

Université Cadi Ayyad

Faculté des sciences et techniques de Marrakech

Département des sciences de la terre

Licence en sciences et techniques Eau et Environnement

Mémoire de fin d'études

*Etude hydrogéologique et hydrologique de la recharge
artificielle de la nappe de Haouz au niveau de oued Zat au
sud-est de Marrakech*

Réaliser par :

- ✉ Bouimouass Houssne
- ✉ Boujghad Abdelaziz

Encadrer par :

- ✉ Mr. Moustadraf Jalal
- ✉ Mr. Sghir Fathallah (ORMVAH)

Soutenu le 26/06/2014 devant le jury composé de :

- ➔ Mr. Moustadraf Jalal (Encadrant)
- ➔ Mlle. Bourgeoini Yamina (Examinatrice)

REMERCIEMENTS

Nous adressons nos profonds remerciements à Monsieur F. SGHIR, notre encadrant à l'Office Régional de la Mise en Valeur Agricole du Haouz, ainsi que monsieur A. Moreno pour leurs temps, leurs encadrement, et leurs conseils.

Nous remercions infiniment notre encadrant Monsieur J. Moustadraf pour tous son temps qu'il nous a consacré et les efforts qu'il à fait malgré les contraintes et la distance.

Nous remercions aussi tous les professeurs du département de sciences de la terre de la faculté des Sciences et Techniques, pour leurs soutiens et leurs conseils.

Nos vifs remerciements à Mlle Yamina Bourgeoini d'avoir accepté de juger ce travail

Par ailleurs, la réalisation de ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien moral et effectif de nos familles. Nous remercions donc nos parents pour leur appui et leur soutien durant toutes nos années d'études.

Nos parents, nos frères et nos amis pour leur encouragement et leur soutien moral. Nous leur exprimons nos vifs remerciements.

On remercie également toute personne qui a aidé de manière directe ou indirecte à la réalisation de ce travail.

Sommaire

- Introduction**
- Méthodologie de travail**
- Liste des figures**
- Liste des tableaux**
- Liste des photos**
- Liste des abréviations**

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LA RECHARGE ARTIFICIELLE DES NAPPES (RAN) 9

- I -Définition de la RAN :10**
- II - Conditions préalables à la réalisation de la RAN :10**
 - II.1- Les conditions Hydrogéologiques : 10
 - II.2- Les conditions hydrologiques : 10
- III -Caractéristiques hydrauliques et physiques10**
 - III.1- Effets induits d'une alimentation artificielle..... 10
 - III.2- La diffusivité, la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement : 11
- IV -Dispositifs de la RAN :11**
 - IV.1- Recharge par puits d'injection 11
 - IV.2- Recharges depuis la surface..... 11
- V -Le problème de colmatage12**

CHAPITRE 2 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE 13

- I -Généralités sur le bassin versant de Zat :14**
 - I.1- Situation géographique : 14
 - I.2- Morphologie : 14
 - I.3- Géologie : 15
- II -Contexte climatologique :15**
 - II.1- Pluviométrie : 15
 - II.2- Températures..... 16
- III -Contexte hydrogéologique16**
 - III.1- Données générales sur la nappe de Haouz : 16
 - III.2- Alimentations de la nappe 16
 - III.3- La baisse piézométrique 16
 - III.4- Le bilan de la nappe 17
- IV -Contexte hydrologiques :17**
 - IV.1- Apports moyens à la station Tafériat..... 18
 - IV.2- Caractéristiques des crues à différentes périodes de retour..... 19
 - IV.3- prélèvements par seguias : 19

CHAPITRE 3 : ÉTUDE DE LA FAISABILITÉ DE LA RECHARGE ARTIFICIELLE AU NIVEAU DE L'OUED ZAT 21

- I -Possibilité de la réalisation d'un projet de recharge artificielle au niveau de l'oued Zat :22**
 - I.1- Conditions d'applications de la recharge artificielle : 22
 - I.2- Les caractéristiques morphologiques du secteur étudié: 23

II -Critères du choix de dispositif de recharge :	25
II.1- Ouvrage retenu:.....	25
II.1.1- Seuil en béton cyclopéen avec bassin de dissipation en enrochement :	25
II.1.2- Seuil en béton cyclopéen avec bassin à ressaut en béton armé :	26

CHAPITRE 4: CHOIX DE SITES POTENTIELS A LA REALISATION DE SEUILS DE RECHARGE ARTIFICIELLE ET SIMULATIONS DE LEUR IMPACT SUR LA NAPPE..... 27

I -Caractéristiques des sites choisis:	28
II -Caractéristiques géotechniques des sites étudiés	Erreur ! Signet non défini.
III - Simulations hydrauliques :	31
III.1- Objectifs des simulations :	31
III.1.1- Détermination de la hauteur optimale des seuils :	31
- Site 1:.....	31
III.1.3- Simulations de l'impact de la recharge sur l'écoulement aval.....	34
III.1.4- Evaluation de débit infiltré :	36
IV - Résultats des simulations :	38
V - Implantation de réseau de suivi piézométrique de suivi	39
VI -Aperçu sur l'avancement des travaux de la recharge artificielle dans le lit de l'oued Zat :	40
VI.1- Chronologie des travaux sur le projet de la recharge artificielle :	40
VI.2- Démarche de réalisation d'un seuil	40

CHAPITRE 5 : QUALITE DES EAUX DE LA NAPPE ALLUVIALE DE L'OUED ZAT 42

I -Échantillonnage :	43
II -Méthodes de mesures :	43
II.1- -La conductivité électrique :	43
II.2- Le potentiel hydrogène (pH) :	43
II.3- Le calcium (Ca ²⁺) :.....	43
II.4- Le total calcium magnésium :	44
II.5- Les chlorures (Cl ⁻):	44
II.6- Les bicarbonates et carbonates (HCO ₃ ⁻ ,CO ₃ ²⁻)	44
II.7- Le potassium et le sodium (K ⁺ , Na ⁺):.....	44
II.8- Les sulfates (SO ₄ ²⁻) :.....	44
III -Résultats et interprétations:	45
III.1- Qualité des analyses	45
III.2- La conductivité électrique:.....	45
III.3- Le potentiel hydrogène:.....	46
III.4- Les cations.....	46
III.4.1- Le Calcium et Magnésium	46
III.4.2- Le Sodium et potassium	46
III.5- Les anions.....	47
III.5.1- Les chlorures	47
III.5.2- Les sulfates	47
III.5.3- Les bicarbonates.....	48
III.6- Diagramme de Piper	48
III.7- Diagramme de Scholler-Bercalov :.....	49

Conclusion

Liste des figures

- Figure 1 : La carte de situation du bassin versant du Zat
 Figure 2: le réseau hydrographique du bassin de Zat (ABHT)
 Figure 3 : La carte géologique du bassin versant de l'oued Zat (Extraite de la carte géologique de la carte de Marrakech au 1/50000)
 Figure 4: Pluie moyenne mensuelle à la station de Taferiat (1982-2002)
 Figure 5 : Evolution du niveau piézométrique au niveau de l'IRE 774/53 (ABHT ,1982-2002)
 Figure 6 : Hydrogramme de la crue du 14/08/1982 (ABHT)
 Figure 7 : Carte de perméabilité de la zone d'étude
 Figure 8 : Carte du coefficient d'emmagasinement de la zone d'étude
 Figure 7 : Cartes des pentes de la zone d'étude
 Figure 8 : Carte des altitudes de la zone d'étude
 Figure 9 : Coupe d'un seuil en béton cyclopéen avec ouvrage de dissipation en enrochement
 Figure 10 : Coupe d'un seuil en béton cyclopéen avec bassin à ressaut eb béton armé
 Figure 11 : Image satellite montrant les sites potentiels à la réalisation des seuils (ASTER)
 Figure 12 : Carte montrant les sites potentiels à la réalisation des seuils
 Figure 13 : Profil en travers du seuil 1
 Figure 14: Profil du site avec la position du seuil.
 Figure 15 et 16: Simulation de l'écoulement au niveau de la section du site 1 avec et sans seuil.
 Figure 17 et 18 : Simulation de l'écoulement au niveau de la section du site 2 avec et sans seuil.
 Figure 19 : Schéma montrant la loi de Darcy dans le lit d'un oued du tronçon de l'oued Zat (différence de charge).
 Figure 20 : Impact de la recharge par les seuils sur la nappe du Haouz au niveau
 Figure 21 : Impact de la recharge par les seuils sur la nappe du Haouz au niveau du tronçon de l'oued Zat (piézométrie).
 Figure 22 : Variation des teneurs en Mg et Ca en mg/l
 Figure 23 : Variation des teneurs en K et Na en mg/l
 Figure 24 : Variation des teneurs en Cl en mg/l
 Figure 25 : Variation de la teneur en SO4 en mg/l
 Figure 26 : Variation des teneurs en HCO3 en mg/l
 Figure 27 : Diagramme de Piper
 Figure 30 : Diagramme de scholler-Bercalov

Liste des tableaux

- Tableau 1 : Précipitations moyennes eu niveau de Taferiat(1982-2002)
 Tableau 2 : Bilan hydrique de la nappe de Haouz-Mejjate pour l'année 2006 (ABHT)
 Tableau 3 : Apports moyens à la station de Taferiat (ABHT)
 Tableau 4 : Caractéristiques de la crue de 14/08/1982
 Tableau 5 : Résultats des ajustements des débits max selon différentes méthodes avec une caractérisation statistique de ces résultats (station de Taferiat).
 Tableau 6 : Crues en m³/s à différentes périodes de retour.
 Tableau 7 : Prélèvements par les seguias le long de l'oued Zat.
 Tableau 8 : Volume moyen d'eau qui se perd à la confluence avec le oued Zat
 Tableau 9 : Caractéristiques des sites choisis
 Tableau 10 : Situation des sites sélectionnés
 Tableau 11 : Situation des sondages de reconnaissance au niveau des 4 sites
 Tableau 12 : Paramètres mesurés au niveau des 4 sites
 Tableau 13 : Débits infiltrés avec et sans seuil lors de la crue du 16/03/1980
 Tableau 14: Débits infiltrés avec et sans seuils pour un débit moyen annuel de 3,57 m³/s
 Tableau 15 : Caractéristiques des puits inventoriés pour le contrôle de la recharge artificielle
 Tableau 16: Coordonnées des seuils réalisés en 2008

Tableau 17 : Seuils réalisés en 2010

Tableau 18 : Situation des points d'eau

Tableau 19: Balance ionique pour les échantillons prélevés

Tableau 20: Conductivité électrique des eaux échantillonnées

Tableau 21: Risques de salinité des eaux d'irrigation

Tableau 22 : Le pH de l'eau échantillonnés

Liste des photos

Photo 1 : Amont du site 1(Mars ,2008)

Photo 2 : aval du site 1(Mars ,2008)

Photos 2, 3, 4, 5 : Photos montrant l'amont, l'aval et les deux rive du site 13

Photos 6 et 7 : Photos montrant l'un des seuils réalisé dans le lit de l'oued Zat en 2014

Photos 8 et 9 : photos Montrant le problème des affouillements au dessous

Des seuils

Liste d'abréviations

ORMVAH : L'office régional de mise en valeur agricole de Haouz

ABHT : L'agence du bassin hydraulique de Tensift

NP : Niveau piézométrique

PN : Profondeur de la nappe

CE : Conductivité électrique

Mm³ : Millions de m³

RD : Rive droite

RG : Rive gauche

TN : Topographie normale

PVC : Polychlorures vinyle

AEP : Alimentation en eau potable

Introduction

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de notre projet de fin d'études, en vue de l'obtention du diplôme de licence en sciences et techniques Eau et Environnement à la faculté des sciences et techniques de Marrakech. Ce travail de recherche s'est déroulé au sein de l'office de mise en valeur agricole du Haouz (ORMVAH) au service de l'irrigation, du 10 Mai au 15 juin.

Le choix de cet établissement est motivé par quatre raisons essentielles :

- L'ambition de s'initier aux activités pratiques et explorer le domaine professionnel sur la base des connaissances théoriques et des compétences acquises pendant les trois ans de la formation
- L'Amélioration de notre savoir faire.
- L'acquisition de nouvelles compétences
- La connaissance des divers méthodes et actions visés à la gestion des ressources en eau dans le Haouz.

Le monde doit faire face dans le prochain futur à des problèmes d'approvisionnement en eau qui ne font que s'aggraver au cours du temps partout dans le monde, en raison de la croissance démographique qui ne cesse de doubler à des intervalles de temps de plus en plus serrés (6,8 milliards en 2008 contre 4,8 en 1984) qui a induit une augmentation dans la demande en eau potable. Il faut ajouter la mauvaise gestion et la surexploitation des eaux souterraines dans beaucoup de régions du monde aboutissant ainsi à un assèchement des nappes d'eaux et des intrusions salines. Le développement actuel de la connaissance en matière d'eaux de surfaces d'une part et des aquifères poreux d'autre part a énormément aidé dans la progression de la GIRE (gestion intégrée des ressources en eau) qui est définie comme l'ensemble des actions à conduire pour assurer une protection et optimisation de l'exploitation des ressources disponibles afin que ces ressources puissent répondre aux besoins des populations de façon durable (Comair, 2008).

Face à tous ces problèmes de gestion, la Recharge Artificielle des Nappes ou RAN (Detay, 1997) a été proposée pour aider à trouver des solutions. Cette technique a évolué avec le temps pour passer d'une simple opération d'augmentation de l'infiltration naturelle dans une nappe à une technique beaucoup plus complexe. D'ailleurs, la littérature scientifique parle d'applications diverses de cette technique dans les aquifères alluviaux et poreux comme la lutte contre les pollutions, notamment en formant une barrière hydraulique qui empêche ou qui limite les entrées d'eaux de rivière polluées. D'autres applications concernent la lutte contre les intrusions d'eau de mer vu l'augmentation du taux d'exploitation d'un aquifère en renforçant l'infiltration provoquée. Ainsi, la RAN fait partie des nouvelles méthodes s'intégrant dans la gestion intégrée des ressources en eaux (GIRE) et se présente comme une alternative complémentaire aux aménagements de surface.

La nappe du Haouz est soumise à des prélèvements sans cesse croissants qui dépassent les capacités naturelles de sa recharge.

La persistance de cette situation risque de compromettre le développement de la région :

- Baisse des niveaux piézométriques : A l'Est de Marrakech, dans le secteur de Chouiter le niveau enregistré en l'espace de six ans une baisse de 18 m ;
- Diminution de la productivité des ouvrages : Le volume annuel d'eau souterraine prélevé pour l'AEP de Marrakech est passé de 30 à moins de 10 Mm³ au cours des 20 dernières années.

Au niveau du bassin de Zat, on assiste à des baisses importantes de la nappe dues à l'effet conjugué de la sécheresse et la surexploitation. Cette situation a poussé les agriculteurs à changer le type de cultures d'une part et d'augmenter la profondeur des ouvrages pour une meilleure exploitation de la nappe.

L'objectif de ce travail est de réaliser une étude sur le projet de la recharge artificielle dans l'oued Zat par l'identification des sites choisis pour l'implantation des seuils visant à ralentir les vitesses des écoulements et favoriser l'infiltration, et les simulations hydrauliques obtenu par modélisation qui montre l'intérêt de la recharge artificielle.

Le présent rapport est subdivisé en Cinq parties que l'on peut résumer comme suit :

- La première partie sera consacrée à des généralités sur la recharge artificielle.
- La seconde partie porte sur la présentation de notre zone d'étude.

- La troisième partie récapitule les conditions nécessaires pour la réalisation d'un projet de recharge artificielle et les caractéristiques morphologiques de l'oued Zat ainsi que le choix de l'ouvrage de recharge adéquat pour le lit de l'oued Zat.
- La quatrième partie portera sur l'identification des sites choisis pour l'implantation des seuils et les simulations hydrauliques de l'écoulement et de l'infiltration avec et sans seuils, dans cette partie en aussi évoquer la situation actuelle des travaux sur la recharge artificielle et le suivi piézométrique de système de la recharge
- La dernière partie de ce rapport contiendra les analyses chimiques de l'eau qu'on a effectués dans le laboratoire pédologique de l'ORMVAH sur quatre échantillons qu'on a prélevé de quatre points différents le long de l'oued Zat.

Méthodologie de travail

Le présent travail à été réalisé selon la démarche méthodologique suivante :

- **Collecte des données** : La difficulté qu'on a rencontrée lors de la réalisation de ce travail réside dans la rareté des données et la difficulté à leur accès, on a fait des dizaines de visite à l'ABHT pour collecter les données nécessaires à l'élaboration de ce travail.
- **Entretien** : Nous avons fait des visites auprès des responsables de l'ABHT pour mieux s'informer sur le sujet et sur les actes mener par l'ABHT pour la préservation des ressources en eau dans la région du Haouz, les responsables de l'ORMOVH aussi ont évoquer l'importance de ce projet qui vise le maintien de la stabilité des niveaux des nappes voir les augmenter pour des fins d'irrigation en premier temps. Les agriculteurs à leur tours souffrent de la baisse des niveaux des nappes qui les obligent à changer leur cultures par des autres qui nécessite moins d'eau (remplacer les légumes par des céréales par exemple) et ils revendiquent des actions qui puissent aider à améliorer les rendements des nappes.
- **Visites de terrain** : On à fait des sorties de terrain pour visiter les seuils réalisés et de voir de plus près les problèmes que rencontre le système de recharge plus précisément le problème de colmatage, nous avons aussi prélevé des échantillons d'eaux pour faire les analyses chimiques.

Chapitre 1 : Généralités sur la recharge artificielle des nappes (RAN)

I-Définition de la RAN :

La Recharge Artificielle des Nappes (RAN) consiste à faciliter la recharge d'une nappe en augmentant, à l'aide de méthodes artificielles, le volume d'eau entrant dans un aquifère pour rejoindre sa zone saturée. La RAN avec stockage est un système plus développé qui consiste à injecter dans un aquifère convenable un certain volume d'eau durant la période pluvieuse ou lorsque cette eau est abondante et à le récupérer durant la période sèche ou selon la demande, c'est-à-dire utiliser le sous-sol comme réservoir souterrain (Pyne, 1995; Murillo Diaz, 2000). L'eau de recharge peut être naturelle (cours d'eau, collecte d'eau pluviale) ou traitée, provenant d'une centrale de désalinisation ou d'une station de traitement des eaux usées.

II- Conditions préalables à la réalisation de la RAN :

II.1- Les conditions Hydrogéologiques :

- La présence de formations géologiques qui favorisent le stockage (Aquifère).
- Des caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère qui aident l'introduction et le stockage de l'eau dans l'aquifère comme une épaisseur de la zone non saturée suffisamment importante pour permettre une remontée significative de la nappe dans le cas d'une nappe libre. De plus, la surface de la nappe ne doit donc pas être trop proche de la surface du sol afin de ne pas occasionner des désordres en surface et d'assurer une meilleure autoépuration.
- Une transmissivité dans la zone non saturée de l'aquifère qui ne doit pas être trop faible pour permettre un stockage significatif, ni trop grande pour ne pas évacuer très rapidement les volumes injectés.
- Dans le cas des nappes captives, les conditions aux limites physiques et chimiques du système doivent permettre l'injection de volumes additionnels d'eau en déplaçant les mêmes volumes d'eau native.

II.2- Les conditions hydrologiques :

- La présence d'une ressource d'eau adéquate pour fournir l'eau de recharge (cours naturel d'eau, période de crue d'une rivière, station de traitement des eaux usées ou des effluents industriels, station de désalinisation de l'eau de mer ou de l'eau saumâtre) capable de fournir les volumes d'eau de recharge durant la durée de vie du projet estimée généralement à 20 ans.
- La connaissance des variations climatiques saisonnières dans le cas d'une eau naturelle de recharge (variations des précipitations, de la température et de l'hygrométrie) et de leur impact sur le régime hydrologique de la ressource (périodes de crue et d'étiage).
- Une qualité d'eau brute destinée à la recharge qui doit répondre à certaines normes afin de minimiser les coûts inhérents et de conserver la rentabilité du projet.

Les conditions géochimiques et biologiques :

- La géochimie de l'eau de recharge, de l'eau originale de l'aquifère et de la roche réservoir doit être caractérisée.
- Les interactions fluide-fluide et fluide-roche doivent être rigoureusement identifiées parce qu'elles peuvent avoir un impact négatif sur le dispositif de RAN adopté.
- L'autoépuration par des processus de traitement naturel et l'extraction des nutriments et d'autres microorganismes pathogènes et xénobiotiques non désirés peuvent fournir un avantage additionnel.
- Les formations épaisses et les nappes captives, entre autres, conviennent pour le stockage.
 - Dans les nappes alluviales, la zone non saturée peut être réduite tandis que dans les formations fissurées et karstiques, les circulations peuvent être trop rapides ; de ce fait, le stockage et l'épuration peuvent être limités.

