

Université Cadi Ayyad
Faculté des Sciences et Techniques
Marrakech



Département des Sciences de la Terre

Université Cadi Ayyad
Faculté des Sciences Sémmlalia
Marrakech



Laboratoire GEOHYD

Mémoire de Stage de Fin d'Etudes

Master Sciences et Techniques
Eau et Environnement



Contribution à la modélisation de la zone centrale de la nappe du Haouz (Maroc)

Par :

Safia KAMAL

Sous la direction de :

N. LAFTOUHI
M. AGOUSSINE
J. MOUSTADRAF

Soutenu le 28 septembre 2012 devant la commission d'examen composée de :

N. LAFTOUHI
M. AGOUSSINE
J. MOUSTADRAF
L.HANICH
H. IBOUH

2011/2012

Remerciements

Le présent travail n'aurait pu avoir lieu sans la contribution de plusieurs personnes. Je tiens à exprimer ma profonde gratitude en remerciant tous ceux qui m'ont aidé à bien mener ce travail.

J'exprime toute ma gratitude à mon encadrant Monsieur LAFTOUHI N., qui m'a proposé ce sujet. Je le remercie pour son aide, sa gentillesse, son soutien, sa disponibilité et ses critiques bienveillants qui m'ont été d'une grande importance pour la progression et la réalisation de ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance et mon profond respect.

J'exprime toute ma gratitude à mon Professeur et encadrant Monsieur AGOUSSIN M. pour ses qualités d'enseignant, ses instructions, ses conseils, sa disponibilité et l'aide qu'il n'a cessé de me prodiguer. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance et mon profond respect.

Ma profonde reconnaissance s'adresse au Professeur MOUSTADRAF J., dont son aide m'a été exceptionnelle. Je ne serais parvenu à accomplir ce travail sans ses conseils et son aide. Ses critiques et ses connaissances dans le domaine de la modélisation m'ont été d'un grand intérêt. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance et mon profond respect.

Je remercie mes professeurs Monsieur HANICH L. et Monsieur IBOUH H., qui m'honorent en acceptant de juger ce travail, Qu'ils trouvent ici l'expression de ma vive reconnaissance.

Un grand merci à mes parents, mes sœurs, mes frères, et mes amis qui m'ont toujours aidé et encouragé durant toute la période d'étude.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

- *Ma famille avec tous mes sentiments de respect, d'amour, de gratitude et de reconnaissance, pour tous les sacrifices déployés pour m'élever dignement et assurer mon éducation dans les meilleures conditions,*
- *À mes professeurs et encadrants sans exception,*
Et à tous mes amis.

Résumé

Le secteur d'étude, localisé au niveau du Haouz central, constitue un bassin de sédimentation d'origine tectonique dans lequel se sont accumulées au Néogène et au Quaternaire d'importantes formations détritiques, qui constituent le siège d'une nappe importante et généralisée qui est la nappe phréatique du Haouz.

Le développement économique de la zone d'étude est essentiellement basé sur l'agriculture, et le tourisme (Golfs), ces deux secteurs représentent les pôles consommateurs d'eau souterraine de la région. Suite au déficit des précipitations de ces dernières années et au développement desdits secteurs, la nappe a connu une surexploitation. Ainsi la gestion et la protection des eaux souterraines deviennent fondamentales.

Ce présent travail a pour but de contribuer à la modélisation de la partie centrale de la nappe du Haouz (maillage 250mx250m). Pour ce faire on s'est basé sur les nouveaux moyens utilisés dans la gestion des ressources en eaux à savoir le SIG et la simulation numérique.

Dans ce sens, on a élaboré un système d'information géographique relatif à l'étude, au niveau duquel on a introduit un nombre important de données recueillies, notamment les informations concernant les pompages autorisés au niveau de la zone d'étude, les données piézométriques et les apports en eau de surface.

Ces données aussi obtenues ont été traitées et analysées avant d'être ajoutées aux conditions aux limites de l'aquifère et aux paramètres physiques du milieu et intégrées dans le modèle numérique des écoulements souterrains (GMS6.5). Le travail de modélisation a été effectué selon les étapes suivantes :

- Elaboration du modèle conceptuel du système;
- Calage du modèle en régime permanent;
- Analyse de sensibilité des paramètres du modèle ;
- Calage du modèle en régime transitoire.

Mots clés : Développement économique, Nappe du Haouz, SIG, GMS6.5, Modélisation numérique.

Abstract

The study area, which is located at the Central Haouz, is a sedimentation basin of tectonic origin which have accumulated in the Neogene and Quaternary an amount of detrital formations, that are the seat of a large and widespread water: Haouz groundwater.

The economic development of the study area is mainly based on agriculture and tourism (golf courses), these two sectors represent the poles consumers of groundwater in the region. Following the rainfall deficit in recent years and the development of these sectors, water table has known overexploitation. And the management and protection of groundwater become fundamental.

The present work aims to contribute to the modeling of the central part of the sheet of Haouz (250mx250m mesh). To reach our goal we based on the new methods used in the management of water resources namely GIS and simulation.

In this sense, we have developed a geographic information system for the study, in which we introduced a large number of data, including information concerning authorized pumping at the study area, data groundwater and surface water supplies.

These data were processed and analyzed before being added to the boundary conditions of the aquifer and the physical parameters of the medium and incorporated into the numerical model of groundwater flow (GMS6.5). The modeling work was performed according to the following steps:

- Elaboration of a conceptual model of the system;
- Calibration of the model in steady state;
- Sensitivity analysis of model parameters;
- Calibration of the model in transient state.

Keywords: Economic Development, Haouz ground water, GIS, GMS 6.5, Numerical simulation.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	7
CHAPITRE I : CONTEXTE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE.....	9
I. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE.....	10
II. MORPHOLOGIE DE LA ZONE D'ETUDE.....	11
III. DONNEES DEMORAPHIQUES.....	11
IV. ACTIVITES ECONOMIQUES.....	11
V .CONTEXTE CLIMATOLOGIQUE.....	13
V .1 PRECIPITATIONS.....	13
V .1.1 . Précipitations annuelles.....	13
V .1.2 . Précipitations mensuelles.....	13
V .2 TEMPERATURES.....	15
V .3 ARIDITE DU CLIMAT.....	15
V.4 TYPE DU CLIMAT.....	16
V .5 EVAPORATION.....	16
VI. CONTEXTE HYDROLOGIQUE.....	17
VI.1 CARACTERISTIQUES DES BASSINS VERSANTS.....	17
VI .2 REGIME DES COURS D'EAU.....	18
VI .2.1 Régime annuel.....	18
VI .2.2 Régime mensuel.....	21
VI .3 AMENAGEMENT DES EAUX SUPERFICIELLES.....	21
VI .3.1 Barrages actuels.....	21
VI .3.2 Projets futurs de barrages dans le secteur d'étude.....	22
VI .4 QUALITE DES EAUX DE SURFACE.....	22
VII .CONTEXTE GEOLOGIQUE.....	23
VII .1 LITHOSTRATIGRAPHIE.....	23
VII .1.1 Primaire.....	23
VII .1.2 Permo-trias.....	23
VII .1.3 Jurassique.....	25
VII .1.4 Crétacé.....	25
VII .1.5 Eocène.....	25
VII .1.6 Mio-pliocène.....	26
VII .1.7 Plio-Villafranchien.....	26
VII .1.8 Quaternaire.....	26
VII .2 CADRE STRUCTURAL DE LA ZONE D'ETUDE.....	26
VII .3 CONTEXTE PEDOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE.....	27

VIII .CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE.....	28
VIII .1 LES NAPPES PROFONDES	28
VIII .1.1 Primaire	28
VIII .1.2 Lias moyen.....	28
VIII .1.3 Cénomano-Turonien.....	28
VIII .1.4 Eocène.....	28
VIII .2 LA NAPPE PHREATIQUE.....	31
VIII .2.1 Limite de la nappe.....	32
VIII .2.2 Alimentation et sorties de la nappe.....	33
VIII .2.2.1 Alimentation de la nappe	33
VIII .2.2.2 Sortie de la nappe.....	33
VIII .2.3 Piézométrie de la nappe	33
VIII .2.4 Paramètres hydrodynamiques de la nappe.....	37
VIII .2.5 Qualité de l'eau de la nappe	38
VIII .2.6 Exploitation de la nappe au niveau du secteur d'étude	38
VIII .2.6.1 Alimentation AEP	38
VIII .2.6.2 Prélèvements agricoles.....	39
VIII .2.6.3 Prélèvements Golfs.....	40
IX. CONCLUSION.....	41
CHAPITRE II : MODELISATION DE LA PARTIE CENTRALE DU SYSTEME AQUIFERE DU HAOUZ	42
I. METHODOLOGIE.....	43
II. SYNTHESE CRITIQUE DES DONNEES	44
II. 1 INTRODUCTION.....	44
II. 2 DONNEES GEOLOGIQUES.....	44
II .3 DONNEES GEOMETRIQUES.....	44
II .4 DONNEES CLIMATOLOGIQUES.....	45
II .5 DONNEES HYDROGEOLOGIQUES.....	45
II .5 .1. Cartes Piézométrique	45
II .5 .2 Historique piézométrique	45
II .6 PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES.....	46
II .7 DONNEES SUR LES PRELEVEMENTS SOUTERRAINS.....	46
II .7.1 Prélèvement pour l'alimentation en eau potable (AEP).....	46
II .7.2 Prélèvements agricoles :	46
III. MODELISATION DE LA PARTIE CENTRALE DE LA.....	47
III.1. INTRODUCTION.....	47
III. 2.MODELE CONCEPTUEL.....	48
III. 2. 1 GENERALITES.....	48
III. 2. 2 CHOIX DES LIMITES DU DOMAINE DE MODELISATION.....	49

III. 2.3 CONDITION AUX LIMITES DU SYSTEME HYDROGEOLOGIQUE	49
IV. MODELISATION DE L'ECOULEMENT DE LA NAPPE.....	52
IV.1. CONSTRUCTION DU MODELE	53
IV.1.1.Discrétisation du domaine d'étude.....	54
IV.1.2. Construction de la géométrie du modèle.....	54
IV.1.3.Conditions aux limites.....	57
IV.1.3.1 Condition à charge imposée.....	57
IV.1.3.2 Condition drain.....	57
IV.1.3.3 Conditions à flux nul	57
IV.1.4 Recharge.....	57
IV.1.5. Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère.....	58
IV.1.5.1.La conductivité hydraulique	58
IV.1.5.2. Le coefficient d'emmagasinement.....	58
IV.2. SIMULATION DE L'ECOULEMENT DE LA NAPPE.....	58
IV.2.1.Simulation en régime permanent.....	60
IV.2.2. Sensibilité du modèle hydrodynamique.....	64
IV.2.2.1 Sensibilité à la recharge	65
IV.2.2.2 Sensibilité à la conductivité hydraulique.....	69
IV.2.3.Simulation en régime transitoire	72
IV.2.3.1 Choix du pas du temps.....	72
IV.2.3.2 Conditions aux limites.....	72
IV.2.3.3 Recharge.....	73
IV.2.3.4 Prélèvements	73
IV.2.3.5 Coefficient d'emmagasinement.....	73
IV.3 Calage du modèle en régime transitoire.....	73
V. CONCLUSION.....	77
CONCLUSION GENERALE.....	78
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	79
LISTE DES FIGURES	80
LISTE DES TABLEAUX.....	82
LISTE DES ABREVIATIONS.....	83

INTRODUCTION GENERALE

La rareté de l'eau est devenue le souci majeur de la plupart des pays du monde et principalement dans les régions où les ressources en eaux restent limitées.

Le Maroc est l'un des pays qui est désormais confronté au problème de pénurie d'eau ; en particulier, sa partie centrale à climat semi-aride. Parmi les ressources en eau souterraine présentent dans cette partie, la nappe du Haouz qui est l'un des plus importants aquifères de la région de Tensift. Son importance réside en la quantité et la qualité de ses ressources hydriques. Actuellement, on assiste à une diversification considérable des problèmes hydrogéologiques de cette nappe. La surexploitation de cet aquifère et l'urbanisation perturbent l'écoulement souterrain de point de vue quantitatif et qualitatif.

La gestion et la protection de cette ressource en eau souterraine deviennent fondamentales. Or, gérer les ressources en eau, c'est comprendre le fonctionnement de l'aquifère dans les conditions naturelles et prévoir l'influence de l'intervention humaine sur la qualité et la quantité de l'eau souterraine.

L'objectif de départ du présent travail était de mettre la lumière sur l'impact de l'augmentation de la demande croissante sur les ressources en eau dans le Haouz Central, à travers la mise en place d'un modèle numérique afin de quantifier les débits naturels transitant dans les formations aquifères plio-quadernaires autour de la métropole de Marrakech et de connaître la distribution des perméabilités permettant la reconstitution de la piézométrie et ce dans le but d'une meilleure compréhension du fonctionnement hydrodynamique du système. Vu le manque de données sur les prélèvements (AEP de Marrakech, Irrigation...), l'étude s'est arrêtée au calage du modèle en régime transitoire (calage insatisfaisant) et ne permet pas de faire des prévisions sur l'état de la nappe.

Le choix de cette partie de l'aquifère de la plaine du Haouz réside dans l'observation directe de l'évolution effrénée du paysage urbanistique (essentiellement horizontalement) et l'extension d'activités demanderesse de grandes quantités d'eau

puisées directement dans la nappe d'eau souterraine. Parmi ces diverses activités, citons la multiplication de parcours de golfs, les projets touristiques à caractère balnéaire.

