutes et/ou transportées permet de renseigner sur le fonctionnement hydro - chimique des aquifères.

La qualité et la quantité des substances en solution dans l'eau permettent de renseigner sur les minéraux qui ont été dissous et, par conséquent, sur la nature des terrains traversés par l'eau.

L'abondance relative de ces solutés peut aussi fournir des indications sur les lieux les plus favorables à la mise en solution.

L'eau contient donc en solution une information très complète, concernant l'essentiel de son histoire souterraine.

En effet, les réactions chimiques, en particulier celles de la dissolution, de même que les processus physiques, ne sont pas instantanées.

La réalisation complète de l'ensemble des réactions d'un système chimique ; aboutissant à la dissolution ou à la précipitation ; demande un temps plus ou moins long.

Le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre entre toutes les réactions en présence, dépend d'un certain nombre de facteur:

- Pression ;
- Température ;
- Nature et concentration des réacteurs ;
- La surface de contact Eau-Roche...

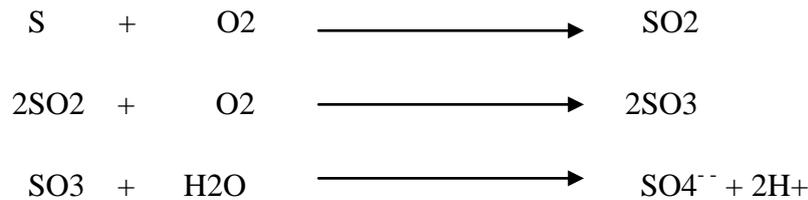
D'autre part la quantité de roches dissoute en un temps donné, à partir d'une surface déterminée, dépend de certaines conditions locales :

- Climat
- Structure
- Morphologie du bassin versant
- Nature des précipitations...

La connaissance précise des réactions chimiques aboutissant à la solubilité des différentes substances, permet de faire apparaître l'expérimentation comme un recours précieux dans l'interprétation des données de terrain.

A titre d'exemple l'ion  $\text{SO}_4^{2-}$ , le plus abondant dans l'eau de Chaâbet El Hamra sera pris comme exemple :

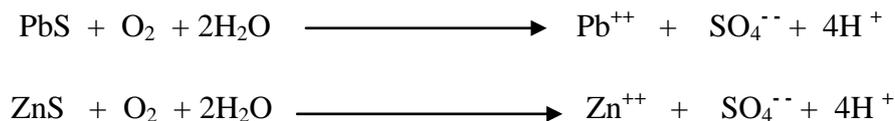
L'ensemble des réactions chimiques peut être résumé de la façon suivante:



L'ion  $\text{H}^+$  libéré peut contribuer à la mise en solution des poussières minérales de l'atmosphère.

Dans les eaux de mine (gisements carbonatés), l'ion sulfate est plus abondant que le bicarbonate. A l'état solide, il est lié au calcium, il constitue le gypse ( $\text{CaSO}_4$ ) qui n'est pas l'unique source des sulfates dans les carbonates, bien qu'il soit toujours à l'origine des teneurs les plus élevées, mais la source la plus probable de l'ion Sulfate est le minerai sulfuré (blende ( $\text{ZnS}$ ), galène ( $\text{PbS}$ ), baryte ( $\text{BaSO}_4$ ), pyrite ( $\text{FeS}_2$ )).

Les sulfures en présence d'eau s'oxydent en donnant des sulfates :



L'oxydation du soufre de la blende et de la galène conduit à la mise en solution du zinc et du plomb (dont les hydroxydes sont insolubles :  $\text{Zn}(\text{OH})_2$  et  $\text{Pb}(\text{OH})_2$ ) et libère en abondance des ions  $\text{H}^+$  qui rendent l'eau agressive.

Cela explique la présence des cavités observées dans les galeries de la mine lors de l'exploitation. Cette dissolution favoriserait la formation d'aquifère.

Dans la chaîne des réactions chimiques, l'oxydation du plomb et du zinc est extrêmement lente.

Donc, la mise en solution de  $\text{SO}_4^{2-}$  par oxydation du minerai sulfuré est une réaction très lente. Elle devrait permettre de caractériser des eaux ayant séjournées longtemps dans le gisement.

L'eau a été prélevée de l'exhaure de la mine, et les analyses n'ont finalement servi que pour l'examen des caractéristiques qualitatives générales des eaux souterraines.

Les analyses disponibles (au nombre restreint) n'étant pas systématiques et la grande variabilité des teneurs des éléments dosés, montrent que les résultats sont aléatoires et d'un intérêt très réduit : ils ne permettent pas d'étudier le fonctionnement hydrochimique des aquifères.

Il est évident que le suivi géochimique des eaux de la mine réalisé jusqu'à présent ne fait pas ressortir les résultats escomptés qui sont le fonctionnement hydrochimique des aquifères.

### V.5. Substances qui influent sur la potabilité de l'eau

La concentration de plusieurs substances chimiques dans les eaux potables varie considérablement suivant les régions, il est impossible d'établir des normes très strictes. Toutefois, le tableau suivant donne les concentrations maximales généralement acceptables par les consommateurs ainsi que les limites admissibles au-delà desquelles la potabilité est sérieusement compromise.

*Tableau V.1 : concentrations acceptables et admissibles des substances qui influent sur la potabilité.*

Substances ou traitement	Maximum acceptable	Maximum admissible
Matières solides totales	500 mg/l	1500 mg/l
Goût	Limites subjectives d'acceptabilité	/
Odeur	Limites subjectives d'acceptabilité	/
Fer (Fe)	0.3 mg/l	1.0 mg/l
Manganèse (Mn)	0.1 mg/l	0.5 mg/l
Cuivre (Cu)	1.0 mg/l	1.5 mg/l
Zinc (Zn)	5.0 mg/l	15 mg/l
Calcium (Ca)	75 mg/l	200 mg/l
Magnésium (Mg)	50 mg/l	150 mg/l
Sulfates (SO <sub>4</sub> )	200 mg/l	400 mg/l
Chlorure (Cl)	200 mg/l	600 mg/l
pH	7.0 à 8.5μ	Moins de 6.5 ou plus de 9.2

*Tableau V.2 : Concentrations admissibles des substances toxiques.*

Substances toxiques	Concentrations maximales admissibles (mg/l)
Plomb	0.05
Arsenic	0.05
Sélécium	0.01
Chrome	0.05
Cyanures	0.20
Cadmium	0.01
Baryum	1.00

D'après les normes internationales des eaux de boissons créées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) en 1965.

*Tableau V.3 : Substances comportant un risque pour la santé.*

Substances	Concentrations maximales admissibles (mg/l)
Nitrates (NO <sub>3</sub> )	45
Fluorure	1.5

## V.6. Résultats obtenus

Cette étude est basée sur les analyses physico-chimiques des échantillons qui sont prélevés dans plusieurs points, dont les résultats sont résumés dans les tableaux suivants :

### V.6.1. Mesures physico-chimiques

*Tableau V.4 : Mesures des paramètres physico-chimiques.*

N° du point	PH	Conductivité (µS/cm)	Résidu sec à 105°C (mg/l)
01	7.26	780	514
02	7.22	930	582
03	7.94	1020	622
04	7.59	780	602
05	7.96	1130	766

**V.6.2. Paramètres de pollution***Tableau V.5 : Paramètres de pollution.*

N° du point	Nitrates (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )
01	2.83
02	31
03	17
04	5
05	19

**V.6.3. Anions et Cations en mg/l***Tableau V.6 : Cations et anions.*

N° point	Calcium (CA <sup>++</sup> )	Magnésium (Mg <sup>++</sup> )	Sodium (Na <sup>+</sup> )	Potassium (K <sup>+</sup> )	Bicarbonates (HCO <sup>-</sup> )	Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> )	Chlorures (Cl <sup>-</sup> )
01	80.11	36.12	26.00	3.00	335.5	88	30
02	75.51	41.43	58.80	1.32	329.4	104	55
03	81.20	44.98	66.95	3.13	311.1	132	95
04	82.62	34.44	27.86	1.69	317.2	104	30
05	85.84	36.03	91.08	4.73	341.6	168	70

**V.6.4. Métaux lourds en mg/l***Tableau V.7 : Métaux lourds.*

N° point	Fer	Manganèse	Zinc	Chrome	Plomb	Cadmium
02	0.160	0.133	0.132	0.000	0.000	0.000
04	0.249	0.014	0.126	0.000	0.000	0.000

**V.6.5. Conclusion**

Les eaux des forages de Chaabet El-Hamra sont de bonne qualité, donc on peut les utiliser pour l'alimentation en eau potable pour la ville de Ain-Azel de Sétif.

## V.7. Utilisation de l'eau extraite

D'après ce qui précède, l'eau extraite par les forages de Chaabet El-Hamra est de bonne qualité, donc elle sera exploitée par l'entreprise existante dans la région (ADE) pour satisfaire les besoins en eau des habitants de la ville d'Ain-Azel.