Les conditions déjà citées vont déterminer le volume d'eau à injecter, le volume récupérable et l'efficacité du dispositif de RAN utilisé, par suite le succès du projet de RAN.

III- Caractéristiques hydrauliques et physiques

III.1- Effets induits d'une alimentation artificielle

L'alimentation artificielle se traduit par deux effets hydrauliques: un effet volumétrique et un effet piézométrique.

- Effet volumétrique: il s'agit du déplacement de l'eau de recharge dans la nappe, il dépend du coefficient de remplissage, du débit spécifique et de la transmissivité du terrain.
- Effet piézométrique: c'est la montée de la surface d'une nappe libre, ou l'augmentation de la pression d'une nappe captive.

III.2- La diffusivité, la transmissivité et le coefficient d'emménagement :

Deux paramètres doivent être considérés dans une opération d'alimentation artificielle:

- Le transfert de la masse d'eau injectée qui est fonction de la transmissivité et du gradient hydraulique, La transmissivité étant la capacité qu'aura un aquifère à permettre l'écoulement horizontal de l'eau sur toute son épaisseur.
- Le transfert des pressions à partir du point d'injection qui est fonction de la diffusivité de la formation aquifère. La diffusivité étant la vitesse de réaction d'un aquifère lors d'une perturbation (injection d'eau dans notre cas), elle est égale au rapport de la transmissivité par le coefficient d'emménagement. Une valeur élevée de la diffusivité caractérise un transfert de pression qui induit un écoulement facile et rapide. Par conséquent si la diffusivité est très importante, l'effet de la recharge sur les écoulements vers les exutoires risque d'être trop rapide. Le maintien de l'élévation du niveau de la nappe (ou de la pression) est plus important que la conservation de la masse d'eau elle-même. La diffusivité doit être telle que le stockage soit important et que l'écoulement soit lent. Idéalement, cela correspond à une anisotropie du milieu marquée par une forte conductivité hydraulique verticale et une conductivité hydraulique horizontale modérée.

L'hétérogénéité de l'aquifère doit être caractérisée pour identifier les zones de transmissivités lentes et rapides. Ces différentes valeurs de transmissivité ont un impact sur les valeurs de diffusivité et donc sur le taux de restitution de l'eau injectée et/ou le degré d'épuration que l'aquifère peut offrir.

IV -Dispositifs de la RAN :

IV.1- Recharge par puits d'injection

Ces dispositifs sont souvent utilisés pour recharger des aquifères profonds ou dans le cas d'insuffisance d'espaces en surface. La récupération des volumes injectés se fait à partir du même puits ou à partir d'un autre puits éloigné pour permettre l'autoépuration. Des considérations de densités et des paramètres hydrauliques doivent être prises en compte lors d'une étude d'un dispositif de recharge par puits (Missimer et al. 2002). On distingue deux types de dispositifs actuellement utilisés :

- **Aquiferstorage and recovery (ASR):** injection de l'eau dans un puits et récupération de cette eau à partir du même puits. Cette technique est le seul moyen de recharge des nappes captives et profondes. Elle permet des économies importantes au niveau du dispositif en n'utilisant qu'un seul puits pour les deux opérations.
- **Aquiferstoragetransfer and recovery (ASTR):** injection de l'eau dans un puits et sa récupération à partir d'un autre puits. En général, ceci est fait pour profiter d'un traitement supplémentaire par géo-purification avant prélèvement.

Les avantages et les inconvénients de ces ouvrages sont les suivants :

- **Avantages:** Ce dispositif nécessite peu de place et des périmètres de protection limités. L'acquisition des terrains est donc peu onéreuse. De plus, c'est la seule solution pour la recharge des nappes captives et des nappes profondes en général.
- **Inconvénients:** La surface d'injection est faible, ce qui nécessite une pression élevée induisant des contraintes importantes à contrôler. Le coût de fonctionnement et de maintenance est très coûteux, en particulier à cause du colmatage. Enfin, comme le sol et la zone non saturée n'interviennent pas pour jouer un rôle épurateur, l'eau brute à injecter doit être de bonne qualité ou préalablement traitée, ce qui entraîne un surcoût de traitement et d'exploitation.

IV.2- Recharges depuis la surface

Globalement, les avantages et les inconvénients des bassins sont à l'inverse de ceux des forages d'injection. En effet, la superficie du dispositif est beaucoup plus importante, et donc le coût d'acquisition plus élevé. Cependant le coût d'entretien des bassins est peu onéreux. D'ailleurs, les prétraitements les plus rencontrés pour de tels dispositifs ou même pour les dérivations de rivières sont normalement le grattage superficiel du fond du bassin. Ceci minimise les traitements ultérieurs à effectuer si on désire avoir de l'eau potable. Les matières organiques et

les métaux lourds peuvent être adsorbés dans la matrice de l'aquifère. Bien que cela n'élimine pas ces substances complètement, les déversements accidentels d'hydrocarbures sont retardés et leurs concentrations sont réduites. Le carbone organique dissous et les substances organiques en traces sont dégradés biologiquement dans le sous-sol dans une certaine limite. Des investigations récentes ont montré que le potentiel redox de l'aquifère est décisif pour la capacité d'élimination (Stuyfzand, 1998; Massmann, 2007). L'épuration par le sol ou géopurification, est efficace, ce qui entraîne une économie de traitement de l'eau à injecter. La principale limite technique est que le niveau de l'aquifère étudié doit être en relation directe avec la surface: l'alimentation des aquifères captifs ou profonds par cette méthode est donc exclue.

V -Le problème de colmatage

La réussite et la pérennité d'une opération d'alimentation artificielle sont étroitement liées au phénomène inéluctable de colmatage qui finit par stopper l'infiltration des eaux dans les terrains aquifères. Les recherches s'accroissent sur ce sujet pour déterminer les réactions chimiques qui se passent entre l'eau native et l'eau injectée, que ce soit par des observations de terrain ou par modélisation géochimique de ces processus, afin de minimiser le colmatage qui aura pour effet de prolonger la durée de vie du dispositif de recharge et par conséquent d'agrandir la rentabilité du projet en minimisant les entretiens requis.

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

I - Généralités sur le bassin versant de Zat :

I.1- Situation géographique :

Le bassin versant Zat est fermé au niveau de Taferiat situé au sud-est de la ville de Marrakech à la latitude N 31°10' et la longitude W 7°10'. Il est délimité au sud par la zone axiale du Haut Atlas, au Nord par la plaine du Haouz, à l'Est par le bassin de R'dat et à l'ouest par le bassin versant de l'Ourika.

L'exutoire du bassin du Zat (Taferiat) est situé à une altitude de 760 mètres, c'est la station de jaugeage de l'oued qui délimite une surface de réception de l'ordre de 516 Km².

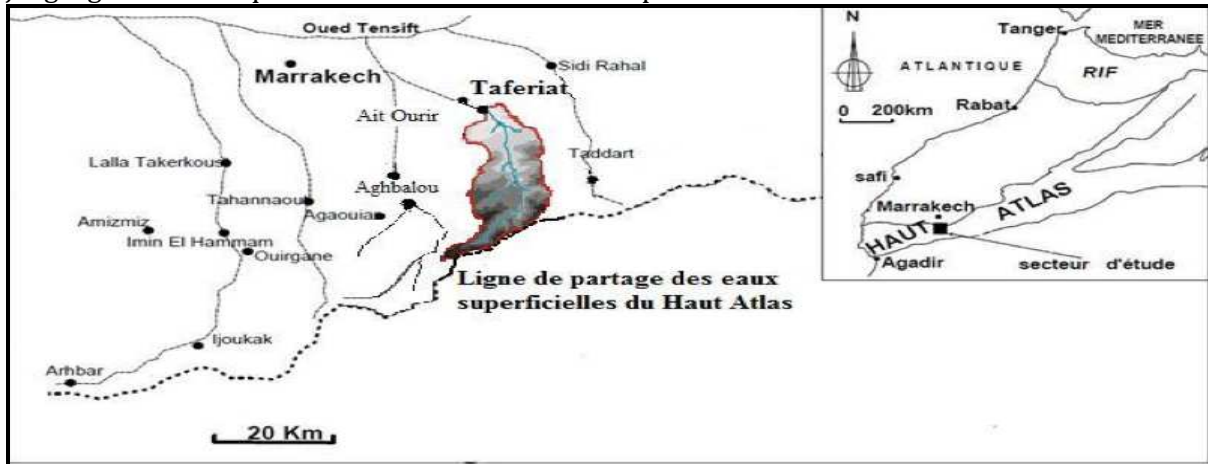


Figure 1 : La carte de situation du bassin versant du Zat

I.2- Morphologie :

L'oued Zat est un affluent atlasique rive gauche de l'oued Tensift, Il forme avec l'oued Ourika les 2 bras principaux de l'oued Lahjar qui passe à coté de Marrakech avant de se jeter dans le Tensift.

Il draine un bassin versant de 516 km² à la station hydrologique de Taferiat et fait partie de la zone la plus active, la plus pentue et la plus arrosée du bassin de Tensift. Ses principaux affluents étant oued Ikiys et oued Yagoun sur sa rive gauche et les oueds Zeraoun, Wansa, Tighazrit, Tighadwine, Tidsi et Afra sur sa rive droite.

Le périmètre du bassin versant est de l'ordre de 135km, ce qui lui donne un indice de compacité ($K_c = 0,28 P/_S$) de l'ordre de 1,66. Il confère au bassin une forme allongée qui aura un impact sur les écoulements et les hydrogrammes observés à l'exutoire.

Le cours principal a une longueur de 55km et les dimensions du rectangle équivalent étant 9Km pour la largeur et 54Km pour la longueur. Ces dimensions confirment la forme allongée du bassin versant.

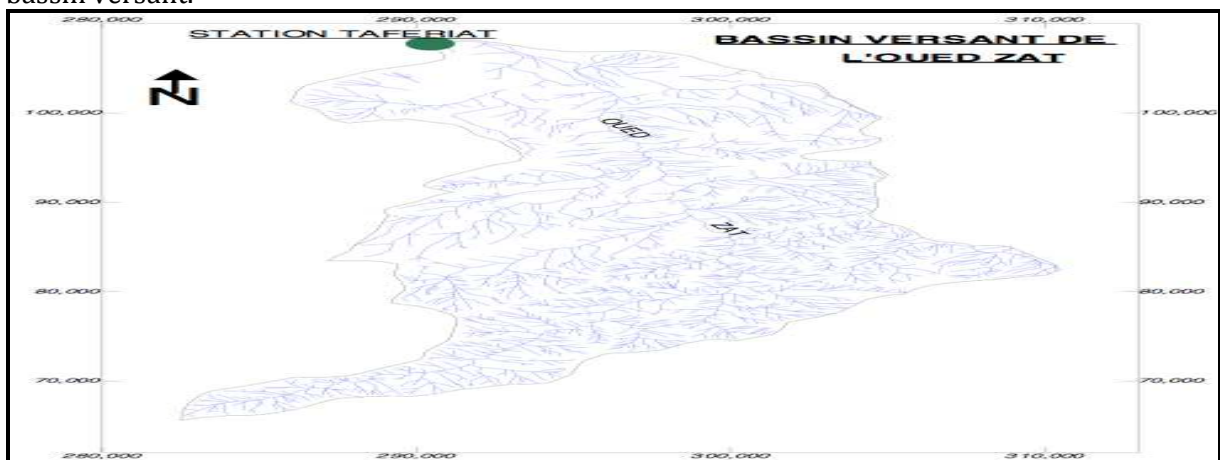


Figure 2: le réseau hydrographique du bassin de Zat (ABHT)

I.3-Géologie :

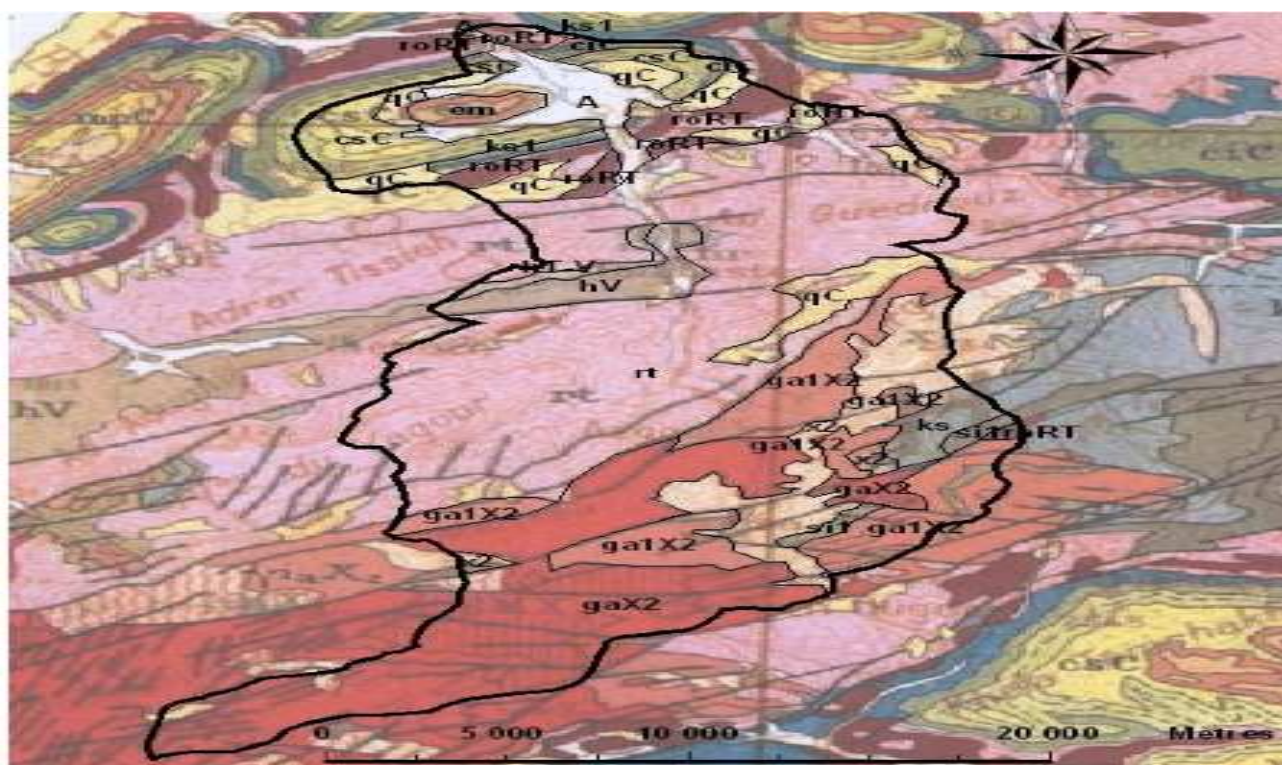
Le bassin est constitué d'un socle rigide Paléozoïque et précambrien au sud et des terrains de couvertures secondaires et tertiaires qui se développent vers le nord et le nord-est.

La chaîne atlasique montre suivant une direction nord-est, sud-ouest deux zones distinctes:

- A l'amont, la zone axiale de la chaîne à hautes altitudes où n'affleure que le socle.
- A l'aval, la zone sub-atlasique septentrionale où la couverture post-hercynienne constitue l'essentiel des affleurements.

Dans l'ensemble, la lithologie du bassin du Zat est constituée à 46 % de terrains imperméables, à 40 % de terrains semi perméables et à 14 % de terrains perméables.

Le tronçon étudié est constitué que de terrains quaternaires.



Symbole	Echelle stratigraphique	Lithologie
A	Formations modernes et Quaternaire	Formations de plaine IV et III
qc	Quaternaire moyen et ancien	Formations de plaine IV et III
em	Eocène moyen	Formations de plaine IV et III
csC	Sénonien faciès continental	Formations II marno-calcaire
ciC	Infracénomanien et Cénomanien continental	Formations II marno-calcaire
roRT	Trias	Basaltes doléritiques
rt	Permo-Trias continental	Grès et argiles
hv	Viséen	Formations I à dominante calcaire
hT-V	Tournaisien supérieur - Viséen	Formations I à dominante calcaire
si1	Ordovicien inférieur	Formations I à dominante schisteuse
ks	Acadien	Formations I à dominante schisteuse
ks1	Cambrien moyen	Schistes à Paradoxides
ga1X2	Précambrien III	Granites et granodiorites
gaX2	Précambrien III	Granites à biot. et granodiorites leuco.
x2	Précambrien II	Schistes et Séritoschistes

Figure 3 : La carte géologique du bassin versant de l'oued Zat (Extraite de la carte géologique de la carte de Marrakech au 1/50000)

II -Contexte climatologique :

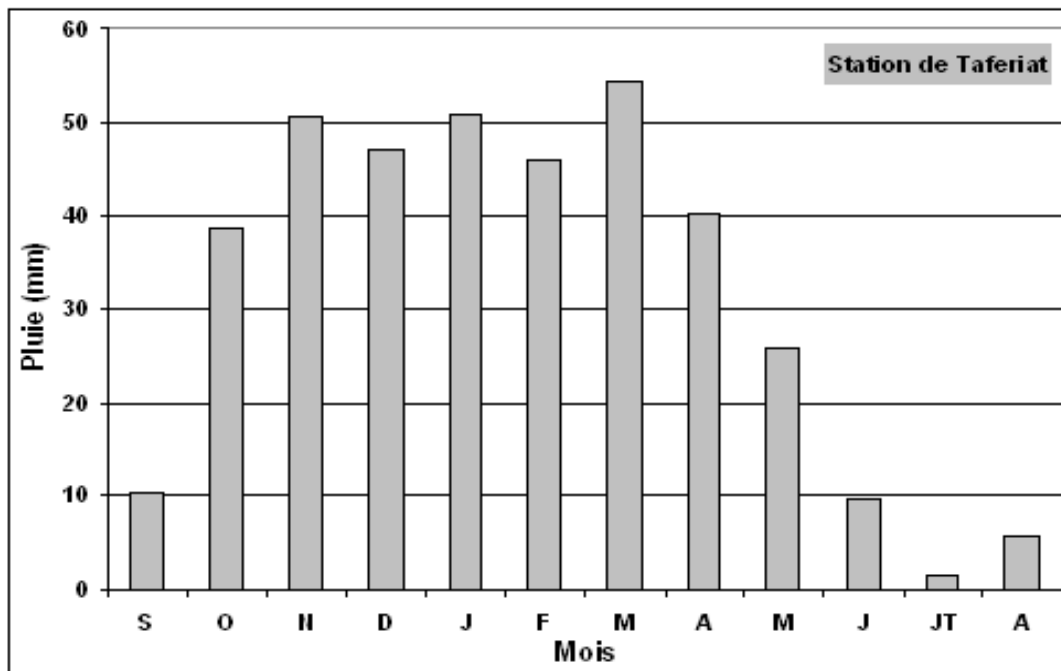
II.1- Pluviométrie :

L'ensemble de la plaine est inscrit dans la zone climatique semi continentale semi-aride avec une pluviométrie en moyenne annuelle et hygrométrie faible. La pluviométrie est variable dans le temps et dans l'espace, la stations de Taferiat dont la série de mesures est relativement longue (1982-2002) représentent cette variabilité au niveau de la zone d'étude.

Tableau 1 : Précipitations moyennes au niveau de Taferiat(1982-2002).

Stations	Moyenne pluviométrique en mm	Maximum en mm	Minimum en mm
Taferiat	429,61	913,40	125,70

Les écarts enregistrés sur les moyennes mensuelles entre les mois de Juillet et Mars sont importants : 1,3 mm en Juillet et 54 mm en Mars dans la station de Taferiat.


Figure 4: Pluie moyenne mensuelle à la station de Taferiat (1982-2002)

II.2- Températures

Les températures sont élevées avec des amplitudes thermiques journalières et annuelles très élevées ; la saison chaude correspond à la période comprise entre avril et octobre, la saison froide correspond à la période comprise entre novembre et mars. Le mois le moins chaud est janvier avec une moyenne de 11.5° à 12°C, les mois les plus chaud sont juillet et aout avec des températures voisines 38°C.

III -Contexte hydrogéologique

III.1- Données générales sur la nappe de Haouz :

La nappe du Haouz et sa bordure occidentale est limitée au Nord par l'oued Tensift, et au Sud par la chaîne atlasique. Elle s'étend d'Est en Ouest sur une superficie d'environ 6 000 Km²; sa largeur moyenne étant de l'ordre au 40Km.

Les écoulements souterrains s'établissent dans les alluvions plio-quaternaires et les formations du néogène dont la puissance globale varie entre 50 et 80m et peut atteindre localement 180m. La profondeur de l'eau sous le niveau du sol s'établit en moyenne à 30m, mais se situe entre 15 et 10m le long de l'oued Tensift et peut atteindre jusqu'à 80m le long du piémont de l'atlas. Dans les zones où l'eau souterraine fait l'objet d'une exploitation intensive, le niveau d'eau sous le sol s'établis aux environs 40 et 50m. Les débits de productions des forages sont généralement bons. Ils peuvent dépasser par endroit jusqu'à 50l/s.

