

Mémoire de Fin d'Etudes

Contribution à l'étude de la recharge artificielle de la nappe du Haouz au niveau de l'oued Ghmat (Bassin de Tensift)

Réalisé par :

- Mlle Nassima Moussajjal
- Mlle Nisrine Boudahk

Soutenu, le 26 juin 2014, devant le jury composé de :

- Mr. Moustadraf Jalal (encadrant FST)
- Mr. Sghir Fath Allah (encadrant ORMVAH)
- Mr. Touil (examineur)

2013 - 2014

Dédicace :

A nos très chers parents,

Rien au monde ne pourrait compenser les sacrifices que vous avez consentis pour notre éducation et notre bien être, veuillez trouver dans ce travail le fruit de toutes vos peines et vos efforts.

A nos chers frères et sœurs,

Pour l'amour et le respect qui nous en toujours octroyés...

A nos enseignants & professeurs,

Pour leur patience, dévouement et sacrifice.

A nos chers amis,

Pour leurs patiences et leurs soutiens qu'ils n'ont cessés d'apporter au cours de cette formation.

Remerciements :

On remercie en premier lieu Monsieur J.MOUSTADRAF, notre encadrant à la faculté des Sciences et Techniques, pour ses soutiens, ses conseils, ses corrections et sa patience.

Nous adressons nos profonds remerciements à Monsieur F. SGHIR, notre encadrant à l'Office Régional de la Mise en Valeur Agricole du Haouz, pour son temps, son encadrement, et ses conseils.

Nos remerciements sont destinés au membre du jury, Monsieur A. TOUIL pour avoir accepté de juger notre travail.

Au terme de gratitude et de respect nous tenons à remercier les personnes suivantes :

- ❖ Monsieur A. MORENO, ingénieur chef au laboratoire de l'ORMVAH et son équipage au sein du Laboratoire pédologique d'ORMVAH, pour leurs soutiens et conseils afin de mener à bien nos analyses chimiques.
- ❖ Mlle A.AYOUCHI ; technicienne au laboratoire de l'ORMVAH et ancienne étudiante à la FSTM pour sa patience et son aide à la réalisation des analyses chimiques au sein du Laboratoire du département qui sans elle ce travail ne peut être fait.
- ❖ M. AGOUSSINE, ENSA Agadir pour ses conseils, orientation et disposition.

Par ailleurs, la réalisation de ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien moral et effectif de nos familles. On remercie donc nos parents pour leur appui et leur soutien durant toutes nos années d'étude. On remercie également toute personne qui a aidé de manière directe ou indirecte à la réalisation de ce mémoire.

Sommaire :

Remerciements	3
Liste des figures.....	6
Liste des tableaux	7
Liste des photos	7
Présentation de l'office du Haouz	8
Introduction	9
Démarche générale et méthodologie du travail	10

Chapitre I : Présentation de la zone d'étude

I-Présentation du cadre général.....	11
1-Situation géographique	11
2-Cadre climatique.....	12
3-Cadre géologique.....	12
II-Présentation de la zone d'étude.....	13
1-Situation géographique	13
2-Réseau hydrographique.....	15
3-Morphologie du secteur de Ghmat.....	17
4-Climat.....	17
5-Topographie.....	18
6-Hydrogéologie.....	19

Chapitre II : La Recharge artificielle de la nappe

1-Généralités.....	20
2-Objectifs de la recharge artificielle	20
3-Classification des seuils.....	21
3-1 En fonction de la nature des matériaux constitutifs	21
3-2 Suivant la géométrie	23
4- les principaux problèmes techniques	25
5-Critères de choix des sites de recharge dans l'oued Ghmat	26
5-1 La lithologie du réservoir	25
5-2 La profondeur de l'eau.....	28
5-3 La transmissivité.....	30
5-4 La perméabilité.....	32
5-5 Le coefficient d'emménagement.....	34
5-6 La pente.....	36
6-Processus hydrodynamique de l'infiltration	38

Chapitre III : Secteurs potentiels et Impact de la recharge artificielle sur la nappe

1- Définition des secteurs potentiels.....	39
2- Origines des eaux de recharge.....	42
Scenario 1 : simulations de l'impact de la recharge lors du passage de la crue Q2 sur le niveau piézométrique	42
1- Période de recharge	42
2- Impact sur la nappe	42
Scenario 2 : Simulation de l'impact de la recharge	43
1- Période de recharge.....	43
2- Volume d'eau infiltré	43

Chapitre IV : Etude de la qualité de l'eau de l'oued Ghmat

1- Echantillonnage	45
2- Mode opératoire	44
3- Résultats des analyses	47
4- Faciès chimique	50
<i>CONCLUSION</i>	55
<i>BIBLIOGRAPHIE</i>	56

Liste des figures :

Figure 1 : carte de situation des bassins versant dans la zone d'étude	14
Figure 2 : carte de situation du réseau hydrographique dans la zone d'étude.....	16
Figure3 : moyenne mensuelle des températures maximales et minimales à Marrakech	17
Figure 4 : précipitations moyennes interannuelles au niveau de l'oued Ghmat.....	18
Figure 5 : seuil en moellons	23
Figure 6 : schéma des différents types de seuils.....	24
Figure 7 : carte des faciès lithologiques du réservoir Plio-Quaternaire.....	27
Figure 8 : carte de profondeur de la nappe par rapport au sol dans la zone de Ghmat	29
Figure 9 : distribution des transmissivités dans le secteur de Ghmat.....	31
Figure 10 : distribution des perméabilités dans le secteur de Ghmat.....	33
Figure 11 : distribution des coefficients d'emmagasinement dans le secteur de Ghmat	35
Figure 12 : carte des pentes au niveau de l'oued Ghmat.....	37
Figure 13: carte des sites aménagés.....	41
Figure 14: représentation graphique de la conductivité électrique.....	48
Figure 15 : représentation graphique des teneurs en calcium des eaux de Ghmat.....	48
Figure 16: représentation graphique des teneurs en magnésium des eaux de Ghmat.....	49
Figure 17: représentation graphique des teneurs en chlorure des eaux de Ghmat.....	49
Figure 18 : représentation graphique des teneurs en sulfates des eaux de Ghmat.....	50
Figure 19 : représentation graphique des teneurs en bicarbonates des eaux de Ghmat.....	50

Figure 20 : Diagramme de piper des eaux souterraines de l'oued Ghmat53

Figure 21 : Faciès chimique du diagramme de Piper.....54

Liste des tableaux :

Tableau 1 : caractéristiques de l'étendue du gain et calcul du scenario 142

Tableau 2 : effet des seuils sur les volumes infiltrés Mm3.....43

Tableau 3 : résultats de la conductivité et du pH des eaux de l'oued Ghmat.....51

Liste des photos :

Photo 1 : seuil en béton21

Photo 2 : seuil en gabion22

Photo 3 : colmatage du bassin d'infiltration au niveau du Seuil8.....25

Photo 4,5 et 6 : méthode PORCHET32

Photo 7 : pH mètre.....45

Photo 8 : conductivimètre.....46

Photo 9 : photomètre à flamme.....47

Présentation de l'Office du Haouz:

Créé par Décret Royal n°831-66 du 22 octobre 1966, l'Office Régional de Mise en Valeur agricole du Haouz est un établissement public doté de la personnalité civile et de l'autonomie financière et il est placé sous la tutelle du ministère de l'agriculture, de la mise en valeur agricole et des pêches maritimes. Sa principale mission est de promouvoir le développement agricole dans sa zone d'action.

La zone d'action de l'Office du Haouz s'étend sur une superficie totale de 663000 ha. Elle comprend trois grands périmètres aménagés (Tessaout amont, Tessaout aval et Haouz central). Elle est limitée à l'est par l'oued El Abid, à l'ouest par le bassin du N'fis, au sud par le piémont du Haut Atlas et au nord par les oueds Tensift et Oum Er-Rbiâ. Cette zone concerne la Wilaya de Marrakech où la zone de l'Office s'étend sur une superficie de 277000 ha, la province d'El Kelâa des Sraghnas sur une superficie de 385000 ha et la province d'Azilal sur une superficie de 1000ha.

Une mobilisation séculaire de l'eau à partir de seguias (canaux en terre), de khettaras (galeries souterraines) et de puits a permis la mise en valeur agricole de la région, concrétisée notamment par l'importance des plantations fruitières.

Toutefois, une agriculture répondant aux besoins du Maroc moderne exige, compte tenu des contraintes climatiques, une garantie et une augmentation des ressources hydrauliques que le système traditionnel ne permet pas d'assurer. C'est pourquoi, dans le cadre des objectifs d'aménagement et de mise en valeur des terres agricoles fixés par le Maroc, l'Office du Haouz se voyait confier la réalisation d'un vaste programme d'aménagement hydro-agricole portant sur les trois régions naturelles composant sa zone d'action, à savoir :

Tessaout Amont : 52.000 ha

Tessaout Aval : 44.000 ha

Haouz central : 50.000 ha

L'aménagement du Haouz central est étroitement lié à celui du Tessaout Aval, par un transfert d'eau inter-régional qui prévoit notamment :

La dérivation par le biais du canal de Rocado de 300 Mm³ de l'oued Lakhdar vers le Haouz central dont 260 Mm³ pour l'irrigation des secteurs répartis sur l'ensemble de la plaine et 40Mm³ pour l'approvisionnement en eau potable de la ville de Marrakech.

Le transfert de 235 millions de m³ des eaux de l'oued El Abid régularisées par le barrage de Bin El Ouidane desservant la région du Tadla, pour irriguer 37 500 Ha du Tessaout aval. Ceci a Etude de l'impact du transport solide sur le canal Rocado, sur la qualité de l'eau et sur l'irrigation.

Techniques naturelles de remédiassions

Introduction :

De part de son extension et sa disponibilité ponctuelle, la nappe du Haouz constitue une ressource stratégique au niveau régionale et national. Elle fait l'objet d'une exploitation intense pour répondre aux exigences du développement économique de plus en plus accrue.

Dans ce contexte de stress hydrique, accentué par la succession de périodes sèches, les aspects quantitatifs et qualitatifs des eaux souterraines de la nappe du Haouz s'avèrent d'un grand intérêt.

La sécheresse impliquant une réduction des apports à la nappe et les prélèvements ont conduit à réfléchir à des axes de protection et de restauration de la nappe.

C'est donc le but d'améliorer cette situation que le recours à la recharge artificielle de la nappe du Haouz est conçu.

L'agence du bassin hydraulique de Tensift (ABHT) a obtenue un appui financier de la Facilité Africaine de l'Eau (FAE)* pour la réalisation d'un projet de recharge artificielle de la nappe de Haouz à partir de l'oued Ghmat.

L'objectif global du projet est d'améliorer les conditions de vie des populations de la plaine du Haouz grâce à la sécurisation de la disponibilité de l'eau par une meilleure utilisation de la recharge artificielle de la nappe.

La présente étude s'inscrit dans le cadre du stage de fin d'études organisé par la Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech (FSTM) pour l'obtention du diplôme de la licence des Sciences et Techniques en Eau et Environnement (LST EE).

Le stage s'est déroulé du 01/05/2014 jusqu'au 15/06/2014 au sein de l'office régional de mise en valeur agricole, notre objectif consiste à étudier la recharge artificielle au niveau de l'oued Ghmat.

Compte tenu des objectifs de notre travail, on a choisi de présenter cet ouvrage en 4 chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude, la caractérisation géographique, géologique, hydrogéologique et climatologique.

- Le deuxième chapitre consiste à présenter la recharge artificielle et ses concepts et théorie.

- Le troisième chapitre consiste à étudié la faisabilité de la recharge artificielle et son impact sur la nappe.

- Le quatrième chapitre est dédié à la qualité de l'eau et l'interprétation des résultats des analyses chimiques.

(FAE)* La facilité africaine de l'eau est un fond géré par la banque africaine de développement (BAD) et destinée au financement du développement du secteur de l'eau en Afrique. Elle a été créée en 2004 à l'initiative du conseil de ministre africain chargés de l'eau.

Démarche générale et méthodologie du travail :

I. Problématique et objectif de l'étude

Les eaux souterraines présentent des enjeux importants sur le plan économique. Cependant, leur exploitation est confrontée à des prélèvements sans cesse croissants et qui dépassent les capacités naturelles de recharge. Pour y remédier, on fait recours à une recharge artificielle par la mise en place des seuils. Cinq seuils sont réalisés afin de favoriser la décantation des eaux de crues à l'amont des seuils, leur étalement à l'aval et l'infiltration dans la nappe.

L'objectif est d'étudier la recharge artificielle au niveau de l'oued Ghmat, son impact sur la nappe ainsi que la qualité des eaux.

II. Déroulement pratique du stage

1-Phase de recherches bibliographique et de recueil des données sur le terrain et travail au laboratoire de l'ORMVAH.

- Sortie de terrain pendant 2 jours pour réaliser une campagne de prélèvements et voir la zone d'étude (oued Ghmat).
- Travail au laboratoire de l'ORMVAH, afin de faire des analyses physico-chimiques (pH, CE, Ca²⁺, Na⁺, HCO₃⁻.....) des différents échantillons prélevés.

2- Phase d'analyse des informations collectées et rédaction du mémoire de fin d'études.

Chapitre I : Présentation de la zone d'étude

I-Présentation du cadre général:

1-Situation géographique :

Le bassin versant de Tensift est d'une superficie de 18 500 km² est compris entre les latitudes 32° 10' et 30° 50' Nord et les longitudes 9° 25' et 7° 25' Ouest.

L'oued Tensift et ses affluents drainent les eaux du sud ouest du Haut atlas, encadré par les Jbilettes au nord et les collines de Mzoudia à l'ouest.

C'est un bassin à relief très contrasté, les altitudes varient entre 0 et 4167m (Jbel Toubkal). Il est drainé par l'oued Tensift qui côtoie au Nord-est la province d'El Kelâat Sraghna, à l'Est celle d'Azilal, au Sud-est celle d'Ouarzazate, au Sud-ouest la province d'Essaouira et au Nord-Ouest celle de Safi. Il déverse dans l'océan atlantique.

L'oued Tensift traverse le bassin d'est en ouest. Il est alimenté de façon quasi exclusive par ses affluents rive gauche qui drainent les flancs nord de l'Atlas. Ces affluents, installés sur un relief montagneux à structure et nature géologique hétérogène, ont des caractères torrentiels. Les principaux affluents sont localisés dans la plaine du Haouz : Oued Ghdat, Oued Zat, Oued Ghmat, Oued N'fis, Oued Rhéraya, Assif El Mal, Oued Chichaoua, Oued Tiroula et Oued Talmost. A la rive droite, aucun cours d'eau pérenne n'existe, seuls des 17 cours d'eau résultant d'événements pluvieux violents contribuent épisodiquement à l'alimentation de l'oued. Il en résulte un bassin versant très dissymétrique dont la rive droite ne joue qu'un rôle hydrologique secondaire.