Pour cela, on doit réaliser un réseau d'adduction en eau potable avec un réservoir.

### V.7.1. Le réseau d'adduction

#### a. Introduction

On définit par adduction des eaux le transport des eaux à partir des zones de captage vers les ouvrages de stockage ou réservoirs.

Le service d'adduction d'eau potable par réseau est une initiative du programme d'approvisionnement en eau potable, visant à offrir aux populations un accès durable à l'eau potable.

Les forages utilisés dans le site sont identiques, avec un même débit de refoulement qui est estimé à 20 l/s pour chacun.

#### b. Détermination des diamètres des conduites d'adduction :

Les deux chercheurs « J.BONNIN » et « BRESSE » proposent deux formules pour limiter les variations des diamètres :

$$d = \sqrt{Q} : \text{Méthode de BONNIN.}$$

$$d = 1,5\sqrt{Q} : \text{Méthode de BRESS.}$$

Avec :  $d$  : le diamètre exprimer en « m ».

$Q$  : le débit d'apport exprimer en «  $m^3/s$  ».

Application numérique :  $Q = 20 \text{ l/s} = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$

$$d = \sqrt{0,02}$$

$$d = 0,141m$$

$$d = 1,5\sqrt{0,02}$$

$$d = 0,212m$$

Donc on propose comme diamètre le diamètre commercial Ø250.

### V.7.2. Dimensionnement du réservoir

#### a. estimation des besoins en eau

La population d'Ain Azel est estimée à 45 000 habitants, et il est recommandé de prendre une dotation de 150 l/j/habitant.

#### a.1. Calcul du débit moyen journalier

Afin d'estimer le débit journalier moyen de consommation, nous adoptons la formule suivante :

$$Q_{j,moy} = \frac{Dot * N_i}{1000}$$

Avec,

- $Q_{j,moy}$  : consommation journalière moyenne en  $m^3/j$  ;
- Dot : dotation journalière en l/hab/j ;
- $N_i$  : nombre de consommateurs.

Les calculs sont présentés dans le tableau ci-dessous

**Tableau V.8 : Calcul du débit journalier moyen.**

Nombre de population	Dotation (l/j/hab)	$Q_{j,moy}$ ( $m^3/j$ )
45 000	150	6 750

#### - Coefficients d'irrégularités

- $K_j$  : coefficient tenant compte de l'irrégularité de la consommation journalière, il est donné par le rapport

$$K_j = \frac{\text{consommation maximale journalière}}{\text{consommation moyenne journalière}}$$

- $K_o$  : coefficient tenant compte de l'irrégularité de la consommation horaire, il est donné par le rapport

$$K_o = \frac{\text{consommation maximale horaire}}{\text{consommation moyenne horaire}}$$

### - Coefficient de pointe

En tenant compte de toutes les variations dans la consommation, nous affectons au débit moyen journalier un coefficient de majoration afin d'obtenir la valeur du débit de pointe du jour le plus chargé. Ce coefficient varie entre 1,15 et 4,30 il est égal au produit de  $K_j$  et  $K_o$ .

$$Q_{j,max} = K_j * Q_{j,moy} \quad : \text{débit journalier maximal en m}^3/\text{j} ;$$

$$Q_{h,max} = K_j * K_o * Q_{j,moy} \quad : \text{débit horaire maximal en m}^3/\text{j} ;$$

Les calculs sont récapitulés dans le tableau ci-dessous

**Tableau V.9 : Calcul du débit horaire moyen.**

$Q_{j,moy}$ (m <sup>3</sup> /j)	$K_j$	$K_o$	$K_p$	$Q_{j,max}$ (m <sup>3</sup> /j)	$Q_{h,max}$ (m <sup>3</sup> /j)
6 750	1.14	2.01	2.29	7 695	15 467

### a.2. Calcul du débit d'apport

$$Q_{II}^c = K_g * [Q_{j,max} + Q_{ri}]$$

$K_g$  : Coefficient tenant compte des gaspillages et des fuites ;

$Q_{ri}$  : débit d'incendie.

➤ On prend  $K_g = 1,12$  (12%)

$Q_{ri} = 60 \text{ m}^3/\text{h}$  pendant deux heures donc  $120 \text{ m}^3/\text{j}$ .

**Tableau V.10 : Calcul du débit d'apport.**

$Q_{j,max}$ (m <sup>3</sup> /j)	$Q_{ri}$ (m <sup>3</sup> /j)	$K_g$	$Q_{II}^c$ (m <sup>3</sup> /j)	$Q_{II}^c$ (l/s)
7 695	120	1.12	8 752.8	101.3

### a.3. Débit d'adduction

Le débit d'adduction est donné par l'expression suivante :

$$Q_I^c = K_s K_g (Q_{j,max} + Q_{ri}) = K_s Q_{II}^c$$

Avec,

$K_s$  : Coefficient d'amplification tenant compte des besoins technologiques pris égale à 1,1.

**Tableau V.11** : Calcul du débit d'adduction

$Q_{II}^c$ (m <sup>3</sup> /j)	$K_s$	$Q_I^c$ (m <sup>3</sup> /j)	$Q_I^c$ (l/s)
8752.8	1.1	9 628.1	111.44

**b. Calcul de la capacité du réservoir**

Pour déterminer la capacité d'un réservoir, on doit procéder à un découpage en tranches horaires pendant lesquelles le débit reste sensiblement constant.

On a :

$$a = \frac{Q_{II}^c}{24} : \text{Débit horaire moyen de distribution (Débit d'apport)}$$

$$C_h : \frac{V_h}{V_t} (\%) \text{ Coefficient de variation horaire}$$

$V_h$  : Volume d'eau consommé par heure

$V_t = 24 a$  : Volume d'eau apporté

$Q_{ch} = C_h * Q_{II}^c$  : Débit consommé par heure

$$a = \frac{Q_{II}^c}{24} = \frac{8752.8}{24} = 364.7 \text{ m}^3/h$$

Le volume du réservoir est calculé à l'aide de la relation suivante

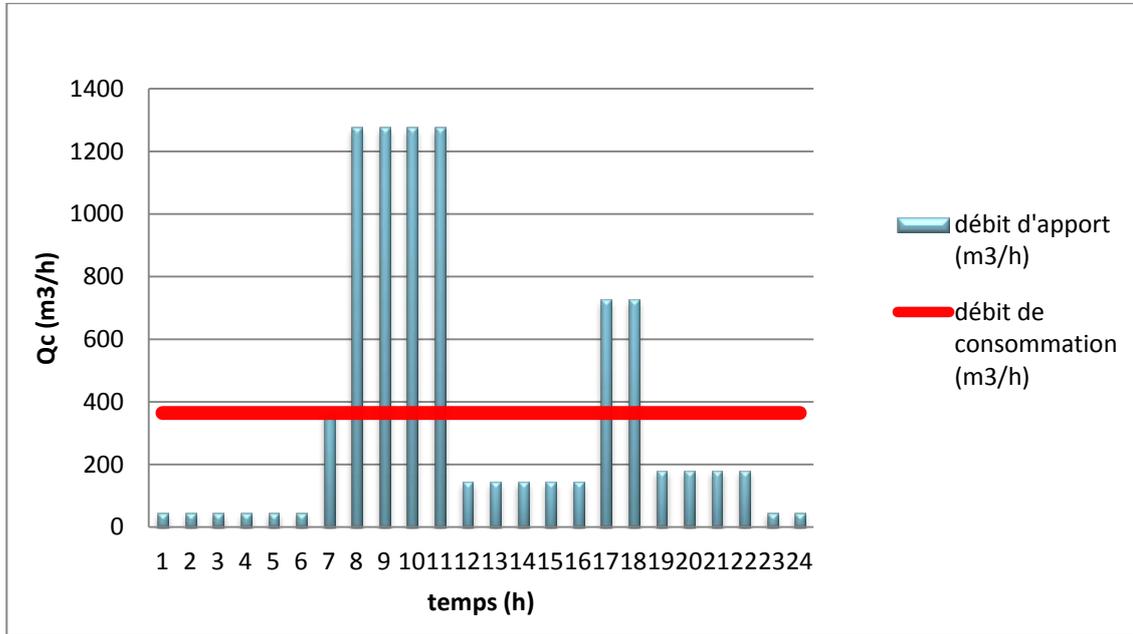
$$V = \max|+\Delta V| + \max|-\Delta V|$$

Tableau V.12 : calcul du volume du réservoir.