III.2- Alimentations de la nappe

L'alimentation de la nappe se fait principalement par l'infiltration directe des eaux de pluie, le retour des eaux d'irrigation et par l'infiltration des eaux de crues le long des oueds atlasiques qui sont d'Est au ouest R'dat, Zat, Ourika, Issyl, Rheraya, N'Fis, Assif El Mal et Chichaoua.

III.3- La baisse piézométrique

Les pompages intensifs (plus de 12000 stations de pompage) que connaît la nappe ont conduit à une baisse du niveau piézométrique sur l'ensemble de la nappe à l'exception de quelques secteurs localisés. Des baisses de plus de 20m sont observées au niveau des champs captant destinés à l'eau potable et de plus de 30m au niveau des périmètres irrigués du N'Fis où se concentrent des exploitations agricoles. A L'Est de Marrakech, dans le secteur de Chouiter le niveau a enregistré en l'espace de six ans une baisse de 18m. A l'Ouest dans la zone de Mejjate où jadis les niveaux piézométriques soutenus, des baisses ont été observées ces dernières années. Cette baisse de niveau piézométrique a engendré une diminution de la productivité des ouvrages de captage et un coût de pompage de plus en plus prohibitif. A titre d'illustration la production d'eau potable pour la ville de Marrakech a chuté de 30Mm³ en 1980 à 10Mm³ en 2008.

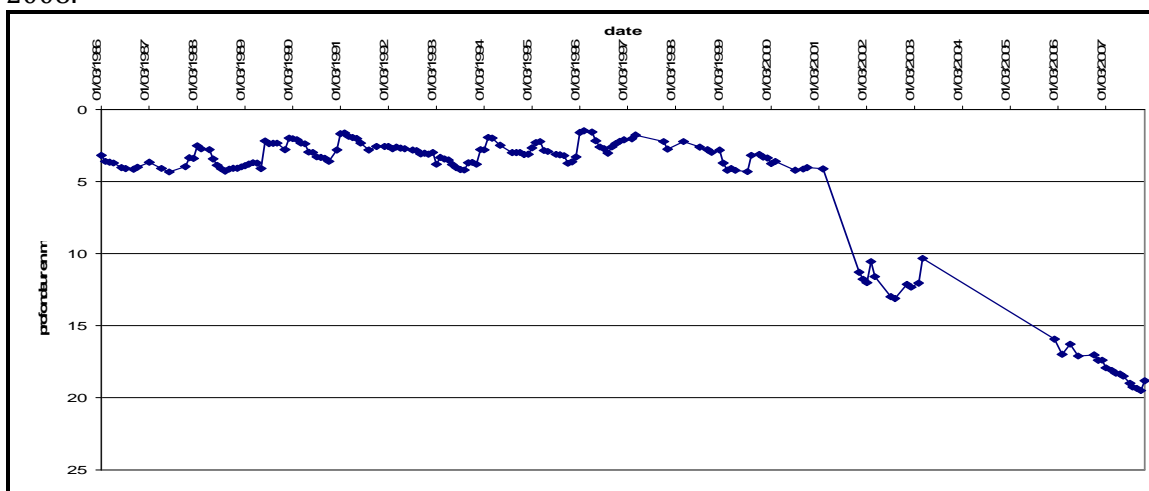


Figure 5 : Evolution du niveau piézométrique dans le secteur de Chouiter au niveau de l'IRE 774/53 (ABHT,1982-2002)

III.4- Le bilan de la nappe

Le bilan hydraulique de la nappe est négatif. Le volume global des prélèvements s'élève à 535 Mm³/an alors que les ressources renouvelables, en année moyenne ne sont que 351 Mm³/an, soit un déstockage de la réserve de 85 Mm³/an. Ce déstockage s'accroît bien évidemment en année déficitaire avec les effets conjugués d'une moindre recharge et d'un accroissement du prélèvement à la nappe.

Tableau 2 : Bilan hydrique de la nappe de Haouz-Mejjate pour l'année 2006 (ABHT)

Entrées	Mm ³ /an	Sorties	Mm ³ /an
Infiltrations directes	18	Prélèvements agricoles	507
Infiltration le long des oueds	65	Prélèvements AEP	28
Retour d'eau d'irrigation	250		
Abouchements	18		
Total entrées	351	Total sorties	535

IV-Contexte hydrologiques :

Le cours d'eau concerné par l'étude fait partie du réseau hydrographique du bassin du Tensift. Il s'agit d'un affluent de la rive gauche de l'oued Tensift dont le sous-bassin est relativement actif. L'orientation de l'oued est principalement SSE-NNW et SE-NW.

Les sections de l'oued sont généralement actives et leur géométrie évolue suite aux crues : l'érosion et les atterrissements se traduisent souvent par la divagation des lits mineurs et l'apparition de segments défluents.

IV.1- Apports moyens à la station Tafériat

Les apports moyens à la station Tafériat ont été établis dans le cadre de l'étude la plus récente sur 2 périodes 1962-2002 et 1985-2002 (voir tableau ci-après).

Tableau 3 : Apports moyens à la station de Tafériat (ABHT)

Période	Méthode de détermination	Apport Moyen en (Mm ³ /an)	Débit moyen (m ³ /an)
1962-2002	Mesure	111,2	3,53
1985-2002	Mesure	91,25	2,89

La crue maximale observée sur la période de 1962 - 2004 est de : 680 m³/s, le 14/08/1982 (crue de période de retour de 50 ans).

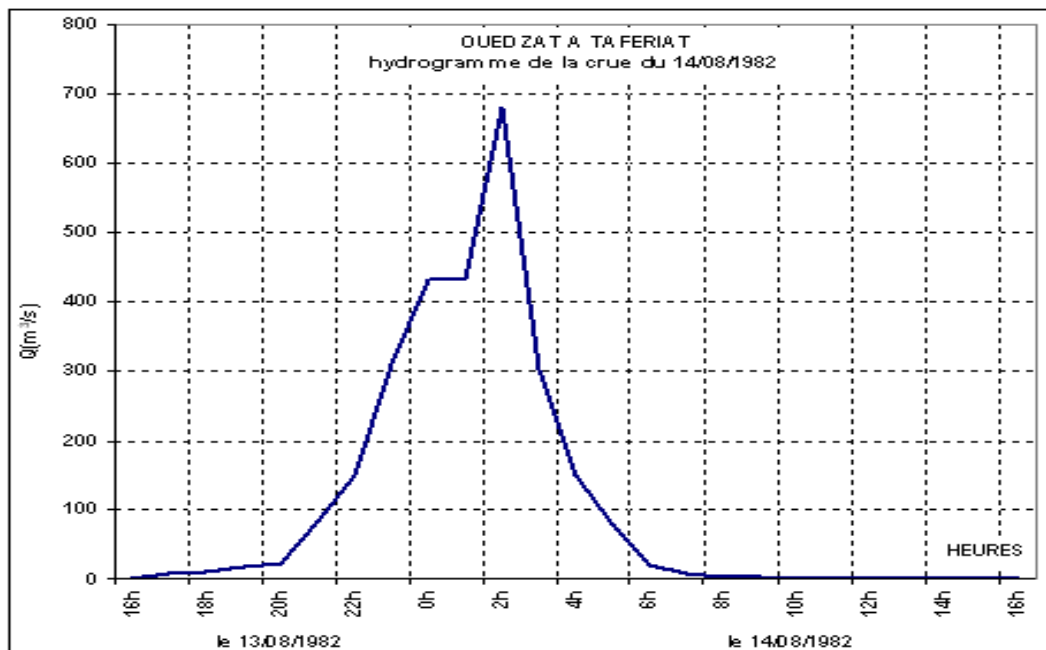


Figure 6 : Hydrogramme de la crue du 14/08/1982 (ABHT)

Tableau 4 : Caractéristiques de la crue de 14/08/1982

CARACTERISTIQUES DE LA CRUE	
date début	13/08/1982 à 16h
date fin	14/08/1982 à 8h
débit de pointe (m ³ /s)	680,000
débit max. moyen (m ³ /s)	178,048
débit base avant (m ³ /s)	0,100
débit base après (m ³ /s)	4.200
volume 10 ⁶ m ³	9,615
temps de base (heures)	15
coefficient de pointe	3,8

IV.2- Caractéristiques des crues à différentes périodes de retour

Le calcul des débits de pointes à différentes périodes de retour au niveau de la station Taferiat s'est effectué essentiellement à partir de l'ajustement statistique des mesures disponibles aux lois de Gumbel, Galton, Gaus et Carré de Gauss, lesdits débits correspondent aux valeurs médianes des résultats des méthodes utilisées.

Tableau 5 : Résultats des ajustements des débits max selon différentes méthodes avec une caractérisation statistique de ces résultats (station de Taferiat).

Récurrence (ans)	Probabilité	GAUS	GUMB	Galt	GOOD	Médiane	Moy.	Ecart type	Coef. De var.
2	0,5	167,08	135,08	102,30	109,52	102,30	116,70	24,55	0,21
5	0,8	312,21	244,98	240,20	260,39	244,98	254,15	26,32	0,10
10	0,9	388,07	317,75	379,37	382,96	379,37	375,10	26,75	0,07
20	0,95	450,72	387,55	555,06	510,48	547,71	522,10	84,89	0,16
50	0,98	521,23	477,90	853,77	684,94	742,74	807,46	306,69	0,38
100	0,99	568,24	545,60	1 138,70	820,59	892,89	1 039,62	463,17	0,45
200	0,995	611,26	613,06	1482,77	958,92	1 044,52	1 389,23	796,26	0,57
1000	0,999	699,96	769,32	2558,18	1288,85	1400,77	2778,98	2387,20	0,86
10000	0,9999	808,40	992,64	4988,32	1778,19	1 913,63	8097,16	9748,25	1,20

Le tableau qui suit récapitule les débits de crues retenus :

Tableau 6 : Crues en m³/s à différentes périodes de retour.

	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 Ans	1000 ans
Zat à Taferiat	245	380	548	742	893	1400

IV.3- prélèvements par seguias :

Le cours de la rivière divague au moment des crues, changeant de chenaux surtout en rive droite, les prises en RG et RD, sont en général de plus en plus éloignées les unes des autres au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'amont, il en découle que les seguias en amont véhiculent plus d'eau et elles ont de l'eau en période d'étiage.

Une grande proportion des seguias est en terre, avec un taux moyen de perte de 4% par km selon l'ABHT.

En période d'étiage les petits barrages de dérivation ORMVAH, drainent presque la totalité de l'eau disponible dans le lit de l'oued.

Tableau 7 : Prélèvements par les seguias le long de l'oued Zat.

Séguias	Sup. dominé e (en ha)	Volumes mensuels moyens pris par les séguias de 1985 à 2001 (103 m ³)												Moyenn e annuell e (10 ³ m ³)
		Sept	Oct	Nov	Déc	Jan v	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil let	Août	
Talbanine	95	75	78	52	80	107	52	58	58	110	82	86	75	914
Abdelbar	17	14	16	10	9	7	5	13	10	18	19	19	21	161
Tafériat	32	31	33	24	21	24	13	20	52	45	39	39	49	390
Talbachat	70	30	51	38	55	89	46	59	72	84	73	60	40	696
Bouglass	6	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	2
El Guers	45	30	28	26	28	27	19	27	38	49	50	42	33	395
Iferden	6	0	0	1	0	2	1	1	2	2	3	1	1	14
Targa Aït Ali	23	5	11	8	7	9	11	12	17	24	25	20	8	156
Taznent	2950	96	408	636	942	874	1127	1167	1376	1195	711	235	102	8 868
Iraken	10	4	10	13	20	14	11	16	28	36	30	19	9	212
Tagouzoult	30	2	7	10	14	14	13	13	26	30	30	18	8	184
Targa N'Nouflla	23	1	6	5	10	9	9	15	20	24	20	13	4	137
Mazrou	2440	42	299	562	609	593	804	1078	1164	1022	470	102	42	6 787
Taâkarit	3200	43	294	647	688	696	934	1195	1499	1277	545	96	35	7 949
Touahel	4400	45	353	748	784	892	1048	1662	1935	1625	597	89	36	9 814
Tihissit	20	0	2	2	5	4	26	14	11	10	2	0	0	77
BenSellou	345	12	101	203	192	204	301	412	500	410	124	12	8	2 480
Rebib	5	0	1	12	5	7	15	24	26	27	8	2	0	126
Talhaouia	3000	29	280	603	609	710	885	1179	1535	1112	420	48	16	7 426
Ben Caïd	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mesref Agadir	820	4	87	153	128	155	211	296	318	232	65	3	5	1 656
Lâamria	1180	1	29	39	30	69	61	82	146	41	15	2	2	516
Targa Ou Salah 1	200	1	13	8	10	26	12	18	55	10	9	1	1	163
Targa Ou Salah 2	-	0	1	2	3	5	11	5	20	2	0	0	0	50
Si Lahbib	70	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	3
Tagafaït Athmane	400	0	0	6	15	24	123	35	62	24	5	1	3	297
Silem	360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hamar	75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	19 872	467	2106	3805	4264	4560	5739	7403	8976	7409	3342	907	497	49 474

Chapitre 3 : Étude de la faisabilité de la recharge artificielle au niveau de l'oued Zat

I-Possibilité de la réalisation d'un projet de recharge artificielle au niveau de l'oued Zat :

I.1- Conditions d'applications de la recharge artificielle :

La mise en œuvre d'un projet de la recharge artificielle tient d'un certain nombre d'éléments dont on peut citer les plus importants :

- La présence d'une zone non saturée relativement importante ✓
- L'eau de surface utilisée doit être de qualité acceptable (pour éviter toute pollution des ressources en eau souterraines) ✓
- On doit disposer d'une quantité d'eau de surface supplémentaire non utilisée par les différents usagers et qui atteigne l'exutoire de l'aquifère ✓

Tableau 8 : Volume moyen d'eau qui se perd à la confluence avec le oued Zat

Apport moyen à la station Taferiat (Mm ³ /an)	Prélèvement moyen par séguis en (Mm ³ /an)	Infiltrations en (Mm ³ /an)	Volume moyen disponible en (Mm ³ /an)
91,25	49,5	entre 9 et 27	entre 15 et 31

- perméabilité suffisante (formations granuleuses ou fissurées ou karstiques) ✓

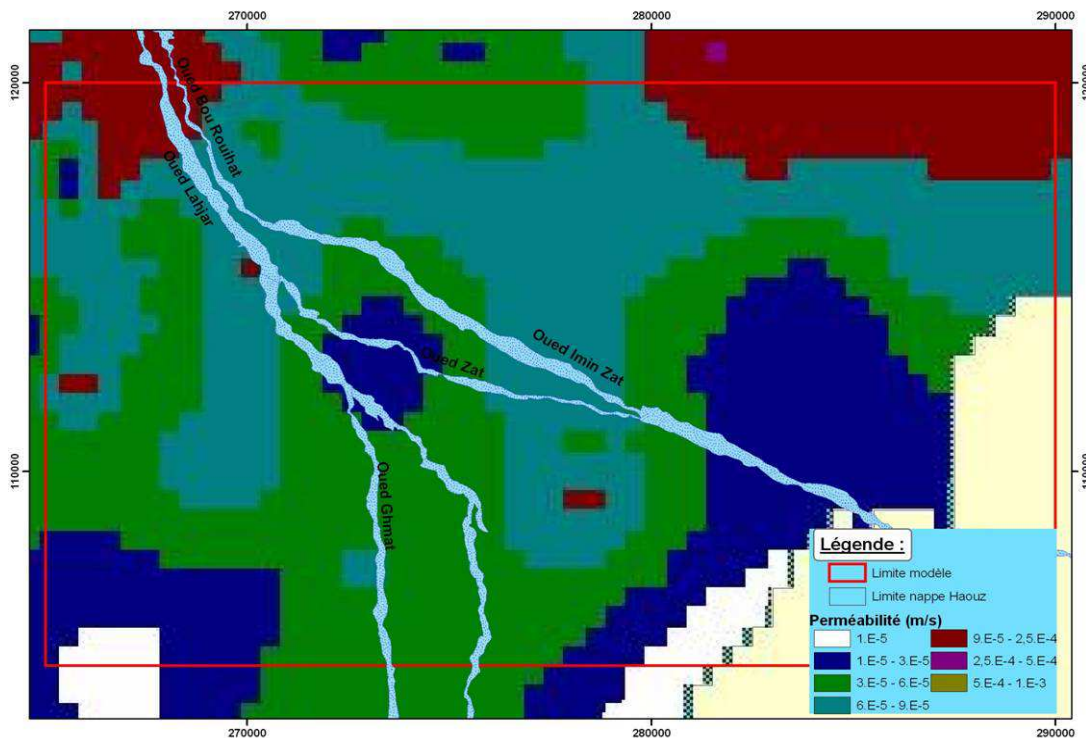


Figure 7 : Carte de perméabilité de la zone d'étude

La perméabilité de la zone d'étude est favorable pour l'infiltration des eaux, elle est divisée en trois zones :

- Une zone avec une perméabilité variant entre 1.10^{-5} et 3.10^{-5} m/s.
- Une zone avec une perméabilité variant entre 3.10^{-5} et 6.10^{-5} m/s.
- Une zone avec une perméabilité variant entre 6.10^{-5} et 9.10^{-5} m/s.
- Transmissivité favorable : épaisseur importante, coefficient de perméabilité élevé ✓

• Emmagasinement important de l'aquifère ✓

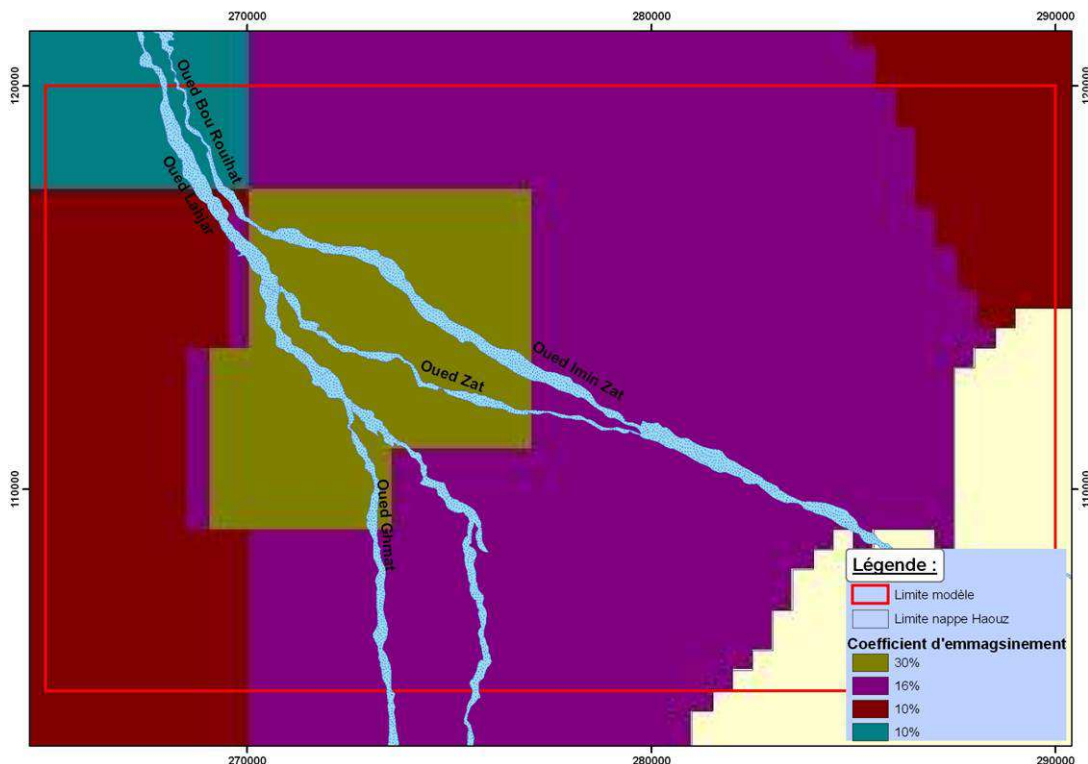


Figure 8 : Carte du coefficient d'emmagasinement de la zone d'étude

La zone d'étude présente deux zones différentes avec un emmagasinement important de l'ordre de 16% et 30%. Ces conditions sont toutes remplies, au niveau du tronçon étudié de l'oued Zat

1.2- Les caractéristiques morphologiques du secteur étudié:

L'analyse des facteurs entrant en jeu, a permis de conclure que l'oued Zat, à leur débouché et parcours dans la plaine, présente des conditions favorables pour la recharge artificielle, aussi bien en ce qui concerne les plages d'infiltration de surface (en général des alluvions grossières), la tranche non saturée (épaisseur largement suffisante), la perméabilité (supérieure à 1.10^{-5} m/s), la pente (inférieure à 2,5%) et la largeur (>200 m). Ces conditions se résument ainsi :

- Le fond de la vallée de l'oued Zat est généralement plat.
- La largeur moyenne du lit majeur dépasse 200 m.
- La largeur moyenne du lit mineur est de 10 m, il présente un régime d'écoulement turbulent et le fond du lit est occupé par un mélange de graviers, galets et blocs.
- Les berges sont sous forme de terrasses alluviales avec parfois des murs en béton ou en remblais pour la protection des séguias, elles sont généralement inclinées et très inclinées avec une pente variant de 5 à 70 %.
- Les formations présentes le long de l'oued sont exclusivement des alluvions récentes et anciens.