Le travail est organisé en deux grands chapitres:

- Le premier chapitre est consacré à la caractérisation géographique, géologique, climatologique et hydrogéologique de la zone d'étude, moyennant une actualisation des différentes données climatiques à savoir les températures et les pluies, ainsi que les débits des oueds parcourant la région.
- Le deuxième chapitre a pour objet la modélisation numérique du système aquifère du Haouz au niveau de la zone d'étude. L'objectif est d'élaborer un outil numérique qui soit représentatif du système, tenant compte du degré d'hétérogénéité du système et de ses propriétés géologiques et hydrogéologiques.

Ce travail de modélisation est basé sur les étapes suivantes :

- Elaboration du modèle conceptuel du système, à partir des résultats de la synthèse hydrogéologique actualisée;
- Calage du modèle en régime permanent ;
- Analyse de la sensibilité des paramètres du modèle ;
- Calage du modèle en régime transitoire.

CHAPITRE I : CONTEXTE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE

I. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

La plaine du Haouz est une dépression d'une superficie de 6 000 Km², allongée d'Est en Ouest et large de 40Km, traversée par la majorité des affluents de la rive gauche de l'oued Tensift drainant les eaux de la chaîne atlasique. La plaine renferme la nappe phréatique la plus importante du bassin de Tensift el Haouz.

La présente étude concerne une partie de la nappe du Haouz (Fig. 1), qui se situe dans le Haouz central. Elle s'étend sur une superficie d'environ 1 528 Km² et est limitée :

- Au Nord par l'Oued Tensift ;
- Au Sud par le piémont du Haut Atlas;
- A l'Est par l'Oued Zat;
- A l'Ouest par l'Oued N'Fis.

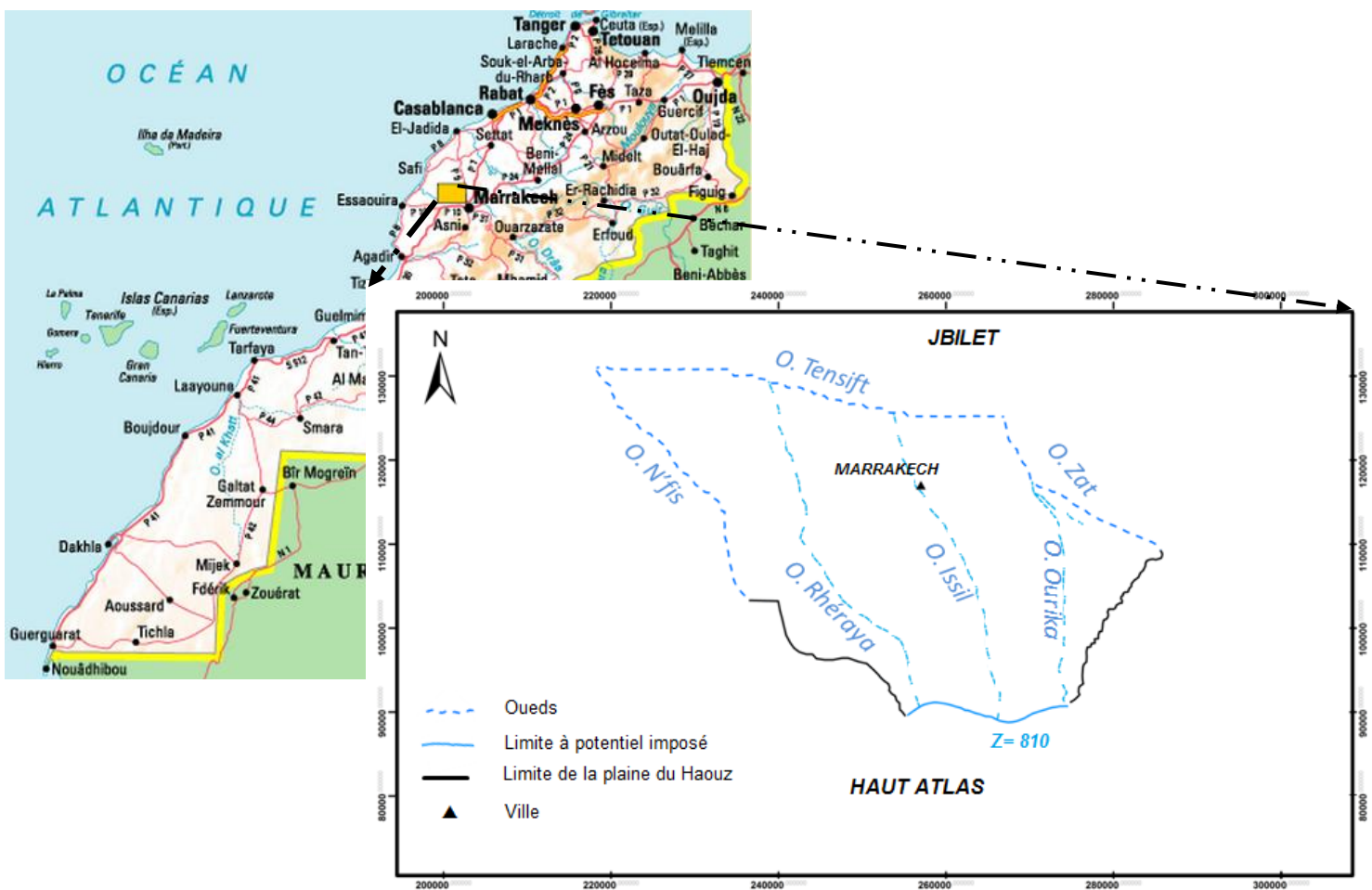


Figure 1: Localisation géographique de la zone d'étude

II. MORPHOLOGIE DE LA ZONE D'ETUDE

La topographie de la zone d'étude montre une variation assez uniforme, elle augmente progressivement du Nord-Ouest (275 m) vers le Sud, l'altitude maximale atteinte est d'environ 895 m. (Fig.2).

III. DONNEES DEMORAPHIQUES

Selon le Recensement Général de la Population et de l'Habitat (R.G.P.H) de 2004, la population de la région de Tensift el Haouz est de 3.102.652 habitants. Ce recensement montre également que plus d'un tiers (1/3) de la population régionale réside dans le grand Marrakech comme pôle régional, 69% de la population urbaine de la région habitent la ville de Marrakech.

La croissance de la population est faible dans la plupart des préfectures de la région de Tensift el Haouz à l'exception de Marrakech qui attire l'essentiel de l'accroissement de la population (<http://www.ccismar.ma/html/presentation/index.html>).

Le tableau 1 présente l'évolution démographique de quelques communes urbaines de la zone d'étude.

IV. ACTIVITES ECONOMIQUES

Les activités principales de la région peuvent être classées selon trois secteurs essentiels:

1. Le secteur primaire : Il comprend l'élevage, les cultures « Bour » et les cultures irriguées ;
2. Le secteur secondaire : il comprend l'industrie, l'artisanat et la branche du bâtiment et les travaux publiques ;
3. Le secteur tertiaire : Essentiellement le tourisme, ce secteur fournit la majorité des emplois dans la région.

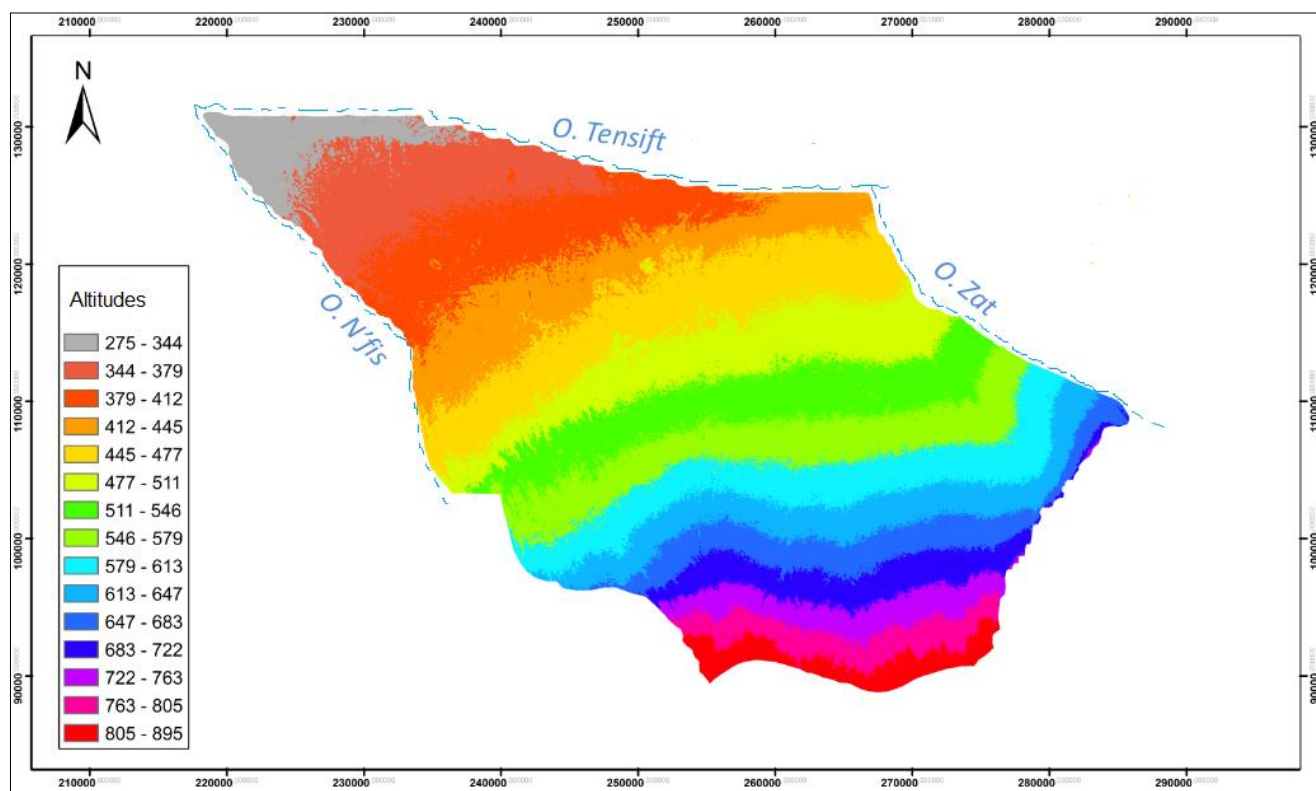


Figure 2: Carte des variations topographiques de la zone d'étude

Tableau 1: Evolution démographique de certaines communes urbaines de la zone d'étude (PDAIRE, 2008)

Commune urbaine	2004	2010	2015	2020	2025	2030
Marrakech	823154	901110	980971	1068540	1159824	1253840
Centre Sidi Abdallah Ghiat	986	1091	1183	1270	1343	1405
Centre Loudaya	8989	9943	10788	11576	12248	12808
Centre Tameslouht	6346	7019	7616	8172	8647	9042

V .CONTEXTE CLIMATOLOGIQUE

Le climat de la région d'étude fait partie intégrante des zones semi-arides à arides, les données climatiques utilisées parviennent de la station de Marrakech et de Tahanaout, misent en place par l'Agence du Bassin hydraulique de Tensift (ABHT).

V .1 PRECIPITATIONS

La zone d'étude montre un caractère désertique lié à la faiblesse des précipitations et leur rareté. L'étude des précipitations est basée sur l'exploitation des données pluviométriques enregistrées durant la période 1980 et 2011 au niveau de la station de Marrakech et la station de Tahanouat.

V .1.1 . Précipitations annuelles

La région d'étude montre une variation annuelle des précipitations, dans le temps et dans l'espace, l'écart des variations annuelles est plus important au niveau de Marrakech (Fig.3) qu'au niveau de Tahanaout (Fig.4).

La moyenne des précipitations varie de 220 mm calculée au niveau de la station de Marrakech pour atteindre 356 mm au niveau de Tahanaout. Le minimum a été enregistré en 1982-1983 pour la station de Marrakech et en 1992-1993 pour la station de Tahanaout. Le maximum des précipitations a été enregistré pendant l'année 2008-2009 pour les deux stations.

V .1.2 . Précipitations mensuelles

L'analyse des pluies moyennes mensuelles interannuelles (Fig.5) montre que les pluies enregistrées au niveau de la station de Tahanouat sont supérieures à celles enregistrées au niveau de Marrakech. On peut aussi déduire l'existence d'une saison pluvieuse allant de Novembre à Avril, avec un maximum en Mars.

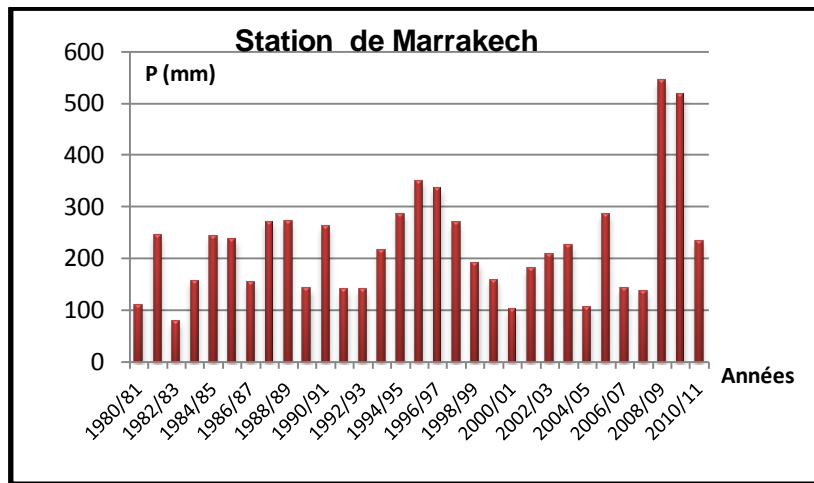


Figure 3: Variations interannuelles des précipitations à Marrakech de 1980 à 2011. (Source : Données ABHT)

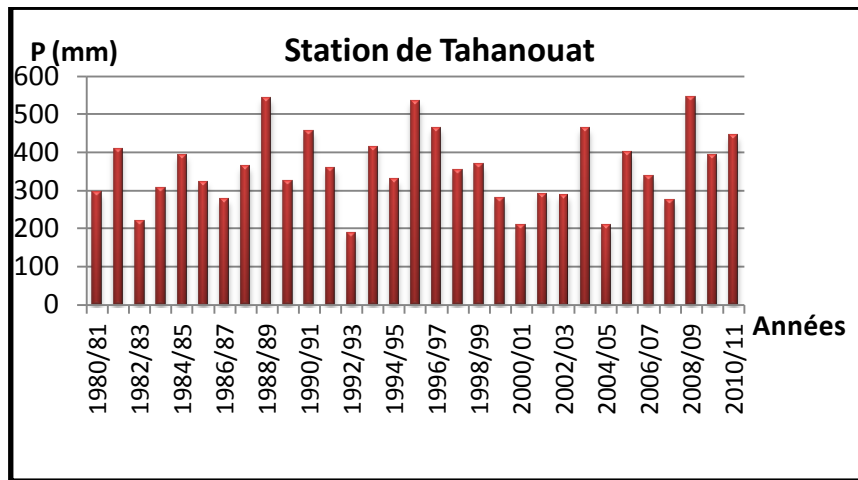


Figure 4: Variations interannuelles des précipitations à Tahanouat de 1980 à 2011 (Source : Données ABHT).