Horizon Heure	2012			volume cumulé		différence		
	$C_h$	$a(m^3/h)$	$Q_c(m^3/h)$	Apport ( $m^3$ )	Consommation ( $m^3$ )	$ \Delta V $	$ \Delta V $	
0 ---> 1	0,125	364.7	45.588	364.7	45.588	319.112		
1 ---> 2	0,125	364.7	45.588	729.4	91.176	638.224		
2 ---> 3	0,125	364.7	45.588	1 094.1	136.764	957.336		
3 ---> 4	0,125	364.7	45.588	1 458.8	182.352	1 276.448		
4 ---> 5	0,125	364.7	45.588	1 823.5	227.940	1 595.560		
5 ---> 6	0,125	364.7	45.588	2 188.2	273.528	1 914.672		
6 ---> 7	1,000	364.7	364.700	2 552.9	638.228	1 914.672		
7 ---> 8	3,500	364.7	1 276.450	2 917.6	1 914.678	1 002.922		
8 ---> 9	3,500	364.7	1 276.450	3 282.3	3 191.128	91.172		
9 ---> 10	3,500	364.7	1 276.450	3 647.0	4 467.578		820.578	
10 ---> 11	3,500	364.7	1 276.450	4 011.7	5 744.028		1 732.328	
11 ---> 12	0,400	364.7	145.880	4 376.4	5 889.908		1 513.508	
12 ---> 13	0,400	364.7	145.880	4 741.1	6 035.788		1 294.688	
13 ---> 14	0,400	364.7	145.880	5 105.8	6 181.668		1 075.868	
14 ---> 15	0,400	364.7	145.880	5 470.5	6 327.548		857.048	
15 ---> 16	0,400	364.7	145.880	5 835.2	6 473.428		638.228	
16 ---> 17	2,000	364.7	729.400	6 199.9	7 202.828		1 002.928	
17 ---> 18	2,000	364.7	729.400	6 564.6	7 932.228		1 367.628	
18 ---> 19	0,500	364.7	182.350	6 929.3	8 114.578		1 185.278	
19 ---> 20	0,500	364.7	182.350	7 294.0	8 296.928		1 002.928	
20 ---> 21	0,500	364.7	182.350	7 658.7	8 479.278		820.578	
21 ---> 22	0,500	364.7	182.350	8 023.4	8 661.628		638.228	
22 ---> 23	0,125	364.7	45.588	8 388.1	8 707.216		319.116	
23 ---> 24	0,125	364.7	45.588	8 752.8	8 752.804		0.004	
volume du réservoir								3 647.000

**Graphe de capacité du réservoir non cumulée :**

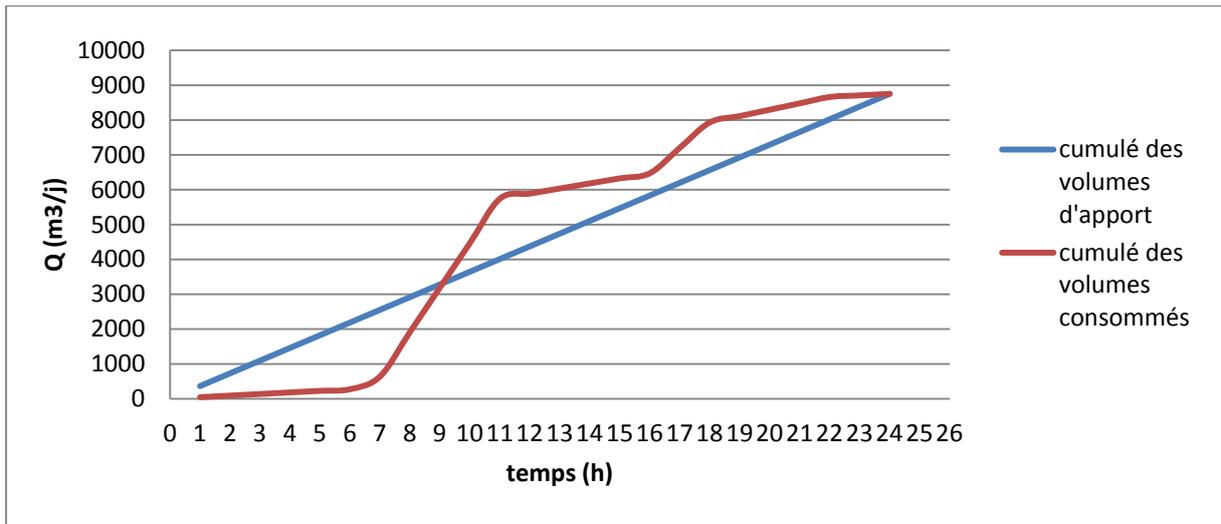
Soit la figure V.1 qui représente le débit consommé non cumulé en fonction du temps sous forme histogramme, ainsi que le débit d'apport.



**Figure V.1 :** Graphe du débit consommé non cumulé en fonction du temps.

**Graphe de capacité de réservoir cumulé :**

Soit la figure V.2 qui représente le débit consommé en fonction du temps, ainsi que le débit d'apport.



**Figure V.2 :** Graphe du débit consommé cumulé en fonction du temps.

**Calcul du volume du réservoir**

Le volume de réservoir est calculé par la formule suivante :

$$V = \max |\Delta V|_+ + \max |\Delta V|_-$$

$$\Rightarrow V = 1\,914.672 + 1\,732.328$$

$$V = 3\,647.0\text{m}^3$$

**On va choisir un réservoir de volume**

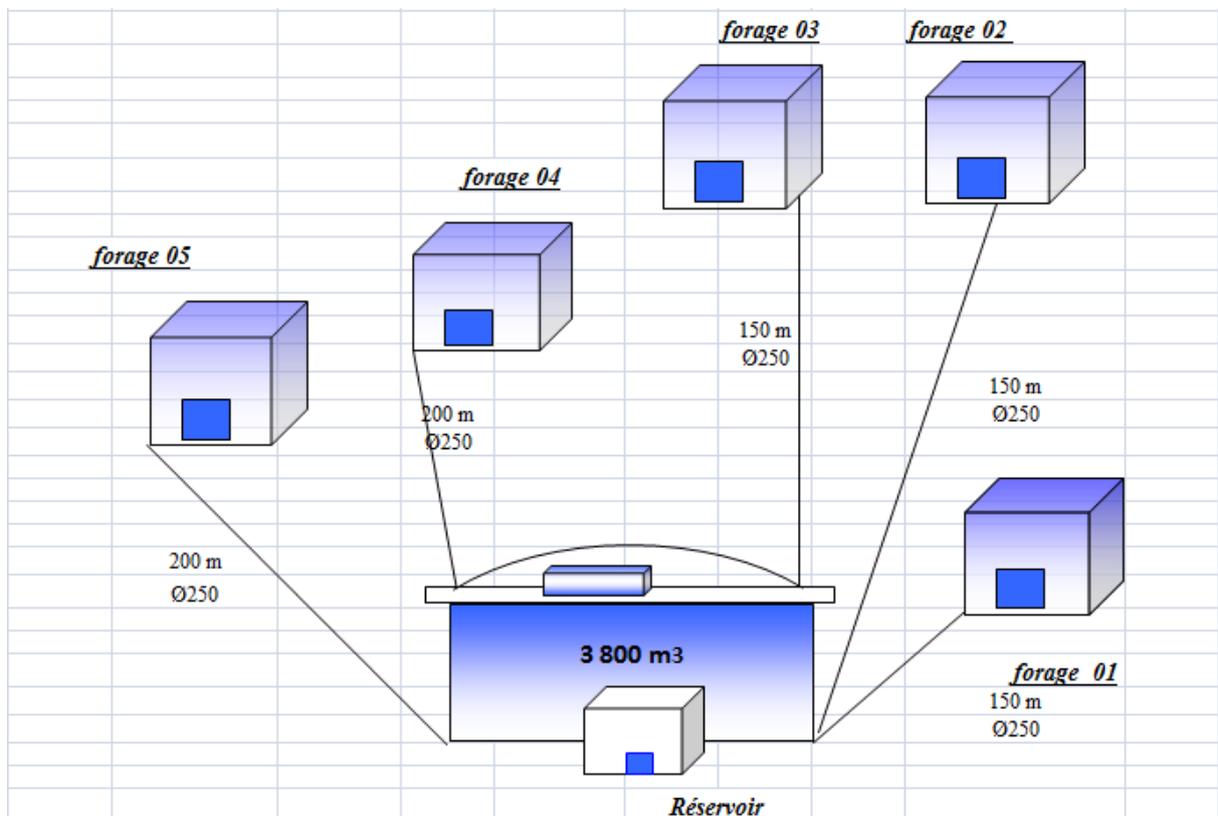
$$V = 3\,800.0\text{m}^3$$

Donc on va choisir un réservoir surélevé rectangulaire dont les dimensions sont les suivantes :

Hauteur : 10m ;

Longueur : 20m ;

Largeur : 19 m.