Ainsi, cet oued peut faire l'objet d'aménagement de recharge artificielle, par seuils ralentissant la vitesse de l'eau et augmentant les superficies mouillées le long du lit de l'oued et fonction des débits mensuels générés, les aménagements des différentes variantes devront être dimensionnés pour résister à la crue centennale.

Le choix des sites pour la mise en œuvre du processus de recharge artificielle, et le dimensionnement des seuils, repose dans une grande partie sur les caractéristiques morphologiques du lit de l'oued à savoir : la pente longitudinale, la largeur du lit de l'oued, la profondeur d'encaissement et la nature de la plage d'infiltration.

La pente conditionne la conception du type d'aménagement, notamment le dimensionnement des seuils, l'écoulement des eaux de surface et le coût des aménagements.

Les hauteurs des rives et la largeur du lit interviennent dans le choix du type de dispositif de recharge adéquat et le dimensionnement des ouvrages, notamment les seuils digues. Chaque site est également caractérisé par la nature de la topographie du lit majeur, régulière ou tourmentée (succession de chenaux et crêtes). En vue d'une caractérisation de l'oued dans la zone d'étude, l'ABHT a digitalisé sur la couverture topographique régulière à l'échelle 1/50 000 :

- Le cours d'eau.
- Le lit majeur.
- Les points cotés du sou-bassin de ce cours d'eau ;
- Les traits morphologiques saillants.

Par la suite, des cartes d'altitudes et de pentes ont été établies pour l'ensemble du sous-bassin de l'aire de l'étude, des cartes ont été également dressées sur système d'information géographique

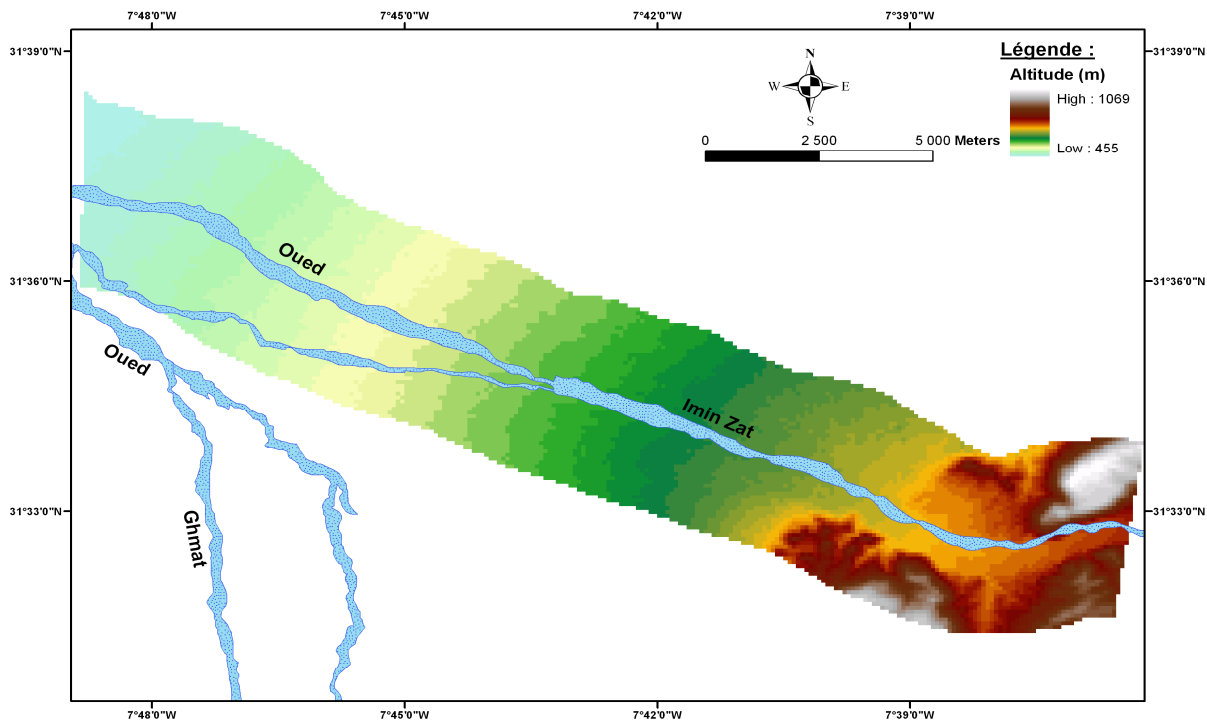


Figure 9 : Carte des altitudes de la zone d'étude

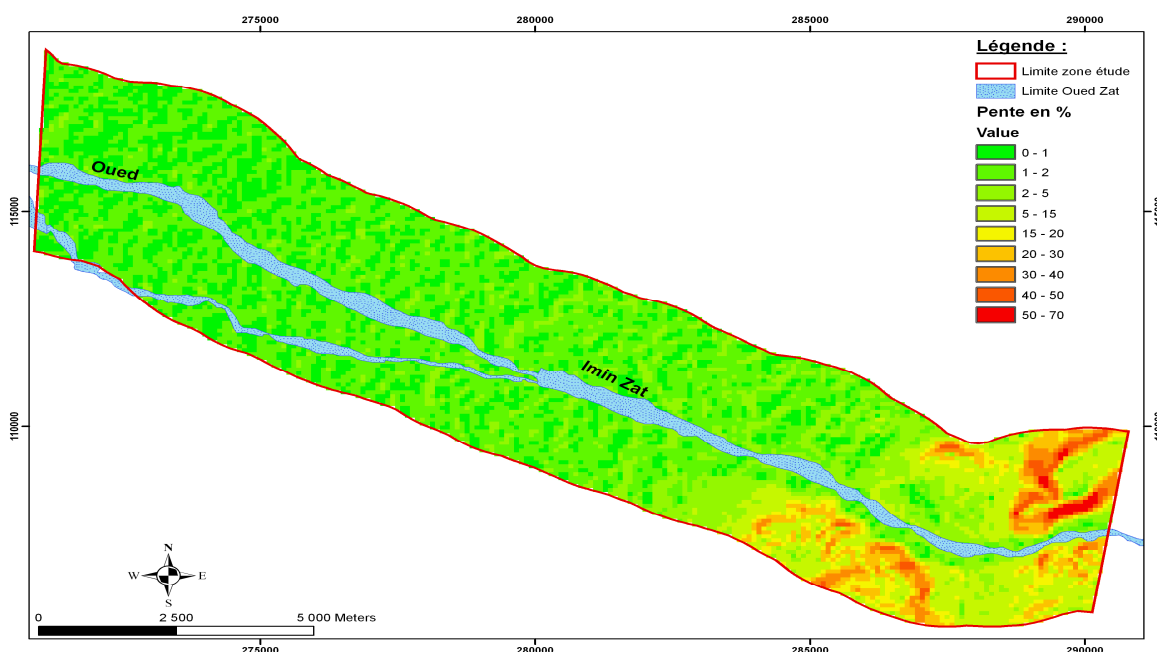


Figure 10 : Cartes des pentes de la zone d'étude

II - Critères du choix de dispositif de recharge :

D'après l'expérience en matière de la recharge artificielle dans le bassin du Tensift, le dispositif le plus utilisé et le mieux adapté consiste à réaliser une batterie de seuils permettant l'amélioration des conditions de recharge naturelle à partir des écoulements de surface.

Les seuils d'infiltration :

Plusieurs types de seuils d'infiltration peuvent être considérés pour des fins de la recharge artificielle. Les considérations à entrevoir sont principalement liées aux matériaux utilisés, à la conception et la définition des ouvrages et au contexte d'implantation de l'aménagement (topographie, environnement, infrastructure, ...)

Ces aménagements peuvent être en relation directe ou indirecte avec des réseaux de séguias assurant un prélèvement au fil de l'eau à partir des oueds dans la zone d'étude. La réhabilitation des prises de séguias peut être considérée comme une mesure d'accompagnement importante à considérer pertinemment dans la définition des dispositifs de recharge

De manière générale, la mise en place d'un seuil dans l'oued permet :

- A l'amont, de combler les divers chenaux d'écoulement par engravement de la retenue et de créer à posteriori une surface relativement plane sur laquelle s'écoule une lame d'eau homogène.
- A l'aval, d'alimenter de façon uniforme l'oued en répartissant dans les chenaux d'écoulement existants une quantité d'eau équivalente.
- En plus, de ralentir l'écoulement par modification de la pente locale et élargissant de la largeur hydraulique et donc d'augmenter le temps d'échange.

II.1- Ouvrage retenu:

Les seuils d'infiltration représentent le dispositif principal de recharges artificielles proposées pour le secteur étudié. D'après les pratiques usuelles dans le bassin de Tensift et les projets réalisés ou en cours de réalisation, les seuils d'infiltrations ou les dérivations en maçonnerie (ou en béton cyclopéen) ont montré leur preuves et sont adaptés aux conditions et aux régimes hydrologiques et hydrauliques difficile dans le bassin de Tensift. De plus, la nature alluvionnaire de lit de l'oued et le charriage des crues (moellons, blocs rocheux, ...) font que les matériaux pour réaliser des seuils en béton cyclopéen sont disponibles in-situ pour la majorité des sites.

L'implantation d'un tel dispositif nécessitera préalablement un reprofilage de l'oued aux alentours de l'axe du seuil défini afin d'homogénéiser et corriger les sections transversales au droit du dispositif. En plus, une protection des talus s'impose afin de réduire les risques d'érosion des berges.

Le dispositif de recharge proposé est composé essentiellement de ce qui suit :

- Le corps du seuil en béton cyclopéen de hauteur variable de 1,5 à 2m sur TN et ancré dans le TN avec une profondeur de 2 à 2,5m selon les cas de figures.
- L'ouvrage de dissipation et de prévention contre les affouillements en aval, deux solutions sont proposées : les bassins de dissipations en enrochement et les bassins à ressaut. La longueur de ces ouvrages est variable d'un site à l'autre.
- Les ouvrages de protection des berges, il s'agit essentiellement de murs en gabions longeant les berges de l'oued en amont des seuils pour contrecarrer les problèmes de débordements induits.

Lors des crues, les seuils constitueront des obstacles à l'écoulement et il y aura des chutes dans l'écoulement des eaux de hauteur égale à ces seuils. Ainsi à l'aval de chaque seuils il apparaîtra des affouillements localisés dus à l'énergie cinétique de l'eau.

Pour protéger les seuils contre l'affouillement localisé en aval, il est prévu une protection aval par la mise en place d'une des solutions suivantes :

- Un bassin de dissipation en enrochement
- Un bassin à ressaut en béton

II.1.1- Seuil en béton cyclopéen avec bassin de dissipation en enrochement :

L'ouvrage de dissipation consiste en un bassin en enrochement anti-affouillement de 2m d'épaisseur sur une longueur variable selon les cas pour chaque seuil. Les blocs auront

généralement un diamètre moyen de 1,2 et les plus gros blocs seront disposés à l'aval immédiat du seuil.

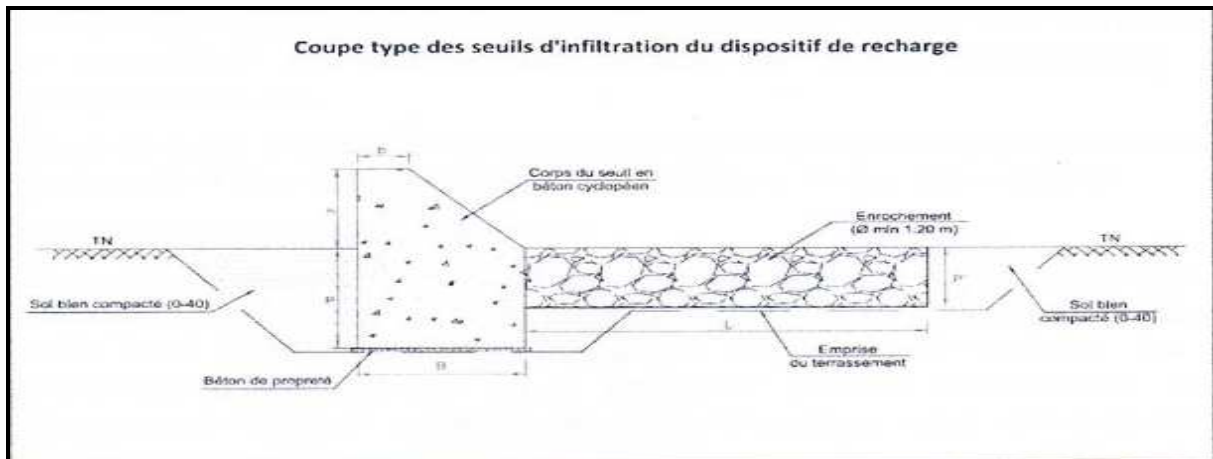


Figure 11: Coupe d'un seuil en béton cyclopéen avec ouvrage de dissipation en enrochement

II.1.2- Seuil en béton cyclopéen avec bassin à ressaut en béton armé :

L'ouvrage de dissipation consiste en un bassin à ressaut en béton armé avec un radier d'une épaisseur de 30 cm et dans laquelle des drains en PVC de 90 mm de diamètre seront placés tous les 5,0*5,0 m.

Afin de protéger le lit en aval de chaque bassin de l'affouillement, des enrochements de 2 tonnes sera prévus, tout au long de la largeur du lit, de 5 mètres de longueur et 2,0 mètres de profondeur.

Des joints de dilatation sont prévus au niveau du bassin amortisseur et du seuil chaque 20 m et des joints de retrait sont aussi prévus tous les 5 m.

Dans le cadre de programme de la recharge artificielle de la nappe de Haouz au niveau de oued Zat, le choix a été porté sur la réalisation des seuils en béton cyclopéen avec bassin de dissipation en enrochement.

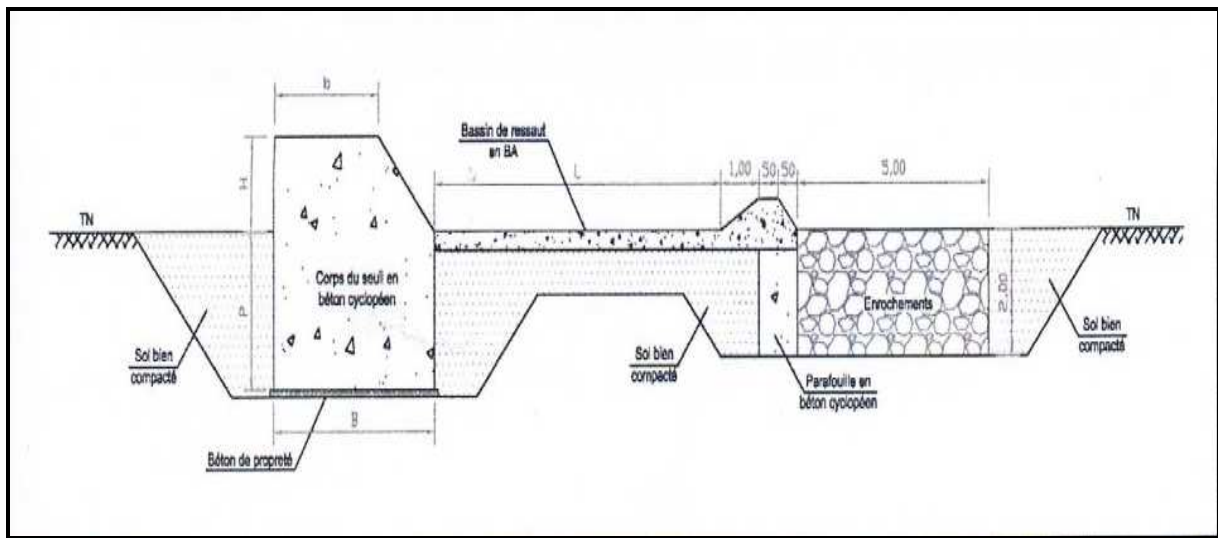


Figure 12: Coupe d'un seuil en béton cyclopéen avec bassin à ressaut eb béton armé

Chapitre 4: Choix de sites potentiels à la réalisation de seuils de recharge artificielle et simulations de leur impact sur la nappe

I -Caractéristiques des sites choisis:

Les sites potentiels susceptibles de mise en œuvre de recharge, ont été décortiqués selon un ensemble de critères morphologiques et physiographiques établis sur la base d'une compilation cartographique des paramètres de base digitalisés.

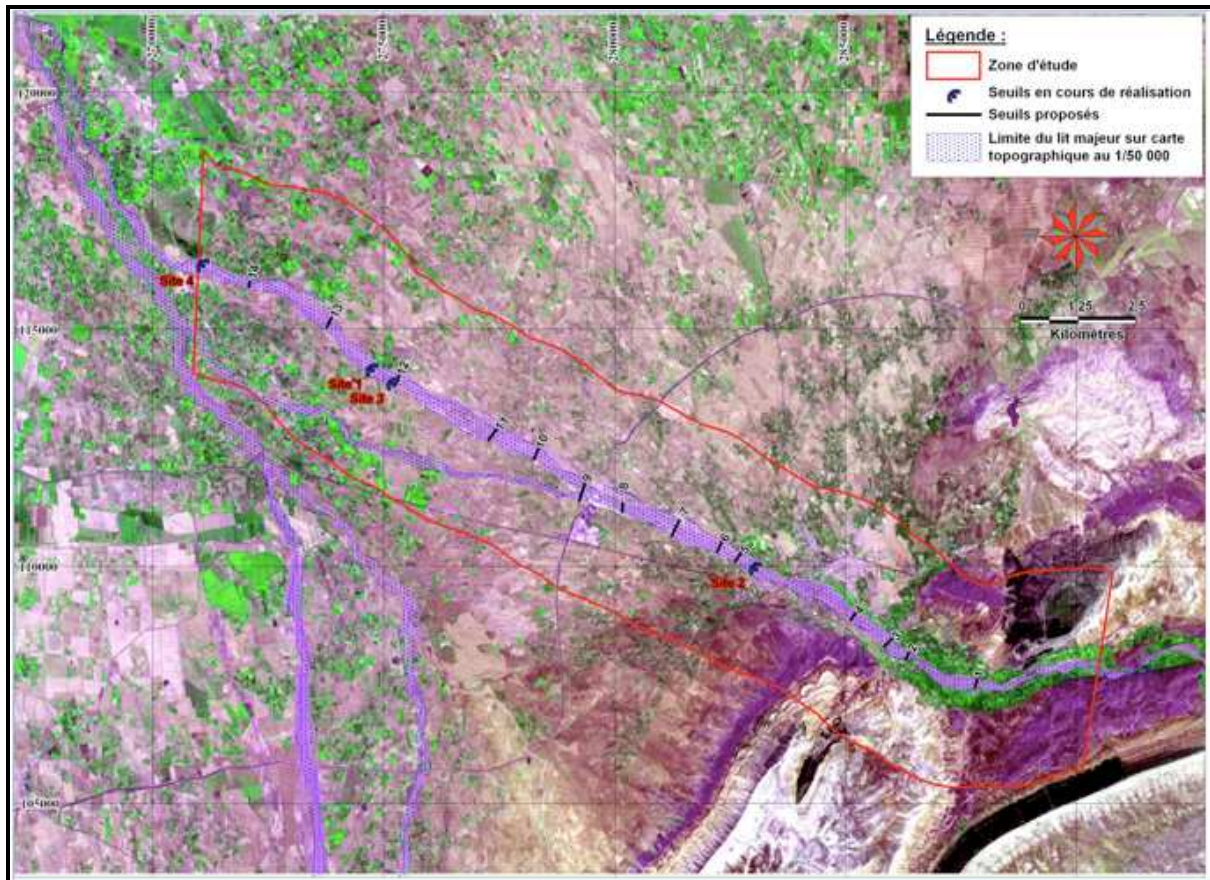


Figure 13 : Image satellite montrant les sites potentiels à la réalisation des seuils (ASTER)

Par la suite, une campagne d'implantation sur terrain a permis d'affiner la sélection et d'acquérir les paramètres nécessaires à la définition détaillée des options. Les travaux topographiques se sont déroulés en même temps.