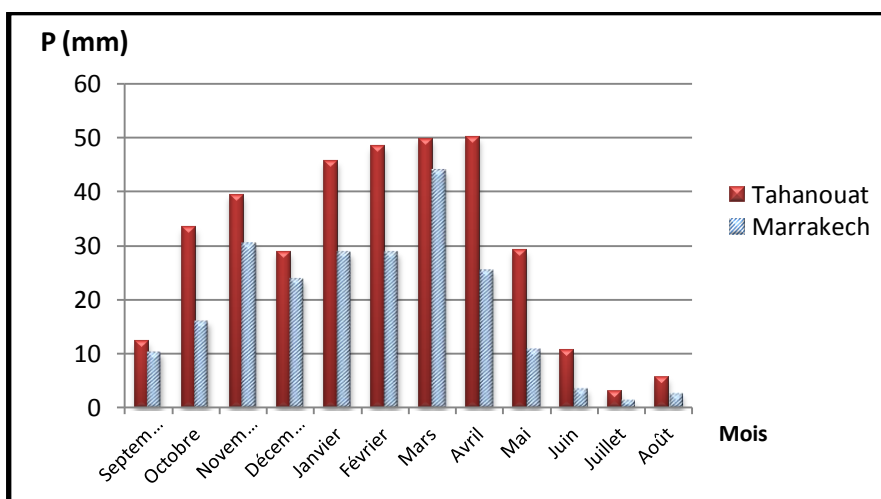


Figure 5: Précipitation moyennes mensuelles (1980-2011) (Source : Données ABHT)

V.2 TEMPERATURES

Les données de températures parviennent de la station de Marrakech. L'analyse de ces données est faite sur une période allant de 1980-2011.

L'analyse des températures moyennes interannuelles (Fig.6) permet de rendre compte de l'existence de deux saisons une chaude et l'autre froide. Les températures maximales sont enregistrées au cours des mois de Juillet et Août, alors que les températures minimales sont enregistrées en Janvier et Décembre.

V.3 ARIDITE DU CLIMAT

L'aridité du climat est définie comme étant le nombre de mois où la pluviométrie moyenne est inférieure à deux fois la température en °C.

L'indice de Gaussen a été calculé pour la station de Marrakech pour la période allant de 1961 jusqu'à 2011.

Le diagramme Ombro-thermique (Fig.7), fait ressortir que la période sèche à Marrakech s'étend sur six mois de Mai à Octobre.

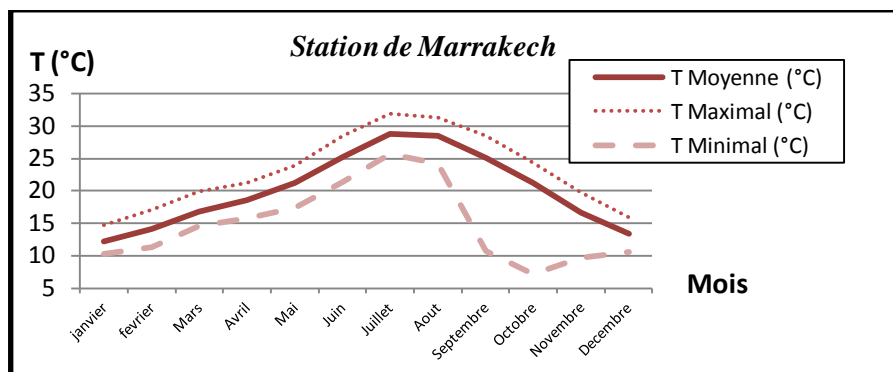


Figure 6: Températures moyennes, maximales et minimales interannuelles (1980-2011)
(Source : Données ABHT)

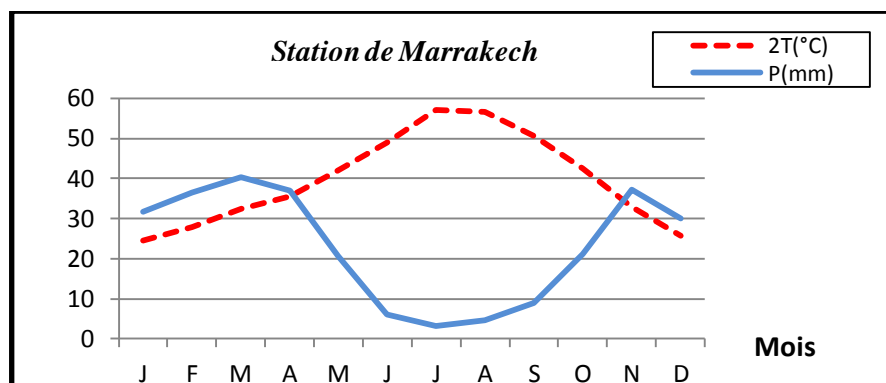


Figure 7: Diagramme Ombro-Thermique pour la station de Marrakech (1961-2011)
(Sources : Données ABHT)

V.4 TYPE DU CLIMAT

L'indice d'aridité annuelle de **De Martonne** permet de déterminer le climat d'une région donnée, il s'exprime selon la relation suivante : $I = P/(T+10)$

Avec : **P** : La hauteur annuelle des précipitations en (mm) ;

T : La température moyenne annuelle en (°C).

L'indice de Martonne a été calculé en utilisant les données de la station de Marrakech sur une période allant de 1980 à 2011 (Tab.2) et il est égal à **7,5**, et témoigne que la région est caractérisée par un climat aride.

Tableau 2: Indice de De Martonne calculé pour la station de Marrakech.

Station	P (mm)	T (°C)	Indice de De Martonne	Type de climat
Marrakech	226,3	20,2	7,5	Aride

V.5 EVAPORATION

L'évapotranspiration englobe les phénomènes d'évaporation et de transpiration, elle est influencée par l'humidité de l'air, la vitesse du vent, la température de l'eau et de l'air, le rayonnement solaire, la pression atmosphérique et la nature du sol.

L'évaporation moyenne annuelle mesurée au Piche pour la période 1983-2011 est de l'ordre de 1767,4 ml. L'évaporation maximale est enregistrée pendant le mois de juillet et août avec des valeurs respectivement de 260,5 et 251,1 ml, alors que la valeur minimale est enregistrée en janvier avec une valeur de 87,4 ml (Fig.8).

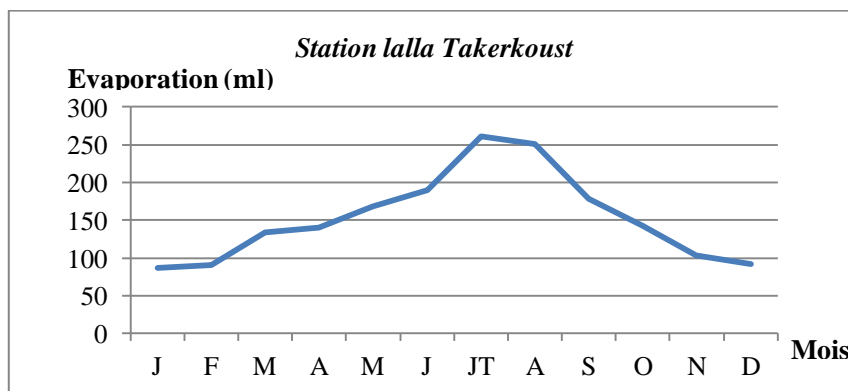


Figure 8: Evaporation moyenne mensuelle mesurée au Piche (1983-2011)

VI. CONTEXTE HYDROLOGIQUE

Le secteur d'étude est inclus dans le système hydrologique de Tensift. C'est un système d'orientation Est-Ouest, dont l'écoulement provient essentiellement de l'apport sur sa rive gauche d'une série d'affluents descendant de l'Atlas. Ce système se caractérise par un débit très faible, sujet à de très nettes variations saisonnières.

VI.1 CARACTERISTIQUES DES BASSINS VERSANTS

Les oueds parcourant le secteur d'étude sont issus des bassins versants localisés au niveau du versant Nord de l'Atlas. Ce sont d'Est en Ouest, le Zat, l'Ourika, l'Issil, le Rhéraya et le N'fis (Fig.1). Ces Oueds se caractérisent par leurs superficies, leurs paramètres physiques et leurs lithologies.

Les caractéristiques essentielles des bassins versants des oueds de la zone d'étude sont marquées dans le tableau 3. Les oueds de la zone d'étude prennent naissance dans des terrains imperméables schisteux et argileux du Primaire et du Permo-Trias, cela est expliqué par le fait que les affleurements des formations triasiques sont plus développés dans les bassins versant du Haouz central. (Razoki, 2001)

Tableau 3:Caractéristiques physiques et lithologiques des oueds de la zone d'étude

Oueds	Caractéristiques physiques			Caractéristiques lithologiques		
	Altitude moyenne (m)	Superficie (Km2)	Pente (%)	Formations perméables (%)	Formations semi-perméables (%)	Formations imperméables (%)
Zat	1960	525	18	14	40	46
Ourika	2700	503	21	6	39	55
Rhéraya	2000	225	21	26	15	59
N'fis	2320	1290	17	20	9	71

VI .2 REGIME DES COURS D'EAU

Les oueds de la zone ont un régime très irrégulier et des débits variant fortement au cours de l'année et d'une année à une autre. Les données exploitées correspondent à la période allant de 1969 à 2010.

VI .2.1 Régime annuel

Les oueds du secteur d'étude sont caractérisés par un écoulement annuel faible et intermittent. Pour mettre en évidence l'état des oueds de la région d'étude, on a choisi la station Imin hamam située sur l'oued N'fis (Fig.9), la station de Tahanouat située sur l'oued Rhéraya, (Fig.10), la station Teferiat située sur l'oued Zat (Fig.11), et la station Aghbalou située sur l'oued Ourika (Fig.12)

D'après les graphes, on remarque que les variations interannuelles sont plus importantes au niveau des stations « Imin hamam » et « Aghbalou ». Le maximum des débits est de 28,3 m³/s, ce dernier a été enregistré au niveau de la station Imin hamam pendant l'année 1996. Les débits minimaux sont marqués pendant l'année 2000 pour Tahanouat (0,08 m³/s), Imin hamam (0,1 m³/s) et Agbalou (0,46 m³/s), alors que le débit minimal pour la station de Taferiat était de 0,39 m³/s en 1986.

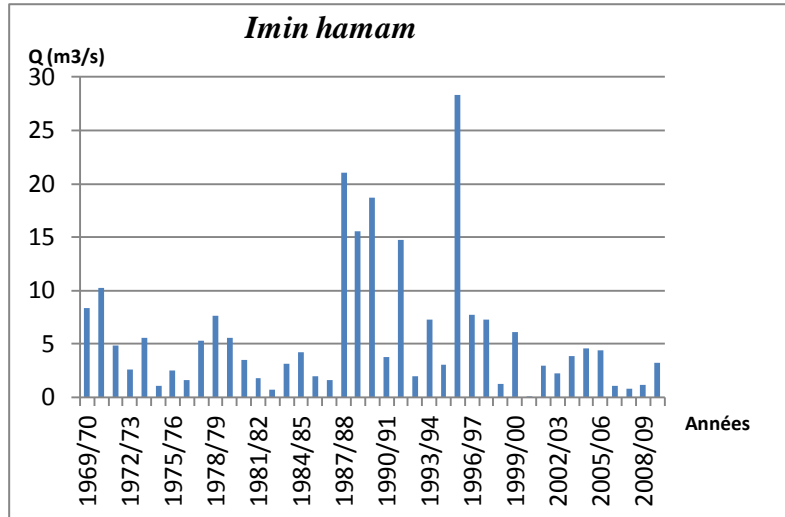


Figure 9 : Variations interannuelles des débits moyens de la station Imin hamam
(Source : Données ABHT)

