

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie civil et Hydraulique

Filière : Hydraulique

Option : Hydraulique urbaine

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

*Etude expérimentale de la recharge
d'une nappe captive en exploitation*

Présenté par :

MOUDER LYES

Soutenu le :/...../.....

Devant le jury composé de :

Mr LABADI ABDALLAH

Mr DJEDRI TOUFIK

Mme ZOUITA NADJOUA

Président

Encadreur

Examineur

Année universitaire 2019 / 2020

RESUME

Le présent travail s'intéresse à l'étude expérimentale des variations piézométriques dans une nappe captive en exploitation au cours d'une opération de réalimentation ou de recharge artificielle. Un banc de drainage est utilisé dans la réalisation du modèle. L'essai consiste à appliquer une charge en amont de l'aquifère et suivre à l'aide de piézomètres, disposés dans le sens de l'écoulement, les variations piézométriques de la nappe. Les observations relevées sont analysées et interprétées.

ملخص

يهتم هذا العمل بدراسة تجريبية حول تغير المستوى البيزومتري لتكوينة مائية مقيدة بفعل تغذية اصطناعية. نستعمل في هذه الحالة جهاز خاص بتجارب الجريان الجوفي حيث وضعنا النموذج محل الدراسة. تتم متابعة التغيرات في منسوب التكوينة المائية عبر انابيب موزعة حسب اتجاه الجريان. النتائج المحصل عليها تبين كيف تتأثر التكوينة المائية بهذه الظروف.

Remerciements

Je tiens à remercier ceux qui m'ont aidé à réaliser ce travail :

Mon encadreur monsieur Djedri Toufik toujours disponible, qui m'a encouragé par ses orientations et conseils, surtout dans la réalisation du modèle et l'exploitation des résultats.

Mr Guediri larbi, responsable du labo, pour son assistance et son dévouement.

Mes enseignants du département pour toutes les connaissances acquises ,

En fin, tous les camarades et amis qui m'ont soutenu

SOMMAIRE

Introduction Générale	7
Chapitre I Généralités sur le milieu poreux	
Introduction	9
Porosité	9
Granulométrie	10
Perméabilité	12
Chapitre II Ecoulements souterrains et recharge des nappes	14
Introduction	17
Les écoulements souterrains	18
Les écoulements en régime permanent	18
Loi de Darcy	20
Généralisation de la loi de Darcy	20
Loi de Laplace	21
Les écoulements transitoires	22
Influence du pompage sur la nappe	23
Recharge artificielle des nappes	23
Chapitres III Essais expérimentaux	24
Dispositif utilisé	25
Installation	25
Conduite des essais	29
Interprétation des résultats	32
Conclusion générale	33
Références bibliographiques	35

Liste des figures

Figure n°1 : Différents types de porosité	9
Figure n°2 : Différents types de porosité	10
Figure n°3 : Exemples de courbes granulométriques	11
Figure n°4 : Schéma d'un perméamètre	12
Figure n°5 : Valeurs de k dans différents types de sols	13
Figure n°6 : Relation $k = f(e)$ pour un sable à granulométrie plutôt continue	14
Figure n°7a : Types d'aquifères	19
Figure n°7b : Types d'aquifères	20
Figure n°8 : Coupe d'un pompage dans une nappe libre	20
Figure n°9a : Banc de drainage	23
Figure n°9b : Schéma du dispositif expérimental	25
Figure 9c : Modèle de nappe captive utilisé	26
Figure n°10 : Courbe granulométrique du sable utilisé	27
Figure n°11 : Perméamètre à charge constante utilisé	28
Figure 13 : Courbes de vitesse de montée de la charge hydraulique dans les piézomètres	31
Figure 14 : Variation de la charge dans les piézomètres	32
Figure 15 : Variation du profil piézométrique au cours du pompage en fonction du temps	33

Liste des tableaux

Tableau N°1 : Résultats de mesure de la perméabilité	29
Tableau n° 2 : Variation de la charge dans les piézomètres en fonction du temps.	29
Tableau N°3 : Variation de la charge dans les piézomètres.	30
Tableau N°4 : Variation de la charge dans les piézomètres	30
Tableau N°5 : Variation de la charge dans les piézomètres.	30
Tableau N°1 : Résultats de mesure de la perméabilité	31
Tableau n° 2 : Variation de la charge dans les piézomètres en fonction du temps.	31

Liste des symboles

Symbole	Définition	unité
W	humidité pondérale	%
M _w	la masse d'eau	kg
M _s	la masse du solide	kg
O	teneur en eau volumique	%
V _w	volume d'eau	m ³
V _t	volume total	m ³
V _s	volume du solide	m ³
V _a	volume de l'air	m ³
U	Le coefficient d'uniformité	—
n _e	la porosité efficace	%
V _e	volume d'eau gravitaire	m ³
K	la perméabilité	m/ s
q	Est le flux	
H	la charge hydraulique totale.	m
Z	La distance verticale à partir de la surface de sol	m
A	La surface du sol.	m ²
U	la vitesse d'écoulement	m/ s
q= i	Est le régime d'infiltration.	
p _w	la pression du fluide dit mouillant	m
Z	hauteur d'eau infiltrée	mm
h _f	Potentiel de succion au niveau du front	mm
h ₀	Hauteur d'eau au niveau de la surface du sol	mm
O _i	Teneur en eau initiale du sol	%
O _f	Teneur en eau finale du sol (à saturation)	%
H _f	Charge hydraulique (potentiel total)	mm
i(t)	la vitesse d'infiltration	mm/ h
ρ _w	la masse volumique de l'eau	(kg/m ³)

Introduction Générale

Le présent travail, expérimental, s'intéresse à un aspect particulier des écoulements souterrains. Il s'agit de provoquer la réalimentation d'une nappe captive surexploitée, à l'aval de laquelle est implanté un écran souterrain. On observe les effets sur la piézométrie de l'aquifère. On utilise pour ce faire un modèle de sable, disposé dans un banc de drainage, avec la configuration du système à étudier. L'observation des fluctuations du niveau piézométrique de la nappe est faite sur une série de piézomètres implantés dans le sens de l'écoulement. L'hypothèse est que la nappe est presque dénoyée, i.e que son niveau piézométrique est légèrement au dessus de la limite inférieure du toit imperméable. Un cas qu'on observerait au cours d'une surexploitation.

Le travail est présenté sous forme de trois chapitres ; un premier, traitant des propriétés mécaniques et hydrauliques du milieu poreux, étant donné, que notre modèle utilise du sable, milieu poreux par excellence. Le deuxième chapitre est dédié aux rappels sur les écoulements souterrains, les aquifères et la notion de recharge artificielle des nappes.

Le troisième chapitre est consacré aux essais expérimentaux réalisés au laboratoire, le dispositif utilisé, la conduite des essais et l'exploitation des observations relevés. On a adopté les cas suivants, selon les performances du matériel disponible :

- Cas n°1 : Alimentation de la nappe et observation des variations hydrodynamiques.
- Cas n°2 : Pompage à partir d'un puits situé près de l'écran, après alimentation de la nappe.
- Cas n°3 : Pompage ($Q=2,96 \text{ cm}^3/\text{s}$) et recharge en parallèle.
- Cas n°4 : Pompage (avec $Q=2,27 \text{ cm}^3/\text{s}$) et recharge en parallèle.

Les résultats obtenus sont traduits sous formes de courbes décrivant les fluctuations de la surface piézométrique de l'aquifère sollicité. Une interprétation est proposée à la fin de ce troisième chapitre. Une conclusion générale est présentée à la fin du manuscrit où on synthétisera l'essentiel des résultats obtenus et la possibilité de les transposer à un cas réel.

Chapitre I

Généralités sur le milieu poreux

Introduction

Le milieu poreux est un ensemble de pores permettant l'écoulement d'un fluide tel que l'eau, la taille de ces pores peut être très fine (les argiles) ou très grosse (les graviers).

Nous nous intéresserons surtout aux terrains poreux qui comprennent toutes les formations détritiques composées de grains cimentés ou non entre eux. Ce sont essentiellement toutes les alluvions fluviales et glaciaires, les masses d'éboulis, les formations gréseuses, les conglomérats perméables, les remblais artificiels.

Le milieu poreux est donc un réseau complexe et très dense de canaux interstitiels. Il est classique de le caractériser par sa courbe granulométrique, sa porosité et sa perméabilité.

I.1. La Porosité :

La taille et le nombre des pores influent beaucoup sur l'écoulement du fluide à travers le milieu poreux et donc sur la perméabilité.

La Porosité exprime l'état de compacité dans lequel se trouve un sol. La porosité est la seule accessible à des mesures directes. On calcule ce paramètre comme étant le rapport du volume des vides (phase liquide et gazeuse) au volume total du sol.