Le tableau qui suit localise les zones retenues pour la recharge artificielle au niveau de l'oued Zat; l'implantation des sites a été entreprise sur la base d'investigation de terrain, les dites visites ont apportées de nouveaux éléments relatifs à l'occupation des sols, la morphologie, la géologie du terrain, la nature des fonds d'oueds et des berges, ainsi que les considérations socioéconomiques (habitation, accès...), ils sont détaillés comme suit :

- Identification du site (coordonnées, accès, croquis)
- Nature des dépôts du lit et son pouvoir filtrant
- aspect socioéconomique et activités dans la zone du site
- Nature des Matériaux de construction
- Largeur de la section, pente, profil de l'oued...
- Nature géologique et lithologique du site (lit et berges...)
- Caractéristiques des berges avec enquêtes sur les traces des crues antérieures
- Occupation des sols au niveau du site (cultures, plantation, gravières, habitations, aménagements hydro-agricoles...).

Les caractéristiques des sites sont fournies dans le tableau qui suit :

Tableau 9 : Caractéristiques des sites choisis

N° du site	Coordonnées extrémités RG		Coordonnées Extrémité RD		Distance par rapport à l'axe		Côte max lit majeur	Côte min lit majeur	Côte du seuil	Hauteur max du seuil	Largeur du seuil
	X _{RG}	Y _{RG}	X _{RD}	Y _{RD}	Dist. RG	Dist. RD					
1	287 803	107 451	287 847	107 611	78,50	81,69	718,858	715,625	717,16	1.53	160,2
2	286 303	108 039	286 364	108 160	38,90	92,98	706,948	703,794	705,08	1.29	131,9
3	285 855	108 316	286 005	108 474	40,60	166,44	696,883	693,441	694,70	1.26	207,0
4	285 106	108 867	285 224	109 017	90,09	100,20	683,156	680,086	682,65	2.56	190,3
5	282 610	110 116	282 747	110 288	110,19	113,20	648,751	645,969	648,30	2.33	223,4
6	282 230	110 315	282 324	110 522	110,00	166,00	644,701	642,404	644,50	2.10	276,0
7	281 234	110 645	281 401	110 961	151,50	90,00	629,659	626,984	629,55	2.57	241,5
8	280 169	111 146	280 176	111 335	112,95	93,17	616,932	612,837	617,00	4.16	206,1
9	279 239	111 386	279 355	111 729	187,50	173,20	605,568	601,718	605,55	3.83	360,7
10	278 264	112 261	278 360	112 497	146,99	109,48	591,044	588,698	590,95	2.25	256,5
11	277 276	112 666	277 471	112 926	190,40	134,92	576,717	574,585	576,70	2.12	325,3
12	275 238	113 788	275 332	114 046	171,99	103,99	546,744	544,929	546,75	1.82	276,0
13	273 768	115 039	273 878	115 256	113,99	127,60	533,961	531,671	533,90	2.23	241,6
14	272 077	115 894	272 106	115 995	92,00	76,40	515,424	513,665	515,42	1.76	168,4

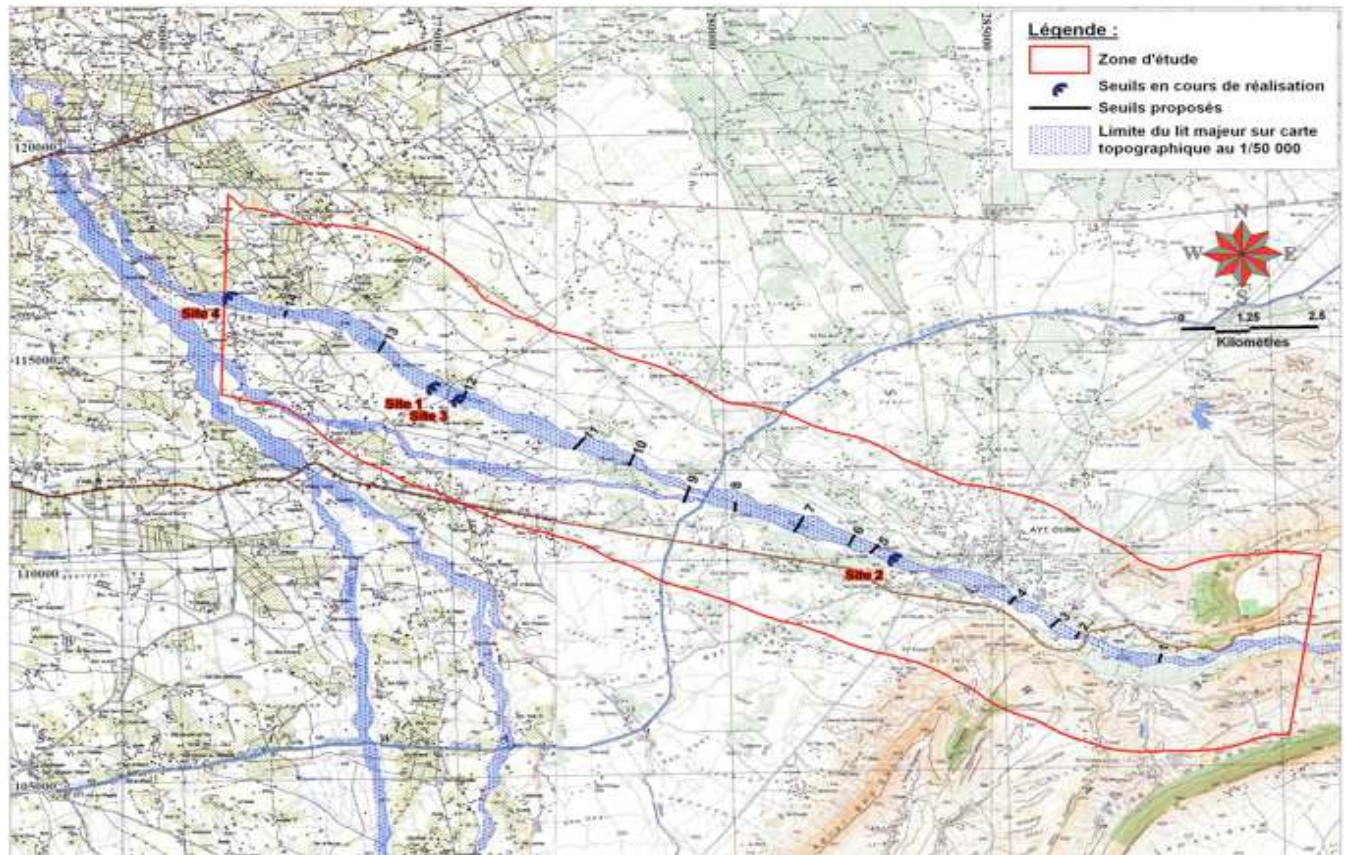


Figure 14 : Carte montrant les sites potentiels à la réalisation des seuils

II -Caractéristiques des sites choisis :

Une étude géotechnique est entamée par le laboratoire L3E sur 4 sites le long de l'oued Zat pour déterminer les caractéristiques géotechniques que présente le lit de l'oued.

Cette étude a permis de déterminer les perméabilités des terrains de surface pour évaluer l'infiltration à travers le lit de l'oued en utilisant la loi de Darcy, au niveau des sites sélectionnés.

Tableau 10 : Situation des sites sélectionnés

N° du site	Coordonnées		
	X	Y	Z
1	293 890	106 670	820
2	283 020	109 890	655
3	275 200	113 990	550
4	271 120	116 380	500

Les prélèvements ont été effectués dans des trous à la tarière dont les coordonnées sont fournies dans le tableau 11.

Tableau 11 : Situation des sondages de reconnaissance au niveau des 4 sites

		X	Y	Altitude du site
Site n°1	Puits n°1	293 887	106 664	820 m
	Puits n°2	293 897	106 668	
	Puits n°3	293 926	106 708	
	Puits n°4	293 940	106 716	
Site n°2	Puits n°5	283 028	109 883	655 m
	Puits n°6	283 027	109 889	
	Puits n°7	283 028	109 893	
	Puits n°8	283 128	109 974	
Site n°3	Puits n°9	275 202	114 008	550 m
	Puits n°10	275 200	113 985	
	Puits n°11	275 181	113 902	
	Puits n°12	275 178	113 882	
Site n°4	Puits n°13	271 127	116410	500 m
	Puits n°14	271 114	116 377	
	Puits n°15	271 080	116309	
	Puits n°16	271 077	116 298	

Les valeurs des perméabilités mesurées varient entre 1.10^{-5} m/s pour un sable argileux et 5.10^{-5} m/s pour des alluvions sableuses

Tableau 12 : Paramètres mesurés au niveau des 4 sites

Référence site	Site n°1			Site n°2	Site n°3	Site n°4
Nature du sol	Sable limoneux	Sable fins	Alluvions sableuse	Alluvions sableuses	Alluvions sableuses	Alluvions sableuses
Perméabilité K (10^{-5} m/s)	0.9	1.7	3.2	4.1	4.6	3.0
Cohésion du sol C' (Kpa)	-	-	16	16	16	16
Angle de frottement interne (en °)	-	-	33	33	33	33

Les valeurs de perméabilité utilisées dans les calculs d'infiltration sont la moyenne de sites 2, 3 et 4 qui couvrent la zone d'étude qui de $3.9 \cdot 10^{-5}$ m/s. Le site 1 est situé très à l'amont de la zone où il y a que la nappe alluviale de l'oued Zat.

III - Simulations hydrauliques

III.1- Objectifs des simulations

Les cartes des zones inondables établies dans le cadre de l'étude pour la délimitation du domaine public hydraulique montrent que les crues de période supérieure ou égale à 10 ans inondent le lit majeur. Les seuils n'auront donc d'impact que pour les petites et moyennes crues (période de retour inférieure à 10 ans). Ces seuils sont implantés loin des zones de prise d'eau par séguia, à signaler que ces dites séguia ne sont fonctionnels qu'en période de crue. Les simulations effectuées ont pour objectifs de :

- Déterminer la hauteur optimale de chaque seuil en fonction de la topographie donnée par le profil en travers ;
- Simuler l'impact de chaque seuil sur l'écoulement aval ;
- Évaluer le débit infiltré à partir des caractéristiques de l'écoulement de surface avec et sans seuil ;
- Estimer le gain en termes de débit infiltré du fait de l'action du seuil.

Nous allons présenter les simulations effectuées pour deux sites, parmi les 14 sites, les sites 1 et 13.

III.1.1-Détermination de la hauteur optimale des seuils :

La hauteur optimale de chaque seuil est déterminée graphiquement à partir de la configuration du profil en travers ; la côte de la position du seuil permet de faire fonctionner l'ensemble des bras du lit majeur, elle est légèrement inférieure à la cote maximale du lit majeur.

- Site 1:



Photo 1 : Amont du site

Photo 2 : aval du site 1 (Mars 2008)

Ce site est situé tout à fait au début de la zone d'étude à 3 Km à l'aval de la station hydrologique de Taferiat. L'accès au site se fait à partir de la piste carrossable au droit du douar Agadir Ait Lahcen situé sur la route nationale RN9 reliant Marrakech Ouarzazate.

le profil en travers du site montre une dissymétrie des berges, celle de la rive droite est plus haute que celle de la rive gauche. Le lit majeur est formé de trois bras principaux. L'écoulement des eaux se fait au niveau du lit mineur du côté de la berge en Rive Droite. Une activité d'extraction du sable d'une manière traditionnelle est pratiquée. Le lit majeur n'est pas très perturbé. On note l'absence de prélèvement par séguia pour l'irrigation au droit du site.

La pente du lit de l'oued au niveau du tronçon étudié est de 1.4%, alors que la largeur moyenne en plein bord est de 160 m dont seulement 14.6 m correspond à la largeur moyenne pour l'écoulement observé lors de visite de terrain.

La cote de couronnement du seuil est choisie comme étant légèrement inférieure à la moyenne des cotes des points de mesures correspondant aux bancs de sables déposés dans le lit majeur.

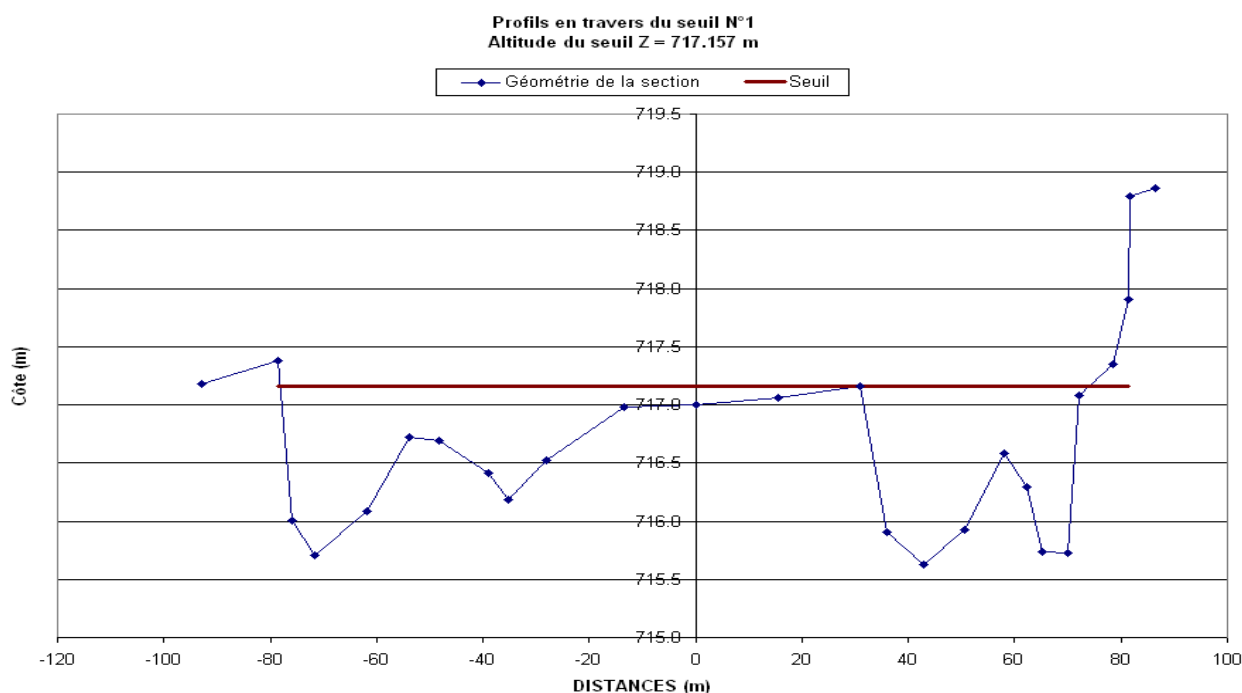
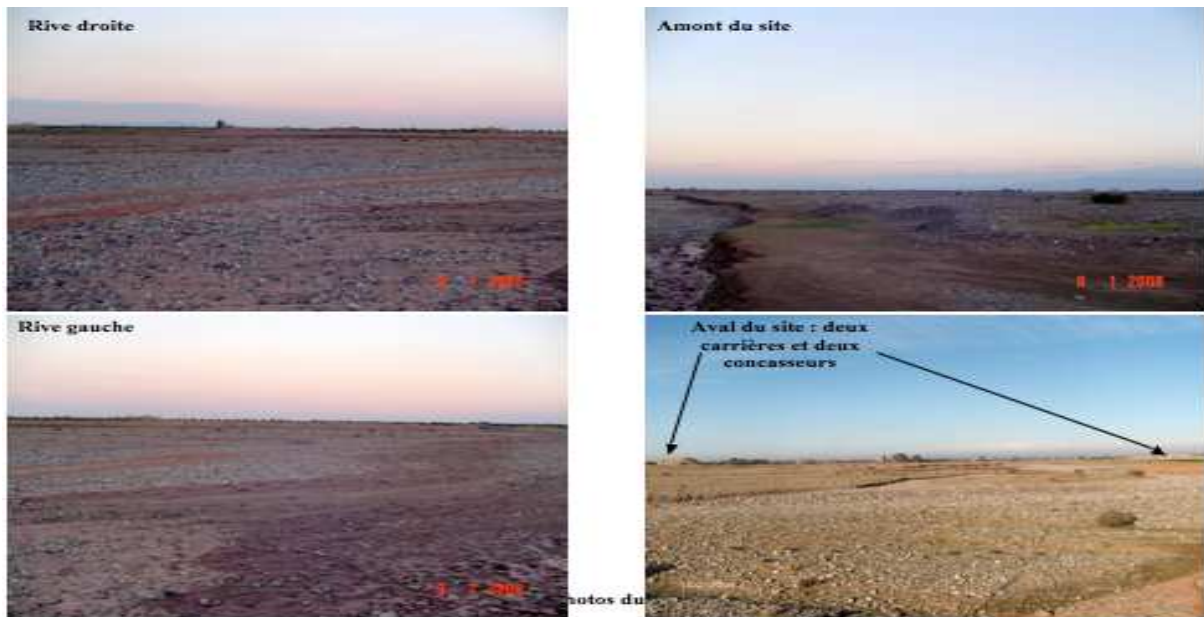


Figure 15 : Profil en travers du seuil 1

- Site 13:



Photos 2, 3, 4, 5 : Photos montrant l'amont, l'aval et les deux rive du site 13

Ce site est accessible par une piste qui rejoint la route provinciale liant la RN9 à la route régionale vers Sidi Rahal (Khemiss Ben Sassi).

Le levé du profil en travers est légèrement plat avec cinq chenaux, le lit mineur longe la rive droite. La berge de la rive gauche est plus haute que celle de la rive droite (figure 29).

À l'aval du site deux carrières existent en rive gauche et en rive droite. Le lit de l'oued est très perturbé par des dépôts d'argiles issues de lavage des granulats et sable. Les eaux de la dernière crue ont stagné au niveau des zones d'extraction qui forment ainsi des bassins d'infiltrations.

La pente du lit de l'oued au niveau du tronçon étudié est de 1%. La largeur du lit majeur est de 241 m dont seulement 9 m correspond à la largeur du lit mineur, siège de l'écoulement des eaux de crues, pendant la période de visite de terrain. Le lit est occupé par des dépôts d'alluvions récents. Les berges correspondent à des anciennes terrasses alluvionnaires qui sont utilisées actuellement comme terrains de cultures d'oliviers, de plantes fourragères et de céréales.

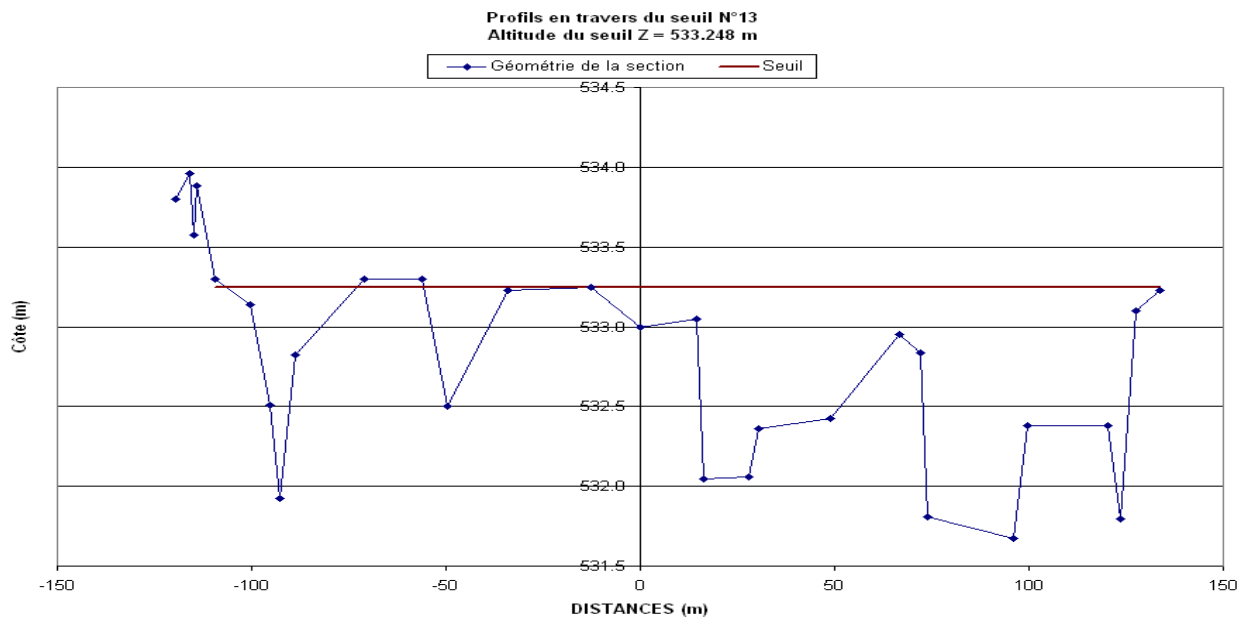


Figure 16: Profil du site 13 avec la position du seuil.