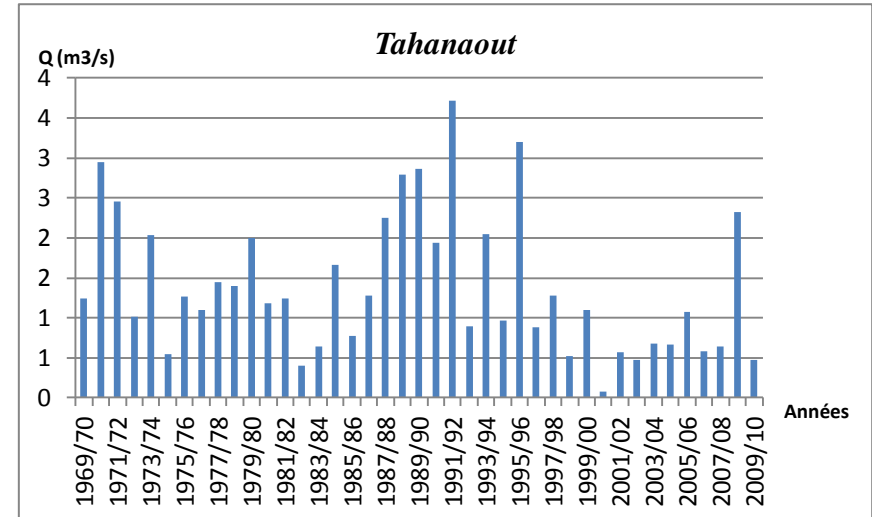


Figure 10 : Variations interannuelles des débits moyens de la station Tahanaout
(Source : Données ABHT)

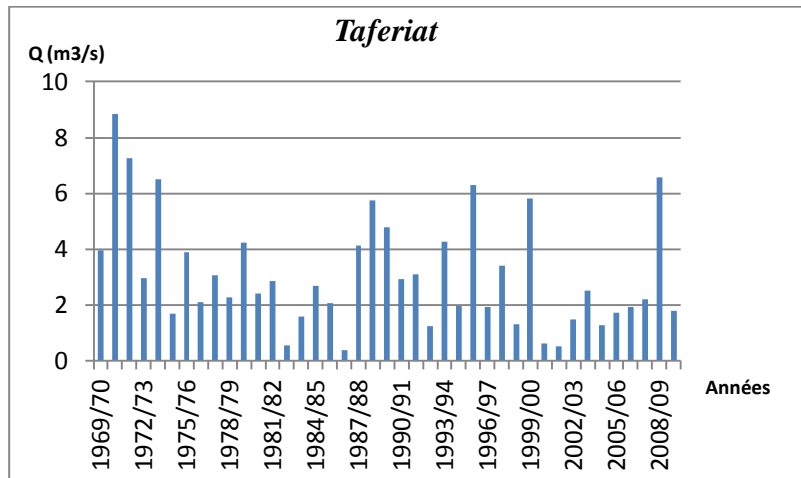


Figure 11 : Variations interannuelles des débits moyens de la station Taferiat
(Source : Données ABHT)

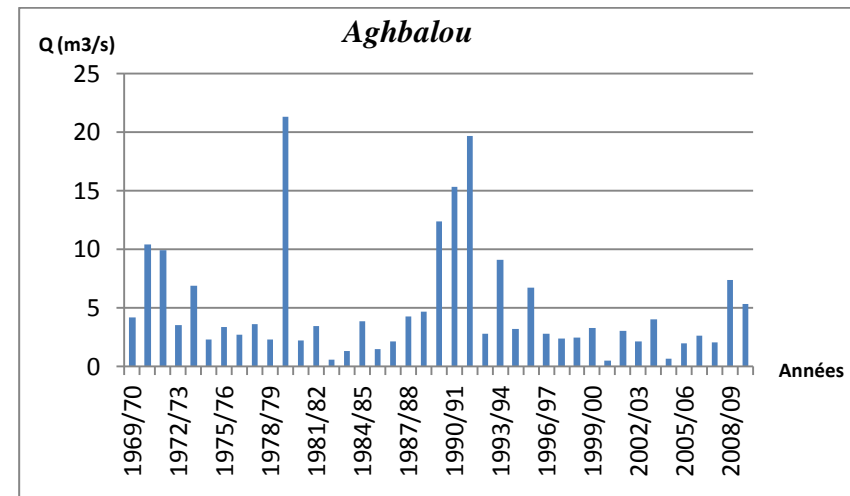


Figure 12 : Variations interannuelles des débits moyens de la station Aghbalou
(Source : Données ABHT)

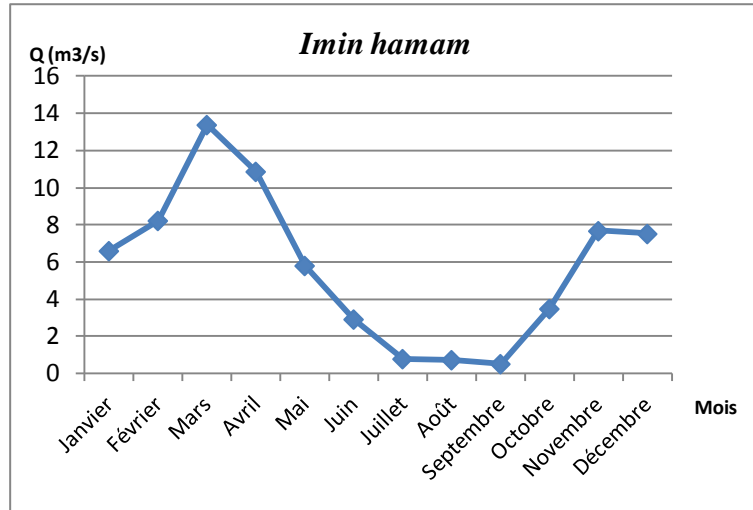


Figure 13 : Débit moyen mensuel de l'oued N'fis

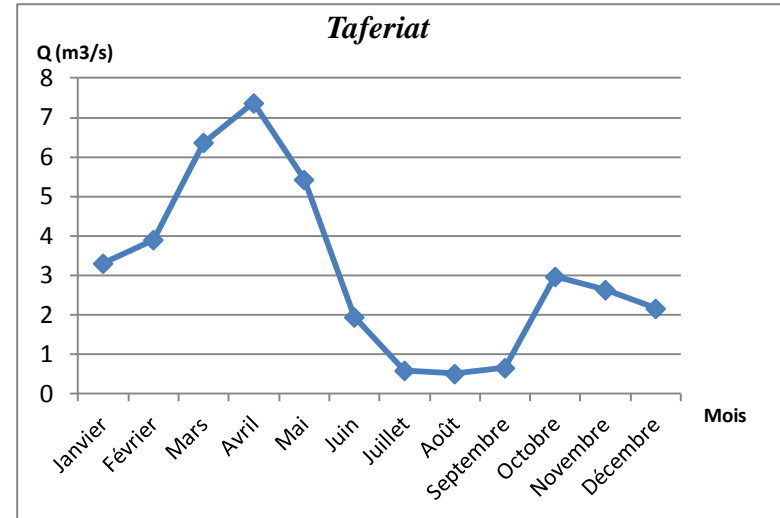


Figure 15 : Débit moyen mensuel de l'oued Zat

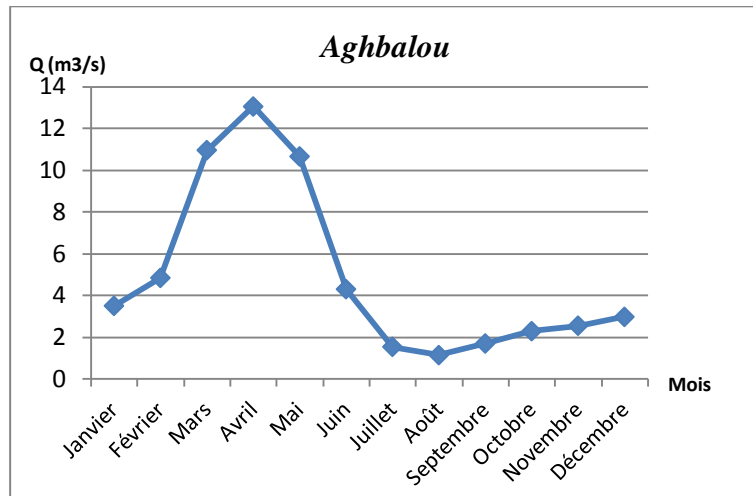


Figure 14 : Débit moyen mensuel de l'oued Ourika

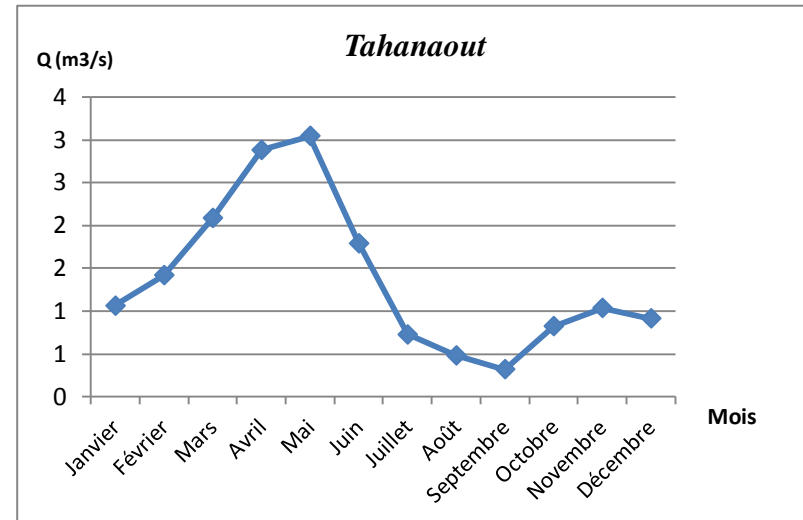


Figure 16 : Débit moyen mensuel de l'oued Rhéraya

VI .2.2 Régime mensuel

Les débits moyens mensuels mesurés pour les quatre stations (Fig. 13, 14, 15,16), pendant la période 1969-2010, montrent des variations saisonnières importantes. Ainsi on remarque que pour les différentes stations, les valeurs les plus faibles sont enregistrées entre Juillet et Octobre, alors que les débits moyens mensuels les plus importants sont enregistrés entre Février et Mai avec un maximum en mois d'Avril.

VI .3 AMENAGEMENT DES EAUX SUPERFICIELLES

L'accroissement de la demande en eau, lié au développement socio-économique de la région a entraîné une mobilisation importante des ressources en eaux. Ainsi, la mise en valeur de cette richesse au profit de l'irrigation, de l'eau potable et de l'industrie est devenue indispensable. En outre, la région bénéficie d'un transfert d'eau à partir du bassin de l'Oum Er Rbia, via le canal de Rocade de 300 Mm³ en année moyenne, destinés à l'alimentation en eau potable de la ville de Marrakech et à l'irrigation dans le Haouz Central.

VI .3.1 Barrages actuels

La construction de barrages et le transfert d'eau interbassin se sont avérés d'une grande nécessité pour la bonne gestion des eaux de surface. Le tableau 4 représente quelques caractéristiques des barrages alimentant la région d'étude.

Tableau 4: Barrages alimentant la zone d'étude (Source : Données ORMVAH)

Barrages	Oueds	Volumes régularisés (Mm ³)	Capacité (Mm ³)
My Hassan 1er	Lakhdar	300	247,6
Sidi Driss	Lakhdar	-	2,8
Lalla Takerkoust	N'fis	86	64,5

Le barrage Lalla Takerkoust, achevé en 1935 et situé au sud de Marrakech sur l'oued N'Fis, alimente le périmètre N'Fis.

Le complexe du barrage Hassan 1^{er} – Sidi Driss, construit en 1987 sur l'oued Lakhdar et grâce au canal de la Rocade permet de distribuer le long de 118 Km, 260 Mm³/an d'eau régularisés vers les nouveaux périmètres du Haouz Central et 40 Mm³/an destinés à l'alimentation en eau potable et industrielle de la ville de Marrakech.

VI .3.2 Projets futurs de barrages dans le secteur d'étude

Trois sites de barrages moyens ont été identifiés dans le cadre du plan directeur d'aménagement intégré des eaux des bassins de Tensift (Monographie du Haouz, 2008) :

- My Brahim sur l'oued Rhéraya;
- Aït Ziat sur l'oued Zat;
- Timinzellit sur l'oued Zat.

VI .4 QUALITE DES EAUX DE SURFACE

La salure des oueds parcourant la région d'étude, dépend de deux facteurs essentiels :

- La nature lithologique des terrains lessivés ; ce phénomène est très courant pour l'oued Zat, dont le bassin versant est en grande partie constitué de terrains Permo-Triasiques salifères, ce qui entraîne une concentration considérable en sels de ces eaux pouvant être supérieure à 1g/l à l'étiage (Razoki, 2001).
- La saison et les variations de la précipitation. Ainsi, la salure devient forte en été à cause de l'évaporation et d'autant plus grande que les terrains sont salifères.

De point de vue qualité, les eaux des oueds de la région d'étude présentent une qualité moyenne à mauvaise, comme le montre le tableau suivant (Tab.5). La détérioration de la qualité est essentiellement due aux rejets urbains et à l'utilisation des engrais au niveau des secteurs agricoles. Pour les retenues des barrages les eaux sont d'une qualité bonne à moyenne, et cela est dû à la bonne oxygénation bien en surface qu'au fond.

Tableau 5: Typologie de la qualité des eaux des oueds (Smajj, 2011)

N° IRE	Nom point	Nom oueds	Qualité				
			Physique	Bactériologique	Organique	Azotée	Phosphatée
2089/53	Station Aghbalou	Ourika	bonne	bonne	bonne	bonne	Moyenne
1566/53	Station Imin hamam	N'Fis	bonne	bonne	moyenne	moyenne	Bonne
1562/52	Station Taferiat	Zat	bonne	bonne	bonne	bonne	Moyenne
4179/44	Amont Marrakech	Tensift	mauvaise	bonne	moyenne	moyenne	Mauvaise
4198/44	Aval Marrakech	Tensift	mauvaise	mauvaise	mauvaise	mauvaise	Mauvaise
1565/63	Station Tahanaout	Rhéraya	bonne	bonne	bonne	bonne	Moyenne

VII .CONTEXTE GEOLOGIQUE

VII .1 LITHOSTRATIGRAPHIE

La plaine du Haouz est une dépression où se sont accumulées différentes formations détritiques issues du démantèlement de la chaîne atlasique au Néogène et au Quaternaire récent, ces formations ont couvert les formations primaires, secondaires et tertiaires. (Fig.17).