I.1.1. La Porosité Géométrique Totale :

Elle se définit par le rapport du volume des vides au volume apparent du sol.

$$n = V_V / V_T = V_V / (V_V + V_S)$$

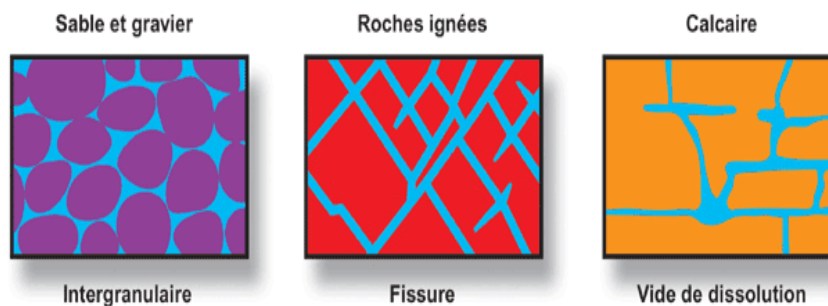
Avec : V_V : volume du vide, V_S : volume des grains, V_T : volume total, n : la porosité.

I.1.2. La Porosité efficace :

La porosité efficace est la différence entre la porosité totale et la rétention spécifique, elle représente le volume d'eau mobilisable.

$$\xi = N \cdot S_r = V_W / (V_V + V_S)$$

Avec: ξ : la porosité efficace. S_r : degré de saturation ; $S_r = V_W / V_V$



Où peut-on trouver de l'eau souterraine? L'eau occupe les interstices des grains de sable, les fissures des roches et les vides de dissolution.

Figure n°1 : Différents types de porosité (Wikip.)

I.2. Granulométrie :

Habituellement, l'analyse granulométrique fournit les proportions de grains de différents diamètres ; cette analyse peut se faire aussi bien par tamisage que par sédimentation dans l'eau en application de la loi de Stokes.

En fonction de la dimension et du nombre des grains composant un granulat, on dénomme les granulats, fines, sables, gravillons ou cailloux. Cependant, pour un granulat donné, tous les grains qui le constituent n'ont pas tous la même dimension.

Pour cela, on procède au classement des grains sur une série de tamis emboîtés les uns dans les autres. Les dimensions des mailles des tamis sont décroissantes du haut vers le bas. Le granulat est placé sur le tamis le plus haut et par vibrations, on répartit les grains sur les différents tamis selon leur grosseur.

Les dimensions d'une série forment une suite géométrique, pour les sables, on utilise les tamis d'ouverture (en mm) : 0,08 - 0,16 - 0,32 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5,0.

Les résultats de ces mesures sont donnés en général sous forme graphique, en mécanique des sols, on représente des courbes cumulatives de tamisat (% de grains inférieurs à une taille donnée) en fonction de logarithme décimal de la taille (figure 2.1).

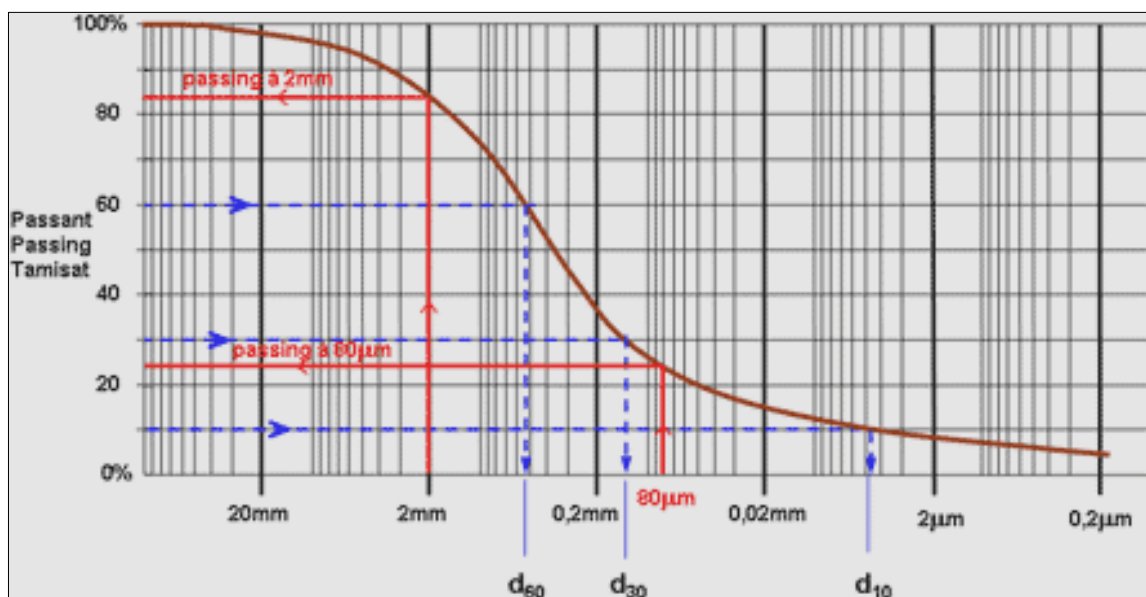


Figure n°2 : Différents types de porosité (Wikip.)

Sur la Figure ci-dessus une représentation des résultats d'une analyse granulométrique sous la forme (passant / tamisat) en fonction du logarithme de la taille des grains.

La courbe granulométrique est un élément essentiel de la description géotechnique des sols, elle permet de comparer les différents sols entre eux et sert de base aux différentes classifications des sols réels en se référant à des valeurs coupures types dont les plus souvent considérées sont les suivantes :

- le tamisat (passant-passing) à 80 μ m correspond à la coupure entre grains fins et grains grossiers;
- le tamisât à 2mm sépare les sables des graviers ;
- le tamisât à 2 μ m correspond aux "argiles" au sens granulométrique.

On appelle d_y la taille de grains qui correspond à un tamisât égal à $y\%$. La valeur d_{10} est appelée diamètre efficace du sol. La forme de la courbe granulométrique est aussi extrêmement importante, elle est caractérisée par deux coefficients :

- C_u ; coefficient d'uniformité d_{60} / d_{10} (dit de Hazen) ;
- C_c ; coefficient de courbure $(d_{30})^2 / d_{60} \times d_{10}$.

On parlera de granulométrie uniforme si les grains sont à peu près tous de la même taille et de granulométrie étalée si toutes les tailles de grains sont représentées (figure 2.2).

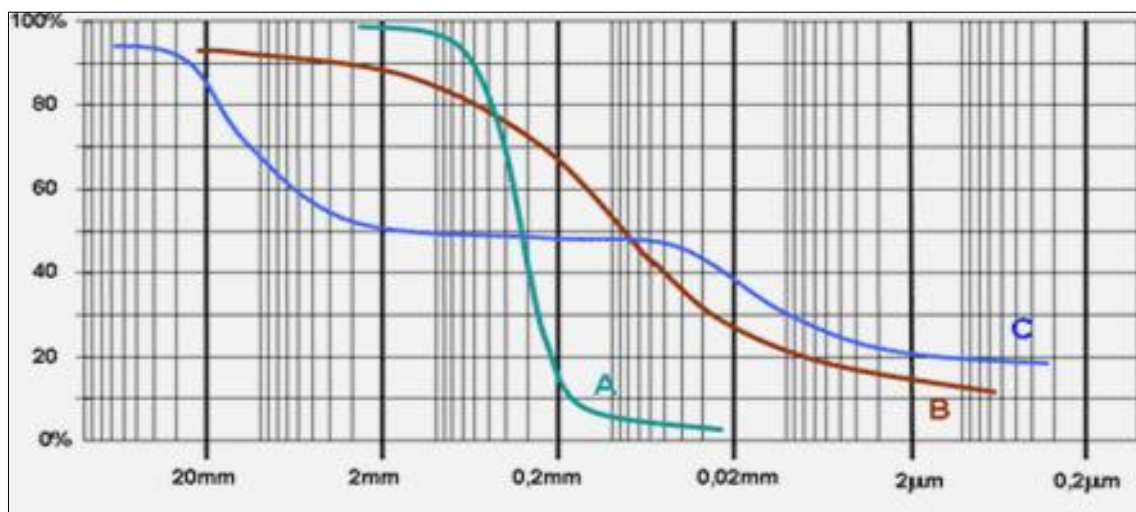


Figure n°3 : Exemples de courbes granulométriques (Wikip.)
(A : granulo. uniforme, B : granulo. étalée, C : granulo. discontinue)

Une famille donnée de sols sera caractérisée par un fuseau granulométrique. Pour les sols naturels, ce fuseau est une traduction des conditions de mise en place du dépôt.

I.3. La rétention spécifique :

L'eau infiltrée à travers les pores n'est pas totalement disponible à cause de la force de capillarité et des charges électriques fixant l'eau sur la surface des grains solides, c'est ce qu'on appelle la rétention spécifique.

I.4. Teneur en eau :

En physique des milieux poreux, on désigne par **teneur en eau** la quantité d'eau liquide contenue dans un échantillon de matière, par exemple un échantillon de sol, de roche, de céramique ou de bois, la quantité étant évaluée par un rapport pondéral ou volumétrique. Cette propriété intervient dans un large éventail de disciplines scientifiques et techniques, et s'exprime comme un rapport ou quotient, dont la valeur peut varier entre 0 (échantillon complètement sec) et (pour la teneur « volumétrique ») la « porosité à saturation » du matériau.

I.5. La Perméabilité :

C'est le paramètre le plus important dans l'écoulement souterrain, car il représente la faculté d'un milieu à transférer le fluide. On parle aussi de conductivité hydraulique. Il est proportionnel à la porosité efficace. Cependant un milieu poreux n'est pas nécessairement perméable si les pores ne communiquent pas entre eux.

Un terrain perméable est dit homogène s'il présente en tout point, dans une direction donnée, la même résistance à un écoulement de filtration. Si cette résistance est la même dans toutes les directions, le milieu est dit isotrope.