**Figure V.3 : Schéma synoptique du réseau d'adduction de Chaabet El-Hamra.**

**V.8. Conclusion**

Les eaux souterraines de la région se caractérisent par leur variabilité hydrochimique. Les conductivités enregistrées varient entre 780  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et plus de 1100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Après avoir assuré que l'eau extraite du champs de captage de Chaabet El-Hamra est de bonne qualité, on doit l'utiliser pour l'alimentation en eau potable pour alimenter la ville d'Ain Azel passant par des conduites de refoulement vers un réservoir, qui permet de stocker l'eau qui viendra du champ de captage pour assurer la distribution de l'eau vers les abonnés.

# Chapitre VI

## Rentabilité du projet

La mine de Chaabet El-Hamra est utilisée pour la production du concentré de Zinc.

## **VI.1. Estimation du cours de Zinc en 2012**

### **VI.1.1. C'est quoi le Zinc ?**

Le zinc est un métal non ferreux et non renouvelable. Il est extrait des minerais, principalement de la blende (ZnS) qui contient du sulfure de zinc ou plus rarement à partir de déchets métallurgiques notamment d'aciéries.

### **VI.1.2. Comment distingue-t-on le zinc ?**

Le zinc se caractérise par sa couleur gris-bleue et son bruit métallique lorsqu'il tombe par terre. Il a la propriété d'être malléable à haute température.

### **VI.1.3. Quelles sont les caractéristiques du zinc ?**

C'est aussi un métal lourd qui est parfait pour les alliages et qui a une excellente conductivité électrique et thermique ainsi qu'une résistance à la corrosion. De plus, il est respectueux de l'environnement puisqu'il est recyclable et économique.

### **VI.1.4. Quel est le cours du zinc en 2012 ?**

Le prix du zinc a constamment augmenté au cours des dernières années, puisqu'il se fait de plus en plus rare. Pour l'année 2012, le cours de la bourse des métaux de Londres indique que le prix d'une tonne de zinc est d'environ 2 000 \$ (dollars).

## **VI.2. Détermination des réserves géologiques du gisement**

### **VI.2.1. Réserves du gisement**

Les réserves du gisement, du Pr0 au Pr 31, ont été évaluées par l'EREM et expertisées par le bureau d'étude canadien "SIDAM".

#### **VI.2.1.1. Evaluation de l'EREM**

Les réserves découvertes par l'EREM sont des réserves de catégorie C1 et C2.

Leur calcul a été basé sur la méthode des **blocs géologiques**. Dans cette méthode, un bloc est défini par un certain nombre de sondages pour lesquels la teneur pondérée et l'épaisseur moyenne du corps minéralisé rencontrent des exigences minimales préalablement définies pour que le bloc soit considéré comme étant du minerai.

Les paramètres de calculs sont :

- Une teneur de coupure : 3%
- Une épaisseur minimale exploitable : 01 m,
- Epaisseur moyenne : la moyenne arithmétique de l'épaisseur de tous les sondages inclus dans le bloc,
- Une densité moyenne :
  - ✓ Corps 1 : 3.04 t/m<sup>3</sup>,
  - ✓ Corps 2 : 3.07 t/m<sup>3</sup>,
- Une maille d'évaluation :
  - ✓ Catégorie C1 : ≤ 100 m en direction et 75 m en pendage,
  - ✓ Catégorie C2 : > 100 m en direction et 75 m en pendage,

Dont les réserves sont réparties comme suit :

**Tableau VI.1 : Réserves géologiques du gisement de Chaabet El Hamra (Evaluation de l'EREM)**

N° du corps	Catégories	Réserves géologiques (tonnes)	Teneur en % Zn
Corps 1	C1	2 737 000	5,23%
	C2	92 200	5,18%
Sous Total 1		2 829 200	5,23%
Corps 2	C1	2 132 500	6,03 %
	C2	58 900	5,60 %
Sous total 2		2 191 400	6,02%
Total		5 020 000	5,57 %

#### VI.2.1.2. Expertise des réserves par SIDAM

Le bureau d'étude canadien a été engagé (SIDAM) pour la réalisation d'une expertise des réserves et d'une étude de faisabilité technique et économique du gisement.

L'évaluation de SIDAM a été basée sur la **méthode des polygones d'influence**.

Dans cette méthode, chaque sondage se voit attribuer une zone d'influence de forme polygonale; les côtés du polygone sont des perpendiculaires tracés à la mi-distance de la droite qui relie le sondage considéré aux autres sondages qui l'entourent.

Les paramètres de calcul utilisés sont :

- Teneur de coupure : 3%

- Epaisseur minimale : 02 m,
- Densité moyenne : 03,05 t/m<sup>3</sup> pour les deux (02) corps 1 et 2,
- Maille d'évaluation :
  - ✓ Catégorie C1 : >75 m en direction et 100m en pendage.

L'expertise de cette évaluation, par le bureau canadien 'SIDAM' a donné les résultats suivants :

**Tableau VI.2 : Réserves géologiques du gisement de Chaabet El Hamra (Expertise SIDAM)**

N° du corps	Catégories	Réserves géologiques	Teneur en % Zn
Corps 1	C1	2 602 200	6,08%
Corps 2	C1	2 205 800	6,80%
Total		4 808 000	6,41 %

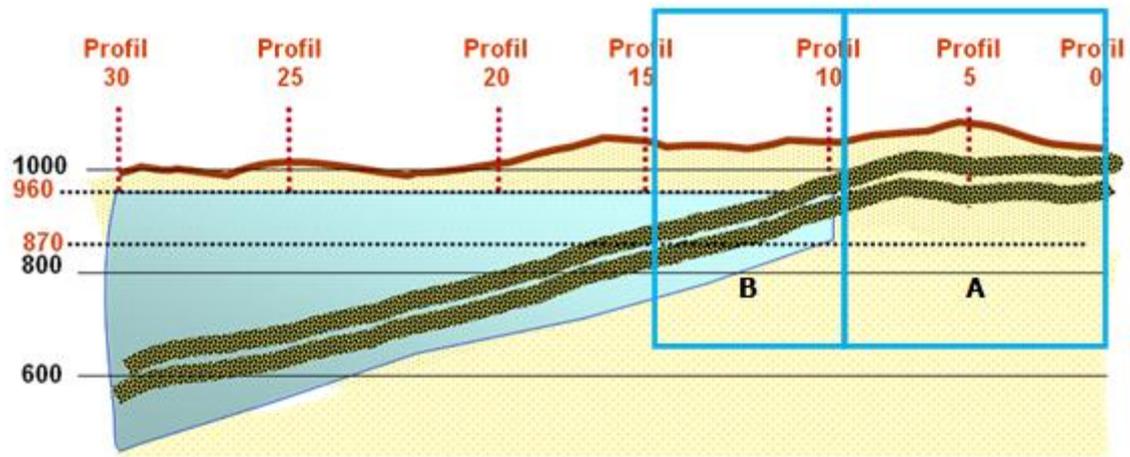
L'estimation des réserves par SIDAM a été faite sur la base des résultats des travaux de sondages réalisés avec une maille de 100\*100 dans la zone Nord-Ouest et 50\*70 dans la partie centrale.

### VI.2.2. Les réserves à exploiter

Cependant lors de la réalisation de ces ouvrages et plus précisément lors de la réalisation du travers banc, le niveau hydrostatique a été rencontré au profil 10 (côte 972).

Cette situation nous a amené à classer les réserves du profil 0 au profil 15 comme suit:

- Une partie supérieure du profil 0 au profil 10 avec de faibles venues d'eau.
- Une partie inférieure du profil 10 au profil 15 (entre le niveau 972 et le niveau 870) totalement inondée



**Figure VI.1 :** Répartition des deux parties exploitables de la mine.

Les réserves situées au-delà du profil 15 sont exclues du projet d'exploitation en raison :

- de la zone stérile à traverser entre les profils 16 et 24 (800 m)
- des contraintes accrues de l'hydrogéologie (250 m<sup>3</sup>/h déjà au profil 15)
- du pendage élevé des corps minéralisés à partir du profil 14. Qui atteint 45%
- de leur faible volume de réserves (25% des réserves globales du gisement).