2-Cadre climatique :

En raison de son étendue et de son relief, le bassin de Tensift se caractérise par un climat très différencié d'une zone à l'autre. Ainsi, le climat est semi aride influencé par le courant froid des Canaries dans la zone côtière, semi aride chaud dans les Jbilet et continental de type aride dans le Haouz et le Mejjate.

Les précipitations sont faibles et caractérisées par une grande variabilité spatio-temporelle. La pluviométrie moyenne annuelle est de l'ordre de 250 mm à Marrakech et peut atteindre 700 mm sur les sommets de l'Atlas. L'examen de la répartition moyenne des pluies mensuelles montre également l'existence de deux saisons nettement différenciées :

- d'octobre à avril, une saison humide où interviennent la quasi-totalité des épisodes pluvieux, soit près de 85 à 95 % de la pluviométrie annuelle ;
- de mai à septembre, une saison sèche avec seulement 5 à 15 % de la pluviométrie annuelle.

Les températures moyennes mensuelles, calculées sur la période 1970-2002 varient entre 18,5°C et 20,5°C. Les mois les plus chauds sont généralement juillet et août (25°C à 27°C sur l'Atlas et la plaine du Haouz et 26°C dans les zones côtières). Le mois le plus froid est janvier (11°C à 13°C sur l'Atlas et la plaine du Haouz et 12°C dans les zones côtières). (ABHT 2010)

L'évaporation moyenne annuelle varie de 1800 mm sur le versant atlasique à 2600 mm dans la plaine du Haouz. Elle est minimale pendant les mois de décembre et janvier tandis que la maximale intervient pendant les mois d'été. Près de 50% de l'évaporation totale est enregistrée durant les quatre mois de juin à septembre.

3-Cadre géologique :

La géologie du bassin versant du Tensift est décrite par son aspect lithologique, le plus important pour l'hydrologie. Les formations constituant le bassin de Tensift sont diversifiées (ABHT 2010).

- Dans la plaine, qui se présente sous forme d'une dépression, on trouve des formations détritiques de type alluvions issues du démantèlement de la chaîne atlasique. Elles sont accumulées au Néogène et au Quaternaire récent, recouvrant ainsi les formations primaires secondaires et tertiaires.
- Les schistes sont largement répandus dans les Jbilet avec des faciès et de couleurs très variés. On y distingue des schistes sombres souvent lités, des schistes gréseux avec des bancs épais de grès ou de quartzites.
- Par ailleurs, d'autres formations moins étendues peuvent être distinguées notamment des conglomérats, des affleurements calcaires et siliceux, des roches éruptives comme les granites et les gabbros.

Dans la chaîne atlasique, les affleurements lithologiques sont dominés par les faciès suivant: des roches éruptives et métamorphiques précambriennes notamment les granites, diorites, dolérites, andésites et rhyolites, des schistes primaires, des formations secondaires fortement colorées en rouge et largement dominées par des calcaires, des grès, des marnes et des argiles.

Bien que qualifiées d'imperméables, les formations métamorphiques ou éruptives comportent des zones d'altérations dont la capacité de rétention est significative étant donné la pérennité de plusieurs cours d'eau qui ne peut pas être attribuée au seul stock neigeux (Huvelin 1973 ; Moukhchane, 1983 ; Sinan, 2000).

II. Présentation de la zone d'étude :

1-Situation géographique :

L'oued Ghmat est la dénomination du cours aval de l'oued Ourika. Ce cours d'eau prend naissance dans les reliefs du haut atlas et traverse la plaine du Haouz sur 40 km avant de rejoindre l'oued Tensift.

L'orientation de l'oued est essentiellement SSE-NNW à SE-NW.

La zone d'étude est formée par le bassin de l'oued Ghmat jusqu'à sa confluence avec l'oued zat.

Ses limites sont constituées par :

- L'oued zat à l'Est
- L'oued Ghiraya à l'ouest
- La confluence avec l'oued zat au nord
- Tnine ourika au piémont du haut atlas au Sud.

L'aire ainsi délimitée s'étend sur une superficie d'environ 275 km².

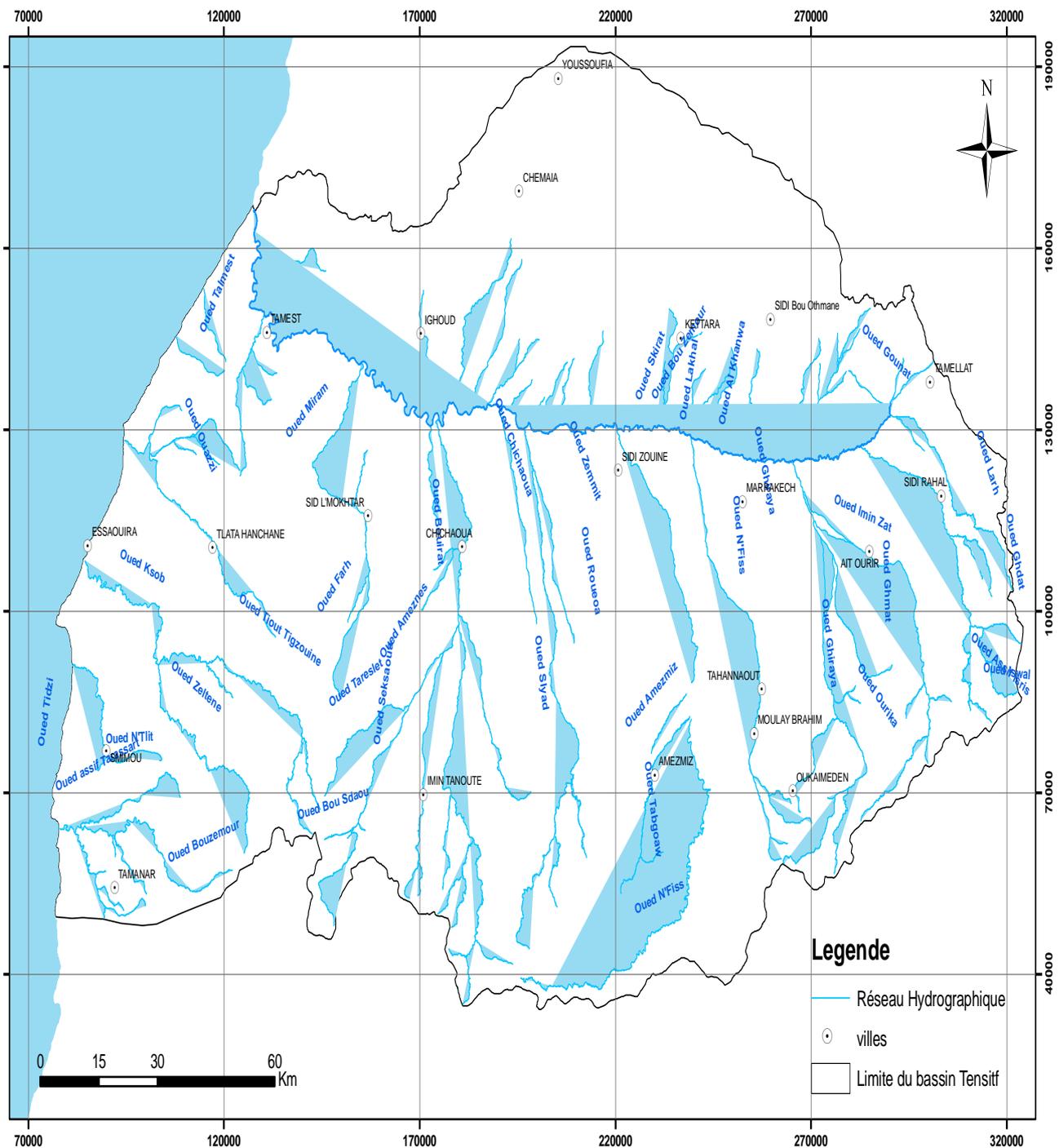


Figure 1: Carte de situation des bassins versants dans la zone d'étude.(Arcgis)

2-Le réseau hydrographique :

L'oued Ghmat est l'un des plus importants affluents RG (rive gauche) de l'oued Tensift prenant naissance dans les montagnes du Haut Atlas jusqu'au bassin de subsidence en aval. Les apports de l'oued Ghmat parviennent indirectement à l'oued Tensift car ils rejoignent celles de l'oued Zat pour former l'Oued Lahjar plus en aval.

Le bassin de l'oued Ghmat est délimité à l'Est par l'Oued Zat et à l'Ouest par l'oued Ghighaya. Les écoulements dans la zone d'étude ne sont pas toujours permanents, surtout en aval de Tnine Ourika et sont régis par les crues saisonnières en hiver et en période d'orage. Un débit de base est généralement maintenu au printemps après la fonte des neiges.

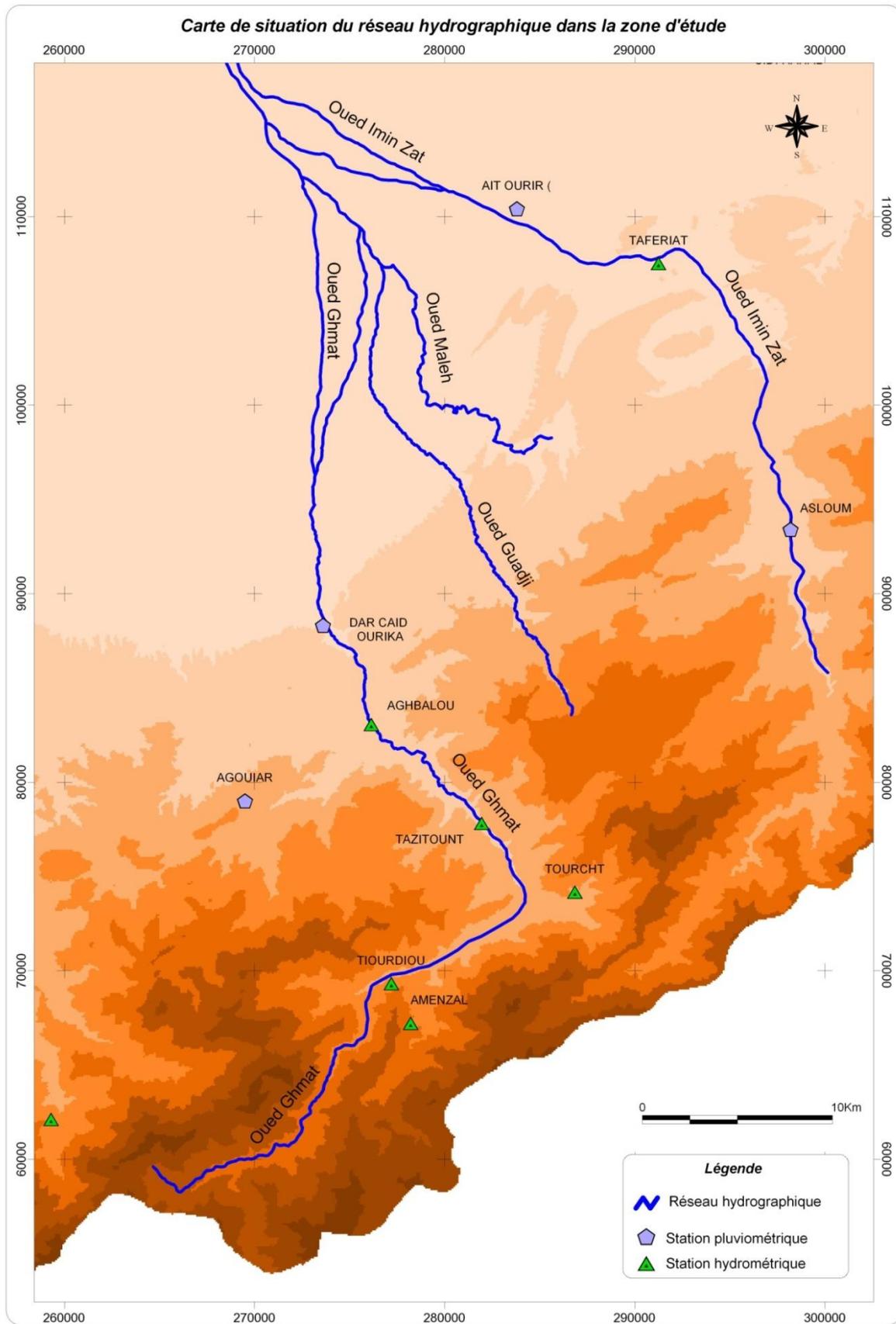


Figure2 : Carte de situation du réseau hydrographique dans la zone d'étude (ABHT, 2010).

3-La morphologie du secteur de Ghmat :

Cette partie de la plaine du Haouz présente les mêmes caractéristiques que le reste de la plaine. Sa morphologie monotone est l'expression des dernières phases de comblement de cette dépression par les apports issus de l'érosion météorique des pentes du Haut Atlas et mis en place sous formes de cônes torrentiels, d'éboulis et d'épandages contrôlés par l'aval topographique et limités au Nord par la remontée du socle au niveau des Jbilet.

Les courbes de niveau sont donc orientées grossièrement ENE—WSW suivant la direction de la ligne de piémont du Haut Atlas, avec des pentes fortes dans les secteurs d'atterrissements préférentiels, pentes qui s'adoucissent vers le Nord. Ces pentes sont entaillées par le cours d'eau Ghmat-Ourika.

Les altitudes s'étagent de 950 m au contact du socle à 430 m sur l'Oued Tentsift. La pente topographique est généralement inférieure à 2% mais peut atteindre 6% au contact du Haut Atlas.

4- Climat :

A l'instar de l'ensemble de la plaine, le secteur de Ghmat est caractérisé par un climat semi-aride avec une pluviométrie (250 mm en moyenne annuelle mesurée au poste pluviométrique de Marrakech) et hygrométrie faible.

Les températures sont élevées avec des amplitudes thermiques journalières et annuelles très élevées (à Marrakech, températures maximales moyennes mensuelles de 18 et 38 C respectivement en janvier et juillet, minimales de 05 et 19 C).