Sinon, il est dit anisotrope, En réalité, la plupart des terrains sont anisotropes, car ils sont plus perméables dans le sens horizontal que vertical.

Il est même fréquent d'observer une anisotropie horizontale dans le cas de nappes alluviales. C'est généralement la conséquence d'une orientation des dépôts parallèle au cours d'eau qui les a engendrés.

La perméabilité, notée K , d'un échantillon de terrain est mesurée à l'aide d'un perméamètre en utilisant la loi de DARCY, qui est la base de la théorie des écoulements de filtration. La perméabilité d'un terrain ou d'une couche en place, est mesurée in-situ par différentes méthodes dont les essais de pompage.

L'expérience de DARCY, qui est en somme très simple, montre que le débit Q filtrant à travers une colonne de sable, sur laquelle on applique une charge constante, est proportionnel au gradient hydraulique i , à la section S de l'échantillon, quelque soit sa forme, et à une constante K qui dépend de la nature du milieu poreux et du fluide filtrant.

K est la perméabilité relative du milieu poreux par rapport au fluide. Elle a les dimensions d'une vitesse. Elle n'est constante que lorsque le milieu est saturé, sinon elle est fonction de la teneur en eau. La loi du perméamètre ou loi de DARCY est donc : $Q = K \cdot i \cdot S$

Q : Débit filtré, i : gradient hydraulique = H / l , S : Section de l'échantillon

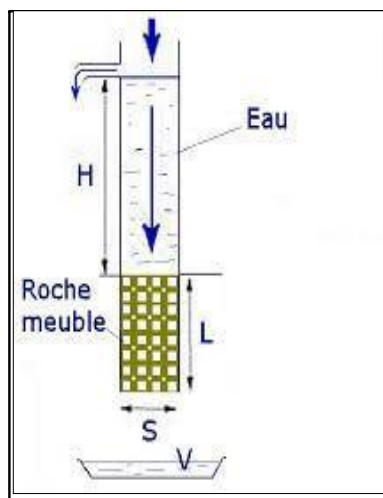


Figure n°4 : Schéma d'un perméamètre (Wikip.)

Pour les milieux à granulométrie fine, on utilise un perméamètre à charge variable, où l'on observe la chute de la charge dans le tube d'alimentation en fonction du temps. On en déduit le débit qui s'écoule à travers l'échantillon. L'application de la loi de DARCY permet de déterminer la perméabilité de l'échantillon.

D'après Terzaghi, la figure suivante donne une vue générale des valeurs de k dans différents types de sols. On retiendra encore une fois la grande étendue de variation de ce paramètre.

k(m/s)		10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²
Drainage		Bon					Mauvais			Pratiquement imperméable			
Types de sol		Graviers grossiers	Sables purs Sables et graviers propres		Sols "impermeables" au dessus de la zone d'altération			Sables très fins – silts mélanges sable/silt/argile		Sols "impermeables" Argiles homogènes non altérés			
			Essais de pompage en place					Infiltromètre de surface					
Mesure de k		Perméamètre à charge constante					Perméamètre à charge variable						
		Estimation à partir des courbes granulométriques					Calcul à partir des essais de consolidation						
Détermination indirecte de k													

Figure n°5 : Valeurs de k dans différents types de sols (Castany G.)

Des relations existent entre les caractéristiques physiques du milieu et la perméabilité, par exemple, Kozeny-Carman propose la relation suivante intéressante d'un point de vue théorique mais peu utilisée :

$$k = C \frac{\gamma_w}{\mu} \cdot \frac{e^3}{1+e} \cdot \frac{1}{S^2};$$

- où $C = 1/2$ si l'écoulement s'effectue dans un cylindre,
- γ_w et μ sont déjà définis ;
- e est l'indice des vides ;
- S la surface spécifique.

Dans le cas de sables uniformes et peu compacts, Hazen a proposé :

$$k \text{ (cm/s)} = C_1 d_{10}^2;$$

Où C_1 est une constante de l'ordre de 100 à 150 et d_{10} le diamètre efficace en cm.

Casagrande a proposé pour les sables complexes :

$$k = 1,4 k_{0,85} e^2 \quad ;$$

où $k_{0,85}$ est la perméabilité pour un indice des vides de 0,85

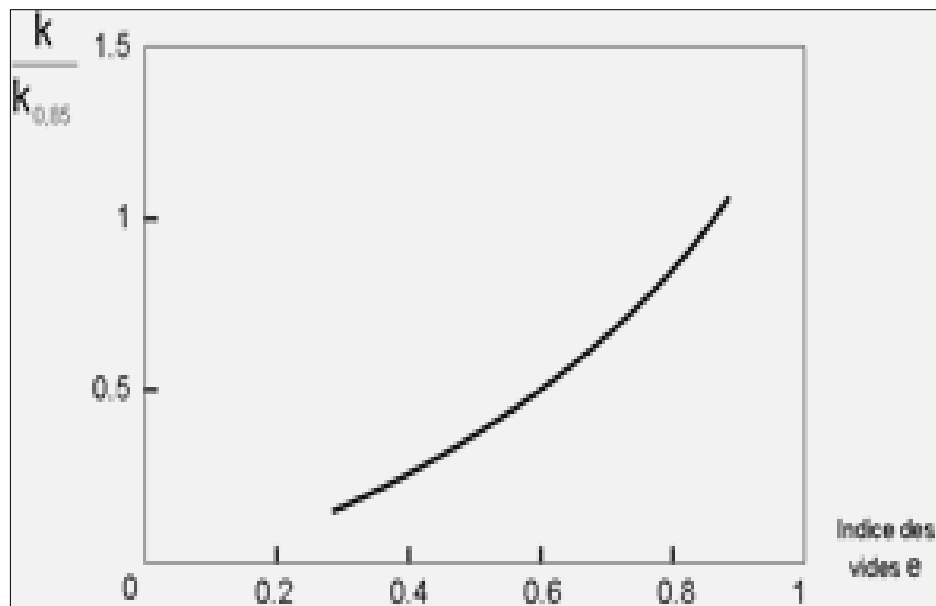


Figure n°6 : Relation $k = f(e)$ pour un sable à granulométrie plutôt continue

Conclusion :

Granulométrie, porosité et perméabilité sont les paramètres les plus caractéristiques du milieu poreux. La taille et le nombre des pores influent beaucoup sur l'écoulement du fluide à travers le milieu poreux et donc sur la perméabilité. Cependant un milieu poreux n'est pas nécessairement perméable si les pores ne communiquent pas entre eux.

Chapitre II

Écoulements souterrains et recharge des nappes

Introduction :

Dans ce chapitre nous rappelons des généralités sur les écoulements souterrains, les régimes d'écoulements, ainsi que les fondements théoriques du phénomène. Les aquifères, ou systèmes hydrogéologiques, sont le siège de ces écoulements sous formes variées, selon les conditions de gisement et d'exploitation. Les niveaux piézométriques sont systématiquement observés car ils permettent de gérer ces systèmes. La recharge artificielle est un outil qui se généralise pour soutenir le stockage des eaux souterraines.

II.1. Les écoulements souterrains :

II.1.1. Les écoulements en régime permanent :

Dans le cas des régimes permanents, la charge hydraulique ne dépend que des variables spatiales, soit $h(x, y, z)$. Sur un point de la surface piézométrique elle est constante et ne varie pas avec le temps. On dit d'un aquifère qu'il est en régime permanent si la somme des débits qui y entrent sont égaux à la somme des débits qui en sortent, soit $\Sigma Q_e = \Sigma Q_s$. On estime que le régime permanent rigoureux n'existe pas. Mais si les fluctuations de la surface libre sont très faibles par rapport à l'épaisseur de la nappe, on peut admettre que l'écoulement est permanent.

II.1.2. La loi de DARCY :

En publiant son mémoire sur les écoulements de filtration, H. Darcy a été à l'origine d'une loi phénoménologique, considérée comme la base de l'hydraulique souterraine.

Pour décrire les écoulements unidirectionnels dans un milieu poreux, il a établi la relation empirique suivante :

$$Q/S = K.i$$

Le débit par unité d'aire Q est proportionnel à $(h_1 - h_2)$ et inversement proportionnel à la longueur l de l'écoulement, tant que $h_1 - h_2 / l$ n'est pas trop fort.

C'est cette expérience qui a permis d'exprimer la loi de Darcy.

$$v = - K i$$

Avec v : vitesse de filtration (c'est le débit traversant une section unité) ;

i : gradient hydraulique ou perte de charge par unité de longueur dans le sens de écoulement ;

k : coefficient de perméabilité du sol qui a la dimension d'une vitesse. Il caractérise à la fois le sol et le liquide filtrant.

Il s'agit d'une vitesse apparente car, d'une part, l'eau ne circule que dans les pores et la section réelle disponible n'est que le réseau de vides aménagé entre les pores et d'autre part, les pores ne sont pas rectilignes et l'eau fait de nombreux détours, c'est ce qu'on appelle la tortuosité du milieu.

II.1.3. La Charge Hydraulique :

La charge hydraulique H conditionne l'énergie d'un point de la nappe d'eau. Comme l'eau se déplace du point à haute énergie vers le point à basse énergie. Il est impératif de bien connaître H . si possible le champ de H .