Les réserves géologiques de la partie inférieure, de profil 10 jusqu'au profil 15, ont fait l'objet de plusieurs évaluations et expertises. Il s'agit de :

**VI.2.2.1. Evaluation de l'ORGM**

Cette méthode d'évaluation a donné les résultats suivants :

**Tableau VI.3 :** Réserves exploitables de la mine (évaluation de l'ORGM).

N° du corps	Catégorie C1		Catégorie C2		Catégorie C1 + C2		
	Quantité	Teneur	Quantité	Teneur	Quantité	Teneur	Métal
Corps 01	914 200	6.25	0	0	914 200	6.25	57 138
Corps 02	746 700	6.65	34 900	6.18	781 600	6.66	52 054
Total :	1 660 900	6.43	34 900	6.18	1 695 800	6.42	109 192

**VI.2.2.2. Evaluation de SIDAM**

Cette méthode d'évaluation a donné les résultats suivants en catégorie C1 uniquement :

**Tableau VI.4 : Réserves exploitables de la mine (évaluation de SIDAM).**

N° du corps	Catégorie C1		Catégorie C2		Catégorie C1+C2		
	Quantité	Teneur	Quantité	Teneur	Quantité	Teneur	Métal
Corps 01	654 746	9.10	/	/	654 746	9.10	59 582
Corps 02	939 381	7.18	/	/	939 381	7.18	67 484
Total :	1 594 127	7.97	/	/	1 594 127	7.97	127 066

**VI.2.2.3. Evaluation de l'ENOF**

La méthode d'évaluation utilisée est celle *des blocs géologiques* avec les paramètres suivants :

- Teneur de coupure : 4%
- Epaisseur maximale exploitable : 02 m,
- Densité moyenne : 03.1 t/m<sup>3</sup>
- Maille d'évaluation :
  - ✓ Catégorie C1 : ≤ 75 m en direction et 100 m en pendage,
  - ✓ Catégorie C2 : > 75 m en direction et 100 m en pendage.
- Taux de perte : 10%,
- Taux de salissage : 08%,
- Taux de certitude : 70%.

Cette méthode d'évaluation a donné les résultats suivants :

**c.1. Réserves géologiques**

**Tableau VI.5 : Réserves géologiques selon l'ENOF.**

Catégorie C1		Catégorie C2		Catégorie C1 + C2		
Quantité	Teneur	Quantité	Teneur	Quantité	Teneur	Métal
315 000	7.82	728 000	7.87	1 043 000	7.86	82 010

**c.2. Réserves récupérables**

Compte tenu des pertes, du salissage et du coefficient de certitude, les réserves récupérables résultant de cette évaluation sont :

**Tableau VI.6 : Réserves récupérable selon l'ENOF.**

N° du corps de minerai	Catégorie	Réserves Géologiques T	Teneur de Zn %	Réserves Exploitable T	Teneur de Zn %
Partie Supérieure	C1	293 000	8.02	258 400	7.36
	C2	414 000	7.90	243 400	7.26
	Total	707 000	7.95	501 800	7.31
Partie Inférieure	C1	315 000	7.82	277 800	7.18
	C2	728 000	7.87	428 100	7.23
	Total	1 043 000	7.86	705 900	7.21
Total		1 750 000	7.90	1 207 700	7.25

Après avoir exploité la partie supérieure du gisement de Chaabet El-Hamra, les teneurs en zinc ont été corrigées pour atteindre 5.16%.

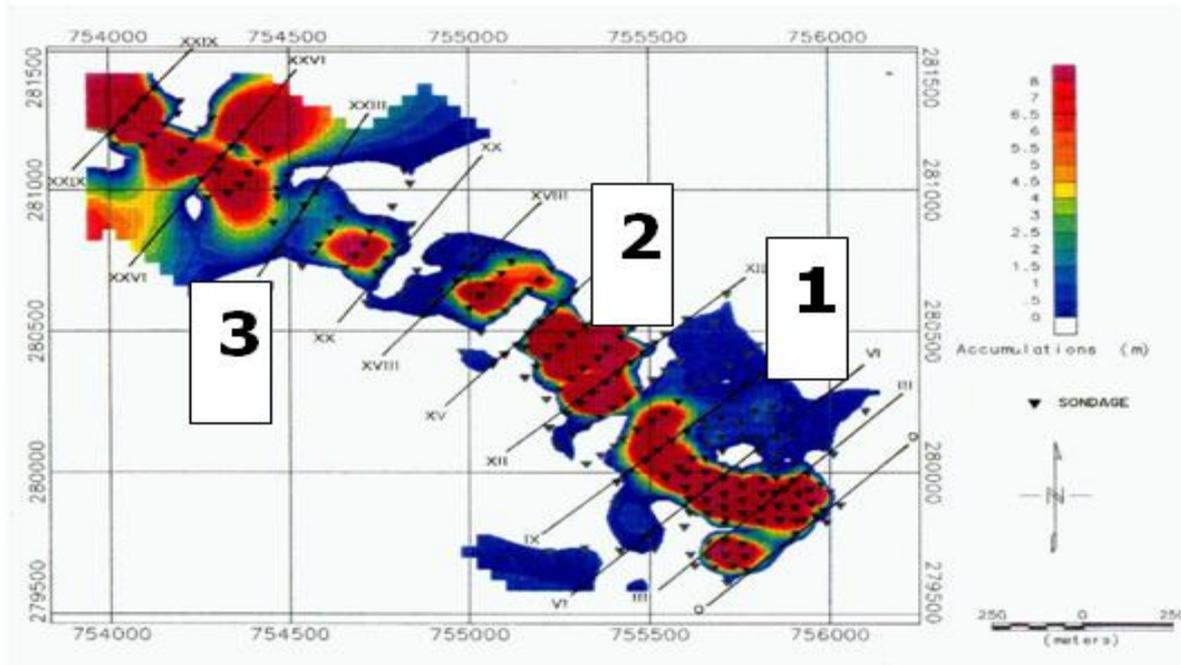
**Tableau VI.7 : Réserves géologiques et exploitable par profil selon l'ENOF.**

Profil	Réserves géologiques Corrigées (tonnes)	Teneur %	Perte	Salissage	Réserves Récup (tonnes)	Teneur (%)	Teneur corrigée %
Total Pr 10	5 254	8,34	10%	8%	5 125	7,68	5,49
Total Pr 11	27 225	6,29			26 655	6,89	4,73
Total Pr 12	235 018	7,82			230 357	7,19	5,14
Total Pr 13	75 367	7,26			73 853	6,86	4,98
Total Pr 14	299 796	8,13			293 847	7,49	5,36
Total Pr 15	77 639	7,78			76 063	7,16	5,24
total	720 299	7.60	10%	8%	705 900	7.21	5.16

Le rendement de l'usine de traitement est de 84.50%, donc

**Tableau VI.8 : Détermination de la quantité nette du zinc.**

Réserves exploitables (tonnes)	Teneur corrigée (%)	Réserves corrigées (tonnes)	Rendement de traitement (%)	Quantité nette du zinc (tonnes)
705 900	5.16	36 424.44	84.50	30 778.652



## RÉPARTITION DES RÉSERVES

**1 = PR 0- PR 10    2 = PR 10- PR 15    3 = PR 15- PR 30**

*Figure VI.2 : Répartition des réserves en zinc (ENOF).*

**VI.3. Frais de l'exploitation**

**VI.3.1. Les moyens matériels (ou investissement)**

*Tableau VI.9 : Frais des moyens matériels.*

Désignation	Uté mesure	Pr10 - Pr15		
		qté	Pu (10 <sup>3</sup> da)	Montant (10 <sup>3</sup> da)
Travaux infrastructure	MI	1 155	70	80 850
Travaux préparatoires	MI	760	70	53 200
Réhabilitation des ouvrages miniers				6 427
Sondage géologiques	U	1 320	12	15 840
Pelle minière	U	2	22 000	44 000
Camion navette	U	3	25 000	75 000
Machine d'abattage	U	1	15 000	15 000
Compresseur d'air	U	1	8 000	8 000
Sondeuse	U	1	15 000	15 000
Pompe immergée	U	2	500	1 000
Pelle chargeuse	U	2	11 000	22 000
Camion à benne	U	2	10 000	20 000
Micro bus	U	2	2 000	4 000
Camionnette	U	1	1 200	1 200
Fourgon explosifs	U	2	1 000	2 000
Construction digue		1	20 000	20 000
Réhabil.Instal.traitement		1	10 000	10 000
Etude géotechnique	U	1	5 000	5 000
Etude environnementale	U	1	200	200
Matériel de topographie				800
<b>TOTAL /</b>				<b>399 517</b>

**VI.3.2. Les moyens humains**

La réouverture de la mine nécessitera un effectif de 111 agents.

- 17 cadres,
- 67 agents de maîtrise, et
- 27 agents d'exécution.

Il se décomposera, par fonction :

Mine.....	: 38	Agents
Traitement laboratoire.....	: 25	Agents
Soutien.....	: 18	Agents
Administration.....	: 08	Agents
Sécurité interne.....	: 22	Agents
Total.....	: 111	Agents

La masse salariale moyenne sera de 40 000 DA/agent/mois.

Selon l'entreprise chargée de l'exploitation de la mine de Chaabet El-Hamra (ENOF), le temps estimé jusqu'à finaliser l'exploitation de la mine en cas de dénoyage de la minéralisation pendant 24 mois est de 9 ans ; 2 ans pour la partie supérieure et 7 ans pour la partie inférieure ; donc, la dépense du personnel sera :

$$\text{Dépense des personnels} = 40000 * 111 * 12 * 9 = 479\,520\,000 \text{ DA}$$

**VI.3.3. Frais de réhabilitation des ouvrages miniers et préparation des chantiers :**

Les moyens financiers nécessaires à accomplir ces tâches sont résumées ci-dessous.