Température

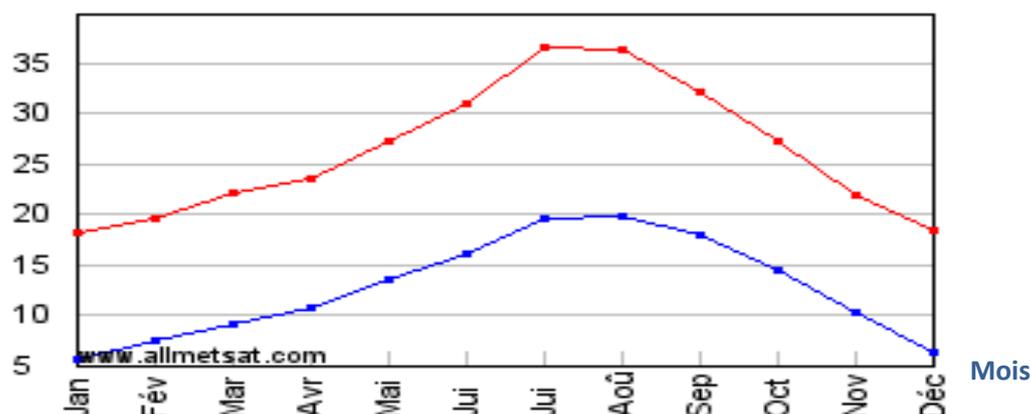


Figure3: Moyenne mensuelle des températures minimales et maximales à Marrakech

La représentation graphique des variations des moyennes mensuelles interannuelles des précipitations, sur une période de 44 ans (1968-2012), montre une variation irrégulière ; les fortes valeurs sont enregistrées au niveau des mois Mars et Avril (les mois les plus pluvieux), alors que les faibles valeurs caractérisent les mois de Juillet et Août (les mois les plus secs) Les précipitations augmentent en allant du sud vers les reliefs du haut atlas.

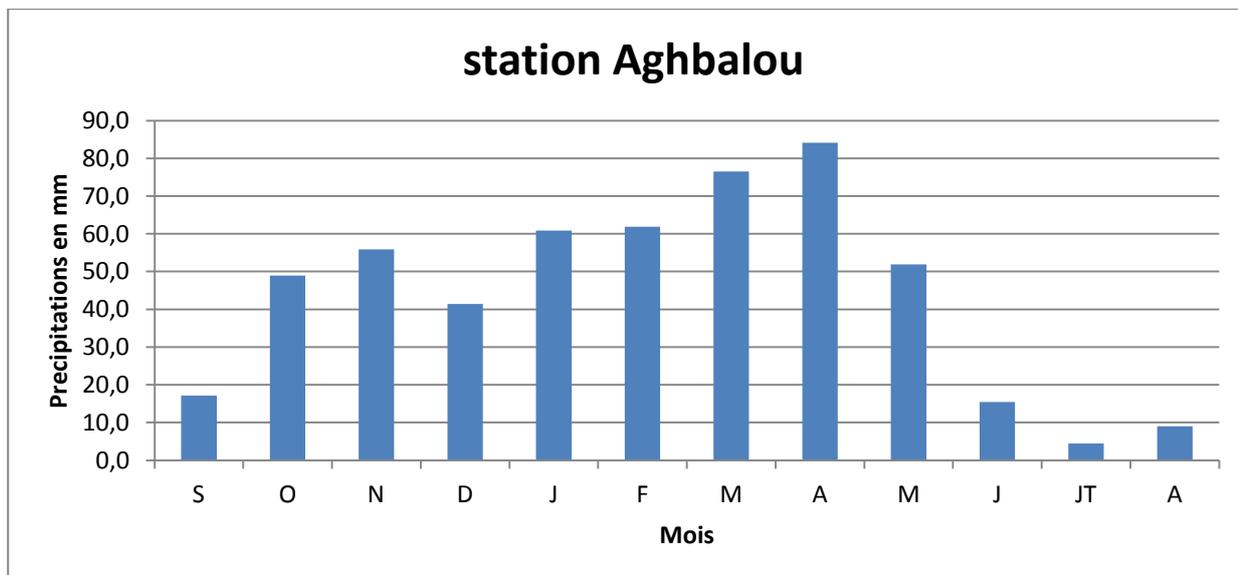


Figure 4 : Précipitations moyennes mensuelles interannuelles au niveau d’oued Ghmat (1968-2012).

5-Topographie

L’analyse du bassin versant de l’oued Ghmat montre que près de 75% de la superficie est située en altitude entre 1600 et 3200 m. L’altitude moyenne du bassin actif au niveau de la station Aghbalou est d’environ 2500m et la pente moyenne du cours d’eau principale est de 5%. Les pentes des vallées latérales sont notoirement plus fortes (5 à 10 fois) ce qui explique la violence et l’importance du charriage des crues observées. Le Tarzaza qui draine le massif de l’Oukaimden qui a une pente moyenne de 11%, mais les vallons les plus pentus se situent en amont du bassin avec des pentes qui atteignent, par endroit, des valeurs de 30 à 40%(Oufra et Tifni en amont de l’Ourika).

La partie aval entre le piedmont et la confluence avec le Tensift, l’oued Ghmat coule avec une pente moyenne notoirement plus faible (1%) sur un parcours en plaine d’environ 40 km (ABHT).

6- Hydrogéologie :

Parmi les différentes nappes existantes, l'unique nappe qui présente une réelle importance dans la plaine du Haouz est la nappe phréatique. Elle est limitée au Nord par les schistes imperméables des Jbilet, au Sud par la bordure nord du Haut Atlas, à l'Ouest par les calcaires du plateau de Chichaoua et à l'Est par l'Oued Lakhdar.

Les eaux de cette nappe circulent dans les alluvions Mio-plioquaternaires ayant une hétérogénéité complexe, tant horizontale que verticale. Cette complexité est à l'origine de la variation des caractéristiques hydrodynamiques de cette nappe.

Chapitre2 : La recharge artificielle de la nappe.

1-Généralités :

Lorsque les quantités d'eau pompées sont excessives, le niveau des nappes phréatiques baisse et les puits s'assèchent. Le temps de restitution naturelle du niveau de la nappe est souvent très long. Les méthodes de réalimentation permettent de maintenir les nappes phréatiques à un niveau suffisant afin qu'elles puissent continuer à être exploitables dans des contextes d'utilisation intensive. La recharge peut se faire par introduction d'eau directement dans l'aquifère par puits, galeries ou autres moyens.

Dans le cadre de ce projet la recharge artificielle est faite au moyen des seuils, dont le principe consiste à réaliser, dans une zone caractérisée par l'existence d'une ramification de chenaux perméables, un seuil pour repartir l'écoulement dans le plus grand nombre possible de chenaux en aval. Les débits doivent déverser sur la plus grande longueur possible du seuil afin d'inonder le lit majeur sur une surface importante et ainsi augmenter la surface d'infiltration.

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 a 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 élargissement de la largeur hydraulique et donc d'augmenter le temps de recharge.

2-Objectifs de la Recharge Artificielle :

Les objectifs de la RA peuvent être multiples et très diversifiés :

-Stockage saisonnier et récupération d'eau;

-Stockage d'eau a long terme ;

-Création de ressource stratégique d'eau ;

-Stockage a courte durée ;

-Remontée des niveaux d'eau et accroissement des débits dans les puits de production ;

-Restauration des niveaux des eaux souterraines ;

-Réduction des couts de pompages par la remontée des niveaux ;

-Stockage d'énergie hydro thermique ;

-Contrôle hydraulique d'eau contaminée ;

- Prévention contre l'intrusion des eaux salines ;
- Contrôle des inondations ;
- Etc.....

3- Classifications des seuils :

3-1 en fonction de la nature des matériaux constitutifs

On peut classer les seuils en trois grandes catégories ordonnées suivant une souplesse croissante des ouvrages.

a-Seuils en béton :

Ces ouvrages présentent une grande solidité d'ensemble (monolithisme) mais sont par contre très sensibles aux affouillements puisque le parement bétonné lisse ne dissipe pas l'énergie. Pour la conception des seuils en béton dans les rivières à fond mobile il est donc nécessaire de prévoir un dissipateur d'énergie efficace.



Photo1 : Seuil en béton

b- Seuils en gabions :

Un gabion est composé d'une structure métallique en grillage de forme parallélépipédique, remplie de pierres. Ce type de matériau, flexible et perméable est intéressant pour les seuils ou les bassins de dissipation lorsque que le coût de transport de gros enrochement devient prohibitif.



Photo 2 : Seuil en gabion

Soumis tour à tour à des pressions et à des compressions, grâce à leur flexibilité intrinsèque, les gabions métalliques se plient mais ne se cassent pas, et leur structure conserve ainsi son efficacité. Le module étant déformable, tout changement dans la forme dû à un affaissement des fondations ou à une contrainte interne est un caractère fonctionnel et non un défaut. Il s'adapte donc à de légers mouvements de terrain et, en se déformant, il reste structurellement solide sans se fracturer. Un ouvrage en gabions peut résister à une force de pression qui mettrait à rude épreuve une construction de pierres sèches et serait vraiment dangereuse avec du béton non armé et de la maçonnerie.

Le remplissage en pierre rend très perméable la structure, éliminant ainsi le besoin d'un système de drainage.

Une construction en gabions coûte moins cher qu'un ouvrage traditionnel. On peut utiliser des pierres en petits morceaux ou des cailloux, que l'on trouve généralement près du chantier pour remplir les cubes, sans devoir recourir à des matériaux spécifiques ou à de la main-d'œuvre spécialisée. Un ouvrage en gabions peut être construit sans équipement mécanique lourd. Une fois achevé, l'ouvrage en gabions sera immédiatement efficace à cent pour cent, sans qu'il soit nécessaire d'attendre comme c'est le cas normalement pour les ouvrages en béton.

C- Seuils en enrochements :

La construction de seuils en enrochements de carrière a tendance à se répandre surtout dans les régions où l'approvisionnement en gros blocs est aisé (proximité des lieux d'extraction ou possibilité d'ouverture de carrière pour les chantiers importants). Ces seuils présentent le triple avantage d'un coût de réalisation modéré, d'une grande souplesse et d'une dissipation d'énergie importante sur le parement aval des ouvrages du à la rugosité des blocs, et se justifient également mieux sur le plan environnemental.

La taille des enrochements utilisés est fonction de leur nature (granite, calcaire) et de leur structure (fissurée ou non). On utilisera en général les blocs de grandes dimensions (blocs de 1T à 1,5T parfois jusqu'à 3T ou 4T), notamment pour les bassins de dissipation.

Les blocs sont parfois liaisonnés au béton ou au bitume.

d- Seuils en moellons :

Les seuils en moellons, dont certains sont pluriséculaires, ont été construits pour l'irrigation des terres agricoles ou pour l'alimentation de moulins. Ils ont généralement une faible hauteur de chute (1 à 4 mètres).

Ces seuils présentent un profil en travers de type triangulaire, c'est à dire avec un parement aval incliné. Ils sont constitués d'une carapace en pierres de taille réduite (30 à 50 kg environ), calée à la main de façon à garantir leur résistance au courant et plus ou moins épaisse, disposée sur son corps de remblai en matériaux tout-venant (voir figure ci-dessous). Parfois les moellons sont liaisonnés à la chaux ou clavés dans une charpente en bois qui augmente la solidité de l'ensemble. Ces structures sont classiques et exposent l'ouvrage à une dégradation rapide dans le cas ou un morceau de carapace est emporté.

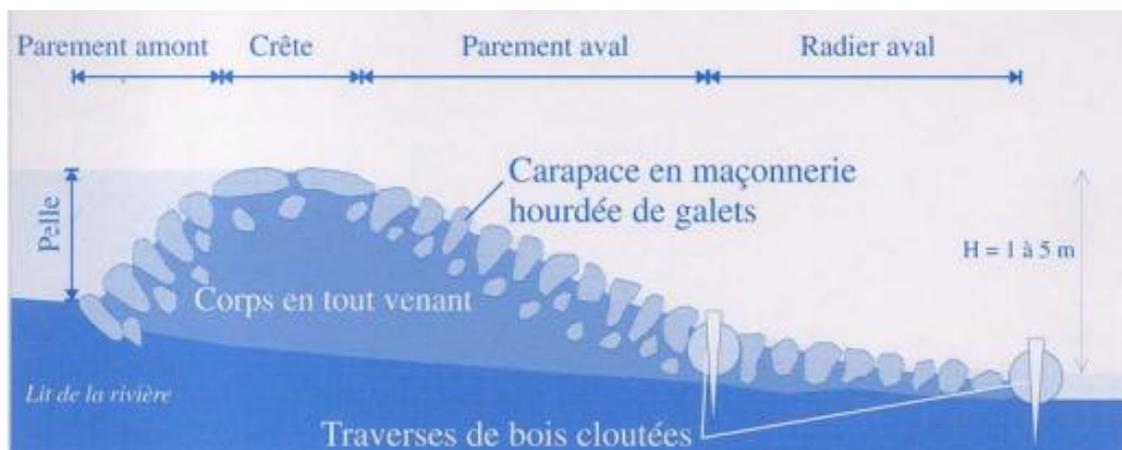


Figure5: seuils en moellons (Google).

e -Seuils mixtes :

On entend par seuils mixtes des seuils composés de plusieurs catégories de matériaux.

En fait la plupart des seuils sont mixtes (enrochements bétonnés, seuils en béton avec bassin de dissipation en gabion ou en enrochement...). Si l'association de matériaux différents paraît a priori favorable à la stabilité de l'ensemble, il faut cependant tenir compte de leurs différences de comportement. La réalisation de seuils mixtes exige certaines précautions relatives à la perméabilité mais aussi à la souplesse spécifique à chaque matériau mis en œuvre.

3-2. Suivant la géométrie :

Le tracé en plan du seuil peut être rectiligne, incurvé ou en ligne brisée. L'axe d'implantation est souvent oblique par rapport à celui de la rivière. Cette position est justifiée par le tracé de la rivière et, s'il existe, de la position du canal de dérivation. De ce fait les ouvrages peuvent atteindre deux à trois fois la largeur de la rivière.