III.1.2- Impact attendu de la recharge :

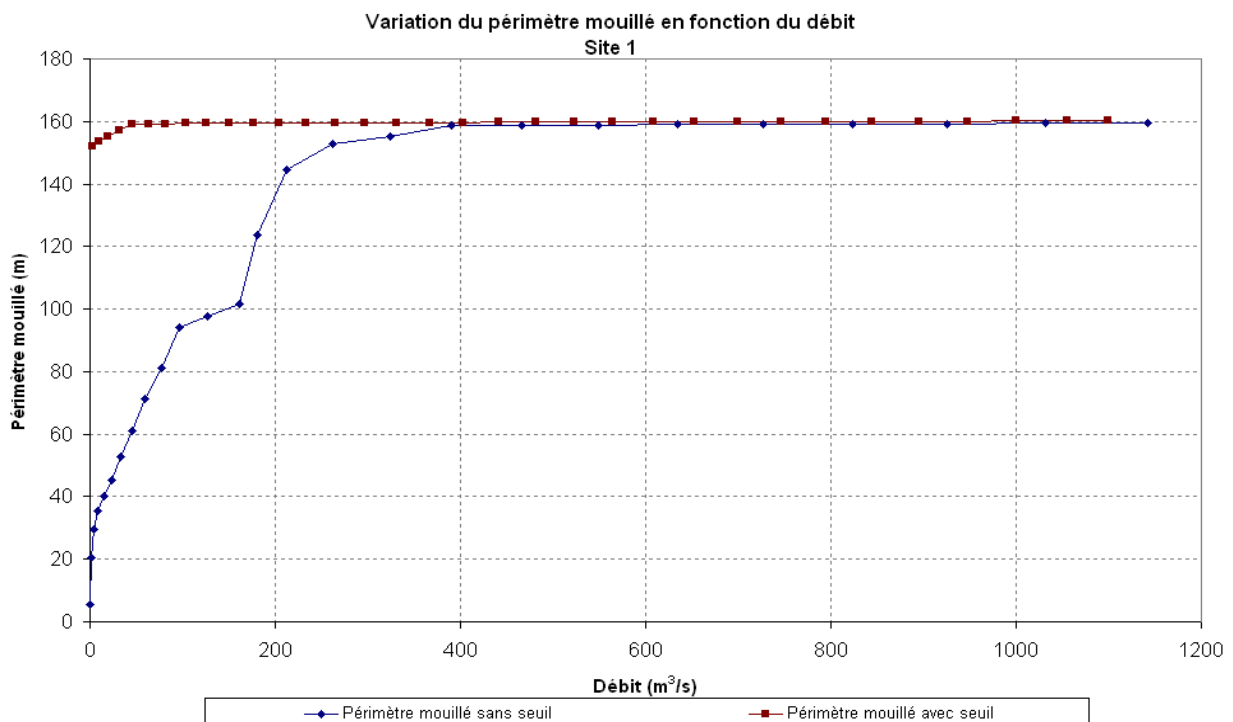
La recharge artificielle des aquifères, dans les zones climatiques arides et semi-arides, vise principalement à stocker les eaux de surface dans les réservoirs souterrains pour renforcer la recharge naturelle des nappes ; réduire les quantités d'eau perdues par ruissèlement, réduire les pertes par évaporation et atténuer les baisses piézométriques.

III.1.3- Simulations de l'impact de la recharge sur l'écoulement aval

Les simulations sont effectuées à l'aide du logiciel d'écoulement de surface GMS dans le cas du terrain naturel ainsi qu'après mise en place du seuil pour différents débits. L'impact du seuil sur l'écoulement aval est représenté par les graphiques du périmètre mouillé et de la cote du plan d'eau en fonction du débit de crue et ce pour les deux cas avec et sans seuil. Les résultats des calculs sont illustrés par les graphiques correspondant aux sites, l'ensemble des graphiques découlant des simulations sont représentés dans les figures ci-après. Lorsque le débit de crue est élevé, le lit majeur est inondé et la largeur de l'écoulement devient identique pour les deux simulations (avec et sans seuil), on peut, donc pour chaque site, déterminer l'intervalle de débit pour lequel le seuil fonctionnera de façon optimale. Les graphiques représentant la cote du plan d'eau gardent à partir d'un certain débit un décalage de cote quasi-constant entre l'écoulement avec ou sans seuil. Cela est dû au fait que la topographie n'est pas suffisamment étendue de part et d'autre des berges du lit majeur pour visualiser l'écrêtement du niveau des crues du fait de l'épandage en dehors du lit majeur. D'une façon générale lorsque les deux graphiques deviennent parallèles, cela correspond à l'inondation du lit majeur par les eaux de crues.

• Site 1 :

Au niveau de la section du site n°1, la simulation avec seuil montre que le périmètre mouillé maximal est atteint avec un débit de 50 m³/s. L'augmentation du périmètre mouillé avec le débit de crue, dans le cas de l'écoulement naturel, s'accroît à partir de 190 m³/s. Le périmètre mouillé de l'écoulement naturel se confond avec celui de l'écoulement avec seuil pour un débit de 400 m³/s. Il s'ensuit que l'on peut considérer que la plage de fonctionnement optimal du seuil se situe pour un débit de crue compris entre 50 et 250 m³/s, au niveau du site n°1.



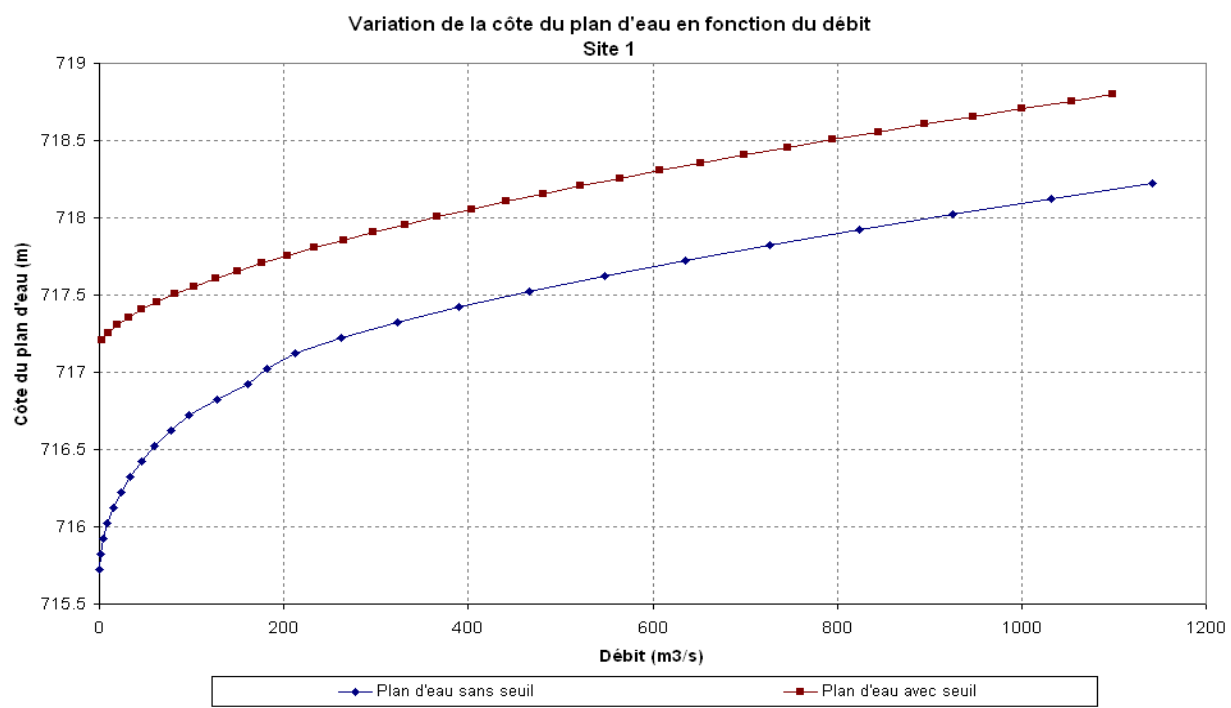
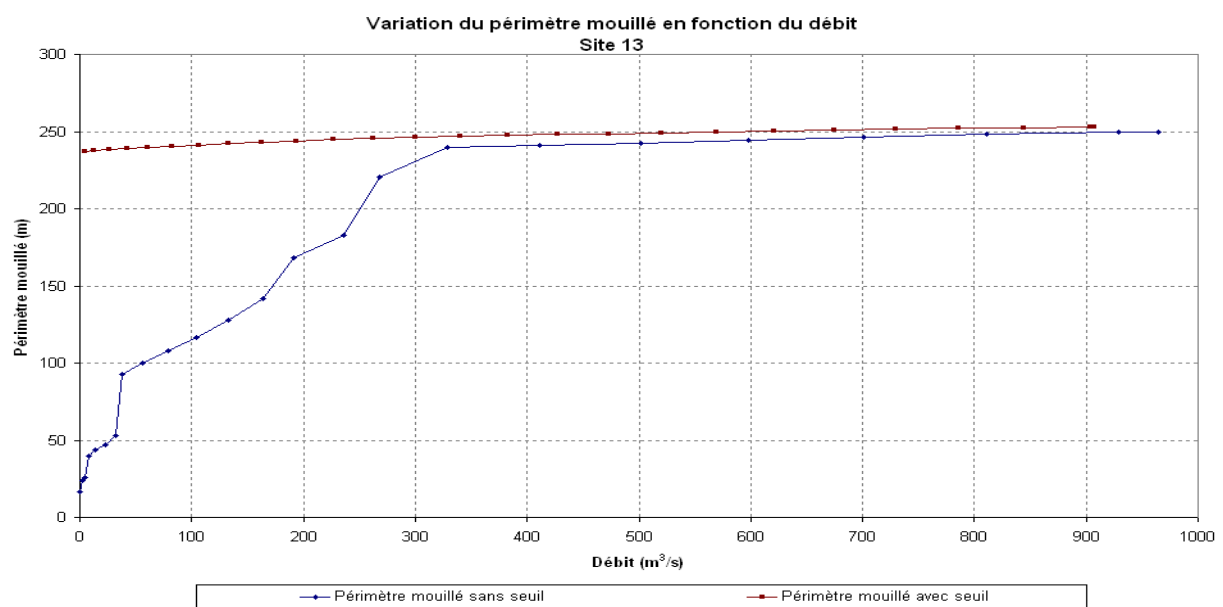


Figure17 et 18: Simulation de l'écoulement au niveau de la section du site 1 avec et sans seuil.

• Site 13

Au niveau de la section du site n°13, la simulation avec seuil montre que le périmètre mouillé maximal est atteint avec un débit de crue de 2 m³/s. L'augmentation du périmètre mouillé dans le cas de l'écoulement naturel devient importante à partir d'un débit de crue de 250 m³/s. Le périmètre mouillé de l'écoulement naturel se confond avec celui de l'écoulement avec seuil pour un débit de crue de 350 m³/s. Il s'ensuit que l'on peut considérer que la plage de fonctionnement optimal du seuil se situe entre 2 et 250 m³/s, au niveau du site n°13.



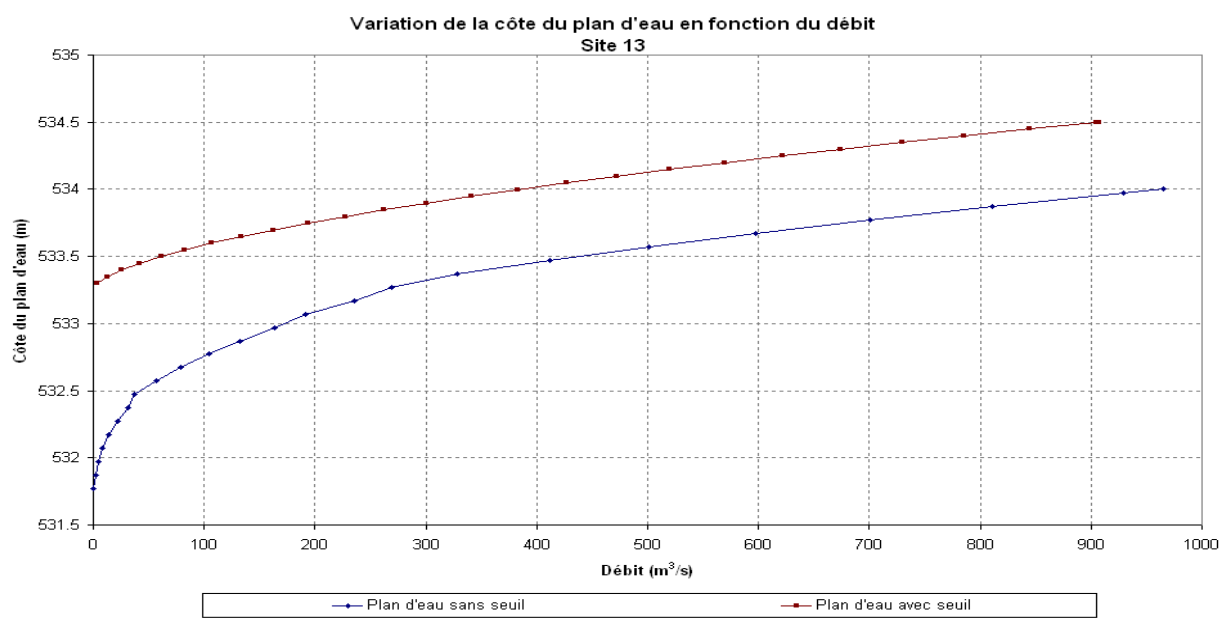


Figure 19 et 20 : Simulation de l'écoulement au niveau de la section du site 2 avec et sans seuil.

III.1.4- Evaluation de débit infiltré :

Le calcul du débit infiltré se fait suivant la loi de Darcy en faisant l'hypothèse que la pression à la base du semi-perméable qui constitue la partie saturée du bras actif du lit majeur est de l'ordre de la pression atmosphérique. Le calcul du débit infiltré en fonction de la charge de l'eau de surface, de l'épaisseur du semi-perméable et de la perméabilité du sol en surface est donné dans les tableaux 14 et 15.

La vitesse d'infiltration peut être estimée à l'aide de la loi de Darcy ; le fond du lit de l'oued étant constitué généralement d'une couche peu perméable due au dépôt de fines, la perméabilité a été déterminée dans quatre sites potentiels par analyse d'échantillons prélevés par le L3E. On estime qu'étant donné la profondeur du niveau piézométrique, le raccordement du flux entrant avec la surface piézométrique a lieu en zone non saturée ; de ce fait on peut supposer que la pression à la base du semi-perméable est la pression atmosphérique (schéma ci-dessous).

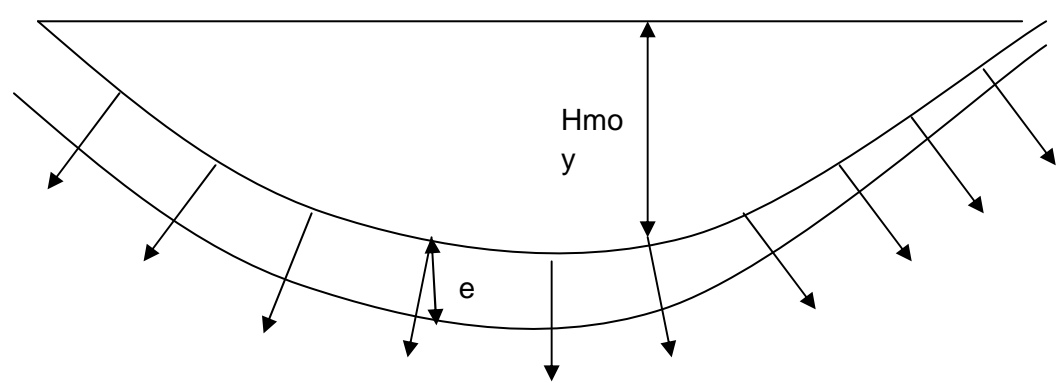


Figure 21 : Schéma montrant la loi de Darcy dans le lit d'un oued

On note :
 Hmoy : la Hauteur moyenne des eaux de surface dans le lit mineur de l'oued, en période de crue,
 e est l'épaisseur du semi-perméable ; par suite la vitesse d'infiltration s'écrit :
 $V = K*(Hmoy+e)/e$
 Le débit unitaire peut s'écrire $q = V*Pm$.
 e : épaisseur semi perméable (zone non saturée)
 Pm : périmètre mouillé.

Dans le cas de l'écoulement, en régime naturel, les eaux de crues sont généralement confinées dans le lit mineur, le périmètre mouillé et donc la surface de contact des eaux de crues avec le sol est peu importante mais l'épaisseur et la vitesse de l'écoulement sont élevées.

Dans le cas de l'écoulement, avec seuil, les eaux de crues occupent l'ensemble des bras du lit majeur, le périmètre mouillé et par conséquent la surface de contact des eaux de crues avec le sol deviennent importants et corrélativement l'épaisseur et la vitesse d'écoulement des eaux de crues diminuent.

Les estimations des débits infiltrés ainsi que le gain obtenu, à l'aval du seuil, sont calculés par 2 approches :

-Une première pour la crue du 16/03/1980 ayant un débit moyen de 48,9 m³/s et un temps de base de 96 heures. Le volume infiltré lors de cette crue au niveau des 14 seuils s'élève à 5,108 Mm³.

-Une deuxième approche est effectuée pour un débit moyen annuel de 3,574 m³/s. Le volume infiltré pour ce débit au niveau des 14 seuils s'élève à 30,9 Mm³ à raison d'un volume fluctuant entre 1,4 et 3,5 millions de m³ par seuil.

Tableau 13 : Débits infiltrés avec et sans seuil lors de la crue du 16/03/1980

-Débits moyen de la crue : 48,9 m³/s

-Temps de séjour : 95 heures

N° de site	Volume infiltré avec seuil en m ³	Volume infiltré sans seuil en m ³	Volume gagné avec seuil en m ³	% gagné avec seuil
1	251 358	153 655	97 703	63,58
2	429 779	364 254	65 515	18
3	389 117	244 636	144 482	59
4	274 120	62 909	211 211	335
5	484 042	405 452	78 590	19,38
6	607 487	504 599	102 888	20,39
7	313 539	274 114	39 425	14,38
8	243 599	78 727	164 872	209
9	126 932	83 906	43 026	51,28
10	307 127	228 861	78 266	34,20
11	544 986	481 845	63 140	13,10
12	453 967	188 044	265 923	141
13	362 882	203 172	159 710	78,60
14	319 308	222 679	96 629	43,39
Total	5 108 308	3 496 854	1 611 381	46

Tableau 14: Débits infiltrés avec et sans seuils pour un débit moyen annuel de 3,57 m³/s

N° de site	Volume infiltré avec seuil en m ³	Volume infiltré sans seuil en m ³	Volume gagné avec seuil en m ³	% gagné avec seuil
1	1 470 303	877 851	592 452	67,48
2	2 454 950	2 053 117	401 833	19,57
3	2 415 000	1 497 441	917 559	61,27
4	1 435 858	334 698	1 101 160	329
5	2 807 544	2 214 558	593 006	26,77
6	3 581 079	2 896 879	684 200	23,61
7	1 841 660	1 606 869	234 790	14,61
8	1 460 373	464 713	995 666	214

9	1 499 978	959 357	504 621	52,60
10	1 822 258	1 360 643	461 616	33,92
11	3 166 453	2 799 598	366 855	13,10
12	2 870 501	1 171 381	1 699 119	145
13	2 209 266	1 228 565	980 701	80
14	1 850 612	1 251 738	598 874	47,84
Total	30885833	20 753 389	10 132 445	48,82

IV – Résultats des simulations :

Les résultats des simulations de l'impact de la recharge artificielle au niveau du tronçon étudié avec présence des seuils, montre une remontée notable du niveau de la nappe le long de la section étudiée. La remontée est de l'ordre de 1m à 1km des deux rives de part et d'autres du lit de l'oued et augmente (10 à 23 m) au niveau des mailles centrales longeant la section de l'oued.