Il s'agit :

- Des coûts de rémunération de (12) agents affectés à l'accomplissement de cette opération, et
- Des coûts de l'acquisition des moyens matériels (les consommables).

Ces coûts sont résumés ci-dessous :

**Tableau VI.10 : Frais de réhabilitation des ouvrages miniers et préparation des chantiers.**

Désignation	Tâches	Coûts (Da)
Réparation des engins miniers		1 000 000
Autres charges liés aux engins(Carburants)		420 000
Entretien des ouvrages miniers	Construction du système de retenue des eaux (avaloir)	73 500
	Entretien et réparation du soutènement et du blindage (descenderie et travers banc)	1 572 200
	Aménagement du radier de la descenderie et du travers banc	290 000
	Remise en état de l'éclairage le long de la descenderie et du travers banc	102 000
Rémunération du personnel (12) agents		2 970 000
<b>Total :</b>		<b>6 427 700</b>

#### VI.4. Frais de traitement :

Le frais de traitement est de 170 DA/Tonne,

$$\text{Frais de traitement} = 170 * 705\,900 = 120\,003\,000 \text{ DA}$$

**VI.5. Frais de production***Tableau VI.11 : Frais total de production.*

	Coût
Matériels	399 517 000
Dépenses des personnels	586 080 000
Coût de réhabilitation	6 427 700
Frais de traitement	120 003 000
Impôts et taxes	50 346 000
Frais divers	10 229 000
Total	1 172 602 700

**VI.6. Frais du système d'exhaure :****VI.6.1. Coût d'un forage****Devis estimatif et quantitatif***Tableau VI.12 : Le coût d'un forage.*

N°	Désignation	unité	Quantité	Prix Unitaire	Prix Total
01	Amenée et montage du chantier	FT	01	100 000.00	100 000.00
02	Démontage et repliement du chantier	FT	01	70 000.00	70 000.00
03	Construction p/formes bassins et rigoles	FT	01	50 000.00	50 000.00
04	Construction des avant puits 22	ML	10	22 500.00	225 000.00
05	Forage en diamètre 8''1/2	ML	240	4 000.00	960 000.00
06	Amenée et repli carottage électrique	FT	01	50 000.00	50 000.00
07	Enregistrement des diagraphies	ML	250	1 200.00	300 000.00
08	Alésage en diamètre 12''1/4	ML	240	4 000.00	960 000.00
09	Alésage en diamètre 17''1/2	ML	110	3 500.00	385 000.00
10	Alésage en diamètre 19''	ML	3	4 000.00	12 000.00
11	Fourniture et pose TP en diamètre 13''3/8 en TNRS	ML	3	8 000.00	24 000.00
12	Fourniture et pose TC en diamètre 13''3/8 en TNRS	ML	3	8 500.00	25 500.00

13	Fourniture et pose TP en diamètre 12'' en TNRS	ML	70	7 000.00	490 000.00
14	Fourniture et pose TC en diamètre 12'' en TNRS	ML	35	7 500.00	262 500.00
15	Fourniture et pose cône de réduction 12''*8''5/8	U	01	5 000.00	5 000.00
16	Fourniture et pose TP en diamètre 8''5/8 en TNRS	ML	90	6 000.00	540 000.00
17	Fourniture et pose TC en diamètre 8''5/8 en TNRS	ML	55	6 500.00	357 500.00
18	Fourniture et mise en place en gravier	M <sup>3</sup>	25	5 000.00	125 000.00
19	Fourniture et injection hexamétaphosphate	Kg	200	500.00	100 000.00
20	Fourniture et mise en œuvre acide	M <sup>3</sup>	03	85 000.00	255 000.00
21	Mise à disposition sans force motrice	H	240	1 800.00	432 000.00
22	Mise à disposition avec force motrice	H	68	2 000.00	136 000.00
23	Essai de nappe	H	02	10 000.00	20 000.00
24	Développement à l'air lift	H	72	2 500.00	180 000.00
25	Développement à la pompe	H	24	2 500.00	60 000.00
26	Essais de pompage	H	81	2 500.00	202 500.00
27	Fourniture et injection ciment	M <sup>3</sup>	01	10 000.00	10 000.00
28	Travail dans conditions anormales	H	300	2 500.00	750 000.00
29	Attente (régie)	H	72	2 000.00	144 000.00
30	Fermeture du forage	U	01	20 000.00	20 000.00
<b>TOTAL</b>				<b>7 251 000.00</b>	
<b>TVA 17%</b>				<b>1 232 670.00</b>	
<b>TOTAL TTC</b>				<b>8 483 670.00</b>	

## VI.6.2. Coût d'un piézomètre

Tableau VI.13 : Le coût d'un piézomètre.

N°	Désignation	Unité	Quantité	Prix Unitaire	Prix Total
01	Amenée et montage du chantier	FT	01	100 000.00	100 000.00
02	Démontage et repliement du chantier	FT	01	70 000.00	70 000.00
03	Construction p/formes bassins et rigoles	FT	01	50 000.00	50 000.00
04	Construction des avant puits 22	ML	10	22 500.00	225 000.00
05	Forage en diamètre 8''1/2	ML	240	4 000.00	960 000.00
06	Amenée et repli carottage électrique	FT	01	50 000.00	50 000.00
07	Enregistrement des diagraphies	ML	250	1 200.00	300 000.00
13	Fourniture et pose TP en diamètre 4'' en TNRS	ML	160	6 000.00	960 000.00
14	Fourniture et pose TC en diamètre 4'' en TNRS	ML	90	6 500.00	585 000.00
18	Fourniture et mise en place en gravier	M <sup>3</sup>	25	5 000.00	125 000.00
19	Fourniture et injection hexamétaphosphate	Kg	200	500.00	100 000.00
20	Fourniture et mise en œuvre acide	M <sup>3</sup>	03	85 000.00	255 000.00
23	Essai de débit	H	02	10 000.00	20 000.00
24	Développement à l'air lift	H	72	2 500.00	180 000.00
27	Fourniture et injection ciment	M <sup>3</sup>	01	10 000.00	10 000.00
28	Travail dans conditions anormales	H	300	2 500.00	750 000.00
29	Attente (régie)	H	72	2 000.00	144 000.00
30	Fermeture du forage	U	01	20 000.00	20 000.00
<b>TOTAL</b>				<b>4 904 000.00</b>	
<b>TVA 17%</b>				<b>0 833 680.00</b>	
<b>TOTAL TTC</b>				<b>5 737 680.00</b>	

## VI.6.3. Equipements d'un forage

Tableau VI.12 : Le coût des équipements d'un forage.

N°	DESIGNATION	U/M	Qtté	Prix unit (DA)	Montant (DA)
1	G.E.P immergé POVAL Q = 25 l/s Hmt = 250 m 380V P = 62 kw	u	1	588 206	588 206
3	Câble électrique 3x50mm <sup>2</sup> plat souple H07-U1000V cuivre	ml	150	4 200	630 000
4	Compteur d'Eau Ø250 PN 16	u	1	30 000	30 000
5	Clapet Sandwich Ø250 PN 16	u	1	25 000	25 000
6	vanne acier Ø 150 PN 16	u	1	39 810	39 810
7	Ventouse Ø 50 PN 16	u	1	8 500	8 500
8	vanne acier Ø 65 PN 16	u	1	8 500	8 500
9	Tube Acier Galv 1 "	ml	150	820	123 000
10	Tête Forage	u	1	70 000	70 000
11	Câble électrique 2x2,5mm <sup>2</sup> H07- U1000 avec Systeme Protection contre à sec	ml	150	200	30 000
12	Robinet puisage d'echantillonnage	u	5	500	2 500
13	Compteur Horraire électrique 220V encllic	u	2	3 500	7 000
	Total				1 562 516

Tableau VI.14 : Le coût total du système d'exhaure.

	Prix unitaire (DA)	Quantité	Prix total (DA)
Coût des Forages	8 483 670	05	42 418 350
Coût des piézomètres	5 737 680	03	17 213 040
Coût d'énergie	120 000/mois	05	14 400 000
Coût équip forag	1 562 516	05	7 812 580
Dépenses personnels	40 000/mois	28	26 880 000
Total			108 723 970

Le frais du système d'exhaure ne fait que 9.27% du frais de production

### VI.7. Rentabilité du projet

*Tableau VI.15 : La rentabilité du projet.*

Produit	Prix unit (\$/t)	Prix unit (DA/t)	Quantité (tonnes)	Total
Zinc	2 000	150 000	30 778.652 t	4 616 797 800

Prix de vente (DA)	4 616 797 800
Frais de production (DA)	1 172 602 700
Frais d'exhaure (DA)	108 723 970
Gain (DA)	2 335 471 130

### VI.8. Conclusion

Les résultats attendus de ce projet sont des résultats très favorables, donc selon les prévisions qu'on a fait, le projet sera **générateur d'une grande richesse**. Ces résultats témoignent d'une forte capacité de production qui subviendra aux obligations de l'exploitation, salaires, impôts, ... Ces résultats témoignent d'un cycle d'exploitation rentable.