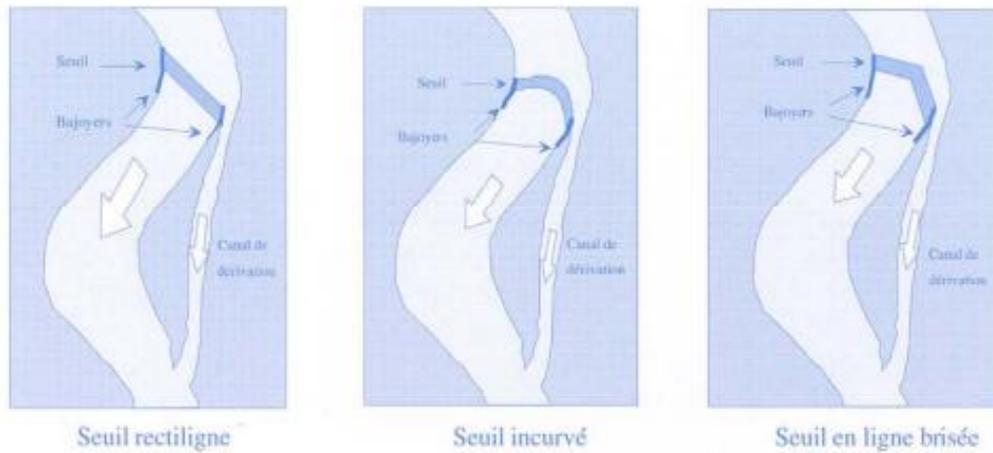


Figure 6: Schéma des différents types des seuils (Google).

a- Seuil rectiligne

Le seuil rectiligne est la structure la plus fréquente, elle est notamment employée dans le cas de seuil en bétons (seuils massifs).

b- Seuil incurvé

Pour améliorer la résistance du seuil aux charges hydrauliques, on peut construire un seuil incurvé. Cette structure s'emploie fréquemment pour des petits ouvrages (en pierres, bois, pierre et bois).

c- Seuil en ligne brisée

Cette technique consiste à former un V dont les extrémités prennent appui en rive en position inversée (la pointe du V dirigée vers l'amont) de telle sorte que la structure s'arc-boute contre le courant. Ainsi, l'ouvrage travaille en compression ce qui lui confère une grande solidité. Le profil du seuil se caractérise par une dépression en son centre ce qui permet de laisser passer le débit à une hauteur normale en situation habituelle. La pente et la largeur du bief, la force du courant et la capacité d'emmagasinement en amont forment des variables importantes à considérer.

→ Dans notre zone d'étude, les types de seuils utilisés sont les seuils en gabions et les seuils en béton.

4- Les principaux problèmes techniques :

4-1 Le colmatage :

Celui-ci a pour inconvénient principal de diminuer le débit d'injection et/ou d'infiltration et rend la prévision des débits, à terme, plus ou moins hasardeuse. Dans les deux cas, il oblige à un entretien régulier et coûteux, plus ou moins difficile en fonction des conditions d'accès permises par le type de dispositif utilisé.



Photo 3 : le colmatage du bassin d'infiltration au niveau du seuil 8.

4-2 Dépôt de matières en suspension :

Dans le cas des bassins d'infiltration essentiellement, la présence de particules en suspension dans l'eau de recharge est directement ou indirectement responsable d'une réduction de la perméabilité de la surface d'infiltration.

4-3 Développement bactérien :

Lorsque les eaux contiennent des substances organiques dissoutes, des bactéries viennent à se développer. Elles se fixent sur la matrice du milieu poreux en s'entourant d'une pellicule d'eau (on parle alors de biofilm). Le développement de cette membrane organique près de la surface d'infiltration est un facteur de diminution de la perméabilité, observée même lorsque l'eau ne transporte pas de sédiments en suspension.

4-4 Croissance d'algues :

Différents types d'algues peuvent influencer sur les performances d'un dispositif d'infiltration. On distingue les algues flottantes et les espèces benthiques (accrochées en fond d'ouvrage). Les espèces qui se forment sur la surface d'infiltration un tapis filamenteux vont, a priori, directement limiter la capacité d'infiltration. Cette couverture végétale retient également les sédiments. Ce phénomène peut alors conduire à un colmatage total ou partiel des bassins d'infiltration.

Remarque:

- ➔ Il peut paraître séduisant d'augmenter la charge d'eau dans les bassins pour augmenter la lame d'eau infiltrée. Cependant, l'augmentation de pression sur la couche colmatée peut provoquer un tassement de cette dernière par consolidation et entraîner une diminution de perméabilité (Bouwer, 1989).
- ➔ La prévention et le traitement du colmatage du bassin d'infiltration sont donc indispensables pour le bon fonctionnement du dispositif de recharge. Son traitement est souvent un grattage superficiel de la couche colmatante.

5-Critères de choix des sites de recharge dans l'oued Ghmat:

5-1 La lithologie du réservoir :

La nappe circule dans des formations détritiques accumulées au cours de la période Mio-Plio-Quaternaire.

La lithologie du remplissage de la période Mio-Plio-Quaternaire est assez complexe dans les détails. Les alluvions présentent une forte hétérogénéité verticale et latérale due au processus de l'érosion des roches du haut atlas. L'oued Ghmat-Ourika a joué un rôle important dans le transport des matériaux érodés et leurs dépôts. Le résultat est l'accumulation de matériaux de tailles différentes, formés dans des conditions et périodes différentes.

Ce système assez complexe est considéré dans son ensemble comme un seul réservoir.

La zone non saturée présente les mêmes caractéristiques : alluvions hétérogènes latéralement et verticalement.

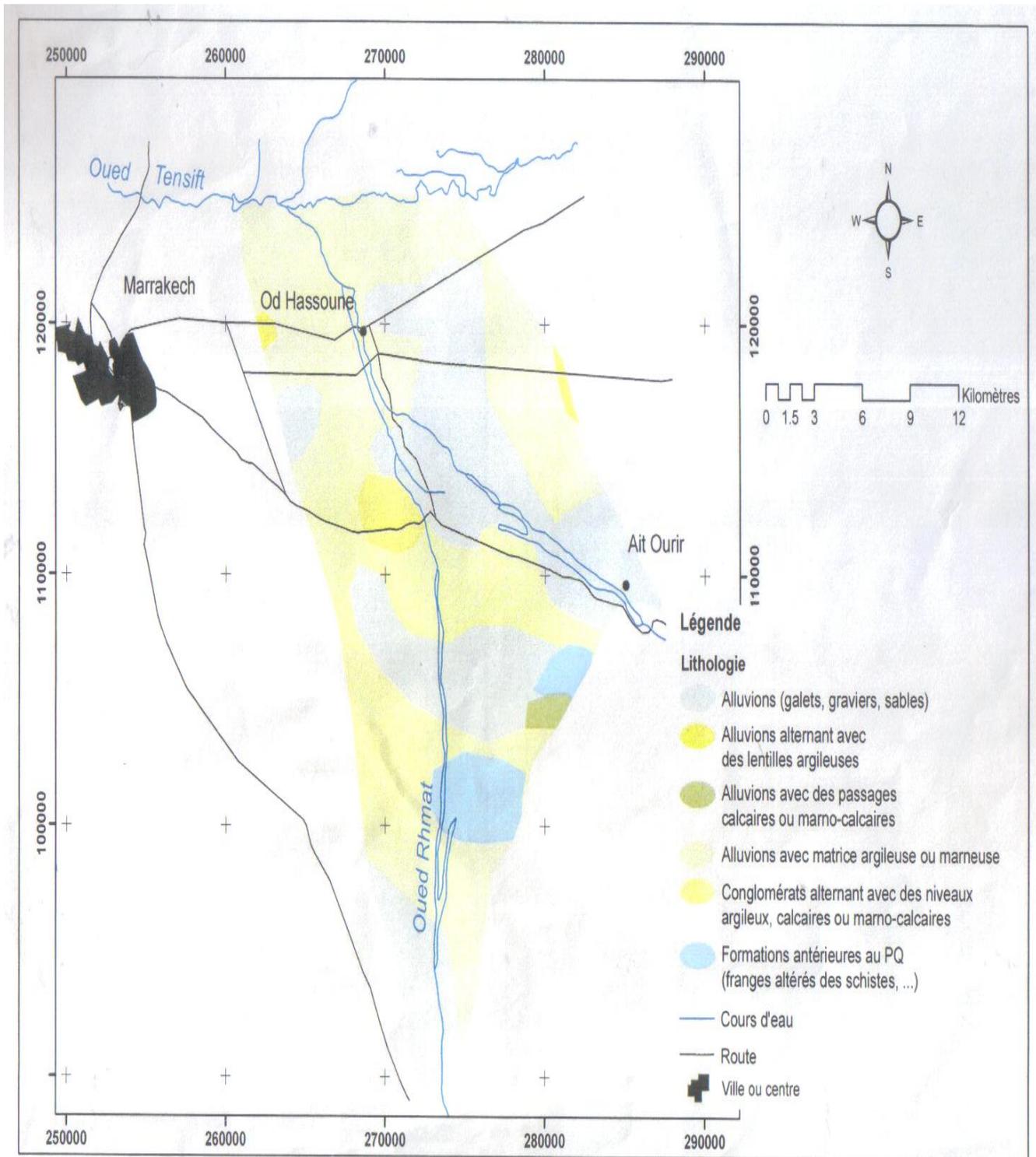


Figure7 : carte des faciès lithologiques du réservoir Plio-Quaternaire. (ABHT, 2010)

5-2-la profondeur de l'eau :

Des analyses on fait apparaitre :

-une zone étirée sur le parcours de l'oued Tensift où l'eau se situe a environ 10 m sous le sol

-Une ligne de piedmont avec une nappe plus profonde vers 30 /50 m au niveau du Haouz Central et 50/60 m sur le reste du bassin, marquée par deux situations particulières :

- Au droit de l'agglomération d'Ourika, nappe " suralimentée " par les oueds et surface piézométrique à moins de 10m
- Sur l'interfluve entre le Tessaout et l'Oued Lahjar, profondeur de la nappe supérieure a 60m.

-L'approfondissement de la surface de la nappe concrétisant l'incidence des prélèvements au droit des champs captant ou de concentration d'ouvrages privés pour l'irrigation.

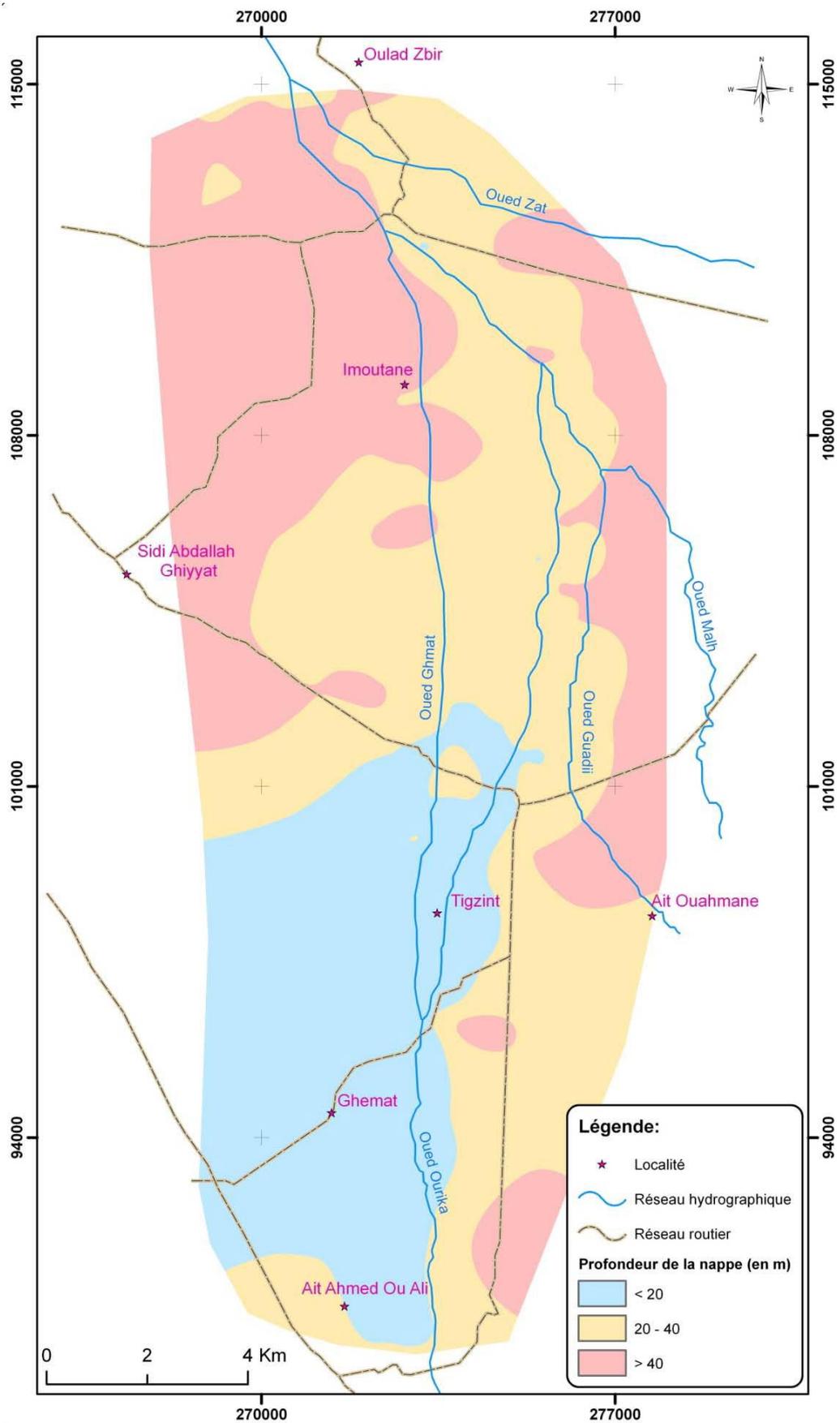


Figure8: carte de profondeur de la nappe par rapport au sol dans la zone de Ghmat (aout 2010 ABHT).

5-3 la transmissivité :

La répartition des transmissivités dans le secteur de Ghmat est illustrée par la figure9.

Les transmissivités sont variables dans l'espace, reflétant l'hétérogénéité des alluvions du remplissage plio-quadernaire. La fourchette se situe entre 1.10^{-5} et 5.10^{-2} m²/s. Les valeurs les plus élevées des transmissivités ($>10^{-3}$ m²/s) se situent dans la zone de confluence des cours d'eau Oued Mellah, Ghmat et Zat et dans la partie aval du bassin de Ghmat. Les valeurs les plus basses se situent en piémont du Haut Atlas.