D'après Bernoulli. La charge en un point est égale :

$$H = Z + P / \gamma + V^2 / 2g$$

Elle s'exprime en mètres d'eau. Cette charge correspond à l'énergie totale d'une particule d'eau de masse unité :

Z : est la cote du point considéré par rapport à un plan horizontal de référence (énergie de position) P : est la pression de l'eau interstitielle en ce point (P/γ : énergie de pression).

V : la vitesse de l'eau.

Dans les sols, les vitesses sont si faibles que la quantité $v^2/2g$ qui représente l'énergie cinétique est insignifiante. La valeur de la charge devient :

$$H = z + P / \gamma$$

Sur la surface libre la pression est égale à la pression atmosphérique. On peut donc écrire : $H = Z$

II.1.4. Généralisation de la loi de Darcy :

Sous forme vectorielle, pour un milieu homogène et isotrope, la loi de Darcy s'écrit : $V = k \cdot i$

$$\vec{V} = k \text{ grad } h$$

Soit dans les directions principales :

$$\begin{aligned} V_x &= -K \frac{\partial H}{\partial x} \\ V_y &= -K \frac{\partial H}{\partial y} \\ V_z &= -K \frac{\partial H}{\partial z} \end{aligned}$$

Pour un milieu anisotrope ; $K_x \neq K_y \neq K_z$

$$\begin{aligned} V_x &= -K_x \frac{\partial H}{\partial x} \\ V_y &= -K_y \frac{\partial H}{\partial y} \\ V_z &= -K_z \frac{\partial H}{\partial z} \end{aligned}$$

II.1.5. Domaine de validité de la loi de Darcy :

Loi de Darcy n'est plus valable dans le cas de vitesse élevée, quand on augmente la perte de la charge dans un perméamétrie jusqu'à des valeurs relativement élevées. Il apparaît une déviation par rapport à la loi linéaire de Darcy (le débit croît moins rapidement). Cette déviation se manifeste plus vite quand le sol est plus grossier.

La limite de validité est déterminée par le nombre de Reynolds qui serait compris entre 1 et 10,

selon le milieu d'écoulement. On note toutefois que cette limite n'est pas rigoureusement définie.

Le nombre de Reynolds, qui caractérise le régime d'écoulement en hydraulique est :

$$R_e = v \cdot d / \mu / \rho$$

Où

- ✓ v : est la vitesse de l'écoulement.
- ✓ d : le diamètre des grains.
- ✓ μ : la viscosité du fluide et ρ sa masse volumique.

La loi de Darcy est une bonne approximation tant que des fortes vitesses d'écoulement ne sont pas atteintes.

II.1.6. L'équation de Laplace :

L'équation de continuité qui décrit le comportement du fluide est :

$$\text{Div } \mathbf{v} = 0$$

Soit ;
$$\partial v / \partial x + \partial v / \partial y + \partial v / \partial z = 0$$

En combinant avec la loi de Darcy, on obtient la loi de Laplace :

$$\partial^2 H / \partial x^2 + \partial^2 H / \partial y^2 + \partial^2 H / \partial z^2 = 0$$

Cette relation gère l'écoulement souterrain permanent dans un milieu homogène et isotrope. Puisque la perméabilité n'apparaît pas dans l'équation on en déduit que la répartition du champs de charge ne dépend que des variables spatiales x , y , et z , donc de la géométrie de l'écoulement et des conditions aux limites.

Pour un milieu anisotrope, en agissant de la même manière, on obtient :

$$K_x \partial^2 H / \partial x^2 + K_y \partial^2 H / \partial y^2 + K_z \partial^2 H / \partial z^2 = 0$$

Pour le milieu anisotrope, la distribution de la charge hydraulique dans le domaine d'écoulement dépend du rapport des perméabilités. La transformation affine permet de représenter l'écoulement réel anisotrope par un écoulement isotrope équivalent plus facile à étudier.

II.2. Ecoulement en régime transitoire :

Dans ce cas la répartition de la charge dépend des variables spatiales et du temps, soit $h = f(x, y, z, t)$. L'équation du mouvement de la surface libre est déduite de celle de la chaleur, soit :

$$(n/K) (\partial h / \partial t) =$$

Où ;

- n : est la porosité de la nappe.
- k : la perméabilité.
- $H(x,y)$ est la cote de la surface libre comptée à partir du plan horizontale de référence.
- $\partial h / \partial x$ est la pente de la surface libre.
- $\partial Q / \partial x$ et $\partial Q / \partial z$ sont les gradients sur la surface libre.

Dans les aquifères la charge hydraulique ou le niveau piézométrique varie en fonction du temps. Il y a donc un mouvement de la surface libre. La vitesse du mouvement dépend des caractéristiques de la nappe (perméabilité, porosité) et des gradients de charge.

Dans le cas général d'un écoulement à surface libre, le problème consistera à rechercher une succession de solution de l'équation de Laplace dépendant l'une de l'autre par l'intermédiaire de l'équation du mouvement de la surface libre.

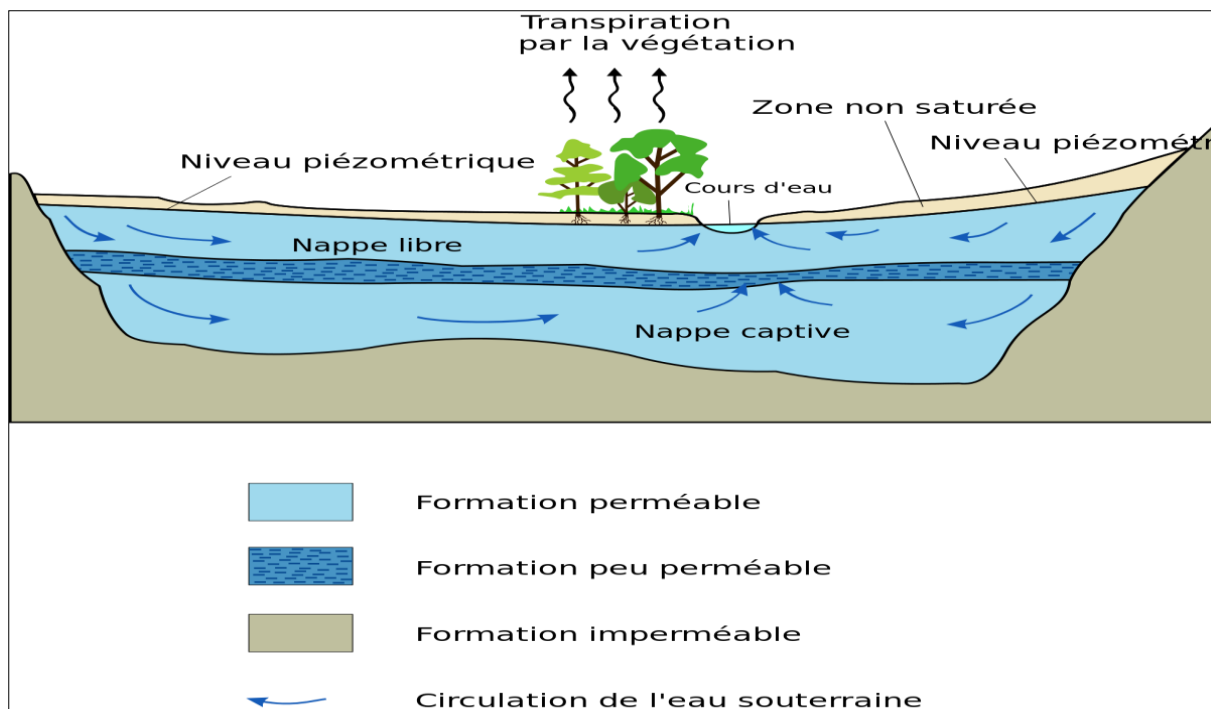


Figure n°7a : Types d'aquifères (wikipedia.org)

II.2. Influence du pompage sur la nappe

Le niveau piézométrique d'une nappe se mesure au moyen d'un réseau de piézomètres et d'une éventuelle modélisation sur la base des données fournies. Il peut aussi être mesuré via le niveau de l'eau des puits s'il en existe. Chaque puits est une fenêtre sur le plafond de la nappe, mais en cas de prélèvement important il faut tenir compte d'un probable rabattement de nappe. Dès que commence le pompage le niveau piézométrique dans le puits commence à diminuer, on parle alors de niveau dynamique. La différence entre le niveau statique, initial de la nappe au repos, et le niveau dynamique est appelée rabattement. Ce dernier croît pendant un certain temps puis se stabilise. Le débit qui rentre dans le puits à partir de la nappe est sensiblement égal au débit pompé.