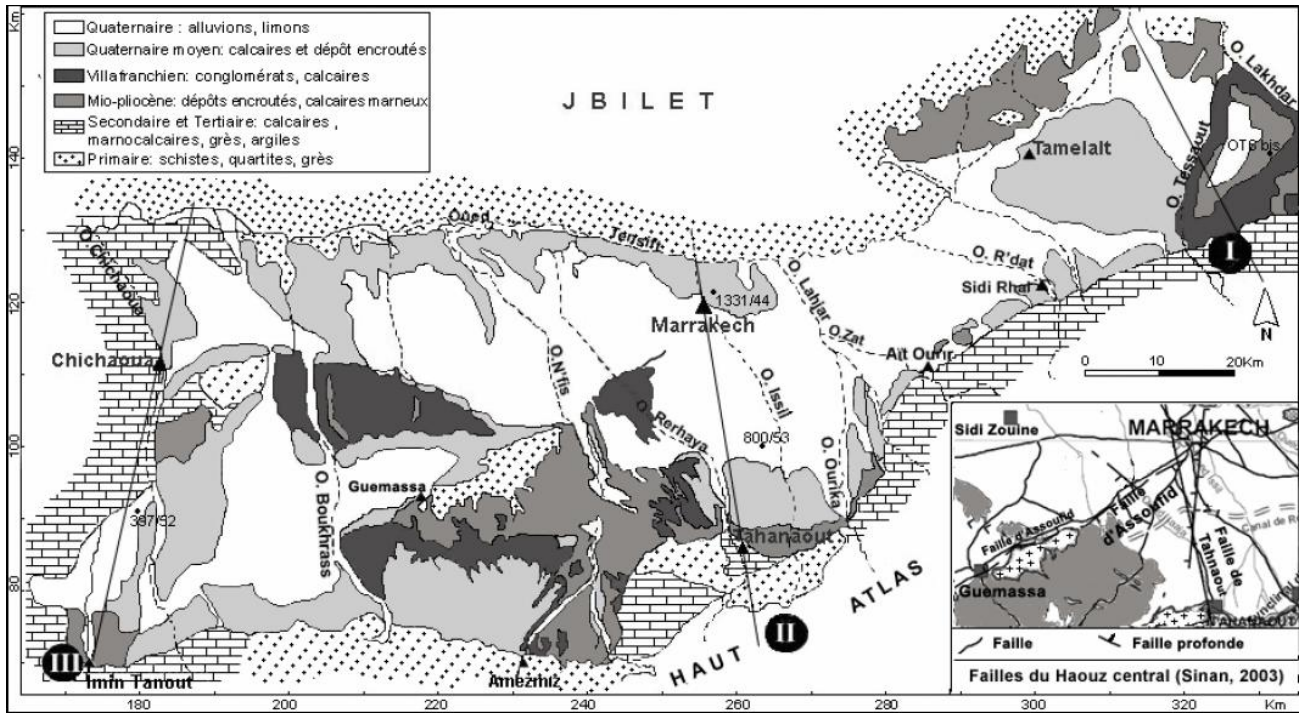


Figure 17 : Carte géologique du Haouz (d'après la carte géologique 1/500000 de Marrakech)

Tous les étages géologiques allant du Primaire au Quaternaire ont été détectés, soit par des forages profonds ou observés à l'affleurement (Fig. 18)

VII .1.1 Primaire

Les formations primaires, constituées de grès, de schistes, d'argiles et de calcaires, forment une grande partie du Haut Atlas de Marrakech,

VII .1.2 Permo-trias

Les dépôts Permo-triasiques du Haut Atlas de Marrakech (région de l'Ourika) constituent une très épaisse série détritique rouge formée d'argiles, de grès et de conglomérats avec des gypses et du sel gemme. L'ensemble est surmonté, le plus souvent, par des coulées de basaltes doléritiques.



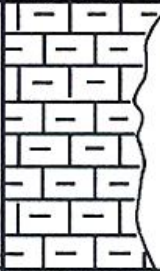

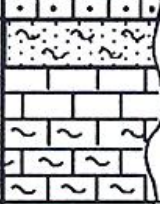
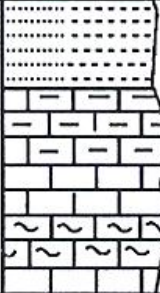
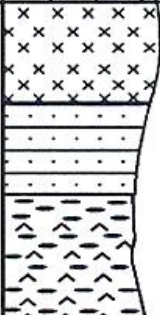

Division géologique	Lithofaciès		Epaisseur maximale
Quaternaire récent		Sables - graviers - limons (50 m)	50 m
Villafranchien		Conglomérats (100 m)	100 m
Néogène		Marnes gréseuses rose-saumon	600 m
		Calcaires lacustres et conglomérats (600 m)	
Eocène		Formations rouges et brunes (200 m)	200 m
		Calcaires et sables phosphatés (50 m)	50 m
Crétacé		Grès et marnes (100 m)	100 m
		Calcaires dolomitiques (100 m)	100 m
		Marnes vertes et argiles rouges gypsifères (200 m)	200 m
Jurassique		Formations continentales à l'est et marnes à l'ouest (200 m)	200 m
		Formations continentales rouges	500 m
		Calcaires et calcaires lités dolomitiques (500 m)	
Stéphano-Trias		Coulées de dolérite	1200 m
		Argiles, grès	
		Conglomérats rouge avec dépôts de gypse et de sel gemme	
Primaire Anté-Stéphanien		Schistes, grès et quartzites	6000 à 8000 m

Figure 18 : Série lithostratigraphique (Razoki, 2001)

VII .1.3 Jurassique

- ✓ **Le Jurassique inférieur** : Le jurassique inférieur s'étend de l'Est jusqu'à la limite Ouest du secteur d'étude qui est l'oued N'fis. A partir de l'oued Rhéraya à l'ouest il devient discordant sur le Trias et le Paléozoïque. Le jurassique inférieur est subdivisé en :
 - Lias inférieur silto-argileux ;
 - Lias moyen formé de calcaires dolomitiques, calcaires marneux avec parfois du gypse.
- ✓ **Le Jurassique moyen** : le jurassique moyen est présent au niveau de la cuvette d'Aït Ourir, il est formé de bas en haut par :
 - Une formation conglomératique (15 à 30 m d'épaisseur) ;
 - Une formation silto-gréseuse (10 à 20 m d'épaisseur) ;
 - Une formation gréseuse (80 à 100 m d'épaisseur) à chenaux conglomératiques.

VII .1.4 Crétacé

- **Le Crétacé inférieur** : On note la présence de formations de l'Albien d'environ 35 mètres à Aït Ourir, elle est essentiellement calcaire gréseuse à altération jaunâtre.
- **Le Crétacé moyen** : Il est représenté par deux étages :
 - ✓ Le Cénomaniens : on note la présence du Cénomaniens au niveau d'Aït Ourir, le faciès est argileux et ne dépasse pas les 50 m.
 - ✓ Le Cénomano-Turonien : le faciès est essentiellement calcaire ou calcaire dolomitique à Aït Ourir avec une épaisseur de 45 m.
- **Le Sénonien** : Les formations Sénoniennes affleurent au niveau d'Aït Ourir, avec une épaisseur d'environ 60 m. dans cette région le Sénonien est essentiellement argileux avec des petites intercalations de calcaires crayeux.

VII .1.5 Eocène

Il est présent d'une façon discontinue en allant de l'Ouest vers l'Est, son épaisseur est de 100 m à Aït Ourir, il est formé de calcaire à coquilles ou à silex, ou bien de calcaire dolomitique avec des passages marneux ou gréseux.

VII .1.6 Mio-pliocène

Le Mio-pliocène est essentiellement formé par des conglomérats à ciment gréseux et marneux au Sud et devient gréseux au niveau d'Aït Ourir. Vers le Nord le faciès change rapidement et devient argilo-gréseux.

VII .1.7 Plio-Villafranchien

Il est caractérisé généralement par des variations latérales de faciès du Sud vers le Nord. Il est formé essentiellement par des conglomérats polygéniques, des calcaires conglomératiques, des limons à nodules, des croûtes calcaires et enfin des calcaires noduleux ou compacts.

VII .1.8 Quaternaire

Les sédiments du Quaternaire sont très diversifiés du fait qu'ils résultent des produits de démantèlement de la chaîne atlasique par un ensemble d'oueds débouchant sur la plaine, où s'effectue le dépôt gravitaire des éléments emportés. Les sédiments Quaternaires sont représentés par les limons rouges, les argiles et les cailloux et par les conglomérats et les alluvions au niveau des rives des oueds. (Razoki, 2001).

VII .2 CADRE STRUCTURAL DE LA ZONE D'ETUDE

D'après Sinan (1986), la zone d'étude est caractérisée par la présence de trois principales failles:

- La Faille de Tahanaout qui s'étend de Tahanaout au Sud à Marrakech au Nord. Elle a une direction N-S et a entraîné le soulèvement du compartiment Ouest (Horst de Guemassa) et l'abaissement de celui de l'Est ;
- La Faille d'Assoufid qui a une direction SW-NE passe au Nord de Guemassa jusqu'à Marrakech. Elle a entraîné la remontée du socle primaire dans le compartiment Sud (Horst de Guemassa) et l'effondrement du compartiment Nord.
- La Faille de N'Fis : avec une direction SE-NW, détectée entre Oued N'Fis au NW et l'intersection de la faille d'Assoufid avec oued Bahja. Elle a entraîné le soulèvement du compartiment NE et la remontée de celui du SW.

VII.3 CONTEXTE PEDOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

L'étude pédologique effectuée en 1951 pour la région du Haouz de Marrakech, révèle la présence de quatre types de sols : rouge, bruns, châtains et gris, avec des textures limono-argileuses, limoneuses ou limono-sableuses.

La carte de répartition géographique de ces différents sols (Fig.19) montre que la région d'étude est composée de :

- Sols bruns à croûte lamellaire et sol gris sur limon gris calcaire, au niveau de la rive droite de l'oued N'Fis ;
- Sol gris sur limon gris et calcaire ;
- Sol gris sur limon rose ;
- Sol gris sur limon rose et caillouteux ;
- Sol brun et châtain jeune ;
- Sol gris de la vallée de l'oued Lahjar ;
- Sol châtain jeunes sur cailloutis dégradés.

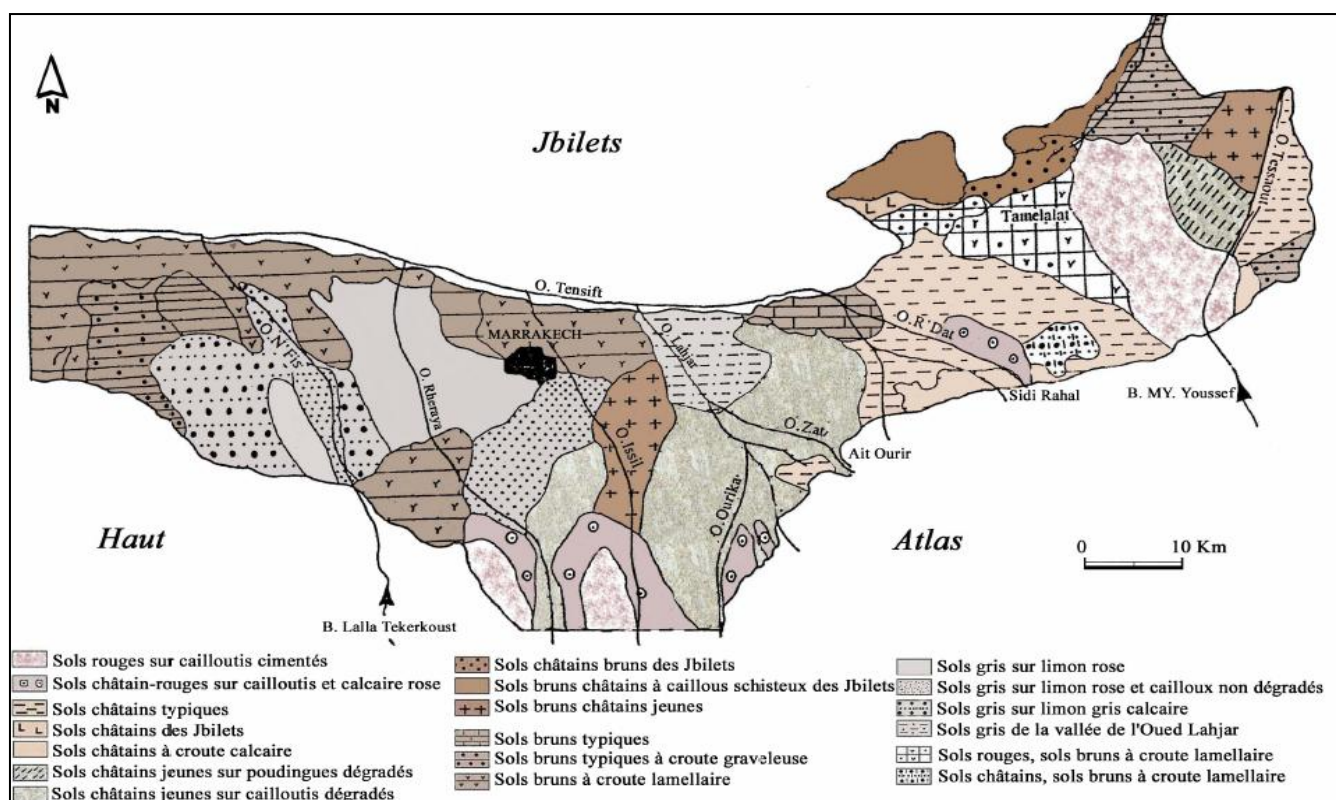


Figure 19 : Carte pédologique du Haouz de Marrakech (Abourida, 2004)

VIII .CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

Les études géologiques et géophysiques effectuées dans la plaine du Haouz ont montré une alternance de niveaux imperméables et de niveaux perméables constituant des réservoirs d'eau (Fig. 20). Ces niveaux aquifères sont d'une importance variable de l'Ouest vers l'Est ainsi que du Nord vers le Sud de la zone. (Razoki, 2001).