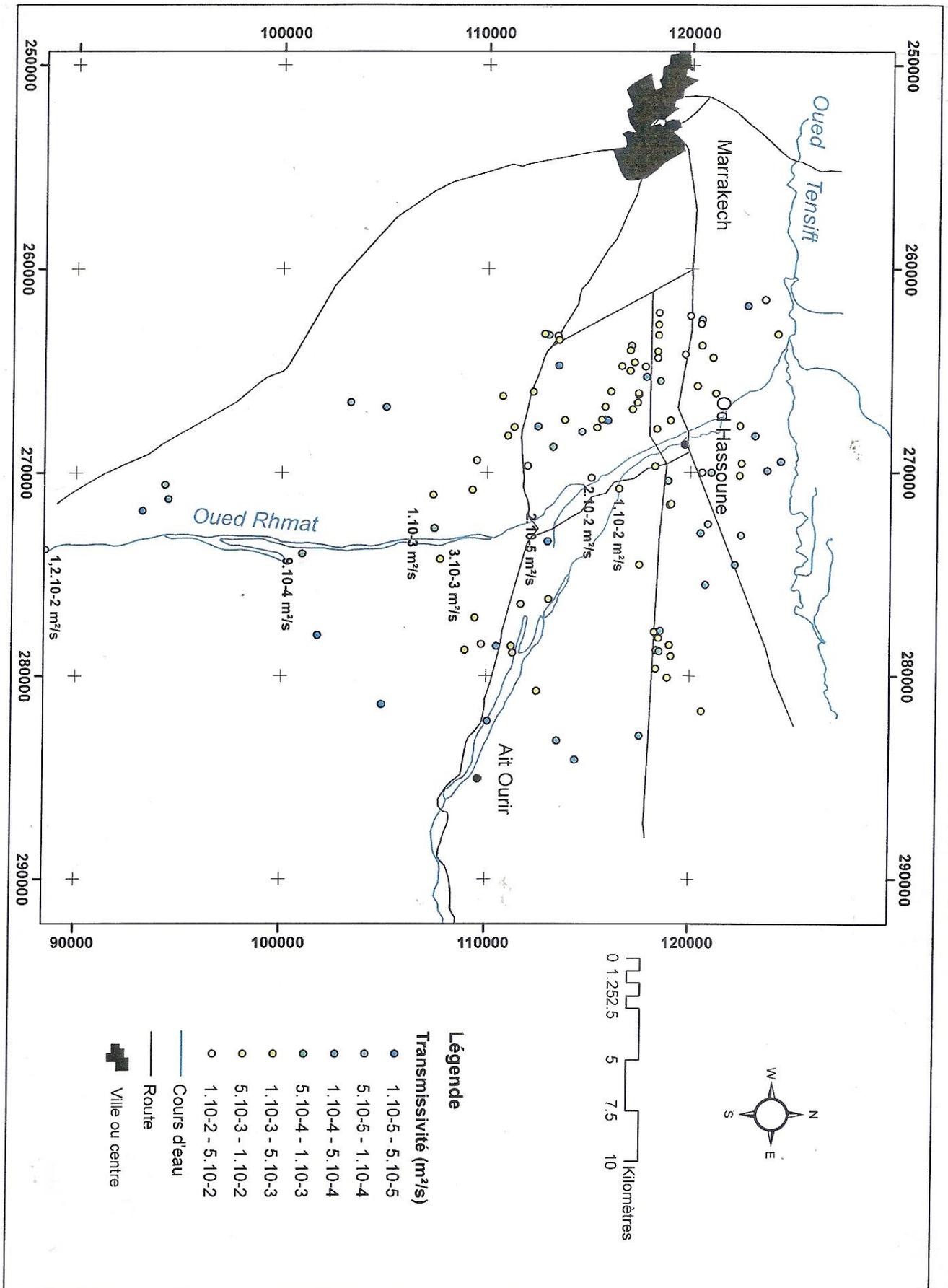


Figure 9 : Distribution des transmissivités dans le secteur de Ghmat (ABHT, 2010).

5-4 La perméabilité :

La méthode de PORCHET a été utilisée pour simuler l'infiltration de l'eau dans la masse des alluvions. Cette méthode consiste à creuser un trou de sondage cylindrique qu'on remplit d'eau et à observer l'abaissement de la surface libre dans le sondage par suite de l'infiltration à travers le fond et les parois latérales.



Photo 4,5 et 6 : méthode de PORCHET.

Les valeurs de perméabilités sont généralement comprises entre 1.10^{-5} et 5.10^{-3} m/s.

La répartition des perméabilités est assez aléatoire. Les zones les plus perméables se situent le long de la zone de confluence des cours d'eau (Mellah, Ghmat et Zat) et en aval sur la rive gauche de l'Oued Ghmat.

La répartition des perméabilités est illustrée par la figure 10.

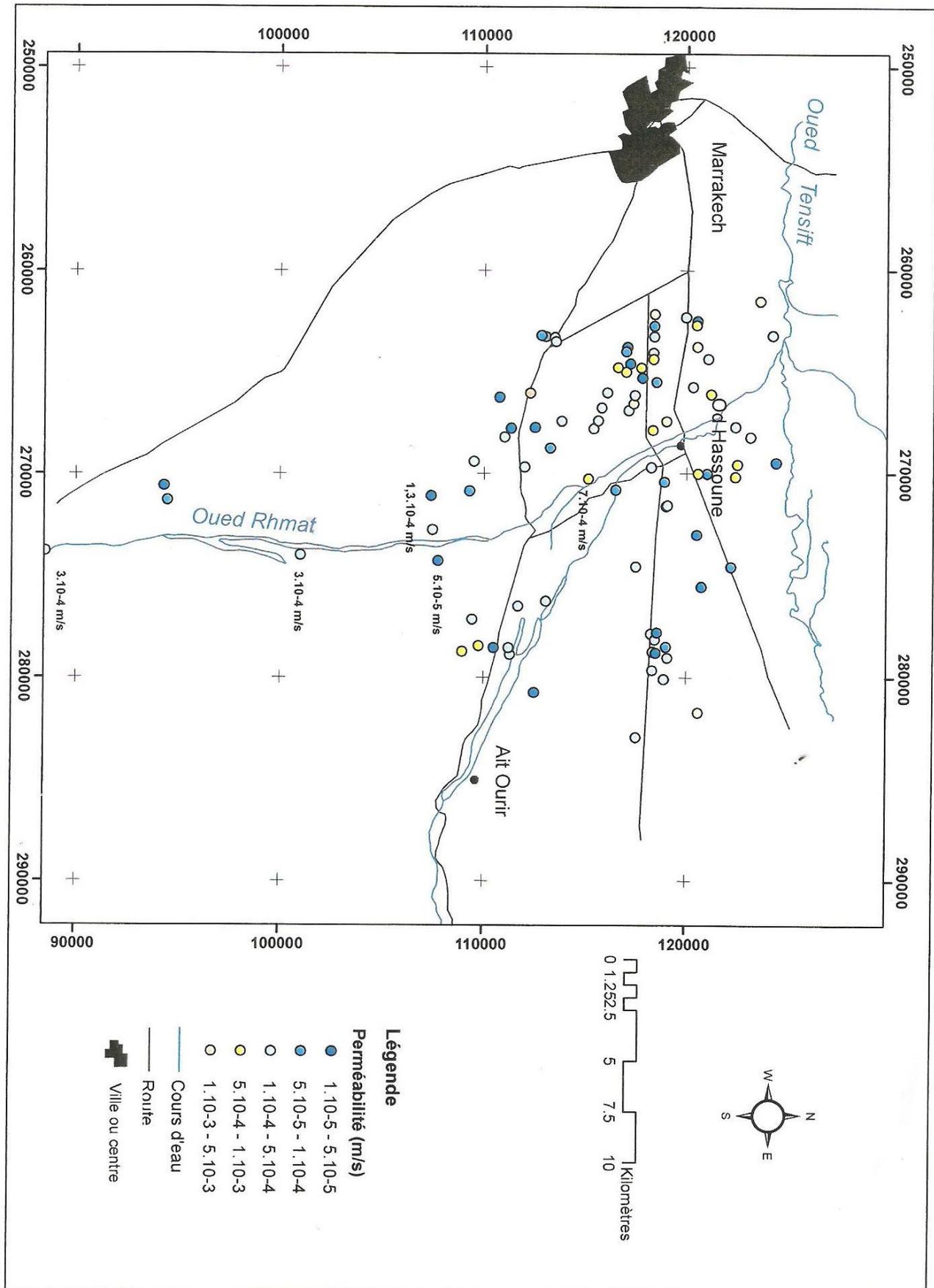


Figure 10 : Distribution des perméabilités dans le secteur de Ghmat (ABHT, 2010).

5-5 coefficients d'emménagement :

Une dizaine de valeurs de coefficient d'emménagement sont disponibles. Elles intéressent essentiellement la partie aval du secteur de Ghmat.

Les coefficients d'emménagement dans le secteur varient entre 0,3% et 3%.

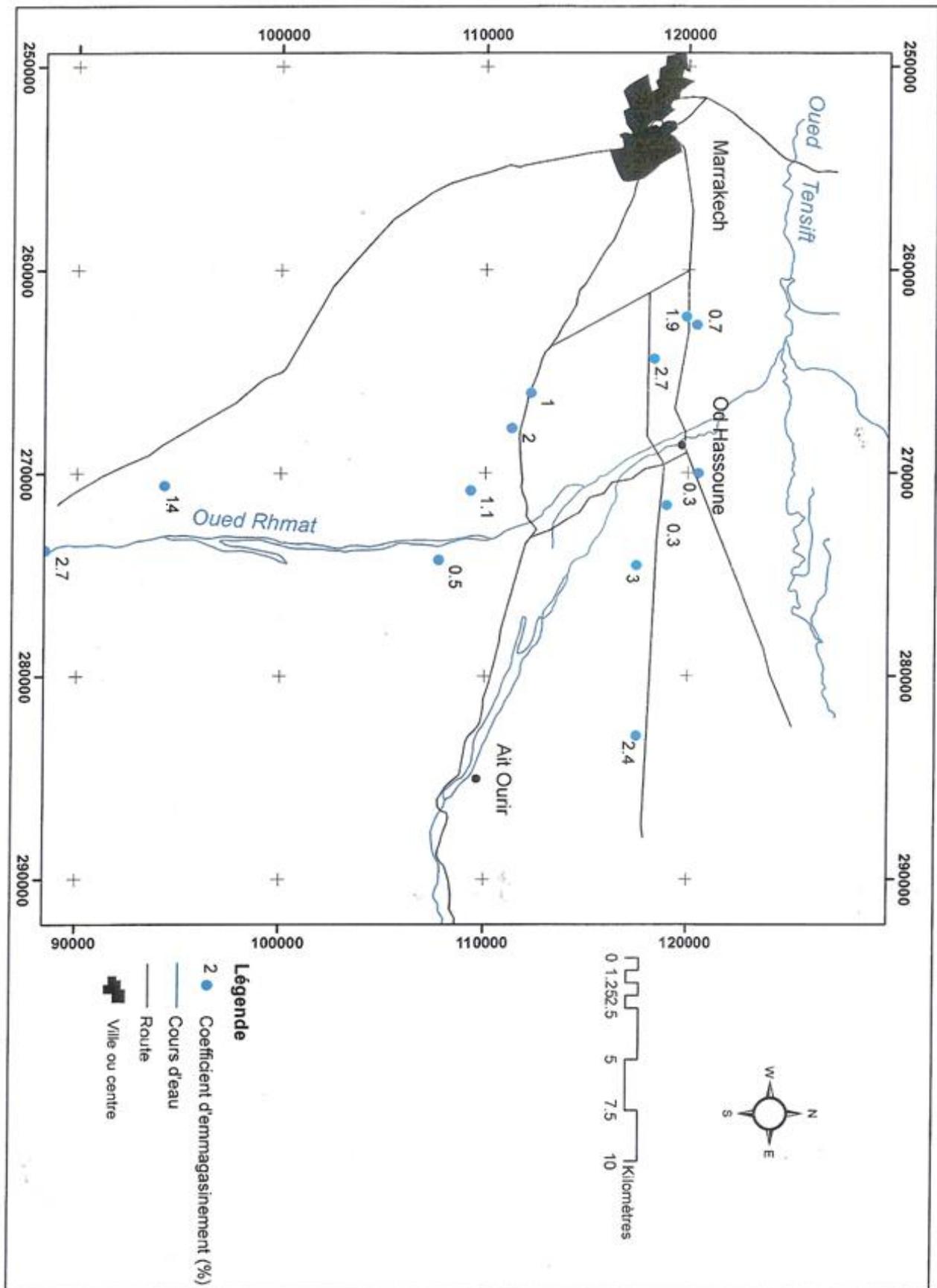


Figure 11 : Distribution des coefficients d'emmagasinement dans le secteur de Ghmat (ABHT, 2010).

5-6 la pente :

La pente conditionne la conception des aménagements, notamment le dimensionnement des digues, l'écoulement des eaux de surfaces et le coût des aménagements.

Les pentes du lit majeur de l'oued Ghmat sont assez régulières et varient entre 1% et 2%. Des pentes inférieures à 1% sont repérables surtout dans la moitié aval du tronçon étudié.