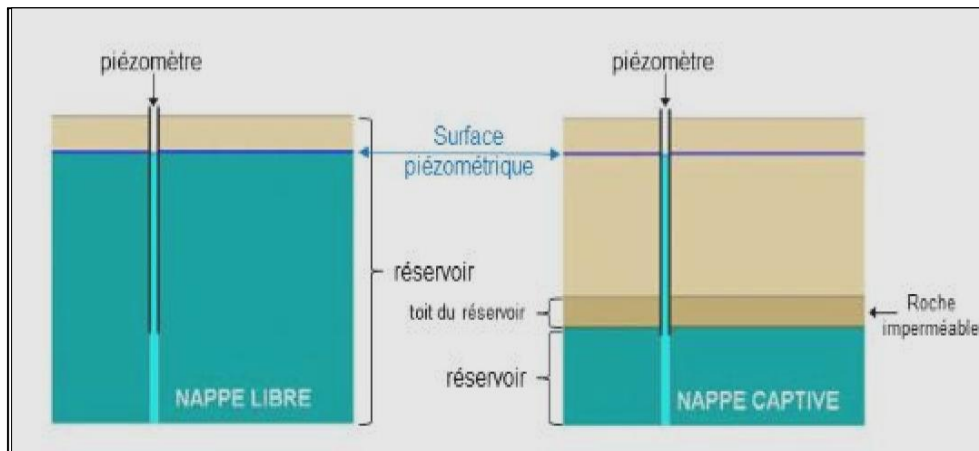


Figure n°7b : Types d'aquifères (wikipedia.org)

Plus on s'éloigne du puits plus le rabattement diminue jusqu'à ce qu'il s'annule à une distance appelée rayon d'influence ou rayon d'action. L'effet du pompage sur la nappe se manifeste donc par la formation d'un cône de dépression dont l'axe coïncide avec celui du puits. Les dimensions de ce cône sont latéralement le rayon d'action (R_a) et verticalement le rabattement (s).

Le rabattement dépend surtout du débit de pompage et le rayon d'action des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère et du temps de pompage.

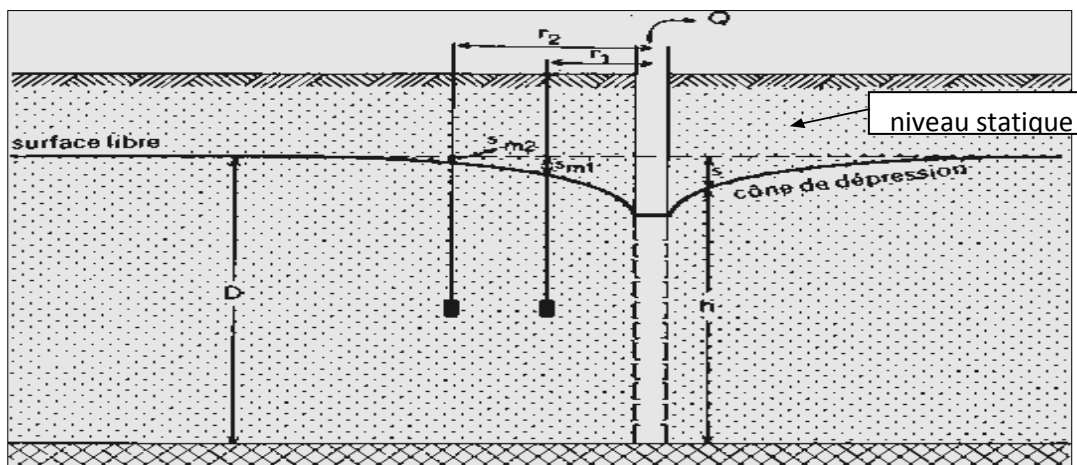


Figure n°8 : Coupe d'un pompage dans une nappe libre
(Hydraulique des puits. H. Dupuit)

Les essais de pompage sont réalisés lors des études hydrogéologiques. Ils permettent d'estimer le rayon d'action du pompage et de calculer le coefficient de perméabilité horizontal des terrains lorsque l'épaisseur de la couche aquifère est connue.

II.3. Recharge artificielle des nappes :

D'après Todd (1959), la recharge artificielle est « l'augmentation de la quantité d'eau bénéficiant aux réservoirs d'eau souterraine via des dispositifs artificiels ». Flint et al. (2002) la définissent comme étant « l'introduction d'eaux extérieures dans une formation aquifère par leur transit dans la zone non-saturée à travers des bassins d'infiltration, puits, aménagement des cours d'eau, etc. ». La recharge artificielle des nappes est une pratique qui vise à augmenter les volumes d'eau souterraine disponibles en favorisant, par des moyens artificiels, l'infiltration d'eaux extérieures (ex. rivière) jusqu'à l'aquifère. C'est une des mesures qui peut être mise en œuvre pour sécuriser l'approvisionnement en eau, compenser certains effets du changement climatique et, plus généralement, aménager la pression quantitative et qualitative sur les masses d'eau souterraine.

Les objectifs de la mise en place d'une recharge artificielle sont les suivants :

- Restauration d'une nappe surexploitée par excès de pompage et dont le rabattement est préjudiciable : c'est le but premier de la recharge artificielle
- Amélioration de la qualité des nappes : baisse des concentrations en certains éléments chimiques (par exemple nitrate, pesticides), soit par dilution, soit en utilisant le pouvoir d'autoépuration du sol. Ceci permet notamment la mise en œuvre de traitements de potabilisation finaux plus simples et plus économiques, mais également d'améliorer la protection de l'environnement
- Protection des aquifères côtiers contre l'intrusion d'eau salée
- Stockage des eaux pour une utilisation différée

Les principales techniques de recharge artificielle sont :

- Les bassins d'infiltration
- Les méthodes d'injection directe
- La recharge artificielle indirecte

Les méthodes d'infiltration consistent à faciliter l'infiltration de l'eau jusqu'à la nappe à partir de bassins spécialement aménagés, souvent en profitant des capacités géo-épuratrices du sol et de la zone non saturée de l'aquifère pour assurer un complément de traitement des eaux infiltrées et améliorer la qualité générale de la ressource. Elles sont généralement utilisées pour réalimenter les nappes libres ou dans certains cas pour mettre en place des barrières hydrauliques. Les méthodes d'injection directe via des forages sont les méthodes les plus utilisées à travers le monde. Elles permettent de recharger des nappes captives afin d'en accroître le potentiel, ou encore de créer des barrières hydrauliques afin de contenir, maîtriser ou dévier des pollutions ou neutraliser un biseau salé, afin de préserver au mieux la ressource en eau exploitée.

Elle nécessite un contrôle rigoureux de la qualité de l'eau utilisée.

La « recharge artificielle indirecte », plus souvent appelée « la réalimentation artificielle induite » ou « réalimentation induite » consiste à augmenter le transfert d'eau entre un cours d'eau et une nappe alluviale en mettant en place des sites de pompage souterrains à proximité des berges. Lors de ce transfert, l'eau du cours d'eau est souvent partiellement filtrée grâce au pouvoir épurateur des berges. Cette technique est connue de longue date, ce qui a souvent conduit nos anciens exploitants des ressources en eau à placer des batteries de forages au droit des fleuves et rivières.

Un critère fondamental concernant la faisabilité d'un projet de recharge artificielle est la disponibilité d'eau de recharge à proximité du site d'injection, nécessaire pour pouvoir assurer un apport régulier et limiter les coûts économiques liés aux transports. On distingue en général deux types d'eau utilisés pour la recharge : les eaux de surface issues de cours d'eau et les eaux usées traitées (actuellement interdit en France). En raison de leur disponibilité, les eaux de surface issues de cours d'eau sont généralement utilisées si l'objectif de la recharge artificielle est principalement quantitatif. Il est toutefois souvent difficile d'utiliser ce type d'eau en période déficitaire sans courir le risque de dégrader le débit du réseau hydrographique, sauf dans les cas où s'il s'agit de grands fleuves ou de rivières importantes.

Les projections d'évolution des ressources en eaux, en lien avec le changement climatique, font craindre une diminution probable des ressources en eaux souterraines, due à des baisses locales de la recharge naturelle des nappes souterraines. Par conséquent, des mesures de préservation des ressources doivent être prises. La recharge artificielle de nappes pourrait être envisagée comme un moyen de gérer durablement ces ressources. Les eaux de surface (en particulier les cours d'eaux) pourraient être utilisées pour la réalimentation artificielle des nappes d'eaux souterraines. L'utilisation d'eaux usées traitées, sous réserve d'une évolution de la réglementation (qui n'autorise pas à ce jour leur utilisation dans ce cadre), pourrait également être envisagée.

Cette pratique est particulièrement développée dans les pays connaissant un fort stress hydrique. Avant d'envisager le développement de cette pratique, il est essentiel d'identifier les dangers et les risques sanitaires pouvant en résulter. En effet, les eaux dont l'utilisation pourrait être envisagée sont susceptibles de véhiculer divers types de contaminants microbiologiques et chimiques.

Conclusion :

Les essais prévus dans la partie expérimentale doivent être conformes aux lois d'écoulement et principes énoncés dans cette première partie. Dans notre cas, c'est un écoulement transitoire, influencé par une recharge artificielle appliquée en amont du système, ainsi qu'un pompage à l'aval. On considère que le modèle que l'on va utiliser est aisément dans les limites de validité de la loi de Darcy, vu la perméabilité du matériau, et la charge hydraulique appliquée dans le dispositif.

Chapitre III

Essais Expérimentaux

Introduction

Le banc de drainage du labo d'hydrologie (Bloc C) nous a servi à simuler un système hydrogéologique composé d'une nappe captive presque dénoyée, d'un écran disposé en aval de l'aquifère. Les essais consistent à mesurer les variations de la piézométrie de la nappe sous l'effet de la réalimentation et du pompage.

Le modèle est apte reproduire le phénomène tel qu'il se passerait dans la nature, tant que la loi de Darcy est respectée.