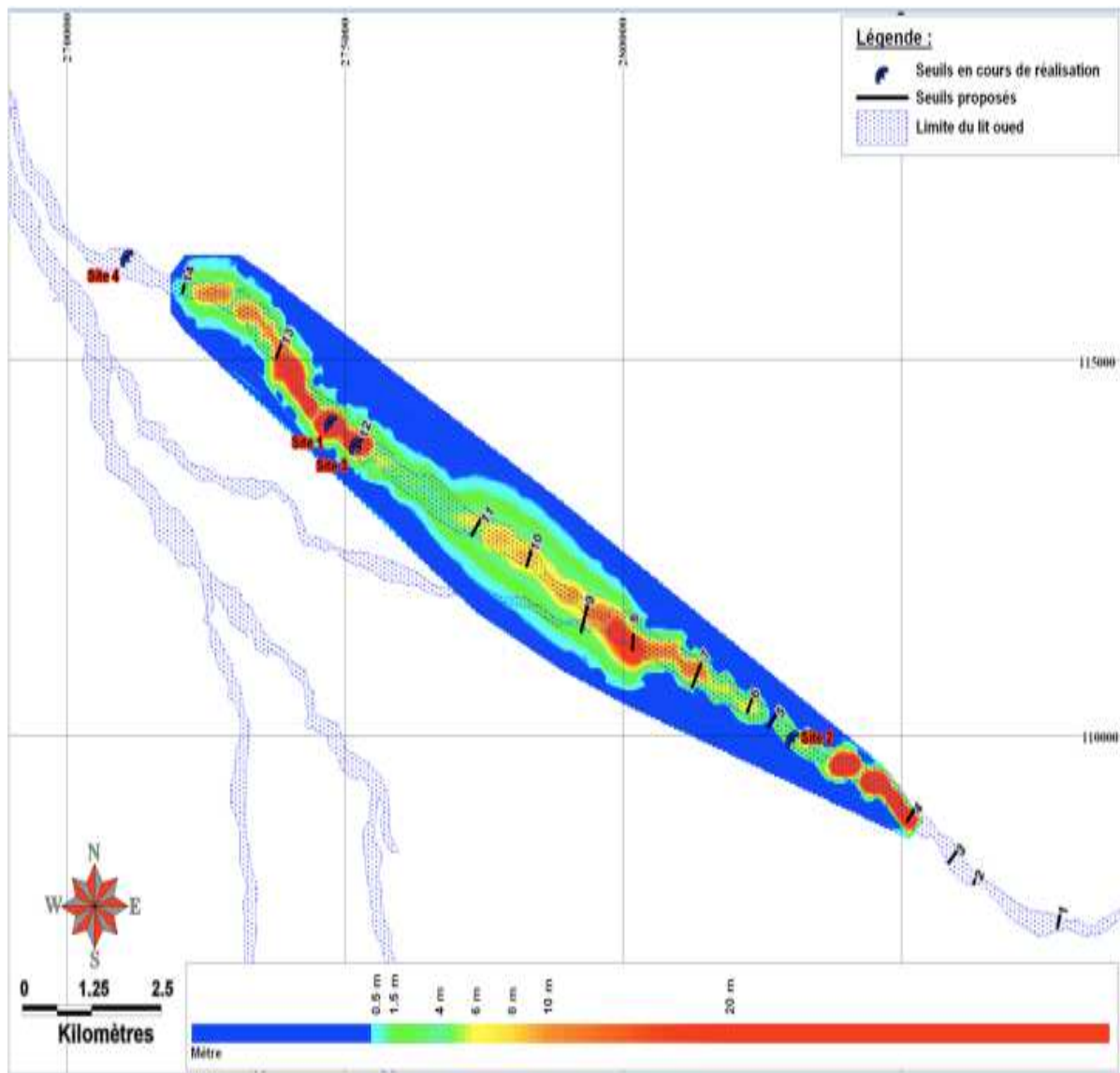


Figure 22 : Impact de la recharge par les seuils sur la nappe du Haouz au niveau du tronçon de l'oued Zat.

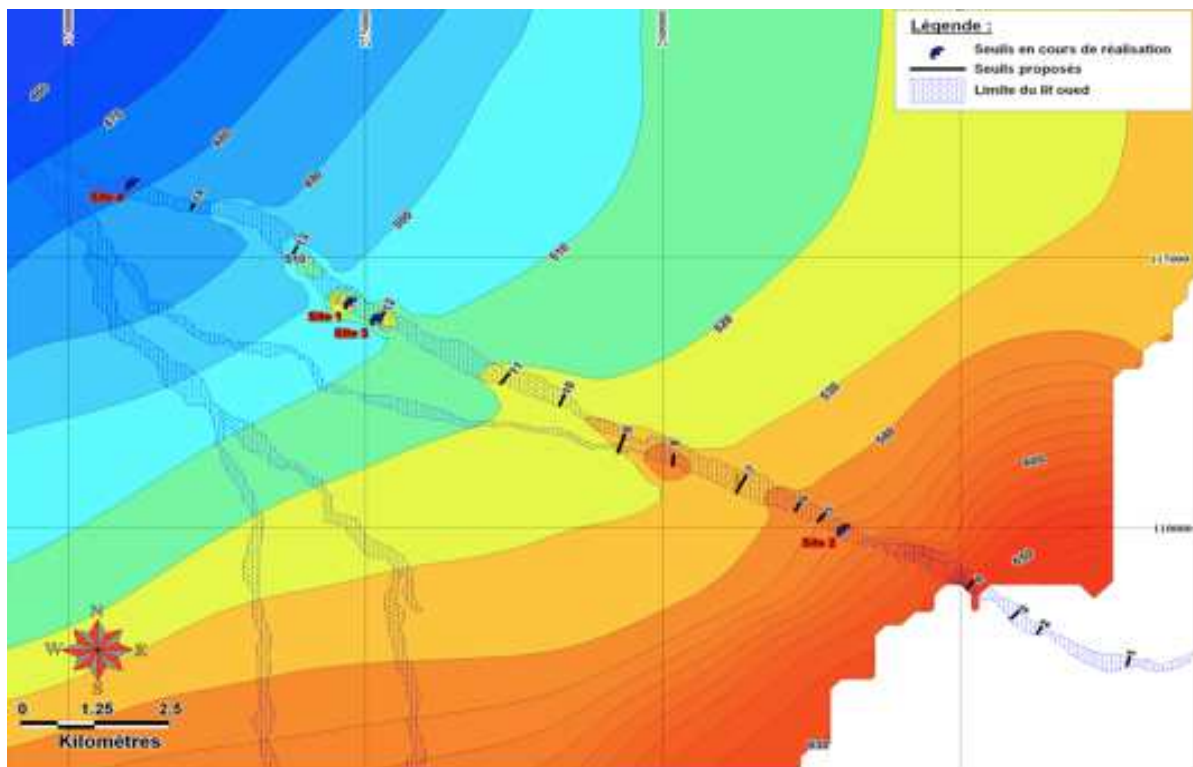


Figure 23 : Impact de la recharge par les seuils sur la nappe du Haouz au niveau du tronçon de l'oued Zat (piézométrie).

V - Implantation de réseau de suivi piézométrique de suivi

Les points d'eau sont situés le long du prolongement de l'oued à 1km de part et d'autre du lit mineur, ils sont au nombre de 44, la profondeur de ces ouvrages est liée essentiellement au niveau de la nappe par rapport au TN. Au niveau des berges les profondeurs de ces points ne dépassent pas une vingtaine de mètre avec un niveau d'eau fluctuant entre 10 et 18 m; par contre plus loin à partir de 500 m par rapport au lit de l'oued la profondeur des ouvrages est en moyenne égale à 60 m avec un niveau d'eau fluctuant entre 35 et 40 m.

Par ailleurs et en vue d'un suivi régulier de l'impact de l'infiltration avec seuils sur la nappe des eaux souterraine, un réseau de suivi a été proposé parmi les points d'eau enquêtés, les critères de sélection reposent sur les points suivants :

- l'éloignement par rapport à l'oued
- l'épaisseur de la lame d'eau
- disponibilité d'accès
- présence du réseau de mesure sur tout le prolongement du secteur étudié.

Ainsi et pour le contrôle de l'efficacité de cette recharge, 14 puits témoins ont été sélectionnés le long du tronçon étudié (tableau 15), ce sont tous des puits servant en grande partie pour l'irrigation, il a tenu compte au cours de cette sélection de la répartition spatiale de ces points d'eau pour que le suivi de la recharge représentera l'état de recharge dans l'étendue de la nappe.

Tableau 15 : Caractéristiques des puits inventoriés pour le contrôle de la recharge artificielle

N°	Nature	Coordonnées			PT (m)	NP (m)	Diamètre (m)	DATE	Côte pézométrique (m)
		X	Y	Z					
P1	Puits	275490	114156	549	62	18.0	1.8	2007-11-09	531.0
P3	Puits	275834	114105	554	60	17.0	1.8	2007-11-09	537.0
P15	Puits	279866	111953	610	66	35.0		2007-11-09	575.0
P16	Puits	278983	112586	596	37	25.0	1.6	2007-11-09	571.0

P20	Puits	284097	109297	678	10	6.0		2007-11-09	672.0
P29	Puits	273067	113588	533	30	17.0	1.8	2007-11-09	516.0
P31	Puits	272773	113192	529	24	16.0	1.6	2007-11-09	513.0
P34	Puits	282831	109762	648	24	11.5	1.8	2007-11-08	636.5
P35	Puits	282557	110031	645	13	11.7	1.0	2007-11-08	633.3
P36	Puits	282360	109883	642	22	16.0	1.2	2007-11-08	625.5
P39	Puits	280612	110570	617	20	13.7	1.4	2007-11-08	602.8
P40	Puits	280075	110896	609	21	13.1	1.6	2007-11-08	595.9
P42	Puits	279009	111331	596	30	18.4	1.8	2007-11-08	577.6
P44	Puits	277569	111549	579	27	14.0		2007-11-08	564.5

VI -Aperçu sur l'avancement des travaux de la recharge artificielle dans le lit de l'oued Zat :

VI.1- Chronologie des travaux sur le projet de la recharge artificielle :

- Réalisation de 4 seuils en 2008 dans le cadre du projet pilote de la recharge artificielle de l'oued Zat, ces seuils sont placés dans les quatre sites étudiés déjà citer. Leurs coordonnées figures dans le tableau suivant :

Tableau 16: Coordonnées des seuils réalisés en 2008

N° du site	Coordonnées		
	X	Y	Z
1	293 890	106 670	820
2	283 020	109 890	655
3	275 200	113 990	550
4	271 120	116 380	500

- Implantation de nouveaux piézomètres pour le contrôle de la recharge
 -Lancement de travaux de réalisation de quatre seuils en début 2010, les travaux sont achevés en 2011, les seuils sont repartis comme suit :

Tableau 17 : Seuils réalisés en 2010

Seuil	Site	X	Y	Hauteur max du seuil (m)	Largeur du seuil (m)
1	6	282 230	110 315	2,10	276,6
2	4	285 106	108 867	2,56	190,3
3	8	280 169	111 146	4,16	206,1
4	3	285 855	108 316	1,26	207

Le total des seuils est donc huit seuils d'infiltration placés le long du lit de l'oued Zat.

VI.2- Démarche de réalisation d'un seuil

La réalisation d'un seuil se fait selon les étapes suivantes :

- Réalisation du levé topographique au niveau du profil en travers du seuil fixé pour implanter le seuil et la protection en gabions.
- Réalisation des fouilles de 2,50 mètres de profondeur sur 5 mètres de largeur, tout le long du profil en travers du seuil fixé.
- Mise en place de murs de protection, des rives de l'oued, en gabions sur une longueur de 100 Mètres, pour chaque rive (75 m en amont du seuil et 25 m en aval du seuil).

-Mise en place d'un seuil en béton cyclopéen en travers du lit de l'oued Zat.



Photos 7 et 8 : Photos montrant l'un des seuils réalisé dans le lit de l'oued Zat en 2014



Photos 9 et 10 : photos Montrons le problème des affouillements au dessous Des seuils

Nous constatant, d'après notre visite des seuils, l'absence des ouvrages de dissipation qui protège les seuils contre les affouillements qui peuvent causer la destruction des ouvrages si une grande crue survient dans le futur et même si elle ne survient pas la durée de la vie de l'ouvrage va diminuer sans la présence de ces ouvrages de dissipation.

Et n'oublions pas le problème de colmatage qui affecte l'aval des seuils et qui est dû au dépôt des fines ce qui provoque la création d'une couche imperméable juste au droit du seuil ce qui ne favorisent pas l'infiltration. Pour remédier à ce problème, il faut procéder à des travaux de curage pour améliorer l'infiltration aux droits des seuils.



Photos 11 et 12 : Phénomène de colmatage



Chapitre 5 : Qualité des eaux de la nappe alluviale de l'oued Zat

Nous avons profité dans le cadre de ce stage de la disponibilité du laboratoire de l'ORMVAH pour faire les analyses chimiques des eaux de la nappe du Haouz au niveau de l'oued Zat. Ces analyses chimiques sont portées sur le pH et la conductivité électrique et les éléments majeurs (Ca^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ et SO_4^{2-}).

I -Échantillonnage :

Nous avons prélevé 4 échantillons de quatre points d'eau différents le long du lit de l'oued zat à partir de l'amont vers l'aval, 3 échantillons sont prélevés à partir de puits traditionnels et un échantillon d'eau de surface.

Tableau 18 : Situation des points d'eau

Echantillon	Localité	Date	Coordonnées	Altitude	PN	NP
Surface	Ait ziad	10/06/2014	X : 293 550 Y : 174 000	822	-	-
Puits 1	Taferiat	10/06/2014	X : 291 000 Y : 175 440	828	6	882
Puits 2	Ait ourir	10/06/2014	X : 282557 Y : 110031	677	13	665
Puits 3	Bouchaala	10/06/2014	X : 275 490 Y : 114 156	520	30	490

Les échantillons qu'on avait amené sont conservé dans des bouteilles en plastique bien propres et bien rincées avec l'eau à prélevé et bien fermées.

II-Méthodes de mesures :

II.1- -La conductivité électrique :

La conductivité est un paramètre important qui nous renseigne sur la minéralisation totale de l'eau. Son unité est le $\mu\text{S}/\text{cm}$.

La méthode de mesure est la suivante :

- On place une quantité suffisante de l'échantillon dans un bécher de 50 mL.
- On place ensuite l'électrode du conductimètre dans le bécher, et on lit la valeur donnée par l'appareil tout en agitant à l'aide d'un agitateur magnétique On ne doit pas oublier de rincer l'électrode après chaque mesure.

II.2- Le potentiel hydrogène (pH) :

C'est un paramètre qui permet de mesurer l'activité chimique des ions hydrogènes (H^+), et donne une idée sur l'acidité ou l'alcalinité d'une eau à l'aide d'un appareil de mesure qui est le pH-mètre. Pour mesurer ce pH, on procède de la manière suivante :

- On place une quantité suffisante d'eau à analyser dans un bécher de 50ml,
- On étalonne le pH-mètre avec des solutions étalons dont le pH est bien connu (généralement de $\text{pH}=10$ et de $\text{pH}=7$),
- Après l'étalonnage de l'appareil, on rince abondamment l'électrode avec de l'eau distillée avant de commencer la mesure, qui consiste tout simplement à placer l'électrode dans le bécher et de lire la valeur donnée par l'appareil.

II.3- Le calcium (Ca^{2+}) :

On les dose par le complexons III (N/50) dans un milieu alcalin à $\text{pH} = 10$, Nous titrons par l'acide éthylène diamine tétra-acétique (E.D.T.A.), Le protocole utilisé dans ce cas est le suivant :

- On place 10 ml d'eau à analyser dans une erlenmeyer de 100 ml.
- On ajoute 40 ml de l'eau distillée,
- On ajoute 2ml de la base forte NaOH (40g/l),
- On ajoute peu de murexide (comme indicateur colorant).
- On obtient le point de virage lorsque la coloration rouge-rose devient violette.

II.4- Le total calcium magnésium :

Il s'agit de d'une somme de Ca^{2+} et Mg^{2+} . Ce volume est manipulé à partir de la technique suivante :

- On prélève 10ml du l'eau à analyser, on place ce volume dans un erlenmeyer de 100 ml.
- On commence à ajouter de la solution tampon (de façon à avoir un $pH=10$),
- On ajoute 3gouttes de colorant Net.
- L'eau prend une coloration du rouge vineux,
- On arrête le titrage par le complexons III (N /50) quand la coloration devient bleue.

Après avoir le total de Ca et Mg il suffit une opération entre le total et le calcium pour avoir le magnésium.

II.5- Les chlorures (cl)

Le chlore n'est pas absorbé ni retenu par les sols, c'est un élément qui se déplace facilement avec l'eau du sol, il est prélevé par les plantes et s'accumule dans les feuilles. Des symptômes de toxicité apparaissent comme la brûlure du feuillage ou le dessèchement des tissus foliaires.

La quantité des chlorures contenus dans les échantillons a été déterminée, par dosage argentimétrique, elle est exprimée en mg/l. Le protocole utilisé dans ce cas est le suivant :

- On remplit l'erlenmeyer du 100 ml par 10 ml d'eau au moment du titrage.
- On remplit la burette par 25 ml de la solution de nitrate d'argent ($AgNO_3$) à $N=1/10$.
- On ajoute 3 à 4 gouttes de chromate de potassium ($KCrO_4$) à 10% sur l'eau qu'on veut titrer, la couleur deviendra jaune, on agite bien avant de commencer le titrage.
- On ouvre la burette en laissant les nitrates d'argent s'écouler lentement on agitant bien, on arrête le titrage quand la solution prend une couleur rouge brun.

II.6- Les bicarbonates et carbonates (HCO_3^- , CO_3^{2-})

L'alcalinité est essentiellement due à la concentration importante des ions : (HCO_3^-), (OH^-), et (CO_3^{2-}) dans l'eau, La technique utilisée pour la mesure de ces bicarbonates est la suivante :

- On met la solution d'acide sulfurique H_2SO_4 (1/5) dans une burette de 25 ml,
- On prélève 10 ml de l'échantillon qu'on place dans un bécher de 100 ml,
- On ajoute 3 gouttes de vert de Bromocrésol sur l'eau qu'on veut titrer, la couleur deviendra bleue, on agite bien avant de commencer le titrage.
- On détermine le point du virage quand la couleur devient jaune.
- Au cas d'un milieu basiques, dont $pH \geq 8.5$, les (CO_3^{2-}) sont titré directement par l'indicateur coloré le Phénolphtaléine ce qui donne une coloration rose à l'échantillon.

II.7- Le potassium et le sodium (K^+ , Na^+)

Le dosage de ces deux ions se base sur la méthode de photométrie à flamme. Son principe se base sur la dissociation des atomes pendant leur passage dans la flamme, et qui émettent de l'énergie à leur excitation. Chaque élément va émettre une longueur d'onde bien précise qui sera détectée par des filtres optiques de chaque élément. Le principe consiste à réaliser une courbe d'étalonnage de l'élément à doser avec des concentrations connues, puis évaporer dans la flamme du photomètre l'eau à analyser et déterminer la teneur du Na^+ ou K^+ en connaissant la longueur d'onde d'absorption de chacun d'eux.

II.8- Les sulfates (SO_4^{2-}) :

- On prélève 10ml de l'échantillon, et on le verse dans un erlenmeyer,
- On ajoute 2ml d'acide sulfurique H_2SO_4 (20 /l),
- On met la solution à bouillir pour détruire les bicarbonates,
- On ajoute 5ml de Chlorure de Baryum $BaCl_2$ (N /25) afin de faire précipiter les sulfates,
- On ajoute 2ml de Chlorure de Magnésium $MgCl_2$ (N /25),

- On ajoute 10ml de la solution Tampon,
- On titre avec le complexons III (N /50)

III -Résultats et interprétations:

III.1- Qualité des analyses

En théorie, l'eau naturelle est électriquement neutre, la somme des anions (en équivalent chimiques devrait être égale à cations. En réalité cet égalité rarement obtenue. En doit calculé la balance ionique via celle des est alors la relation suivante :

$$BI = \frac{\Sigma(\text{cations}) - \Sigma(\text{anions})}{\Sigma(\text{cations}) + \Sigma(\text{anions})} \times 100$$

D'après la balance ionique, les analyses sont considérées comme :

- Excellentes lorsque $BI \leq 5\%$
- Acceptable lorsque $5\% \leq BI \leq 10\%$
- douteuse lorsque $BI \geq 10\%$

Tableau 19 : Balance ionique pour les échantillons prélevés

Echantillon	Balance ionique en %
Eau de surface	11
Puits 1	9
Puits 2	7
Puits 3	6

III.2- La conductivité électrique:

Les résultats obtenus montrent que les eaux souterraines ont une conductivité comprise entre 410 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et il est de l'ordre de 430 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour l'échantillon de surface.

Tableau 20 : Conductivité électrique des eaux échantillonnées

Echantillon	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Sels solubles (g/l)
Eau de surface	430	0,28
Puits 1	650	0,45
Puits 2	800	0,54
Puits 3	850	0,59

Tableau 21: Risques de salinité des eaux d'irrigation

Risque	Total dissous (mg/L)	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Nul	<500	<0.75
Léger	500-1000	0.75-1.5
Modéré	1000-2000	1.5-3.00
Sévère	>2000	>3.0

- **Les eaux de surface** : l'échantillon de l'eau de surface présente une conductivité de l'ordre de 430 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et une teneur en sels solubles de 280 mg/l. Ce sont des eaux non salines bonnes pour l'irrigation.
- **Les eaux souterraines** : Ces eaux se divisent en deux groupes :
 - Eaux avec conductivité $<750 \mu\text{S}/\text{cm}$: présentées par l'échantillon de puits 1, il présente une salinité nulle.
 - Eaux avec conductivité 750-1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$: présentées par les échantillons de puits 2 et 3, c'est une eau légèrement saline.