VIII .1 LES NAPPES PROFONDES

VIII .1.1 Primaire

Les schistes du primaire constituent un substratum imperméable pour les formations secondaires et tertiaires. Toutefois, au sein de ces niveaux schisteux s'intercalent des bancs plus durs de grès et de quartzites, qui, lorsqu'ils sont fissurés, sont siège d'un écoulement localisé.

Par ailleurs les forages effectués dans les formations primaires du Haouz Central ont montré de faibles débits, ceci pourrait être lié à des zones de fractures, de schistosité intense et d'altérations.

VIII .1.2 Lias moyen

Au niveau de la plaine, il occupe une superficie d'environ 300 Km². Les niveaux liasiques constituent un réservoir très important dont l'exutoire principal est la nappe phréatique. Un débit d'environ 1600 l/s traversant les calcaires liasiques alimente directement la nappe plio-quadernaire.

VIII .1.3 Cénomano-Turonien

Il constitue l'aquifère profond le plus important sous la plaine du Haouz (Fig. 21). Sa superficie est estimée à 500 Km² sous le Haouz Central. L'exutoire principal de cet aquifère est la nappe plio-quadernaire.

VIII .1.4 Eocène

Les formations calcaires Eocènes constituent un aquifère profond important sous la plaine du Haouz Central (Fig. 21). Son extension est estimée à 840 Km². Les calcaires éocène, pentés vers le Nord, se biseautent sous le recouvrement plio-quadernaire, ce qui permet une alimentation de la nappe phréatique à partir de ces calcaires. (Razoki, 2001)

Divisions géologiques		Faciès	Perméabilité	
Quaternaire récent		Sables, graviers et galets d'oueds. Formations détritiques consolidées des terrasses. Limons de la plaine	P	
Villafranchien		Conglomérats plus ou moins consolidés. Marnes gréseuses et calcaires lacustres		
Néogène continental		Marnes gréseuses rose saumon fluvio-lacustres, calcaires lacustres et conglomérats	I	
Eocène	supérieur	Formations rouges et brunes continentales	P	
	Moy et inf	Calcaires et sables phosphatés avec niveaux de marnes jaunes	I	
Crétacé	supérieur	Grès et marnes	I	
	moyen	Calcaires dolomitiques, marnes et marno-calcaires	P	
	inférieur	Marnes vertes et argiles rouges gypsifères	I	
Jurassique	sup et inf	Formations continentales à l'Est, marines à l'Ouest, avec des calcaires et des argiles	P	
	Lias	sup	Formations continentales rouges	I
		moy	Calcaires et calcaires lités dolomitiques, surtout représentés à l'Est	P
		inf	Marno-calcaires et marnes à gypse	I
Stéphano-Trias		Coulées de dolérites au sommet. Argiles, grès et conglomérats rouges avec dépôts de gypse et de sel gemme	I	
Primaire anté-stéphanien		Schistes, grès et quartzites. Présence de calcaires au Dévonien	I	

Figure 20 : Les niveaux aquifères dans la série lithostratigraphique de la plaine du Haouz (Razoki, 2011)

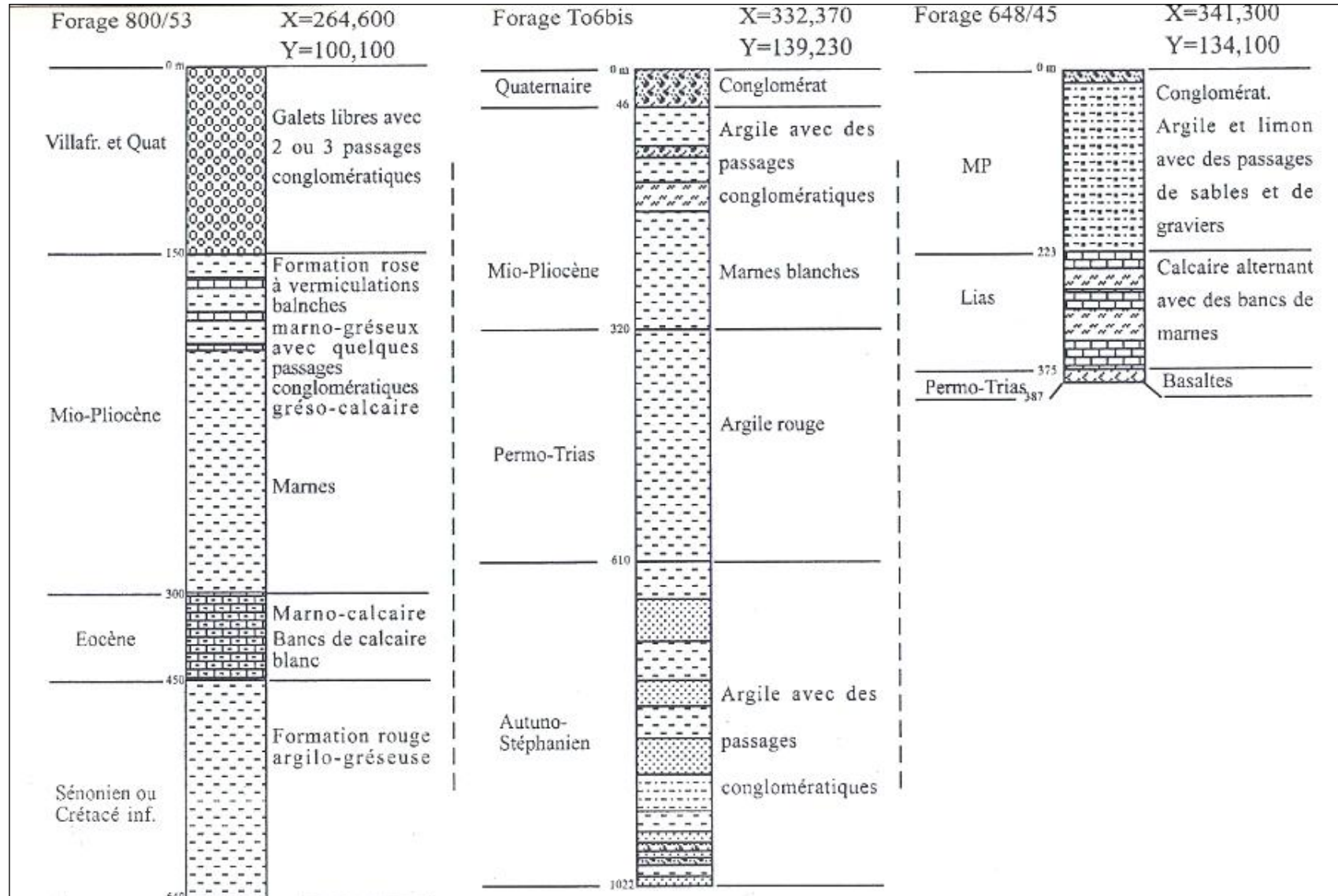


Figure 21 : Coupes géologiques des forages du Haouz Centrale et Oriental (Razoki, 2001)

VIII .2 LA NAPPE PHREATIQUE

Les matériaux détritiques plio-quaternaires issus du démantèlement de la chaîne Atlasique par les oueds descendants du Haut Atlas, sont le siège d'une nappe phréatique importante (Fig. 22). Cette nappe s'étend de la bordure du Haut Atlas au Sud jusqu'à l'oued Tensift (Haouz Occidental et Central) et jusqu'aux trouées de la Tassaout et du Gaïno (Haouz Oriental) au Nord. L'hétérogénéité des dépôts est responsable de l'extrême diversité des caractéristiques hydrodynamiques de la nappe. (Razoki, 2001).

La nappe phréatique couvre une superficie de 6000 Km², avec une épaisseur allant de 10 à 20 mètres au Nord et pouvant atteindre 70 mètres au Sud et des réserves estimées à environ 7 à 9 milliards de m³ d'eau. Les prélèvements de la nappe sont estimés à environ 400 millions de Mm³/an. (Sinan *et al.*, 2003).

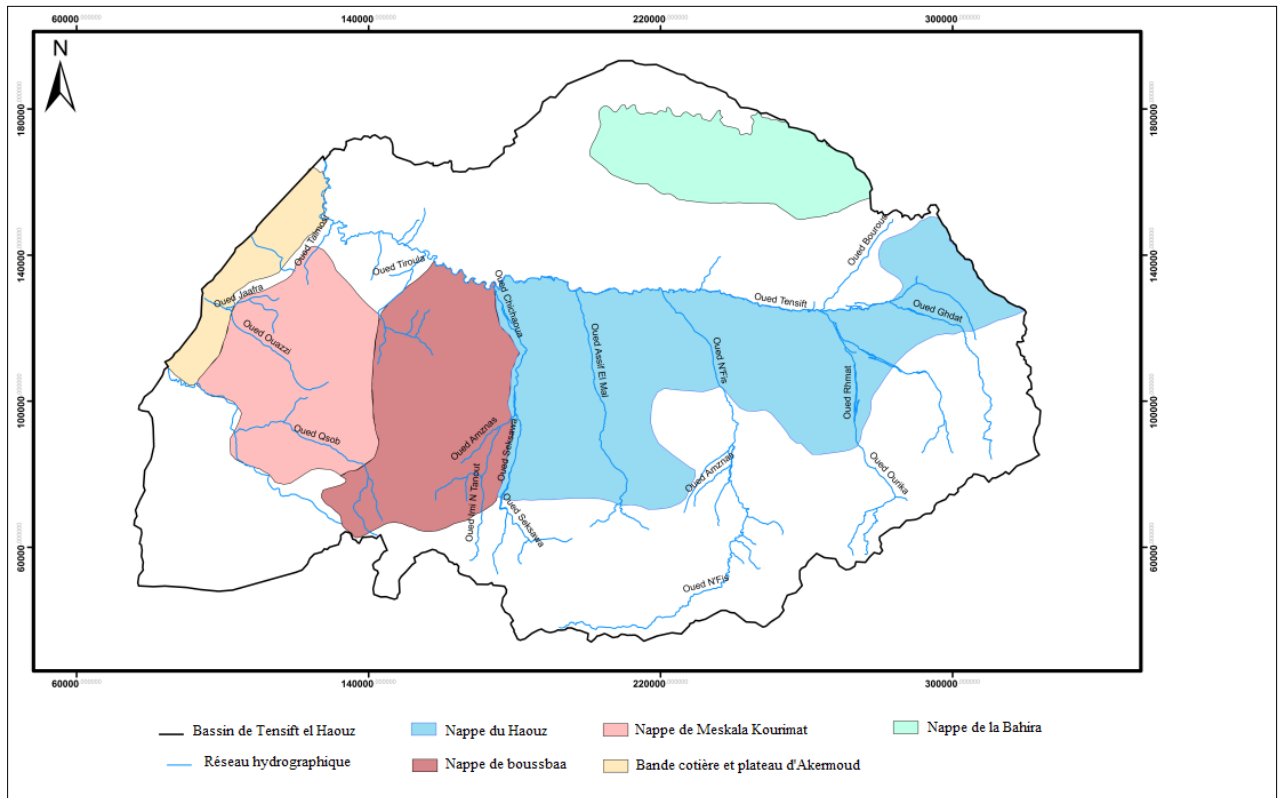


Figure 22 : Localisation de la nappe du Haouz dans le système aquifère du Bassin de Tensift-el-Haouz

VIII .2.1 Limite de la nappe

La nappe du Haouz est limitée au Nord par les schistes imperméables des Jebilet, au Sud par la bordure Nord du Haut Atlas, à l'Ouest par les calcaires Crétacé-Eocènes de Chichaoua et à l'Est par l'oued Lakhdar. La particularité de cette nappe est la non unicité de son substratum qui peut être selon l'endroit, soit les marnes Mio-pliocènes, soit les argiles Permo-Triasiques, soit enfin les schistes Primaires.

Par ailleurs, les conditions aux limites de cette nappe, en relation avec les apports des bassins limitrophes, dépendent de la nature lithologique des formations secondaires et tertiaires du pourtour et de leur pendage. (Razoki, 2001).

Dans la présente étude la portion de la nappe prise en compte, présente la partie centrale de la nappe du Haouz, elle est limitée au Nord par l'oued Tensift, au Sud par le Haut Atlas, à l'Est par l'oued Zat et à l'ouest par l'oued N'fis. (Fig. 23). Cette partie de la nappe du Haouz se présente comme un compartiment bien individualisé et naturellement limité par des limites physiques, faisant d'elle un sous-aquifère à part entière.