Toutefois l'expérimentation doit suivre des règles aussi rigoureuses que possible, c'est pour cela que nous avons du refaire les essais plusieurs fois pour limiter l'effet des erreurs systématiques.

La mise en place de l'écran a nécessité beaucoup de temps et de tentatives pour aboutir à un dispositif fiable.

L'alimentation de nappe est faite en appliquant une charge en amont du dispositif, supérieure à la charge initiale de la nappe.

Les essais expérimentaux consiste à suivre la surface libre de l'aquifère après disposition d'un écran en travers de l'écoulement. On présentera alors l'équation du mouvement de la surface libre en fonction des paramètres adoptés. C'est un cas particulier d'écoulement transitoire. La détermination des volumes relatifs additifs en eau souterraine permettra d'extrapoler les résultats obtenus aux conditions réelles de terrain.

III.1. Dispositif utilisé :

L'équipement utilisé est un banc de drainage dans lequel on peut disposer le matériau selon la configuration choisie. On peut donc simuler différents cas d'écoulement. Le banc est présenté dans la figure ci-dessous,



Figure n°9a : Banc de drainage (Labo bloc C) (Avril 2020)

Il comporte :

- ✓ Un support spécial qui soutient le réservoir de drainage et d'infiltration.
- ✓ Une citerne.
- ✓ Une pompe centrifuge.
- ✓ Le support possède des pieds ajustables pour équilibrer l'ensemble du montage.
- ✓ Le réservoir de drainage et d'infiltration possède un cadre rectangulaire en acier profilé.
- ✓ Un panneau avant en verre trempé.
- ✓ Deux tubes de décharge indépendante set réglables.
- ✓ Deux rails en aluminium le long du coté supérieur du réservoir pour soutenir l'écran réducteur de pression, une membrane imperméable et un tuyau d'admission.

A la base de réservoir se trouve un déchargeoir utilisé lorsque l'équipement est nettoyé pour s'assurer que des particules de terre ne tombent pas dans la citerne. Relié au support sous la tablette se trouve l'interrupteur de la pompe, qui contrôle la pompe et l'alimentation d'eau dans le tuyau d'admission au réservoir a partir de la citerne.

L'eau est envoyée vers la citerne au moyen des tubes de décharge. La citerne peut être vidée en utilisant le déchargeoir.

Des piézomètres peuvent être implantés directement dans le matériau utilisé et permettent d'observer le niveau piézométrique. Il est aussi cible d'injecter un colorant a l'aide d'une aiguille implantée dans l'aquifère relié a un flacon suffisamment élevé. Ce dispositif est destiné a visualiser les lignes de courant.

III.2. Installation :

Sur la figure ci-dessous, est présenté un schéma du modèle utilisé. L'aquifère constitué par le sable, un toit imperméable est disposé pour mettre en charge la couche de sable. Un écran en aval intercepte l'écoulement en aval. Le schéma du banc de drainage est représenté ci-dessous :

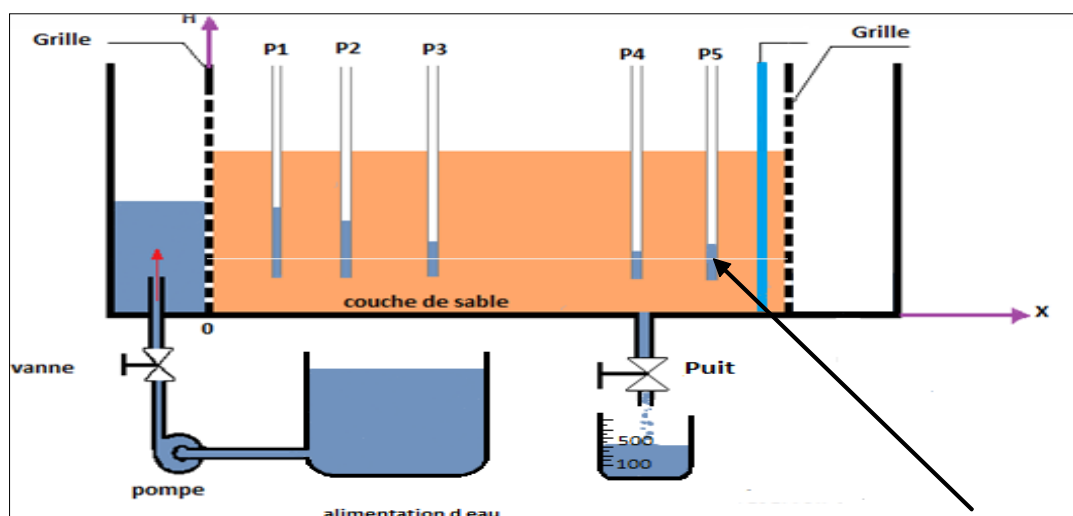


Figure n°9b : Schéma du dispositif expérimental



Figure 9c : Modèle de nappe captive utilisé

III.2. Granulométrie et perméabilité du matériau utilisé

Avant de réaliser nos essais nous avons réalisé des essais permettant de déterminer la granulométrie et la perméabilité du sable utilisé.

➤ *Matériau Utilisé (Milieux Poreux) :*

Le sol utilisé pour réaliser nos essais est un sable lavé (propre) de diamètre variant dans la gamme (0,5-2,0mm), il est préparé par tamisage mécanique.

Le tamisage mécanique rentre dans le cadre de l'analyse granulométrique. Des sols dont le diamètre des grains est plus grand que 0,08mm, en général les dépôts de sols trouvés dans la nature contiennent une plus grande catégorie des dimensions et des propriétés variables d'un point à l'autre, l'analyse granulométrique des sols est habituellement faite au laboratoire à l'aide de deux types d'essais qui sont le tamisage mécanique et la sédimentométrie.

➤ *Principe de la manipulation :*

Le tamisage mécanique consiste à faire passer une quantité de sol sec à travers une série de tamis A.F.N.O.R., et à mesurer les pourcentages des passants de chaque tamis en fonction de leur dimension.

➤ *Matériel Utilisé :*

- Série de tamis A.F.N.O.R.
- Grand plat.
- Balance sensible.
- Appareil vibreur.

➤ *Procédure de l'essai :*

La procédure de l'essai de tamisage mécanique est décrite en détail dans les normes

A.S.T.M D422 63. Les principales étapes peuvent être décrites de façon sommaire comme suit :

Prendre une quantité de sable sec.

- Désagréger les grains dont le diamètre est supérieur au tamis 2mm.
- Faire passer le sable à travers une série de tamis superposés de diamètre décroissants du haut en bas. Le passage peut être effectué à brassage des tamis à l'aide d'un vibreur mécanique.
- Peser au gramme près les quantités de sable retenues sur chaque tamis.
- Exprimer ces poids en pourcentage cumulé des grains retenus dans les tamis en fonction des diamètres des mailles, est représentée dans la figure suivante :

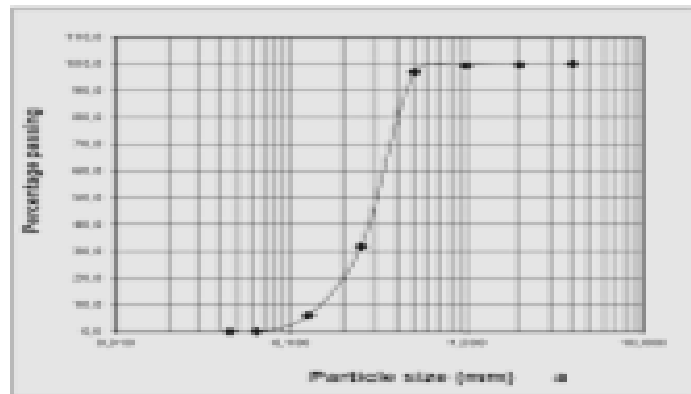


Figure n°10 : Courbe granulométrique du sable utilisé

➤ Mesure de la perméabilité :

Le coefficient de perméabilité d'un sol est un coefficient important qui dépend de la granulométrie du sol, de sa nature, et de sa structure. Plus le sol est fin, plus les pores sont fins ; plus les frottements entre l'eau et les grains sont grands, plus la perméabilité est faible. A l'inverse plus le sol est compact, plus les pores sont fins ; plus les frottements sont grands, plus la perméabilité est faible.

Comme le sol choisi est un sable, donc on a un sol très perméable ; alors la mesure de perméabilité s'effectue sur un perméamètre à charge constante.

L'essai consiste à laisser l'eau circuler à travers un échantillon de sable préalablement placé dans un perméamètre. Le volume d'eau qui s'écoule à travers l'échantillon est mesuré à l'aide d'un bêcher gradué, la période est mesurée à l'aide d'un chronomètre.

Dans notre cas, l'épaisseur du sable est 49,5 cm. On règle le robinet de telle façon que le niveau d'eau dans le perméamètre soit constant. D'où on aura une perte de charge de 61,5 mm ($\Delta H = 61,5$ mm).

Quand l'écoulement devient permanent, on mesure un volume d'eau écoulé dans la période mesurée à l'aide d'un chronomètre.



Figure n°11 : Perméamètre à charge constante utilisé (Labo d'hydrologie – Bloc C)

Nous réalisons trois essais de mesure de perméabilité. Les résultats sont dressés dans le tableau N°1. Le débit peut s'exprimer sous la forme :

$$Q = v / \Delta t = K \cdot \Delta H / L$$

Donc : $K = v \cdot L / (\Delta H \cdot S \cdot \Delta T) = Q \cdot L / (\Delta H \cdot S)$.