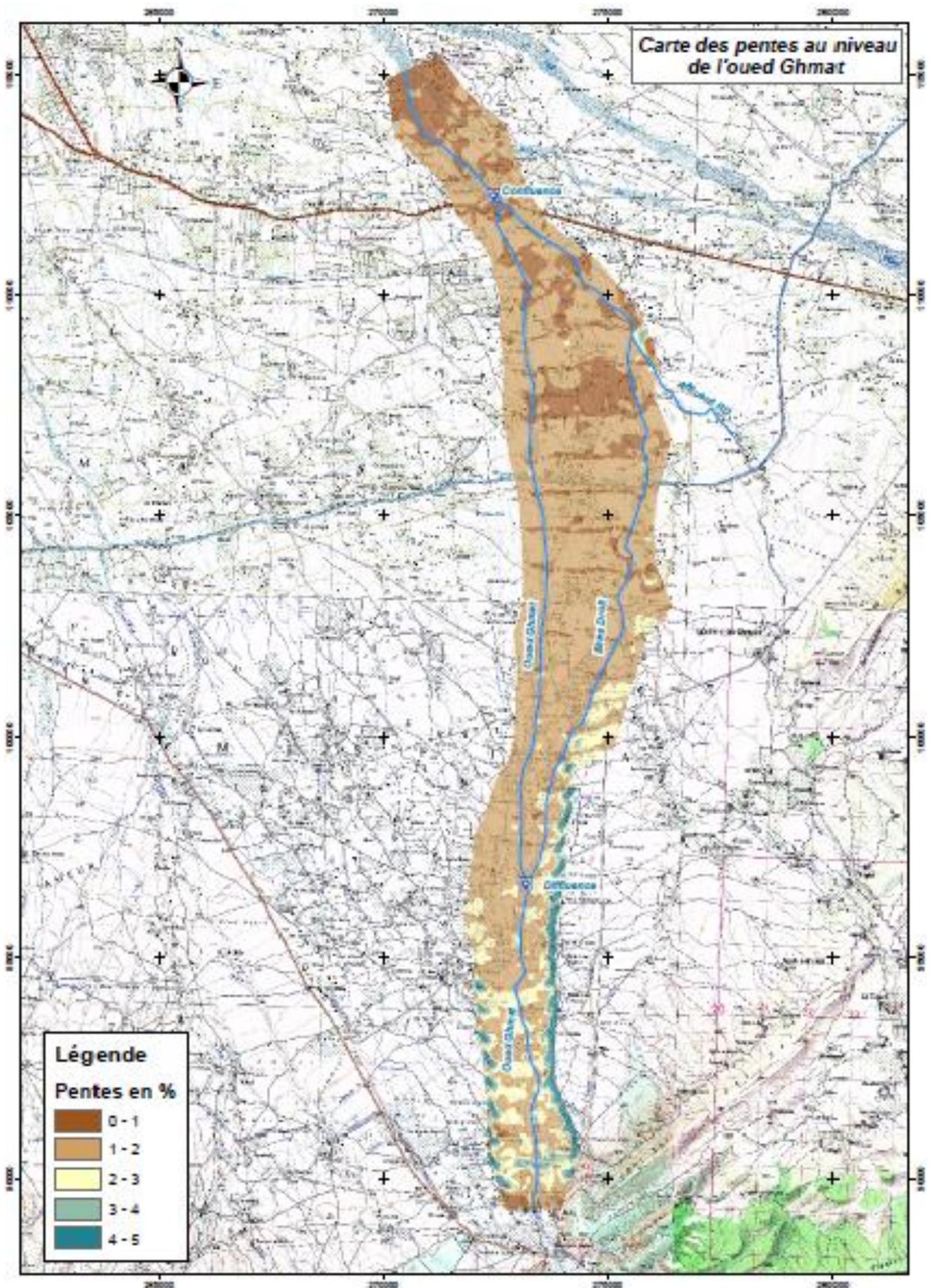


Figure 12: carte des pentes au niveau de l'oued Ghmat. (ABHT, 2010)

6-PROCESSUS HYDRODYNAMIQUES DE L'INFILTRATION :

Le processus de réalimentation peut se décomposer succinctement en trois phases (Bize, Bourguet, Lemoine 1972) :

- **Phase 1** : la mise en eau d'un dispositif d'infiltration est suivie de l'avancée d'un front d'humidité (eau-air). Le principal moteur de l'écoulement pendant cette phase est l'effet de succion dû au contraste de teneur en eau à travers l'interface. Le gradient hydraulique est donc très nettement supérieur à 1. Pendant cette phase, bien que l'infiltration mesurée en surface soit non nulle, la nappe n'est pas rechargée. Il y a stockage dans la zone non saturée. La durée de cette phase d'infiltration sans recharge est fonction de la nature de la couche superficielle de sol et du sous-sol, du degré initial de saturation, des charges hydrauliques imposées et de la profondeur de la surface piézométrique.

- **Phase 2** : la surface libre de la nappe commence à remonter dès qu'elle est atteinte par la frange d'humectation. La teneur en eau dans la tranche supérieure du sol s'égalise (proche de 100 %), la perméabilité tend vers la perméabilité du sol saturé ; la succion interne à cette tranche s'annule, l'écoulement devient gravitaire, le gradient hydraulique de l'infiltration est voisin de 1. Le gradient hydraulique de la nappe augmente légèrement au fur et à mesure de sa remontée.

- **Phase 3** : une connexion hydraulique s'établit entre la plage d'infiltration et la surface de la nappe. L'écoulement est saturé dans sa totalité ($K = K_{sat}$). Le gradient hydraulique devient caractéristique d'un écoulement saturé en nappe (de quelques ‰ à quelques %) sur l'ensemble du profil (gradient de nappe) et diminue jusqu'à l'établissement d'un régime permanent. Afin de bénéficier d'un gradient hydraulique maximum, et donc d'un volume infiltré maximum, il peut être préférable d'infiltrer durant la phase 2. (D.Jauffret mai 2004)

Chapitre III : Secteurs potentiels et impact de la Recharge Artificielle sur la nappe.

1- Définition des sites ou secteurs potentiels :

La combinaison des orientations des études antérieures et l'actualisation des données de reconnaissance de terrain ont menées à tirer les conclusions suivantes :

1-La recharge artificielle dans la partie amont de la zone d'étude, entre Tnin Ourika et la diffluence, est défavorable pour plusieurs raisons. En effet, la profondeur de la nappe, et ainsi l'épaisseur de la tranche non saturée, est plus faible et ne dépasse pas 10m. La lithologie est d'autant peu perméable car la zone est occupée par des formations alluvionnaires avec matrice argileuse ou marneuse. De plus, cette zone profite d'un débit d'étiage dès le printemps dont la quasi-totalité est dérivé à ce niveau. A ce niveau, la recharge se fait naturellement sur les deux rives par retour des eaux d'irrigation vers la nappe.

2-Un seuil réalisé au niveau de la diffluence permettra de repartir l'écoulement entre les deux branches de l'oued Ghmat et ainsi d'exploiter des chenaux au niveau des deux bras. L'avantage de cet ouvrage est le contrôle et la répartition des eaux en fonction des deux bras et des droits d'eau en aval, de plus il permettra de mesurer les débits transitant à l'entrée de chaque branche a travers le déversoir du seuil sur chaque branche. Le seuil permettra aussi le comblement en son amont des zones d'extraction laissées par la carrière abandonnée.

3-Une fois les eaux de l'oued Ghmat reparties dans les deux branches actives, il est question de localiser des sites avec des conditions favorables à la recharge en fonction des différents critères établis auparavant. L'analyse géomorphologique du lit de l'oued montre que le bras gauche (principale) est très large et présente un écoulement en tresses multiples et interconnectés.

Ce bras présente d'importantes plages d'infiltration localisées entre la traversée de la route secondaire au niveau d'Ait Bouhmouch et la traversée du canal de rocade. Le bras droit quant à lui est de largeur plus réduite et devient plus large en aval de sa confluence avec l'affluent RD (oued Maleh et oued Guadji) présentant des plages d'infiltration assez importants.

Les caractéristiques de la nappe au niveau de ces 2 secteurs sont favorables à la recharge, a savoir, une lithologie alluvionnaire, une transmissivité bonne à élevée surtout au niveau de la confluence du bras droit avec l'affluent principal de l'oued Ghmat .Les profondeurs de la nappe varient entre 10 et 30 au niveau des deux secteurs. Et les pentes sont les plus faibles (< a 1%).

4-Un seuil en aval de la confluence des deux bras de l'oued Ghmat, a l'amont du pont sur la RN9, est aussi proposé afin de favoriser la recharge de la nappe dans cette zone à forte transmissivité et de lithologie alluvionnaire perméable. Le site permettra aussi de stabiliser l'écoulement en amont du pont où une station hydrologique est proposée afin de disposer de mesures assez précises.

Le choix des seuils :

Le scénario d'aménagement de recharge correspond à des secteurs identifiés comme a priori favorable pour recevoir les dispositifs de recharge. La comparaison de scénario d'aménagement est effectuée sur la base des analyses suivantes :

- Analyse comparative des conditions hydrogéologiques.
- Analyse comparative des effets de la recharge en utilisant le modèle hydrodynamique de la nappe.
- Analyse comparative des débits à l'amont.
- Analyse comparative des configurations morphologiques des lits.
- Analyse comparative de l'impact des seuils sur la ligne d'eau et les conditions de l'infiltration.

En conclusion, il a été proposé de retenir l'aménagement de cinq seuils :

- Difffluence Ghmat, un seuil sur chaque branche.
- Ait Bouhmouch, bras droit.
- Ait Bouhmouch, bras gauche.
- En amont du canal de rocade, bras droit.
- Entre la confluence des deux branches et le pont de la RN9.

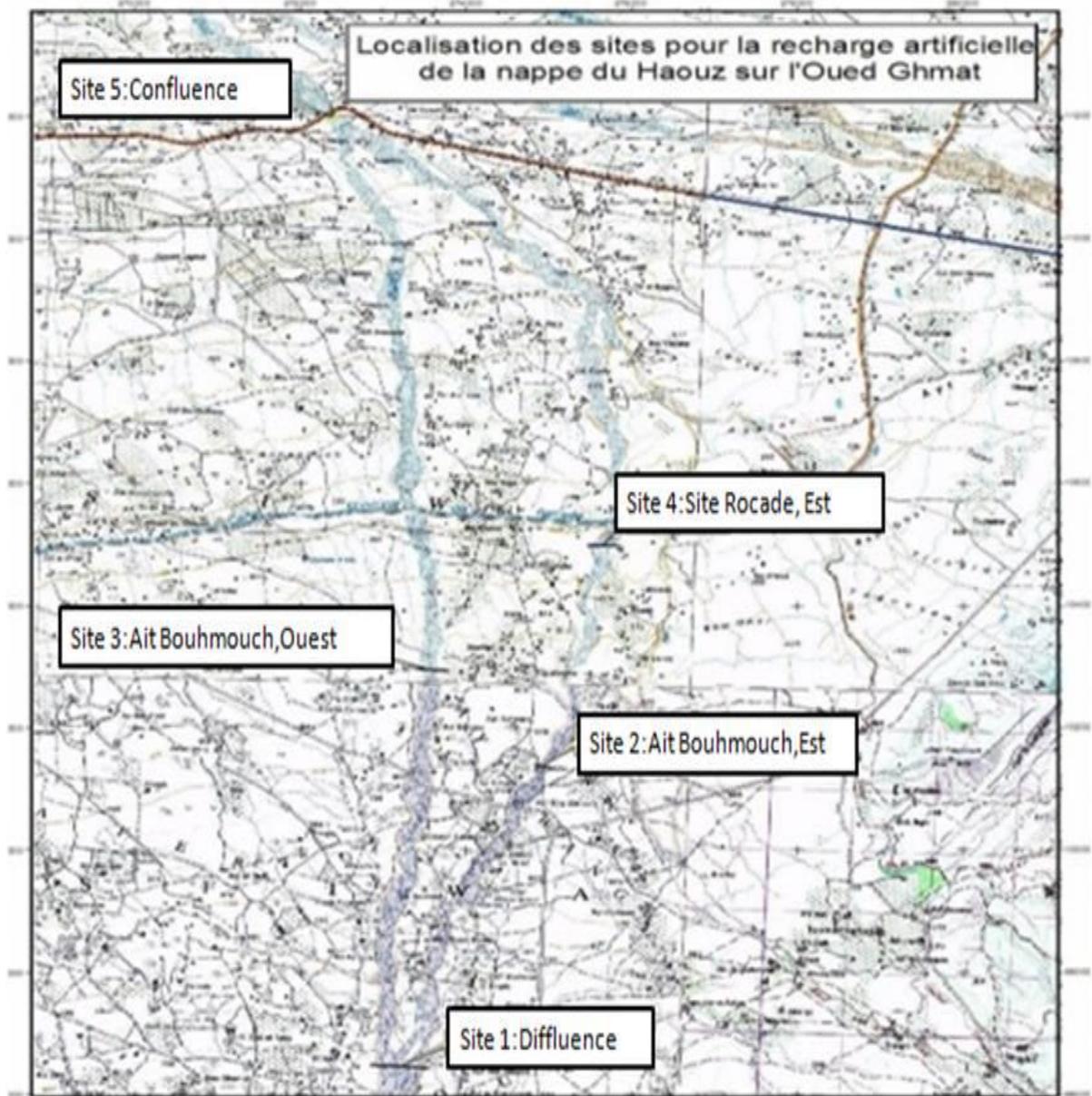


Figure 13: carte des sites aménagés (ABHT, 2010)

2- Origine des eaux de recharge et impact de la recharge artificielle sur la nappe :

Afin d'estimer les volumes infiltrés par chaque dispositif de recharge, il est nécessaire de déterminer la ressource en eau (précipitations, fentes de neiges, eau traitée, crues...), ainsi que la durée pour laquelle elle est disponible.

Pour les dispositifs de recharge projetés, l'étude des volumes infiltrés s'est basée sur les crues. Un scénario de base a été étudié afin d'estimer les infiltrations. En effet, l'étude est focalisée sur la crue moyenne (Q2) du fait que l'effet des seuils est maximal sur les échanges avec la nappe.

Les simulations hydrodynamiques ont pour objet de comparer les effets dus à la recharge artificielle, en ce qui concerne la remontée des niveaux et l'air d'influence.

Les simulations ont été effectuées en utilisant le modèle mathématique de la nappe de Haouz au niveau de l'oued Ghmat, élaboré par ANZAR CONSEIL.

Scénario 1 : simulation de l'impact de la recharge lors du passage de la crue de base (Q2) sur le niveau piézométrique.

1-Période de recharge :

La période durant laquelle les sites sont soumis à une recharge est d'une journée, correspondant au temps de base de la crue. Le pas des simulations du modèle hydrodynamique est la journée.

2-impact de la recharge sur la nappe :

Le tableau ci-après indique les caractéristiques de l'étendue du gain calculé pour chaque secteur.

Tableau 1 : Caractéristiques de l'étendue du gain et calculé-Scénario 1 (résultat de la première journée). (ABHT, 2010).

Secteur	Superficie du gain (ha)
Secteur 1 : Difffluence	26
Secteur 2 : Amont rocade	14
Secteur 3 : Aval rocade	13
Secteur 4 : Branche droite	14
Secteur 5 : Confluence	5

→ On remarque que la superficie du gain est plus importante (26ha) au niveau de la diffluence par rapport aux autres secteurs, ceci est dû au débit important à ce niveau.

Scenario 2 : Simulation de l'impact de la recharge :

1-période de recharge :

La période durant laquelle les sites sont soumis à une recharge est de 13 semaines correspondant aux mois de Mars à Mai. Le pas des simulations du modèle hydrodynamique est la journée.

2-volume d'eau infiltré :

Le tableau ci-après récapitule les volumes d'eau infiltrés au niveau des secteurs étudiés pendant la période de recharge.

Tableau 2: Effet des seuils sur les volumes infiltrés (Mm³) (rapport définitif ABHT, 2010).