# Conclusion générale

## **Conclusion générale**

On dit souvent que « l'eau est victime de l'exploitation minière », mais il faut se rappeler aussi que la majorité des accidents miniers ont eu pour cause les inondations des galeries qui ont engendrés des milliers de morts dans le monde : **Mars 1977** - Inondation dans une mine de charbon de Tower City (Pennsylvanie, nord-est): neuf morts. **Avril 2012** - Au moins 15 personnes ont trouvé la mort dans deux mines inondées en Chine, pour ne citer que ces deux exemples.

La présence de l'eau dans les mines constitue donc un danger potentiel pour les mineurs (voir catastrophe de la mine de Kharzet Youcef 1990 (Ain Azel).

C'est pour endiguer ce phénomène dans la mine de Chaabat el Hamra à 12 Km de Ain Azel, qui a été le théâtre de l'une des plus grandes catastrophes qu'a connues l'Algérie moderne, qu'une étude nous a été confiée par l'ENOF.

Notre travail a consisté donc à protéger cette mine contre les venues d'eau, à l'assécher afin de permettre son exploitation et d'étudier la qualité de l'eau extraite afin de la réutiliser à des fins plus adéquates et rentabiliser le projet.

Afin de mener à bien cette étude nous avons commencé par comprendre les caractéristiques de la zone d'études et à recueillir les données nécessaires à la bonne exécution de ce travail.

Nous avons ensuite entamé une étude hydrogéologique pour déterminer les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère, paramètres utilisés ensuite pour estimer la durée de rabattement suite à un pompage continu 24/24.

Grace à cette étude nous avons pu établir le débit de pompage, le nombre de forages nécessaires, la durée de rabattement de la nappe pour assécher la mine et permettre son exploitation, l'emplacement des forages et établissement d'un système de pompage.

Nous avons pu par exemple prévoir cinq forages situés au-delà des travaux miniers, ce qui implique des travaux miniers à sec avec une bonne qualité de l'eau extraite qui va servir à alimenter les habitants de la ville d'Ain Azel.

Les objectifs du système de pompage des eaux sont les suivants :

- ✓ Rabattre efficacement le gisement ;
- ✓ Créer des conditions de sécurité d'exploitation minière souterraine ;
- ✓ Minimiser la dégradation de la qualité et de la quantité des substances qui influent sur la potabilité de l'eau ;
- ✓ Assurer une alimentation en eau sûre et durable la ville d'Ain Azel en AEP ;
- ✓ Assurer les besoins en eau de la mine ;
- ✓ Baser les méthodes de gestion sur les concepts suivants : réduction, réutilisation, recyclage ;
- ✓ Eviter d'évacuer hors du site des eaux dont la qualité ne répond pas à la législation environnementale algérienne.

Nous avons enfin étudié la rentabilité de l'exploitation de la mine de Chaabat el Hamra.

Annexe

Annexe I : Table des valeurs de  $w(u)$  correspondantes aux valeurs de  $u$  et de  $1/u$ . Méthode de Theis

		$1/u =$	$n$	$n(1)$	$n(2)$	$n(3)$	$n(4)$	$n(5)$	$n(6)$	$n(7)$	$n(8)$	$n(9)$	$n(10)$
$n$	$N$	$u =$	$N$	$N(-1)$	$N(-2)$	$N(-3)$	$N(-4)$	$N(-5)$	$N(-6)$	$N(-7)$	$N(-8)$	$N(-9)$	$N(-10)$
1.000	1.0	$w(u)=$	2.194(-1)	1.823	4.038	6.332	8.633	1.094(1)	1.324(1)	1.554(1)	1.784(1)	2.015(1)	2.245(1)
0.833	1.2		1.584(-1)	1.660	3.858	6.149	8.451	1.075(1)	1.306(1)	1.536(1)	1.766(1)	1.996(1)	2.227(1)
0.666	1.5		1.000(-1)	1.465	3.637	5.927	8.228	1.053(1)	1.283(1)	1.514(1)	1.744(1)	1.974(1)	2.204(1)
0.500	2.0		4.890(-2)	1.223	3.355	5.639	7.940	1.024(1)	1.255(1)	1.485(1)	1.715(1)	1.945(1)	2.176(1)
0.400	2.5		2.491(-2)	1.044	3.137	5.417	7.717	1.002(1)	1.232(1)	1.462(1)	1.693(1)	1.923(1)	2.153(1)
0.333	3.0		1.305(-2)	9.057(-1)	2.959	5.235	7.535	9.837	1.214(1)	1.444(1)	1.674(1)	1.905(1)	2.135(1)
0.286	3.5		6.970(-3)	7.942(-1)	2.810	5.081	7.381	9.683	1.199(1)	1.429(1)	1.659(1)	1.889(1)	2.120(1)
0.250	4.0		3.779(-3)	7.024(-1)	2.681	4.948	7.247	9.550	1.185(1)	1.415(1)	1.646(1)	1.876(1)	2.106(1)
0.222	4.5		2.073(-3)	6.253(-1)	2.568	4.831	7.130	9.432	1.173(1)	1.404(1)	1.634(1)	1.864(1)	2.094(1)
0.200	5.0		1.148(-3)	5.598(-1)	2.468	4.726	7.024	9.326	1.163(1)	1.393(1)	1.623(1)	1.854(1)	2.084(1)
0.166	6.0		3.601(-4)	4.544(-1)	2.295	4.545	6.842	9.144	1.145(1)	1.375(1)	1.605(1)	1.835(1)	2.066(1)
0.142	7.0		1.155(-4)	3.738(-1)	2.151	4.392	6.688	8.990	1.129(1)	1.360(1)	1.590(1)	1.820(1)	2.050(1)
0.125	8.0		3.767(-5)	3.106(-1)	2.027	4.259	6.555	8.856	1.116(1)	1.346(1)	1.576(1)	1.807(1)	2.037(1)
0.111	9.0		1.245(-5)	2.602(-1)	1.919	4.142	6.437	8.739	1.104(1)	1.334(1)	1.565(1)	1.795(1)	2.025(1)

Annexe II : Table des valeurs correspondantes de  $u$ ,  $w(u)$  et  $F(u)$ . Méthode de CHOW.

$u$	$w(u)$	$F(u)$	$u$	$w(u)$	$F(u)$	$u$	$w(u)$	$F(u)$
5	1.14(-3)	7.34(-2)	9(-2)	1.92	9.13(-1)	9(-4)	6.44	
4	3.78(-3)	8.98(-2)	8(-2)	2.03	9.56(-1)	8(-4)	6.55	
3	1.30(-2)	1.17(-1)	7(-2)	2.15	1.00	7(-4)	6.69	
2	4.89(-2)	1.57(-1)	6(-2)	2.30	1.06	6(-4)	6.84	
1	2.19(-1)	2.59(-1)	5(-2)	2.47	1.13	5(-4)	7.02	
			4(-2)	2.68	1.21	4(-4)	7.25	
9(-1)	2.60(-1)	2.76(-1)	3(-2)	2.96	1.33	3(-4)	7.53	
8(-1)	3.11(-1)	3.01(-1)	2(-2)	3.35	1.49	2(-4)	7.94	
7(-1)	3.74(-1)	3.27(-1)	1(-2)	4.04	1.77	1(-4)	8.63	$F(u)=$
6(-1)	4.54(-1)	3.60(-1)						
5(-1)	5.60(-1)	4.01(-1)	9(-3)	4.14	1.82	9(-5)	8.74	$= \frac{w(u)}{2.30}$
4(-1)	7.02(-1)	4.55(-1)	8(-3)	4.26	1.87	8(-5)	8.86	
3(-1)	9.06(-1)	5.32(-1)	7(-3)	4.39	1.92	7(-5)	8.99	
2(-1)	1.22	6.47(-1)	6(-3)	4.54	1.99	6(-5)	9.14	
1(-1)	1.82	8.74(-1)	5(-3)	4.73	2.07	5(-5)	9.33	
			4(-3)	4.95	2.16			
			3(-3)	5.23	2.28			
			2(-3)	5.64	2.46			
			1(-3)	6.33	2.75			

Annexe III : données du graphe 01.

t (min)	t (s)	log (t)	s (m)
5	300	2.477	6.37
10	600	2.778	9.71
15	900	2.954	13.11
20	1200	3.079	15.31
25	1500	3.176	21.14
30	1800	3.255	28.28
40	2400	3.380	35.34
50	3000	3.477	42.24
60	3600	3.556	46.15
70	4200	3.623	47.81
80	4800	3.681	48.01
90	5400	3.732	48.2
100	6000	3.778	48.71
110	6600	3.820	49.51
+120	7200	3.857	49.58
130	7800	3.892	49.71
140	8400	3.924	50.33
150	9000	3.954	51.89
160	9600	3.982	51.19
170	10200	4.009	51.4
180	10800	4.033	51.71
190	11400	4.057	51.55
200	12000	4.079	51.38
210	12600	4.100	51.7
220	13200	4.121	51.85
230	13800	4.140	52.09
240	14400	4.158	52.81
250	15000	4.176	52.77
260	15600	4.193	52.31
270	16200	4.210	51.41
280	16800	4.225	52.29
290	17400	4.241	52.71
300	18000	4.255	53.16

Annexe IV : Données du graphe 02.