Avec :

S : section de l'échantillon ($S = 4,98 \text{ cm}^2$).

L : longueur de l'échantillon (mm).

Q : le débit filtré.

ΔH : perte de charge ($\Delta h = 61,5 \text{ mm}$).

K : coefficient de perméabilité du sable.

On déduit directement la perméabilité du sable:

Sachant que le gradient hydraulique $i = 1.24$ et la section de l'écoulement $S = 94.98 \text{ cm}^2$ et le débit filtré $Q = 8,829 \text{ cm}^3/\text{s}$, le coefficient de perméabilité de ce sable est :

$$K = 7,495 \cdot 10^{-2} \text{ cm/s}$$

Tableau N°1 : Résultats de mesure de la perméabilité

N°échantillon	N°1	N°2	N°3
La charge H (cm)	8,80	12,40	18,00
Le volume (cm ³)	8388 ,60	11820,30	17158,50
Le temps (s)	960	1290	1999
Le débit (cm ³ /s)	8,738125	9,163023	8,583542
La perméabilité K (cm/s)	0,074190	0,077798	0,072878

III.3. Conduite des essais:

Après la préparation du modèle avec la disposition de 5 piézomètres (situés respectivement à 20,5 cm, 40,5 cm, 60,5 cm, 92,5 cm et 106,5 cm par rapport au dispositif de l'alimentation), on a installé un écran imperméable à une distance de 112 cm. On met un toit imperméable de 3 cm d'épaisseur (polystyrène) pour mettre 20 cm de sable en charge. On remplit le banc avec l'eau puis on dispose le sable pour éviter l'emprisonnement de l'air.

On déclenche la pompe, l'eau s'écoule, et la charge augmente de l'amont vers l'aval jusqu'à obtention d'une couche saturée. Le niveau statique a été fixé à 10,5 cm de la base du banc, grâce a un système de trop plein.

Le débit de la pompe qui alimente la nappe est en moyenne de 25,17cm³/s.

On relève les niveaux d'eau dans les piézomètres chaque minute pendant une durée de 4 minutes.

Quatre configurations ont été utilisées :

- Cas n°1 : Alimentation de la nappe et observation des variations hydrodynamiques.
- Cas n°2 : Pompage à partir d'un puit situé près de l'écran, après alimentation de la nappe.
- Cas n°3 : Pompage (Q=2,96 cm³/s) et alimentation en parallèle.
- Cas n°4 : Pompage (avec Q=2,27cm³/s) et alimentation en parallèle.

Cas N°1 - Alimentation de la nappe :

L'essai a consisté à alimenter la nappe avec un débit de 25,17 cm³/s durant 7,8 minutes, tout en observant l'évolution de la charge dans les piézomètres. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant.

Tableau n° 2 : Variation de la charge dans les piézomètres en fonction du temps.

Distance des piézomètres (cm)		charge piézométrique (cm)					
		t = 0 min	t= 1min	t= 2min	t= 3min	t= 3,5 min	t= 4min
p1	20,5	10,5	14,97	17	21,23	23,9	27,1
p2	40,5	10,5	11,8	15	18,5	21,07	25,6
p3	60,5	10,5	11,23	13,9	16,87	18,63	23,27
p4	92,5	10,5	10,73	12,46	14,73	16,33	18,9
p5	106,5	10,5	10,7	12,13	14,2	15,57	17,67

Cas N°2 : Pompage à partir d'un puits situé près de l'écran, après alimentation de la nappe.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau N°3 : Variation de la charge dans les piézomètres.

Distance des piézomètres (cm)		charge piézométrique (cm)							
		t=0	t=1min	t=2min	t=3min	t=4min	t=5min	t=6min	t=7min
p1	20,5	33	29,7	29,07	28,37	27,93	26,77	23,27	20,6
p2	40,5	33	28,9	28,3	27,77	27,17	25,77	21,3	18,47
p3	60,5	33	26,47	26,1	25,4	24,97	22,13	16,97	14,57
p4	92,5	33	16,5	16,1	15,8	15,3	10,67	7,7	6,33
p5	106,5	33	21,7	21,13	20,83	20,43	12	9,07	7,43

Cas N°3 : Débit de pompage moyen $Q = 2,96 \text{ cm}^3 / \text{s}$:

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau N°4 : Variation de la charge dans les piézomètres

Distance des piézomètres (cm)		charge piézométrique (cm)					
		t=0	t=1min	t=2min	t=3min	t=4min	t=5min
p1	20,5	10,5	12,4	16,3	20,13	21,57	25,53
p2	40,5	10,5	10,67	13,3	16,4	18,4	22,5
p3	60,5	10,5	8,9	10,4	12,67	14,33	18,03
p4	92,5	10,5	4,07	4,27	4,67	4,7	6
p5	106,5	10,5	4,63	5,07	5,43	5,87	6,2

Cas N°4 : Débit de pompage faible $Q = 2,27 \text{ cm}^3 / \text{s}$:

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau N°5 : Variation de la charge dans les piézomètres.

piézomètre distance (cm)		charge piézométrique (cm)					
		t=0	t=1min	t=2min	t=3min	t=3:30min	t=4min
p1	20,5	10,5	12,23	16,03	20,4	23	26,4
p2	40,5	10,5	11	13,63	17,03	19,37	24,17
p3	60,5	10,5	9,17	11,2	13,63	15,63	21,47
p4	92,5	10,5	5,63	5,67	7,07	7,9	10,5
p5	106,5	10,5	6,6	6,6	7,33	8,2	10,67

III.4. Interprétation des résultats :

III.4.1. Cas N°1 - Alimentation de la nappe :

On observe une remontée d'eau respectivement dans tous les piézomètres, la mise en charge sous le toit ralentit sensiblement le phénomène. La surface de la nappe s'élève beaucoup plus en amont, créant en conséquence un gradient hydraulique croissant.

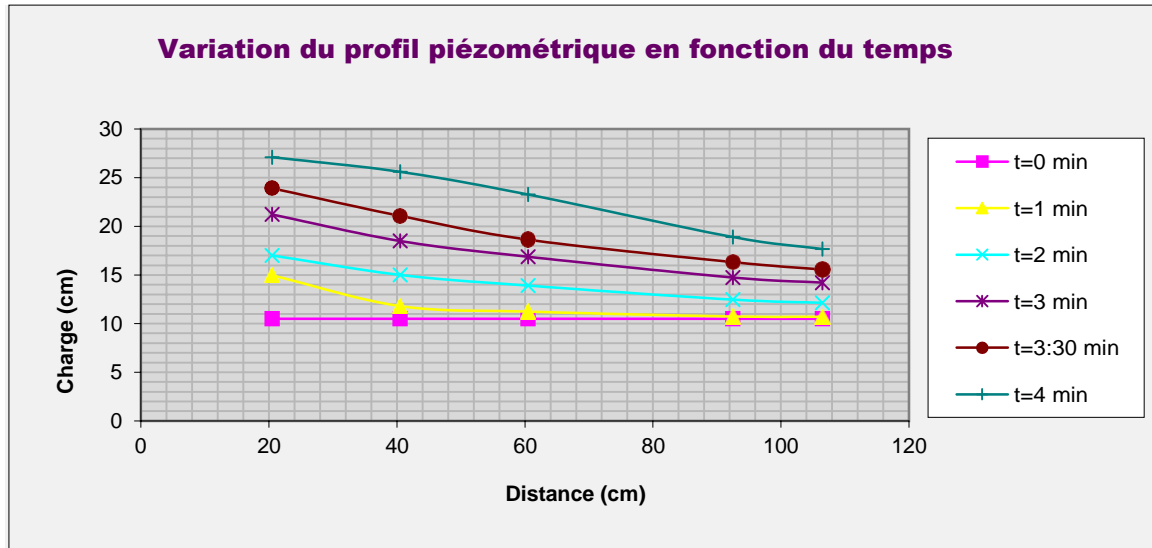


Figure n°12 : Variation de la charge dans les piézomètres.

Les courbes de la vitesse de remontée de l'eau montrent bien comment évolue la charge hydraulique latéralement dans l'aquifère. On peut l'ajuster facilement avec une équation linéaire de la forme $h = a t$, où a est la pente de la droite, qui dépend surtout de la perméabilité du matériau.