Semaines	Secteur1 (Diffluence)		Secteur 2 (Aval Rode)		Secteur 3 (Aval Rode)		Secteur 4 (Bras droit)		Secteur 5 (Confluence)	
	Sans Seuils	Avec seuils	Sans Seuils	Avec seuils	Sans Seuils	Avec Seuils	Sans Seuils	Avec Seuils	Sans Seuils	Avec Seuils
S1	0,18	0,7	0,58	1,06	0,45	1,19	0,52	0,97	0,41	0,5
S2	0,21	0,68	0,61	0,94	0,36	0,86	0,58	0,91	0,22	0,26
S3	0,22	0,71	0,65	0,95	0,38	0,86	0,63	0,96	0,22	0,25
S4	0,23	0,71	0,65	0,94	0,37	0,85	0,63	0,95	0,22	0,25
S5	0,23	0,72	0,66	0,93	0,38	0,85	0,63	0,94	0,22	0,25
S6	0,23	0,72	0,67	0,93	0,4	0,83	0,64	0,94	0,22	0,25
S7	0,23	0,72	0,68	0,92	0,4	0,84	0,64	0,93	0,22	0,25
S8	0,23	0,7	0,63	0,9	0,38	0,83	0,62	0,9	0,22	0,25
S9	0,21	0,68	0,59	0,86	0,35	0,81	0,59	0,86	0,21	0,24
S10	0,2	0,65	0,56	0,83	0,34	0,77	0,56	0,82	0,2	0,23
S11	0,18	0,61	0,52	0,8	0,32	0,74	0,52	0,78	0,19	0,22
S12	0,16	0,57	0,47	0,78	0,31	0,7	0,47	0,74	0,19	0,22
S13	0,14	0,52	0,4	0,71	0,29	0,67	0,41	0,68	0,17	0,9
S14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Totale	2,65	8,69	7,68	11,57	4,75	10,81	7,43	11,38	2,92	3,39
Gain(Mm ³)	6,04		3,89		6,06		3,95		0,46	
Gain en % de l'excédent	18,3%		11,08%		18,4%		12,0 %		1,4%	

Les résultats montrent que les volumes infiltrés sont assez importants et varient entre 0,5 et 6 Mm³.

Le secteur 1 (Difffluence) et 3 (Aval rocade) présentent le maximum des volumes infiltrés suivis par les secteurs 2 (Aval rocade) et 4 (Branche droite) avec environ 4Mm³. Enfin le secteur 5 vient en dernière place avec seulement 0,5Mm³.

Le secteur 1 présente un volume infiltré important malgré que ses paramètres hydrodynamiques sont plus faibles par rapport aux autres secteurs ; cela est peut être dû à plusieurs paramètres :

- Le débit de la crue : le débit au niveau du secteur 1 est plus important, puisque c'est à ce niveau où les eaux se partagent entre le bras droit et le bras gauche.
- le colmatage du sol diminue le taux d'infiltration de l'eau ; l'amont est moins exposé à ce phénomène que l'aval.
- la largeur du lit : plus le lit est large, plus la surface de contact est grande et donc les infiltrations sont importantes ...

Le secteur 3 présente les meilleures performances hydrauliques ce qui explique les volumes infiltrés assez importants.

Le secteur 2 et 4 présentent des performances hydrauliques et de perméabilité moyennes par rapport aux autres secteurs ce qui justifie les volumes infiltrés similaire. La différence entre les 2 secteurs peut être expliquée par une transmissivité plus élevée du secteur 4.

Les résultats du secteur 4 restent tout de même très relatifs vu qu'ils sont liés aux seuils du premier secteur sans le quel aucune répartition du débit n'est possible pour ce scénario pour la branche droite.

Chapitre IV: Etude de la qualité de l'eau de l'oued Ghmat

1-échantillonnage :

L'échantillonnage a été réalisé le 10 et 11 juin 2014. Cette période correspond aux basses eaux de la nappe du Haouz.

Les points d'échantillonnage sont au nombre de 4, et ont subi des analyses physico-chimiques au laboratoire de l'ORMVAH.

2-Mode opératoire :

Le pH : On étalonne le pH-mètre avec des solutions tampon de pH=7 puis de pH=10, ensuite on introduit l'électrode dans notre échantillon et on lit la valeur marquée sur l'écran de l'appareil.



Photo 7: PH-mètre

La conductivité : Avant de faire la mesure, il faut d'abord étalonner l'appareil en utilisant un étalon qui a une conductivité connue, puis on met l'électrode dans un flacon contenant de l'eau après agitation, ensuite on lit le résultat marqué dans l'écran de l'appareil.



Photo 8 : Conductivimètre.

Les chlorures : Dans un Erlenmeyer, on introduit successivement 10ml de l'échantillon d'eau et on rajoute 3 gouttes de chromate de potassium, on remarque l'apparition d'une coloration jaune franc, ensuite on dose par les nitrates d'argent (AgNO_3) jusqu'à l'apparition d'une teinte de virage rouge.

Le Ca^{2+} : Dans un Erlenmeyer, on introduit 10ml de l'échantillon d'eau, 40ml d'eau distillée, 2ml de NaOH et on y ajoute du colorant murexide, on remarque l'apparition d'une coloration rose.

On dose par un complexant jusqu'à apparition d'une coloration violette.

Le Mg^{2+} et Ca^{2+} : On introduit 10ml de l'échantillon dans un Erlenmeyer et on y ajoute 3 gouttes du colorant NET et 2ml de la solution tampon. On remarque l'apparition d'une coloration rouge vineux. Le dosage est fait par complexant jusqu'à l'apparition d'une coloration bleu.

Les sulfates : On met 10ml de l'échantillon, 2ml de H_2SO_4 , puis on chauffe jusqu'à ébullition.

On ajoute ensuite 5ml du chlorure de baryum ($BaCl_2$) pour accélérer la précipitation des sulfates. On laisse se refroidir et on ajoute 10ml de la solution tampon, 2ml de chloruro-magnesium.

Le Na^+ et K^+ : La photométrie de flamme permet le dosage des cations alcalins Li^+ , Na^+ , K^+ , Ca et Ba .



Photo 9 : photomètre à flamme.

3-Résultats des analyses physico-chimiques :

Remarque : → Le puits 1 représente un point d'eau en amont

→ Le puits 2 représente un point d'eau entre l'amont et l'aval

→ Le puits 3 représente un point d'eau en aval

- Le ph : les pH calculés sont compris entre 8,23 et 8,62. Ces valeurs sont proche de la neutralité et relativement stable dans l'espace.
- La conductivité électrique : Dans les eaux de puits, la conductivité augmente de l'amont vers l'aval avec des valeurs qui varient de 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 1420 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les eaux de surface ont une conductivité de 430 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
Les valeurs de la conductivité électrique de ces eaux attestent d'une bonne qualité minéralogique.

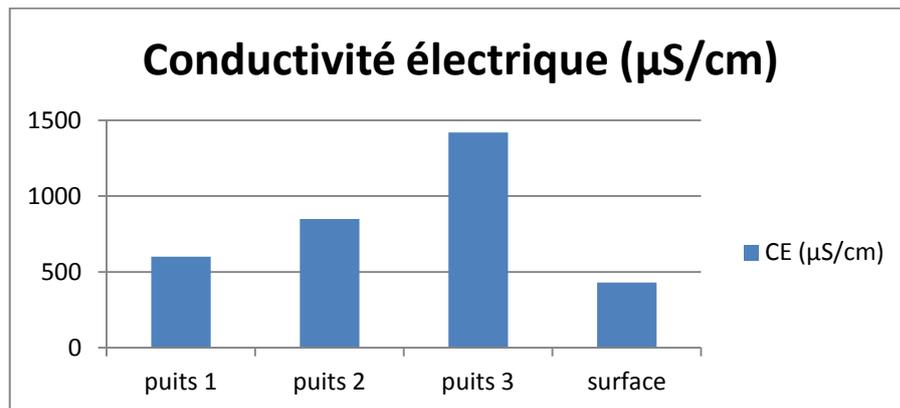


Figure 14: représentation graphique de la conductivité électrique.

- Les éléments majeurs : les éléments chimiques majeurs permettent de connaître la nature de la composition et la prédominance quantitative de certains éléments, d'évaluer l'agressivité physico-chimique des eaux et le taux d'éléments soluble transportés.
Les principaux résultats sont présentés ci-après :

- **Le calcium (Ca^{2+})** : les teneurs en calcium sont relativement modeste, dont les valeurs de concentration varient entre 24mg/l et 36mg/l. Les concentrations en Ca^{2+} de ces eaux ne dépassent pas les normes fixées par l'OMS.

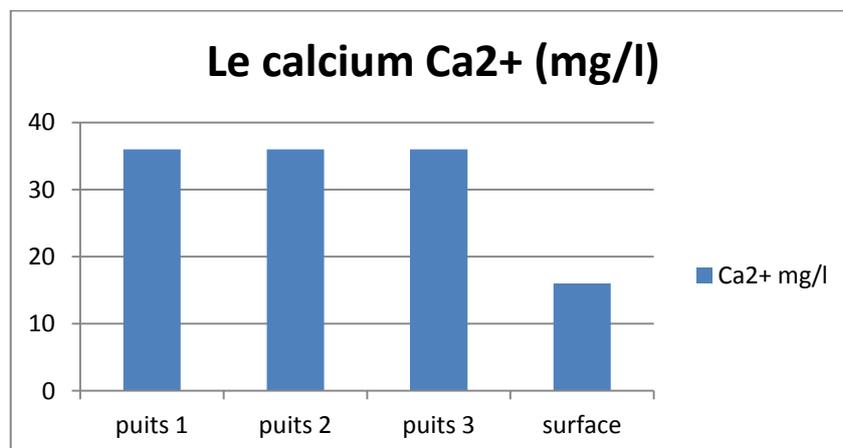


Figure 15 : représentation graphique des teneurs en calcium des eaux de Ghmat.

- **Le magnésium (Mg²⁺)** : les teneurs en magnésium se situent entre 12,1 et 29,04mg/l (nettement inférieur à celle du calcium), et ne dépassent pas les normes fixées par l'OMS (100mg/l).

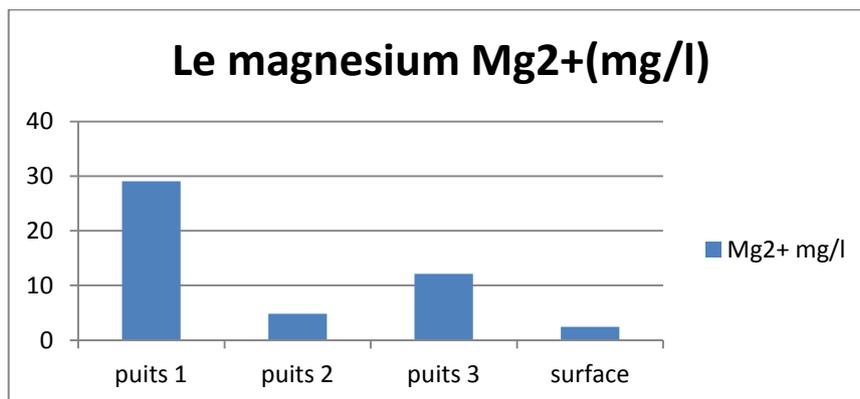


Figure 16: représentation graphique des teneurs en magnésium des eaux de Ghmat.

- **Le groupe Sodium Chlorure (Na⁺_Cl)** : les valeurs du sodium sont nulles. Quant aux chlorures leurs concentrations varient entre 124,25 mg/l et 443,7 mg/l. On note que ces valeurs de chlorure ne dépassent pas les normes de potabilité fixées à 300 mg/l.

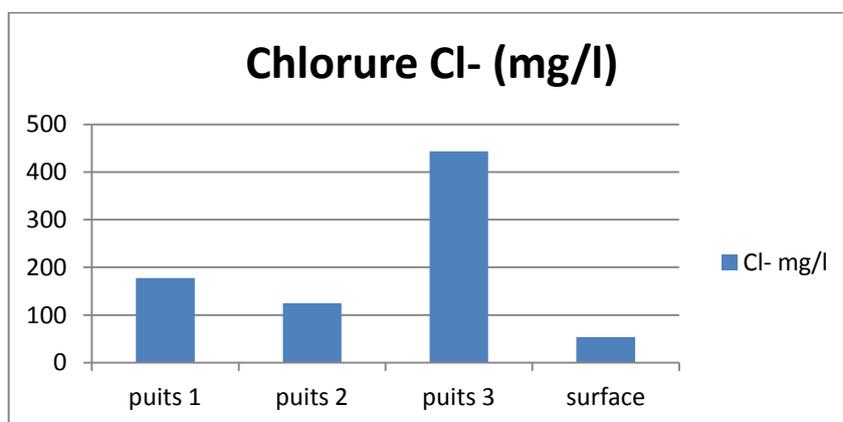


Figure 17: représentation graphique des teneurs en chlorure des eaux de Ghmat.

- **Les sulfates (SO_4^{2-})** : ils sont variables dans l'espace, la valeur maximale enregistrée atteint 336mg/l et minimal 278,4mg/l. Ces valeurs dépassent les normes de potabilités des eaux (250mg/l).

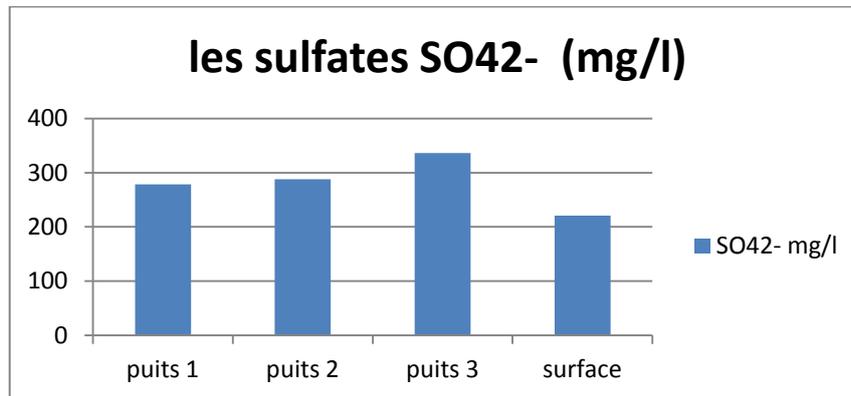


Figure 18 : représentation graphique des teneurs en sulfates des eaux de Ghmat.

- **Le bicarbonate et le dioxyde de carbone (HCO_3^- et CO_3^{2-})** : le taux des bicarbonates a atteint un maximum 427mg/l et un minimum de 225,7mg/l. Quant aux valeurs des carbonates (CO_3^{2-}), elles sont toujours nulles.