10	600	2.778	11.87
20	1200	3.079	15.33
30	1800	3.255	18.68
40	2400	3.380	19.38
50	3000	3.477	19.96
60	3600	3.556	20.34
70	4200	3.623	19.98
80	4800	3.681	20.35
90	5400	3.732	20.8
100	6000	3.778	22.01
110	6600	3.820	21.83
120	7200	3.857	22.37
130	7800	3.892	22.98
140	8400	3.924	23.14
150	9000	3.954	23.12
160	9600	3.982	23.13
170	10200	4.009	22.91
180	10800	4.033	22.98

## Annexe V : Données du graphe 03

t (min)	t (s)	log (t)	s (m)
5	300	2.477	6.69
10	600	2.778	11.81
15	900	2.954	16.64
20	1200	3.079	19.08
30	1800	3.255	21.72
40	2400	3.380	23.52
50	3000	3.477	25.32
60	3600	3.556	26.74
70	4200	3.623	27.57
80	4800	3.681	28.12
90	5400	3.732	28.71
100	6000	3.778	29.46
110	6600	3.820	29.85
120	7200	3.857	29.57
130	7800	3.892	29.66
140	8400	3.924	29.52
150	9000	3.954	28.43
160	9600	3.982	28.67
170	10200	4.009	30.31
185	11100	4.045	30.36
200	12000	4.079	30.86
215	12900	4.111	30.55
230	13800	4.140	29.86
250	15000	4.176	30.85
270	16200	4.210	31.13
290	17400	4.241	31.38
320	19200	4.283	31.43
350	21000	4.322	30.82
380	22800	4.358	29.54
410	24600	4.391	29.96
440	26400	4.422	29.64
470	28200	4.450	29.66
530	31800	4.502	29.41
590	35400	4.549	28.87

Annexe VI : Données du graphe 04

t (min)	t (s)	log (t)	s (m)
10	600	2.778	0.9
20	1200	3.079	0.59
30	1800	3.255	0.7
40	2400	3.380	1.4
50	3000	3.477	0.5
60	3600	3.556	0.65
80	4800	3.681	3.25
100	6000	3.778	2.4
120	7200	3.857	4.1
150	9000	3.954	4.2
180	10800	4.033	4.3
210	12600	4.100	4.4
240	14400	4.158	4.45
270	16200	4.210	4.5
300	18000	4.255	4.58
330	19800	4.297	4.59
360	21600	4.334	4.59

Annexe VII : Données du graphe 05

t (min)	t (s)	log (t)	s (m)
5	300	2.477	8.78
10	600	2.778	10.68
20	1200	3.079	12.64
30	1800	3.255	13.38
40	2400	3.380	14.16
50	3000	3.477	15.17
60	3600	3.556	15.99
70	4200	3.623	16.58
80	4800	3.681	17.32
90	5400	3.732	17.97
100	6000	3.778	18.33
110	6600	3.820	18.35
120	7200	3.857	18.33

## Annexe VIII : données pour le graphe 06

t (H)	t(min)	t (s)	log (t)	s (m)
	5	300	2.477	7.67
	10	600	2.778	12.61
	15	900	2.954	16.08
	20	1200	3.079	18.42
	25	1500	3.176	20.65
	30	1800	3.255	22.14
	40	2400	3.380	25.32
	50	3000	3.477	26.24
	60	3600	3.556	27.07
	70	4200	3.623	27.89
	80	4800	3.681	28.43
	90	5400	3.732	32.61
	100	6000	3.778	32.66
	110	6600	3.820	32.7
	120	7200	3.857	32.76
	150	9000	3.954	33.26
	180	10800	4.033	33.46
	240	14400	4.158	35.06
	300	18000	4.255	35.26
6	360	21600	4.334	35.5
7	420	25200	4.401	35.51
8	480	28800	4.459	37
9	540	32400	4.511	37.26
10	600	36000	4.556	37.01
11	660	39600	4.598	37.24
12	720	43200	4.635	37.24
13	780	46800	4.670	36.51
14	840	50400	4.702	36.51
15	900	54000	4.732	36.57
16	960	57600	4.760	36.58
17	1020	61200	4.787	36.36
18	1080	64800	4.812	36.4
19	1140	68400	4.835	36.33
20	1200	72000	4.857	36.33
21	1260	75600	4.879	36.27
22	1320	79200	4.899	36.23
23	1380	82800	4.918	36.23
24	1440	86400	4.937	36.33

# Références bibliographiques

# Bibliographie

- 1) Actualisation et réhabilitation des forages d'eau  
Présenté par BENSAADA Mohamed. Chargé de cours du centre universitaire de Khmise Miliana.
- 2) Cours Hydrogéologie 4<sup>ème</sup> année  
Présenté par Mr : A. BERMAD
- 3) Des forages de qualité en région lorraine
- 4) Essais de pompage et équipements  
Présenté par Mrs : - Messaoudi Ouchene Mahfoud - Mahmoudi Abdelkader  
De l'E.N.S.H
- 5) Etude hydrogéologique et modélisation de la nappe de l'oued IN AMGUEL (Tamanrasset)  
PFE à ENP en 1990  
Présenté par Mrs : - A. LARBES - M. SAMI
- 6) Etude hydrogéologique et modélisation mathématique des écoulements souterrains de la Basse Vallée de la Soummam  
PFE à l'ENP en 2002  
Présenté par : Mounia DJIHAD YOUNSI
- 7) Evaluation des méthodes existantes de calcul des périmètres de protection des ouvrages de captage d'eau souterraine.  
Mémoire de magistère Présentée par AMROUCHE Soumia.
- 8) Forages et sondages  
Technique d'ingénieur présenté par Jean-François MAILLARD  
Géologie au Laboratoire Régional de l'Equipement de l'Est Parisien.
- 9) Guide des essais de pompage et leurs interprétations  
De Robert P. CHAPUIS
- 10) Guide pratique pour les essais de pompage de puits  
Comité internationale de la croix rouge septembre 2011

- 11) Hydraulique souterraine  
De Georges Schneebeili.
- 12) HYDRO QUEBEC :  
<http://www.hydroquebec.com/fr/index.shtml>
- 13) Hydrogéologie et forage  
de l'Institut National de Perfectionnement de l'Équipement  
Session de 25 au 29 avril 2010
- 14) Interprétation et discussion des pompages d'essai  
Traduction du Bulletin : Analysis and Evaluation of pumping Test Data ; ILRI  
Wageningen, 1973, 2ed edition.
- 15) Les nouvelles méthodes d'interprétation des essais de puits horizontaux. Application  
au champ de Hassi Messaoud  
PFE à l'ENP 2007 présenté par AMDANI MEROUANE
- 16) Les réseaux d'adduction d'eau potable dans les quartiers périurbains de KINSHASA  
par L'assistant NZAMBI KUIZA Bertin, Matricule : 7/918.709T.
- 17) L'interprétation des données fondamentales provenant du réseau hydrogéologique,  
dans le but d'établir le régime des eaux phréatiques  
Présenté par I. ENEA, S. TENU ET E. PÎRVANESCU  
  
Institut de Recherches Hydrotechniques  
Bucarest-Roumanie
- 18) Prospection d'eau souterraine par forage profonds à Muriaux (canton du Jura)  
de 1) M. Hessenauer, 2) Ch. Rieben 3) F. Flury
- 19) Potentialités hydrogéologiques d'une plaine littorale marocaine (oued Loau, Tétouan)  
Présenté par S. RKIOUAK & A. PULIDO-BOSCH A. GAIZ
- 20) Représentation de la répartition hydrogéologique par Système d'Information  
Géographique (SIG) : Cas de la région d'Ain Azel  
Mémoire de magistère Présenté par Mr : DJAZIRI Omar.
- 21) Récupération des données sur la zone d'étude  
ENOF de Sétif, ANRH de Constantine