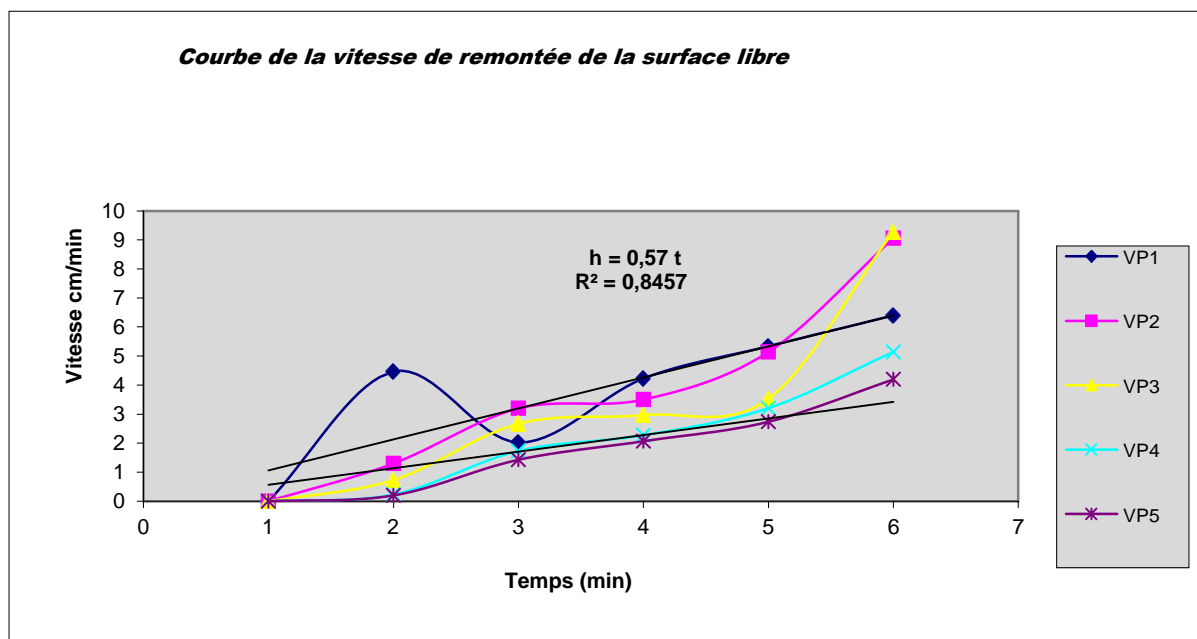


Figure 13 : Courbes de vitesse de montée de la charge hydraulique dans les piézomètres

III.4.2. Cas n° 2 : Début de pompage après l'alimentation :

Dans cet essai on va simuler un pompage ; nous avons présenté les débits et durées utilisés. Les charges comme prévu diminuent, sensiblement plus en amont.

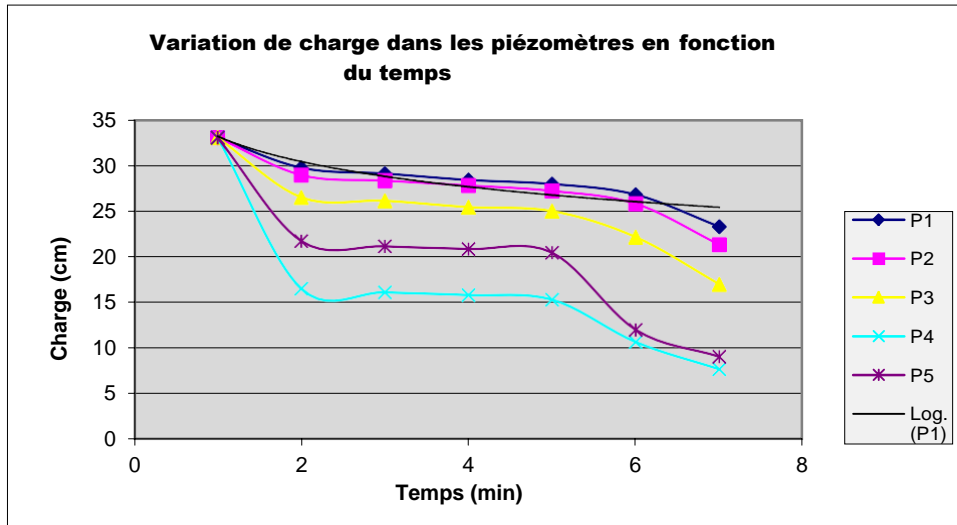


Figure 14 : Variation de la charge dans les piézomètres

On observe sur les courbes (Figure 15, l'évolution de la surface piézométrique de la nappe. On constate la présence d'une zone de rabattement produite par le puits de pompage. La forme générale de la surface de la nappe reste quasiment la même, la zone de rabattement évolue de la même manière que l'ensemble de la nappe. On déduit facilement, dans ce cas, que la recharge est plus rapide que la chute du niveau piézométrique.

III.4.3. Cas n°3 : Pompage avec débit moy. $Q = 2,96 \text{ cm}^3 / \text{s}$:

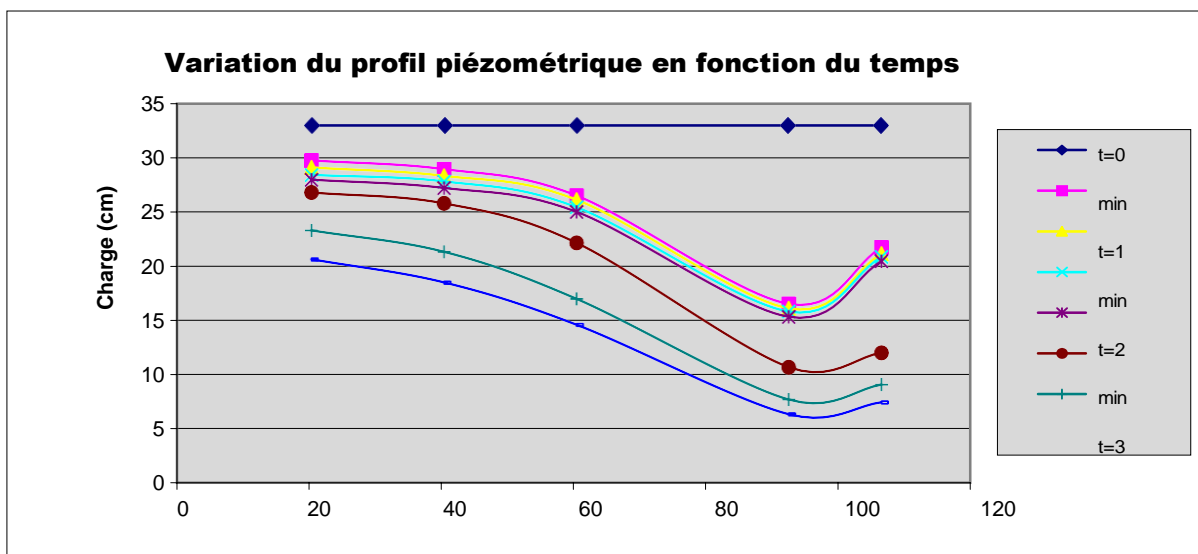


Figure 15 : Variation du profil piézométrique au cours du pompage en fonction du temps

Conclusion :

Les essais réalisés ont montré la réaction d'un aquifère captif à une recharge et pompage. Les premiers essais, concernant la recharge, ont permis de déduire une progression linéaire de la charge hydraulique en fonction du temps.

L'équation $h = a t$, décrit bien le phénomène, où a est la pente de la droite, qui dépend entre autres de la perméabilité du matériau. Toutefois, plusieurs essais, avec plusieurs types de matériaux permettront de donner des valeurs à ce paramètre a .

Il est intéressant de remarquer que la réalimentation provoque un gonflement de la nappe en amont. Ceci est boosté par la présence de l'écran disposé en aval de l'aquifère. Par contre, le pompage crée une zone de dépression limitée aux alentours immédiats du puits. Les niveaux piézométriques chutent à la même vitesse. Les essais de recharge et pompage simultanés n'ont pu être effectués, suite à l'interruption à cause du covid 19.

Conclusion générale :

Le travail réalisé, s'est intéressé à la réaction d'un aquifère captif surexploité, à une réalimentation ou recharge artificielle. Initialement, les essais programmés devaient s'étaler sur une période de trois semaines. Mais des contraintes liées à pandémie, ne nous ont pas permis de multiplier les essais pour affiner les observations. On s'est contenté, alors, du travail réalisé, qui, malgré les désagréments liés au Covid 19, a abouti à des résultats intéressants.

On a présenté dans les deux premiers chapitres de synthèse bibliographique, les notions de base sur les milieux poreux et les écoulements souterrains. On a rappelé l'essentiel des connaissances usuelles sur la réalimentation des aquifères et sur l'effet des pompages sur la piézométrie des nappes.

Le troisième chapitre a été consacré à l'expérimentation réalisée, l'équipement utilisé, le modèle conçu et les résultats obtenus.

Les premiers essais, concernant la recharge, ont permis de déduire une progression linéaire de la charge hydraulique en fonction du temps.

L'équation empirique obtenue à partir des courbes tracées, $h = a t$, décrit bien le phénomène. Toutefois, plusieurs essais, avec plusieurs types de matériaux permettront de donner des valeurs à ce paramètre a .

Il est intéressant de remarquer que la réalimentation provoque un gonflement de la nappe en amont. Ceci est boosté par la présence de l'écran disposé en aval de l'aquifère. Par contre, le pompage crée une zone de dépression limitée aux alentours immédiats du puits.

Une série d'essais est nécessaire pour compléter ce travail sur les aquifères.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Castany, G.(1998) : hydrogéologie « principes et méthodes » Edition-DUNOD.

Hess, Paul J.; (1986) *Utilisation des eaux souterraines au Canada, 1981*, Institut national de recherche en hydrologie, rapport no 28 de l'INRH, étude no. 140 de la Collection des rapports techniques de la DGEI, Ottawa, , 45 p

Todd, David Keith. (1980).*Groundwater Hydrology*, 2^{ème} éd., John Wiley & Sons (ed.), New York (N.Y.), , 535 p.