III.3- Le potentiel hydrogène

Il traduit la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14. Ce paramètre se mesure par un pH-mètre. Il conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques, et dépend de facteurs multiples dont la température et l'origine de l'eau.

Tableau 22 : Le pH de l'eau échantillonné

Echantillons	pH
Eau de surface	8,43
Puits 1	8,34
Puits 2	8,11
Puits 3	8,33

Pour les eaux échantillonnées, le pH est légèrement alcalin.

III.4-Les cations

III.4.1- Le Calcium et Magnésium

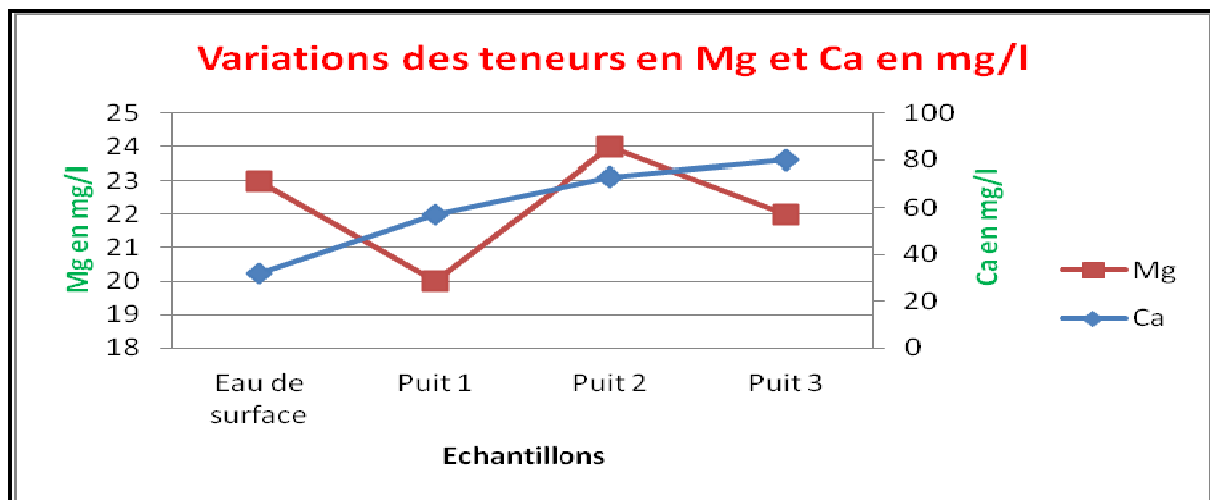
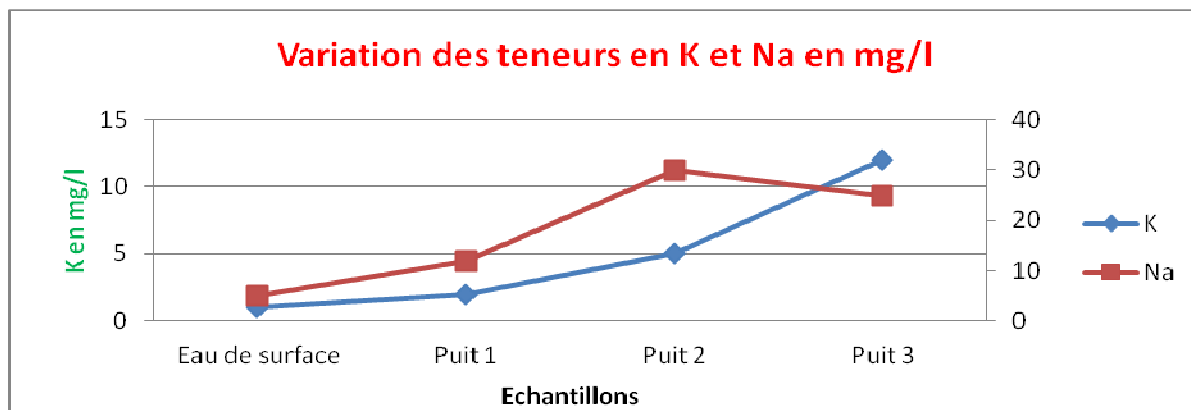


Figure 24 : Variation des teneurs en Mg et Ca en mg/l

La teneur en Magnésium varie d'un échantillon à l'autre avec des écarts importants arrivant jusqu'à 40 mg/l, elle est extrême pour le puits 2 alors qu'elle est la plus faible pour le puits 1. Le calcium lui, augmente de l'amont vers l'aval avec une légère augmentation de 2 mg/l, l'échantillon de surface présente une teneur inférieure à celle des échantillons de l'eau souterraine

III.4.2- Le Sodium et potassium

III.4.3-



La teneur en Sodium la plus élevée est enregistrée au niveau du puits 2 avec une légère augmentation par rapport au puits 3, l'échantillon de surface.

Le Potassium augmente de l'amont vers l'aval dans les eaux souterraines ce qui est expliqué par la présence de terrains argileux en aval de l'oued Zat.

Figure 25 : Variation des teneurs en K et Na en mg/l

III.5- Les anions

III.5.1- Les chlorures

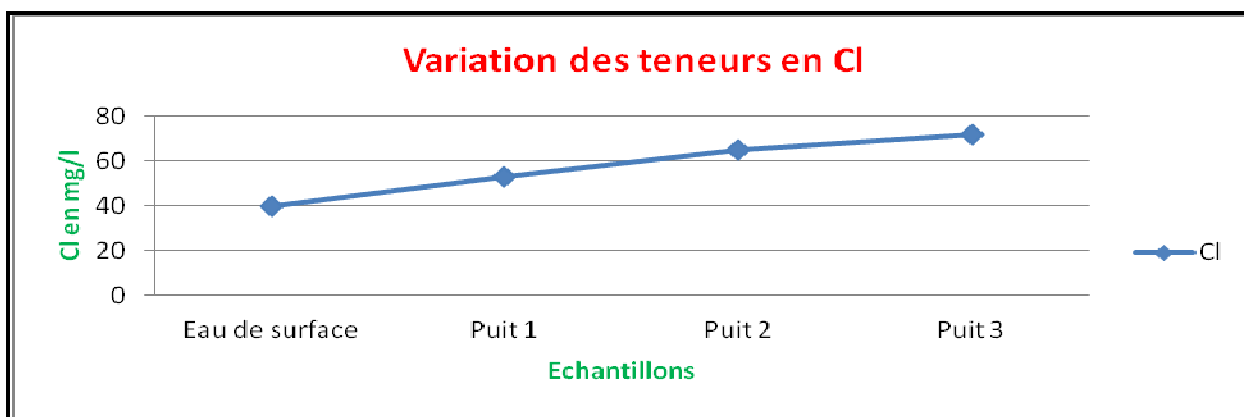


Figure 26 : Variation des teneurs en Cl en mg/l

La teneur en Cl augmente de l'amont vers l'aval de l'ordre de 20 mg/l et elle est de l'ordre de 40 mg/l pour l'échantillon de surface qui est une teneur inférieure par rapport aux eaux souterraines.

III.5.2- Les sulfates

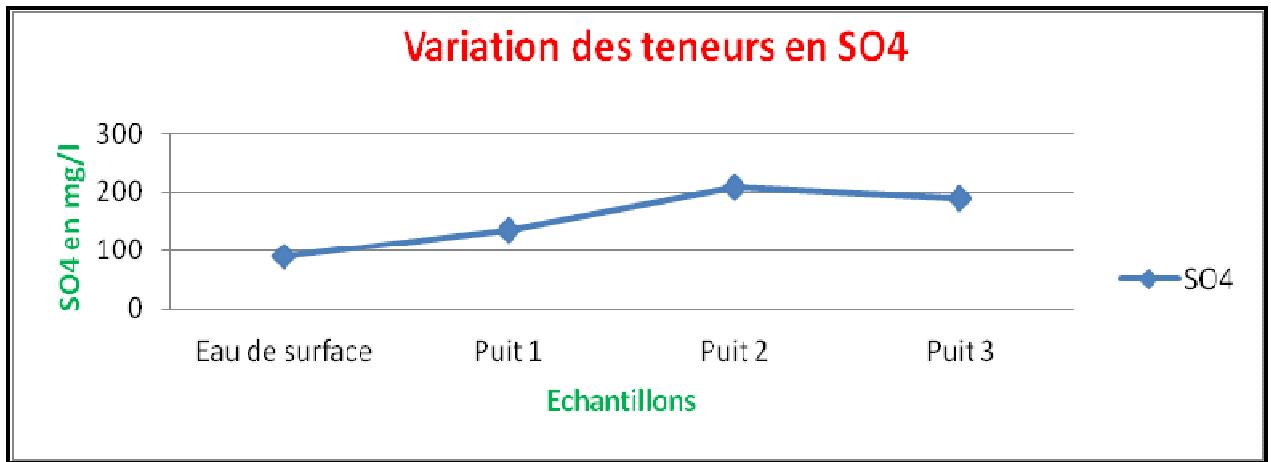


Figure 27 : Variation de la teneur en SO4 en mg/l

Les sulfates présentent des teneurs élevées pour tous les échantillons, la plus élevée est enregistrée dans le puits 2.

III.5.3- Les bicarbonates

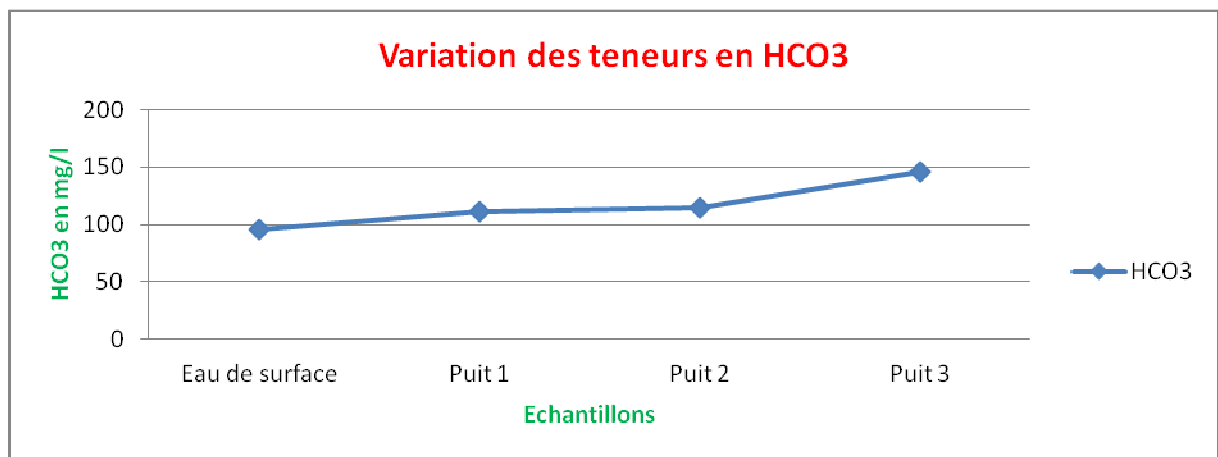


Figure 28 : Variation des teneurs en HCO3 en mg/l

Les bicarbonates présentent des teneurs augmentant de l'amont vers l'aval. L'échantillon de surface a une teneur inférieure à celle des eaux souterraines.

III.6- Diagramme de Piper

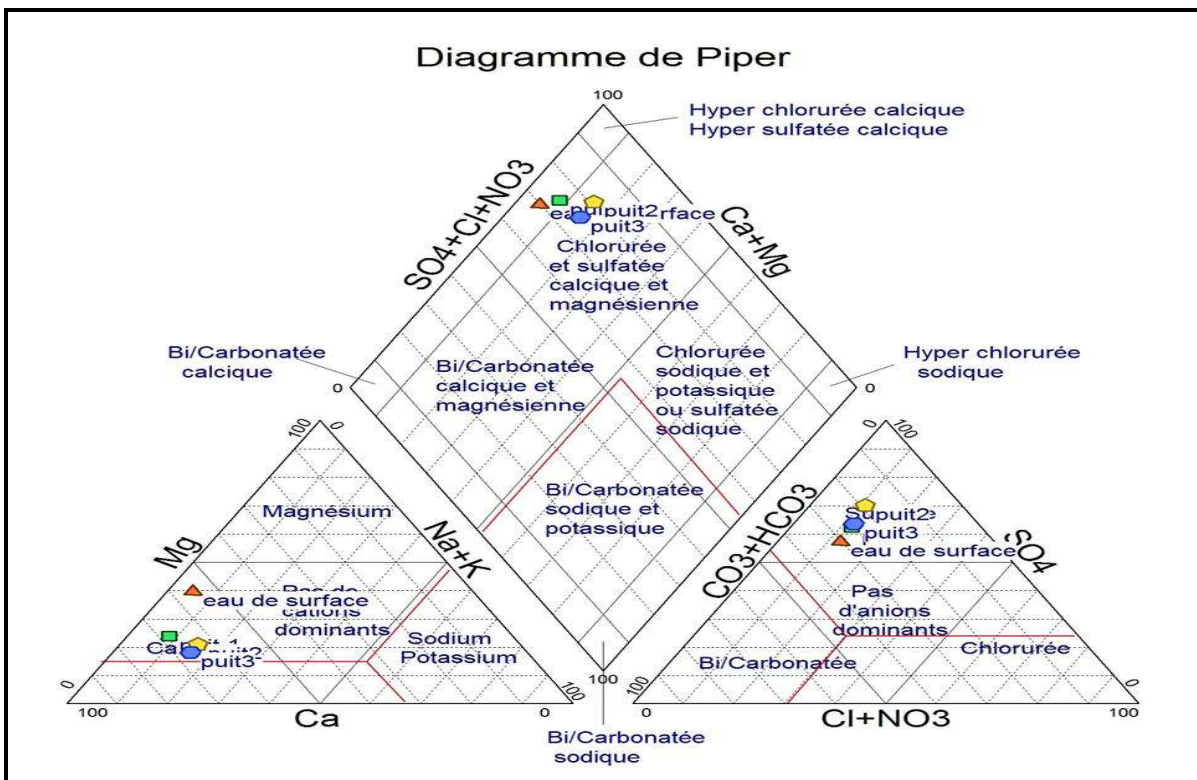


Figure 29 : Diagramme de Piper

Les échantillons prélevés présentent un faciès hydrochimique chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne.

III.7- Diagramme de Scholler-Bercalov :

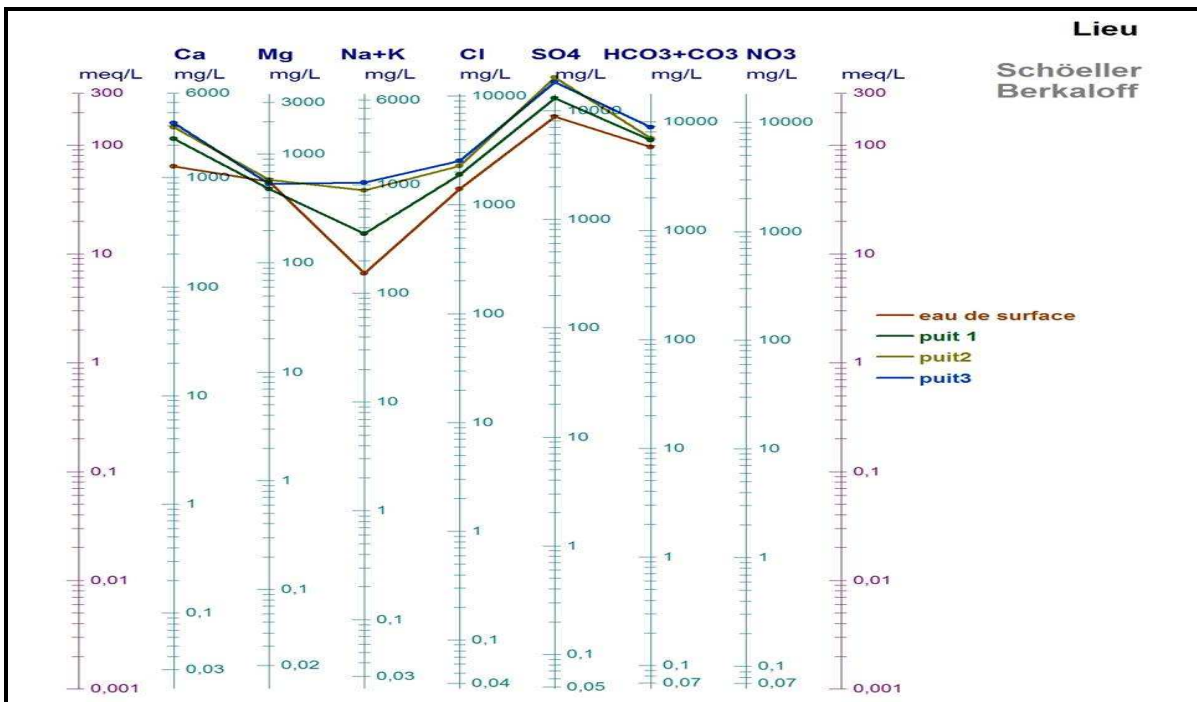


Figure 30 : Diagramme de Scholler-Bercalov

Les échantillons peuvent se grouper dans un seul groupe caractérisé par des teneurs proches en termes de tous les éléments, on observe aussi la dominance des sulfates et bicarbonates par rapport aux autres éléments.

En général les analyses des échantillons prélevés de puits près des seuils montre que les eaux sont d'une bonne qualité, en terme d'irrigation comme pour l'alimentation en eau potable. La recharge artificielle n'a donc pas un impact négatif sur la qualité des eaux souterraines.

Conclusion

- La notion de la recharge artificielle comme une action de la politique de gestion intégrée des ressources en eau et son impact positive sur l'état des ressources en eau souterraines.
- Description des Conditions de réalisation du projet de la recharge artificielle au niveau de l'oued Zat et de la technique utilisée.
- Les simulations hydrauliques montrant l'intérêt de la recharge artificielle au niveau de oued Zat.
- Les analyses chimiques montrant la bonne qualité des eaux souterraines ce qui confirme que le système de recharge n'a pas un impact négative sur la qualité des eaux souterraines.

Recommandations

- Aménagement d'un barrage à Taferiat pour une meilleure exploitation des eaux de l'oued.
- Adaptation des nouvelles techniques d'irrigation au lieu de l'irrigation traditionnelle.

- Bétonnage des séguias pour réduire les pertes en eaux d'irrigation.
- Contrôler les prélèvements intensives par des lois sévères.

Références bibliographiques

- Alimentation artificielle des nappes souterraines par J. BIZE, L. BOURGET, J. LEMOINE. Edition Masson et Cie (1972).
- Comair F.G (2008) Gestion et hydrodiplomatie de l'eau au proche orient. Ed. L'orient-le jour, Beyrouth, 317pp.
- Detay M. (1997). La gestion active des aquifères. Masson, Paris 416p.
- Étude d'Actualisation des ressources en eau de surface de la zone d'action de l'agence du bassin hydraulique du Tensift par CID (ABHT, 2004).
- Étude de synthèse hydrogéologique pour l'évaluation des ressources en eau souterraine du bassin hydraulique du Tensift. Mission IV : Modèles hydrogéologiques par ANZAR (ABHT,2003).
- Étude de gestion des principales nappes de la région hydraulique du Tensift. Mission 1 : connaissance et diagnostic de l'état et de la gestion actuelle des ressources en eau souterraines par RESING (ABHT, 2008).
- Étude d'évaluation des matériaux de construction dans les lits des oueds Zat et N'fis Mission I par L3E et MEDITECH (ABHT, 2007).
- Étude pour la délimitation du domaine public hydraulique au niveau des oueds Zat et Lahjar par DHI Eau et Environnement (ABHT, 2008).

- Étude des potentialités de recharge artificielle de la nappe du Haouz. Mission I : Étude d'impact de la recharge artificielle et définition d'un schéma de gestion par ANZAR (ABHT, 2005).
- Étude du plan de gestion intégré des ressources en eau dans la plaine du Haouz, Royaume du Maroc par Pacific Consulting International, Japon (ABHT, 2008).
- Murillo Diaz J.M & Lopez Geta J.A (2000) La recharge artificielle des aquifères dans les zones où les précipitations sont irrégulières. Hydrogéologie (3) : 3-12
- Pyne .R & David .G (1995) Recharge et les puits des eaux souterraines. Gide de l'aquifère de récupération de stockage.
- www.fstgeo.ab.ma