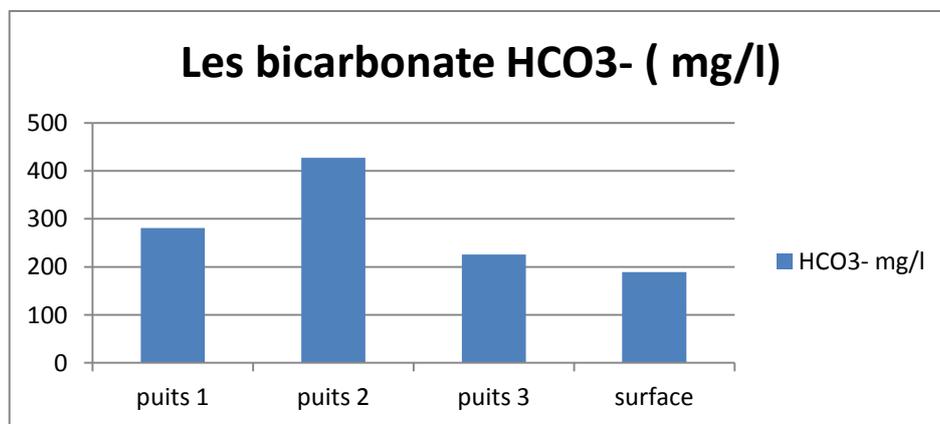


Figure 19 : représentation graphique des teneurs en bicarbonates des eaux de Ghmat.

- **Le potassium (K^+)** : Ses valeurs sont nulles.

Tableau 3 : Résultats de conductivité et de pH des eaux de l'oued Ghmat.

Echantillon	Date	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH
Puits 1 en amont	11-06-2014	600	8,39
Puits 2 entre l'amont et l'aval	11-06-2014	850	8,52
Puits 3 en aval	10-06-2014	1420	8,23
Eau de surface	11-06-2014	430	8,62

Remarque : les résultats des analyses chimiques trouvés sont douteuses.

4-Faciès chimique :

Pour comparer les analyses entre elles et mettre en évidence le type d'anion ou de cation dominant, nous avons représenté les analyses chimiques sur le diagramme de piper.

Le Diagramme de Piper est l'une des représentations les plus classiques pour comparer les compositions chimiques des eaux naturelles. Il permet une représentation des cations et anions sur deux triangles spécifiques dont les côtés témoignent des teneurs relatives de chacun des ions majeurs par rapport au total des ions. La position relative d'un résultat analytique sur chacun de ces triangles permet de préciser en premier lieu la dominance cationique et anionique. A ces deux triangles, est associé un losange sur lequel est reportée l'intersection des deux lignes issues des points identifiés sur chaque triangle. Ce point d'intersection représente l'analyse globale de l'échantillon. Cette position permet de préciser le faciès de l'eau naturelle concernée. Le diagramme de Piper permet également :

=> D'illustrer l'évolution chimique d'une eau dans un aquifère ainsi que les mélanges d'eaux de minéralisations différentes ;

=> D'avoir une idée sur la lithologie à partir des analyses chimiques ;

=> D'avoir une relation entre le chimisme de l'eau et la nature lithologique de l'encaissant ;

=> La projection de plusieurs échantillons en même temps :

- Pour suivre leurs évolutions dans le temps et dans l'espace,

- Pour les comparer ;
- Pour avoir une idée sur la notion de mélange ;

=> De suivre les propriétés physico-chimiques au cours de leur évolution spatiotemporelle

L'examen du diagramme des cations de la figure 14 montre que tous les puits sont localisés dans le pôle Mg^{2+} avec des pourcentages moyen inclus entre 10% et 50%. Cette constatation révèle que tous les puits présentent un faciès magnésien.

L'observation du triangle des anions de la figure 14 montre que la totalité des puits présentent un faciès mixte.

La projection des points sur le losange de la figure 14 montre un seul nuage qui caractérise le faciès des eaux souterraines dans la zone d'étude. Ce nuage définit un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien.

Diagramme de Piper

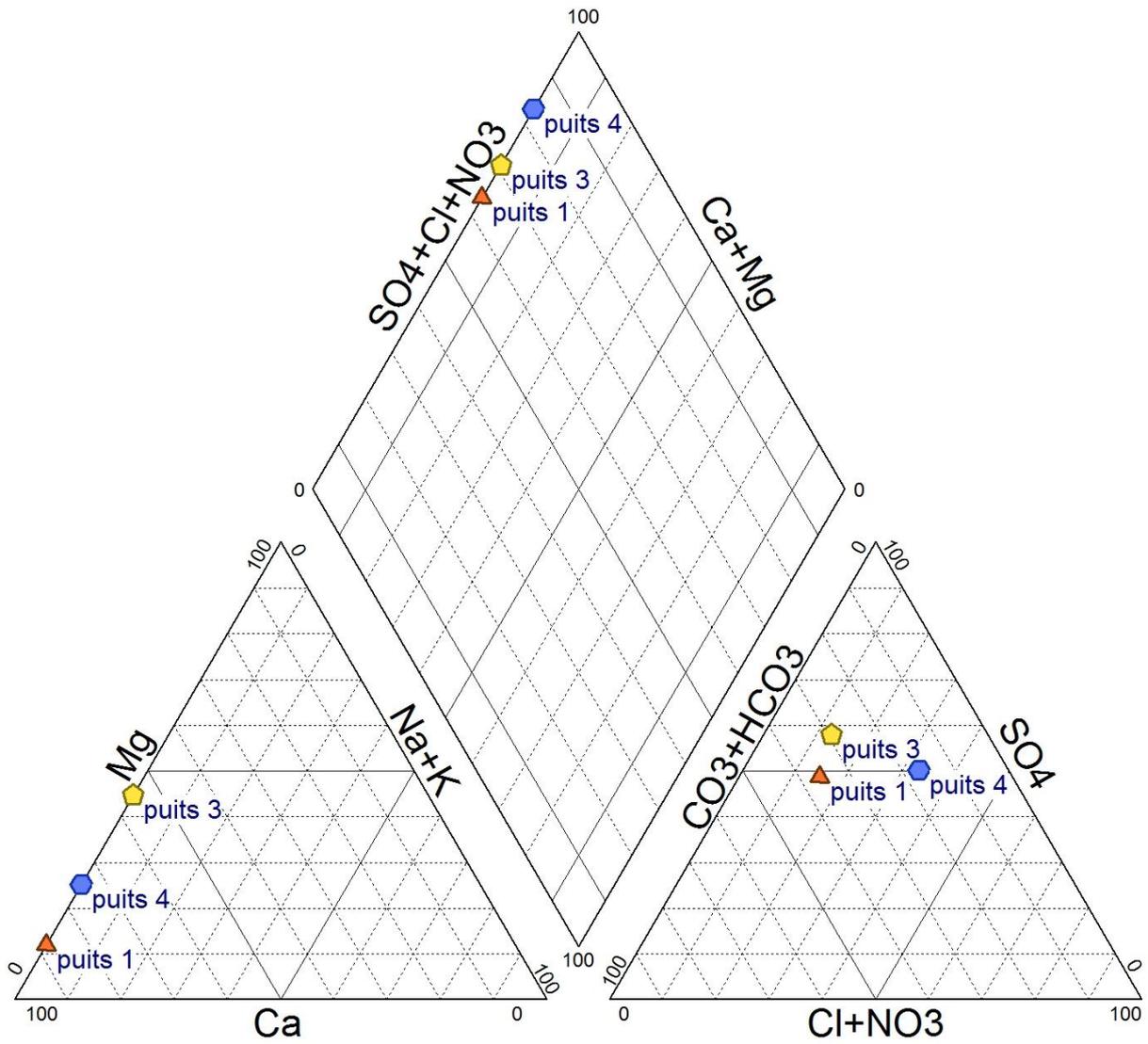


Figure 20 : Diagramme de Piper des analyses des eaux souterraines de l'oued Ghmat.

Diagramme de Piper

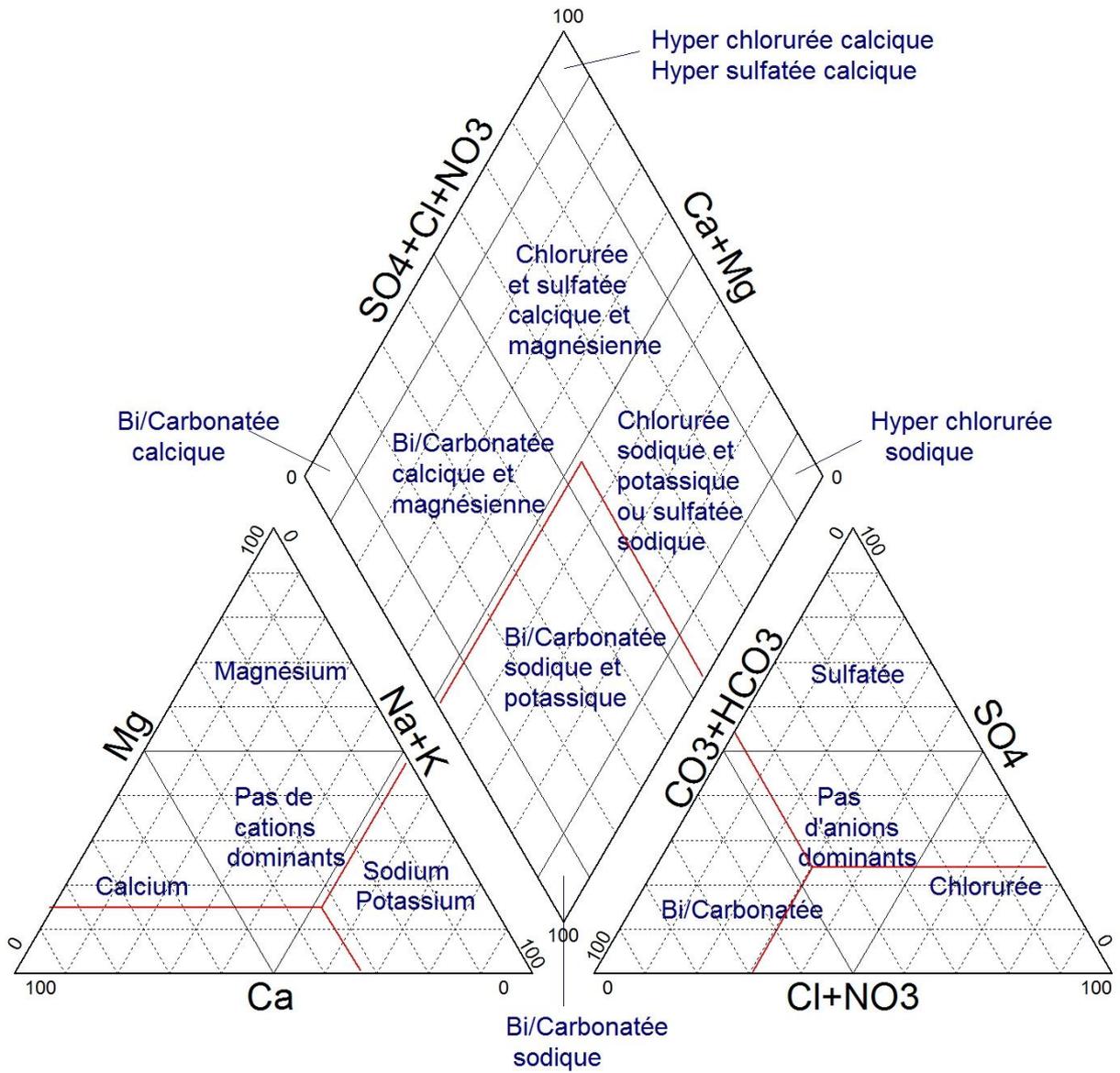


Figure 21 : Faciès chimiques du diagramme de Piper

Conclusion :

Les perspectives en matière d'eau douce ne sont pas réjouissantes puisque, de l'avis général, sa rareté semble inéluctable. Or, un pays qui manque d'eau et un pays qui ne peut ni nourrir sa population, ni se développer. D'ailleurs, la consommation en eau par habitant est désormais considérée comme un indicateur du développement économique d'un pays.

Avoir accès à l'eau est donc devenu un enjeu économique puissant à l'échelle planétaire qui pourrait devenir, dans le siècle à venir, l'une des premières causes de tensions internationales.

La recharge artificielle de la nappe apparaît, dans ces circonstances, une solution intéressante.

En effet les résultats qu'on a pu tirer des simulations ont montrés que la recharge artificielle au niveau de l'oued Ghmat a un impact positif sur la nappe, et peut résoudre la majorité des problèmes hydrauliques.

Or, en réalité ces résultats théorique ne sont pas applicable car l'eau au niveau de la diffluence ne se répartie pas équitablement sur les deux bras, et dans l'état naturel la totalité de l'excédent passe par le bras gauche, donc les calculs des simulations ne sont pas fiable puisqu'elles sont faites à la base de cette répartition.

Vu le manque de l'information et la courte durée de stage, on n'a pas pu faire une étude d'impact sur la nappe des dernières années après conception des seuils, cependant si on a assez de temps on pourrait faire une étude plus développée, et corriger les défaillances trouvées.

Cette méthode devrait être appelée à se développer dans le futur dans d'autres domaines, notamment dans le domaine de la réutilisation des eaux usées. Le stockage souterrain en nappe présente de nombreux avantages pour répondre aux besoins en eau à court et moyen terme. Dans tous les cas la recharge artificielle de la nappe doit être utilisée de manière consciente dans une perspective de maîtrise collective du patrimoine afin de ne pas gravement compromettre le potentiel aquatique des générations futures. Il est de notre responsabilité que les aménageurs et les décideurs intègrent ces enjeux.

BIBLIOGRAPHIE :

- ABHT ; (octobre 2010) : étude hydrologique, hydrogéologique et environnementale de l'étude de la recharge artificielle de la nappe du Haouz, rapports mission1.
- ABHT ; (octobre 2010) : Simulations hydrauliques et étude d'impact de la réalisation du système de recharge par seuils, rapport définitif mission 3.
- ABHT ;(octobre 2010) : Analyses chimiques et nitrates, rapport provisoire 2p ,5p, 6p.
- El Alaoui Elfels A.et Hajhouji Y ; (2010) - Hydrochimie et qualité des eaux de surfaces et souterraines du Haouz (Maroc), 19p.
- D. Jauffret ; (2004) : Possibilités de recharge artificielle de la nappe alluviale de la Loireen Saône-et-Loire pour sécuriser l'alimentation en eau potable, 13p, 14p, 15p.
- Facilité africaine de l'eau ; (Décembre 2008) : Projet pilote de recharge artificielle de la nappe du Haouz à partir de l'oued Ghmat, 18 p et 24p.
- Harakat.R et Lazrak. A ; (2011) : Impact des margines sur les eaux souterraines sur la nappe phréatique de la vallée de Ghmat au sud de Marrakech, 36 p.
- ABHT .Huvelin ; 1973, Moukhchane ; 1983 et Sinan ; 2000 ,35p.