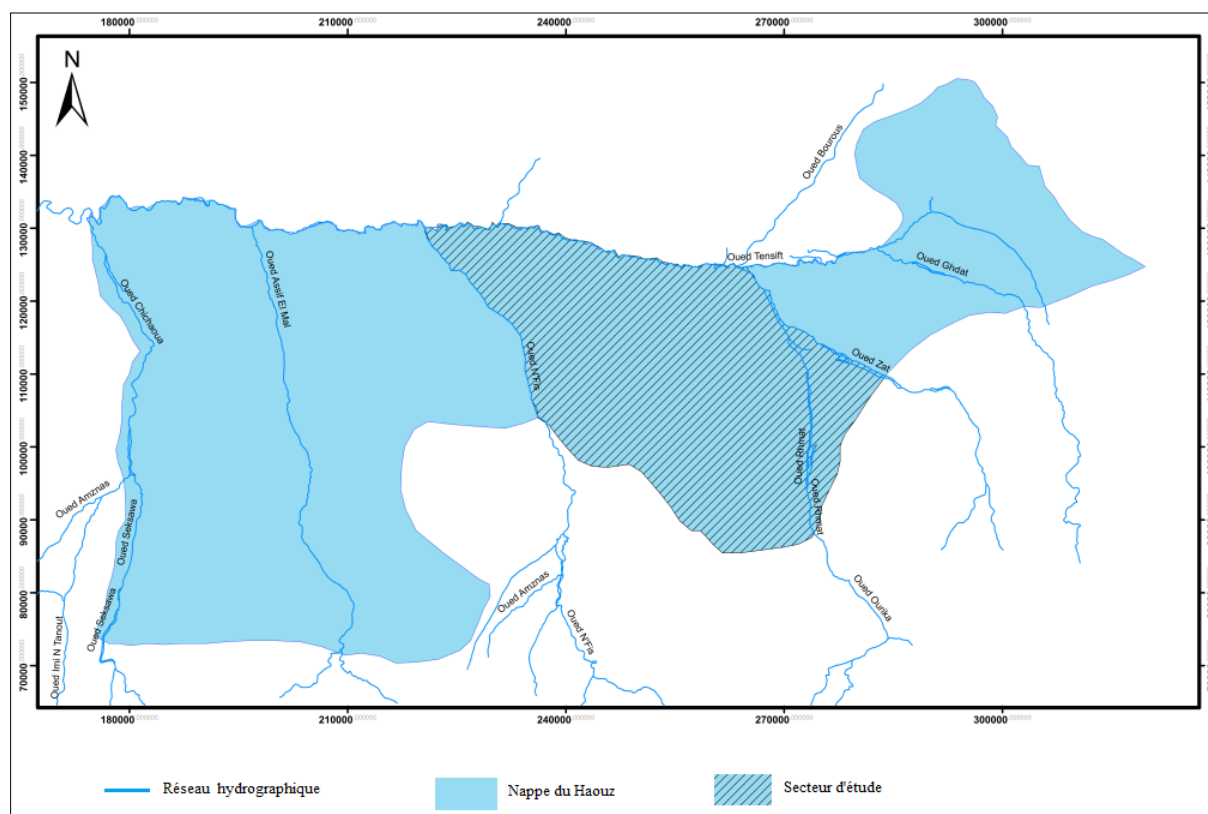


Figure 23 : Localisation de la zone d'étude dans la nappe du Haouz

VIII .2.2 Alimentation et sorties de la nappe

VIII .2.2.1 Alimentation de la nappe

Au niveau du secteur d'étude, les zones d'apport d'eau à la nappe sont les suivantes :

- Les surfaces d'abouchement avec les nappes profondes, au niveau du Haouz central, ce phénomène de drainance n'est pas toujours admis dans les études hydrogéologiques en raisons de l'absence d'éléments qui démontrent ce phénomène ;
- Au front d'infiltration, après ruissellement sur les bassins versants dans le Haouz central et des cônes d'éboulis compris entre Rhéraya et l'Ourika ;
- Recharge par le retour des eaux d'irrigation (au niveau des périmètres irrigués) et qui représentent une source non négligeable ;
- Recharge par les oueds atlasiques comme le Zat, l'Ourika et le Rhéraya ;
- Recharge diffuse par les précipitations.

VIII .2.2.2 Sortie de la nappe

Les sorties de la nappe correspondent :

- Au drainage des oueds et en particulier de l'oued Tensift qui constitue l'exutoire naturel de toute la nappe du Haouz ;
- Aux prélèvements dans les puits et forages qui deviennent de plus en plus importants d'une année à l'autre, à cause des besoins croissants de l'alimentation en eau potable et de l'irrigation et des activités touristiques.

VIII .2.3 Piézométrie de la nappe

La carte piézométrique permet d'apporter des informations quant au fonctionnement hydrodynamique du système aquifère et notamment sur les directions d'écoulement, les gradients hydrauliques, le drainage par les rivières et les zones très sollicitées en terme de prélèvements.

La nappe plio-quadernaire a fait l'objet de plusieurs campagnes piézométriques, notamment en 1962 par Cochet, 1971 par Bernet et Prost et en 1986 par la DRPE. La carte piézométrique de 1962 à été dressée par Cochet et elle constitue l'état

piézométrique de référence pour plusieurs études hydrogéologiques. Cette carte à été réalisée à partir de 1200 mesures. (Fig. 24).

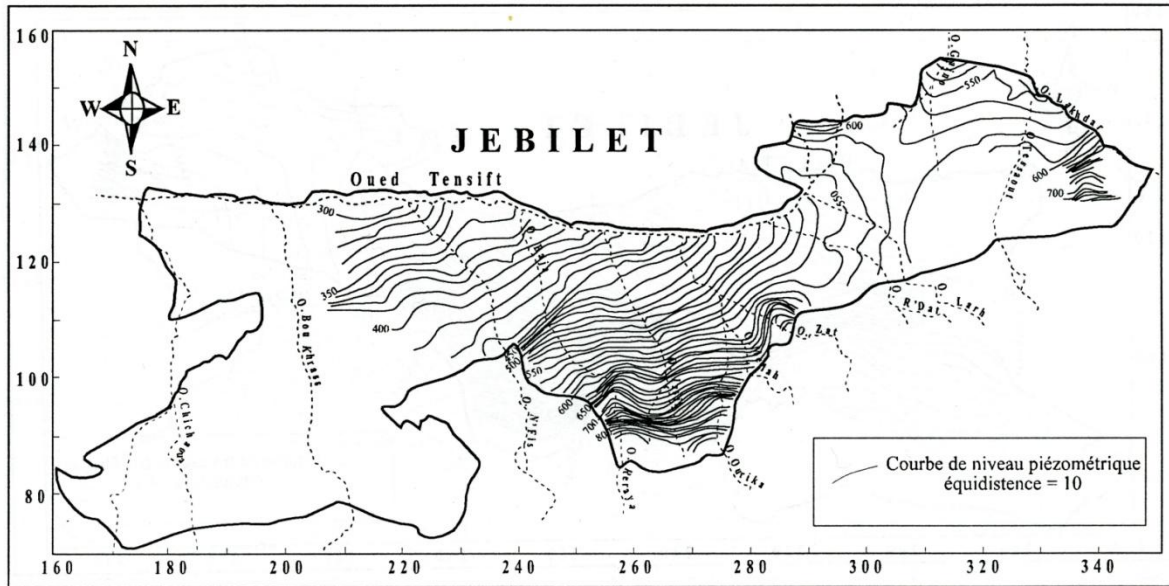


Figure 24 : Carte piézométrique de 1962 (Cochet, 1962)

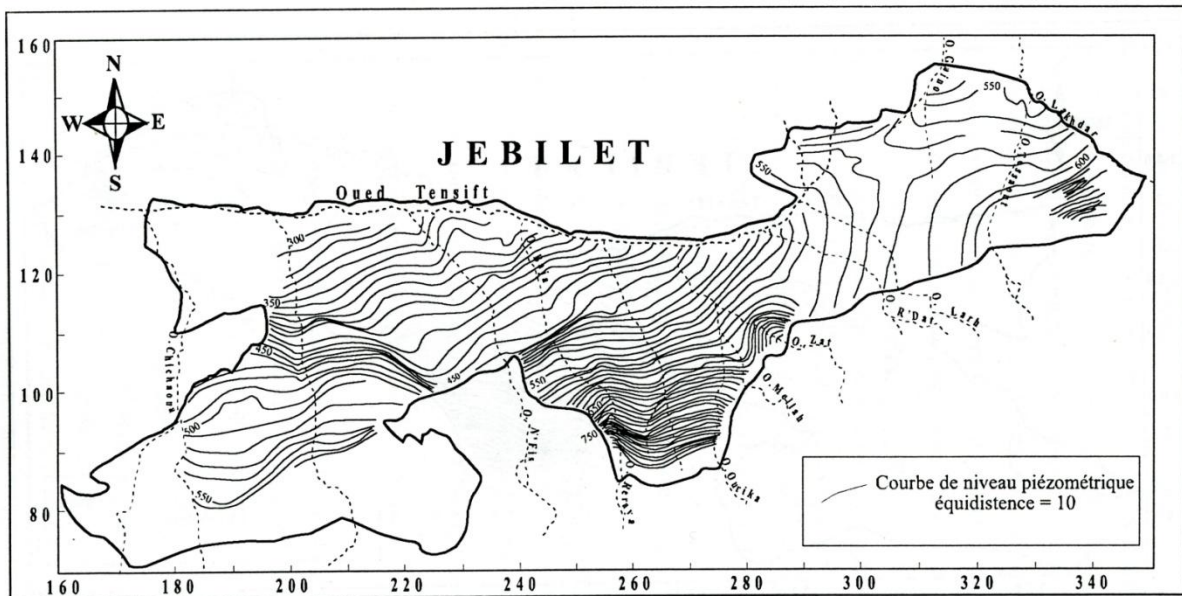


Figure 25 : Carte piézométrique de 1971 (Bernert et Prost, 1975)

L'analyse des cartes piézométriques ci-dessus (Fig. 24, 25) a montré les points suivants :

- Au niveau de la zone d'étude (Haouz Central), la nappe présente un comportement simple, avec des lignes de courants presque parallèles orientées vers le Nord Ouest ;

- Les courbes deviennent convexes au niveau des parties drainantes des oueds atlasiques ;
- L'écoulement de la nappe se fait du Sud (bordure atlasique) vers le Nord-Nord-Ouest ;
- La partie Sud présente de forts gradients hydrauliques, de l'ordre de 2 à 4%, ce dernier diminue en allant vers le Nord pour atteindre des valeurs entre 0,5 et 1%.

Entre les années 1962 et 1971, à partir d'une simple lecture des deux cartes (Fig 24, 25), on remarque qu'il y a une baisse du niveau piézométrique sur tout le secteur. Pour mieux illustrer cette baisse, des graphes de variation du niveau piézométrique (Fig. 27, 28) ont été élaborés pour la zone d'étude, ces graphes représentent les fluctuations de la lame d'eau au niveau des piézomètres de contrôle (Fig. 26) mis en place par l'ABHT. Parmi les onze points d'observation, seuls cinq ont été représentés sur des graphes vu l'insuffisance de données pour les autres points.

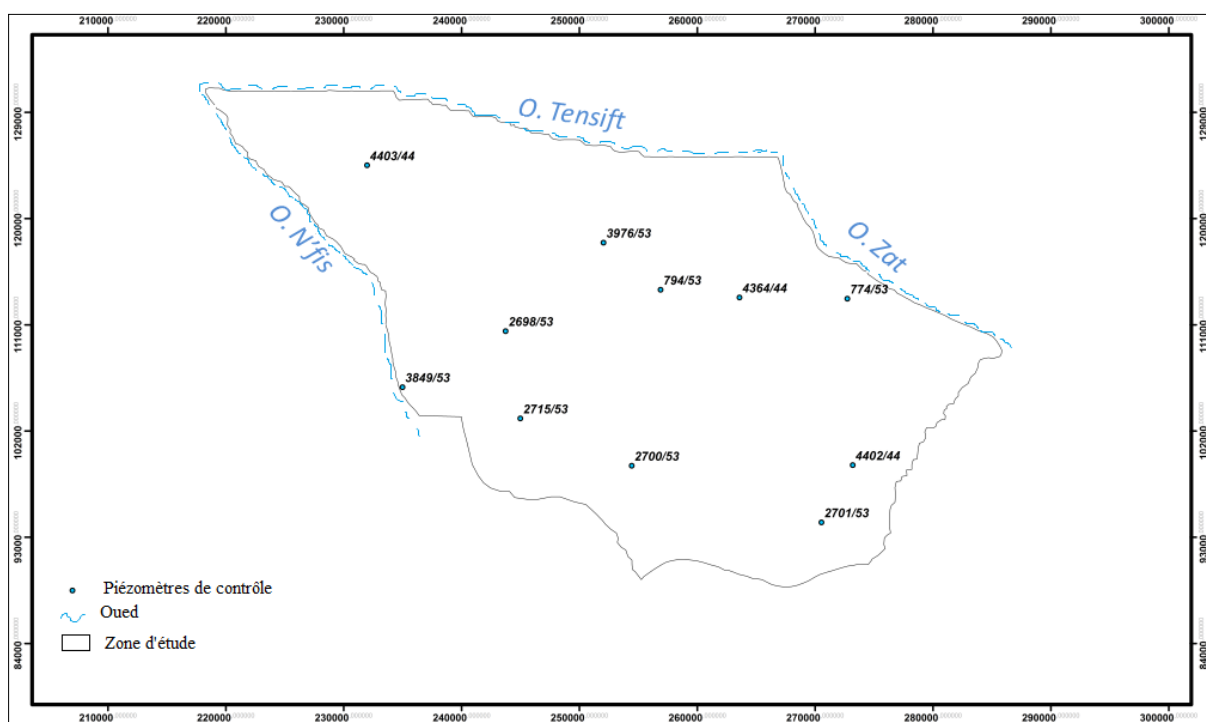


Figure 26 : Répartition des piézomètres de contrôle dans la zone d'étude

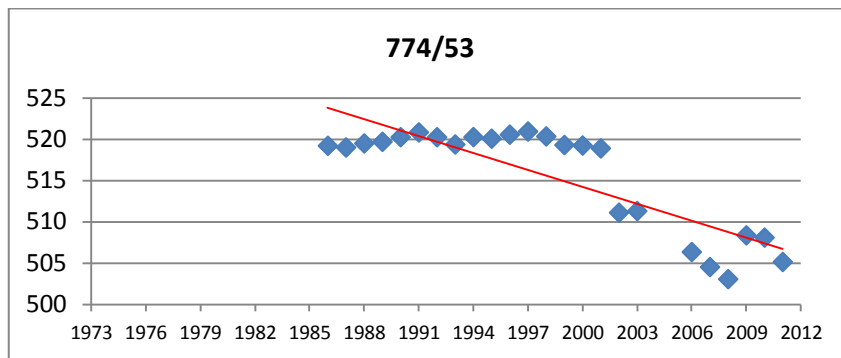
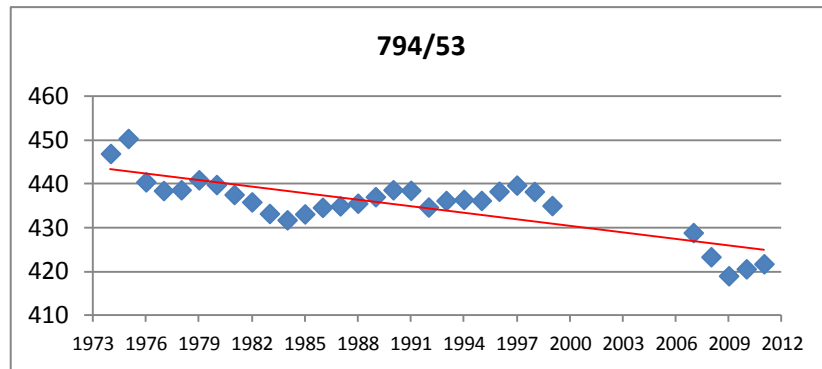
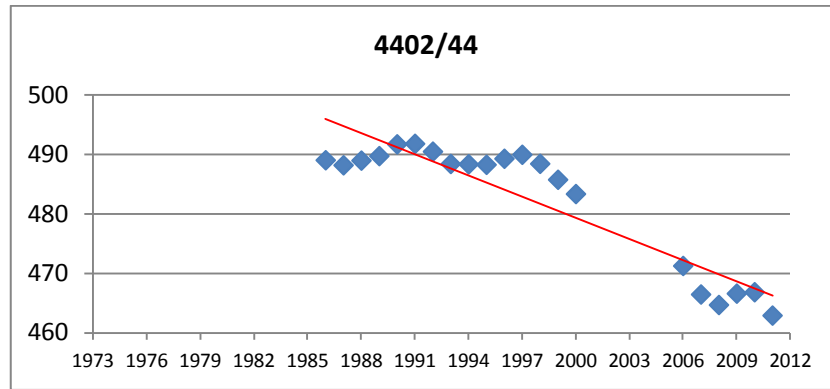


Figure 27 : Baisse du niveau piézométrique dans la nappe du Haouz central

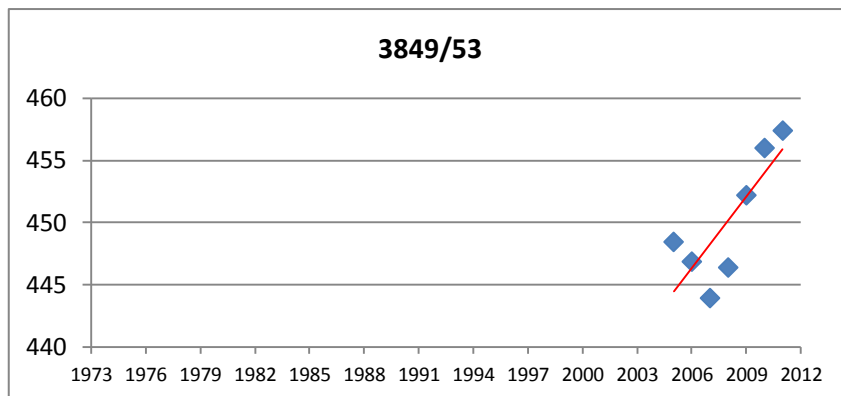


Figure 28 : Remontée du niveau piézométrique de la nappe du Haouz central

Les figures ci-dessus montrent que certains piézomètres témoignent d'une baisse remarquable du niveau piézométrique tels que le piézomètre IRE 4402/44 (1,04 m/an), 497/535 (0,7 m/an) et 774/53 (0,56m/an) (Fig. 27). D'autres piézomètres ont connu à l'inverse une tendance à la remontée du niveau piézométrique, c'est le cas du piézomètre 3849/53 (0,15m/an), (Fig. 28)

L'allure que manifestent les cartes piézométriques et les graphes témoignent d'une baisse du niveau de la nappe qui est du certainement au déficit d'apports à la nappe suite aux périodes de sécheresses, conjuguées à la surexploitation de cette ressources pour répondre au besoin des différents secteurs.

VIII .2.4 Paramètres hydrodynamiques de la nappe

La détermination des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère à savoir la transmissivité et le coefficient d'emménagement, se base sur les essais de pompage.

Les essais de pompage effectués par l'ABHT ont permis de déterminer les intervalles de variations des paramètres hydrodynamiques de la nappe.

Le travail de Sinan (2000), qui utilise les paramètres géo-électriques pour déterminer les paramètres hydrodynamique, montre que :

- La Transmissivité se situe dans les intervalles (1.10^{-5} et $3,5.10^{-2}$ m²/s). Au niveau du Haouz central, les zones de bonne transmissivité sont représentées par les lits d'oueds atlasiques.
- Le coefficient d'emménagement présente des valeurs qui se situent entre 0,1% et 27%. il fluctue autour de 10% à proximité des oueds atlasiques et diminue à 5% entre ces derniers. Plus au Nord, les valeurs ne dépassent pas 3%.

L'hétérogénéité verticale et horizontale des alluvions aquifères et la complexité de la structure profonde du Haouz sont à l'origine de la diversification des paramètres hydrodynamiques.

VIII .2.5 Qualité de l'eau de la nappe

Le faciès chimique des eaux est lié à la nature des formations géologiques lessivées par les eaux. Au niveau de la zone d'étude, entre l'oued N'Fis et Issil le faciès des eaux est généralement bicarbonaté-calcique, résultant de l'infiltration d'eau ayant lessivé les calcaires et les silts du Haut Atlas.

Plus à l'Est au niveau du bassin versant du Zat où les formations Permo-triasiques sont importantes, les eaux infiltrées présentent un faciès chloruré-sodique.

VIII .2.6 Exploitation de la nappe au niveau du secteur d'étude

La région d'étude subit une grande pression matérialisée par la concurrence de différents consommateurs. En effet, le développement socio-économique que connaît cette région a engendré et continue à engendrer une évolution importante des besoins en eau, aussi bien dans le domaine de l'approvisionnement en eau potable et industriel que dans le secteur agricole.

Les sorties de la nappe par pompage sont destinées à l'alimentation en eau potable, industrielle, et à l'irrigation des parcelles et des parcours de golfs et autres projets touristiques.

VIII .2.6.1 Alimentation AEP

Le secteur d'étude dispose de 8 champs captant, comptant 29 puits pour l'alimentation en eau potable, les volumes pompés sont appelés à augmenter avec l'amélioration des stratégies d'extension des projets d'urbanisation tracés dernièrement pour la région.

Pour l'année de référence (1962 où la nappe est considérée en régime permanent), les pompages destinés à l'AEP étaient de l'ordre de 60 l/s, alors qu'actuellement ce débit de pompage est passé à 970 l/s.

VIII.2.6.2 Prélèvements agricoles

L'irrigation constitue un pôle important de l'exploitation des eaux de la nappe. Les périmètres irrigués qui se présentent dans la zone d'étude sont:

a. La grande hydraulique

Cette partie est subdivisée entre:

- Le secteur de N'Fis, rive droite, avec 21 000 Ha de périmètres irrigués ;
- Le secteur d'Oasis Hassan II, avec 1600 Ha de périmètres irrigués ;
- Le secteur H2 avec 4600 Ha de périmètres irrigués.

b. La petite et moyenne hydraulique

Cette partie est subdivisée entre :

- Le secteur d'Ourika, avec 28790 Ha de périmètres irrigués ;
- Le secteur de Rhéraya, avec 8358 Ha de périmètres irrigués ;
- Le secteur de Zat, avec 5941 Ha de périmètres irrigués.

Les puits servant à la satisfaction des besoins en eau de ces périmètres ainsi que d'autres parcelles agricoles sont représentés dans la figure 29. Le nombre de ces puits dépasse largement 8000 unités, avec des débits fictifs autorisés dépassant 5 m³/s. Ces débits diffèrent selon la superficie de la parcelle irriguée.

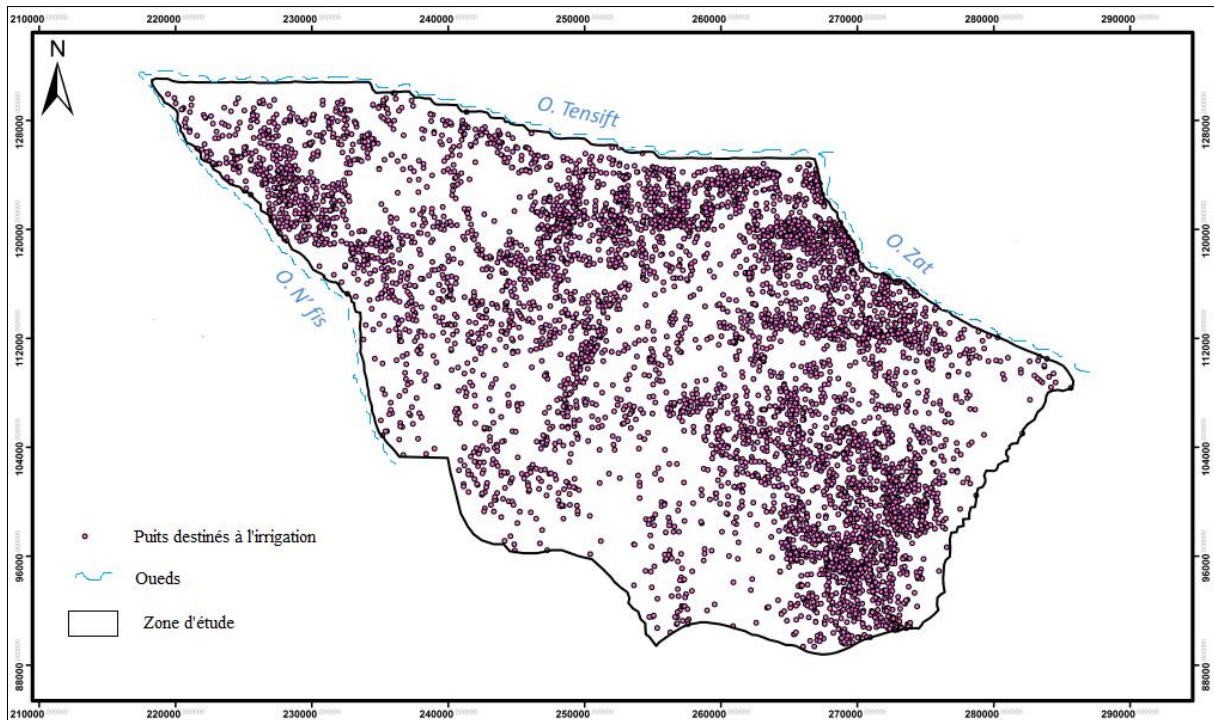


Figure 29: Localisation des puits destinés à l'irrigation dans la zone d'étude

VIII .2.6.3 Prélèvements Golfs

Le golf demande beaucoup de manipulations, nocives pour l'environnement. En effet, les tonnes d'eau nécessaires à l'entretien du gazon, sans compter les engrais et autres polluants chimiques utilisés pour faire en sorte que l'endroit soit verdoyant.

Le golf est l'autre nouveau type de tourisme. Bien qu'il soit ancré dans la culture depuis longtemps, ce n'est que ces dernières années qu'une véritable multiplication de nombre de parcours afin de satisfaire une plus large clientèle fut entreprise, et cela continue toujours aujourd'hui. A Marrakech, six golfs sont opérationnels (Tab. 6), avec un besoin annuel égal à 6,55 Mm³ en eau d'irrigation, ils se situent tous au niveau de la zone urbaine de Marrakech, périphérie de la ville. D'autres sont en cours de réalisation, avec un besoin annuel de 14,5 Mm³ pour eau d'irrigation (Tab. 6). D'après les données du PDAIRE, la consommation en eau de la ville de Marrakech est égale à 74,38 Mm³ dont 27% (donc près du tiers) sont attribués à la consommation des Golfs.

Tableau 6: Projets golifiques existants, en cours de réalisation et projetés (Boutakrabt, 2011)

Type	Intitulé du projet	Besoins en eau annuelles en (Mm ³)
Golfs existants	Amelkis	0,85
	Royal Golf	1.6 à 2.5
	Assoufid	1
	CMP	
	Al Maaden	1
	PGP	1,5
Golfs en cours de réalisation 2010 - 2011	Atlas Golf Ressort	1
	Domaine Royal Palm	1,65
	Royal Ranches Marrakech	1
	Golf Akenza	1
	Golf Chrifia	1,2
	les Jardins de l'Atlas	1,5
	Douja Golf Ressort	1
Golfs en perspective de réalisation (avant 2015)	New Hivernage	1
	Paradise Golf Ressort	1
	Atlas Garden Ressort	1,5
	Golf de l'Ourika	1
	Alhambra	1,5
	Iberostar	0,8
	Seba Al Aqaria	1
	les Jardins Al Ajial	1
Golfs prévus (au delà de 2015)	Domaine Al Mansouria	1
	Al Bahia Golf Ressort	1
	Tritel	1
	Emaar	1

IX. CONCLUSION

Cette partie a été consacrée à l'élaboration d'une synthèse actualisée sur la zone d'étude et de ses ressources en eau, basée sur les données et documents existants, notamment en ce qui concerne les aspects géographie, climatologie, hydrologie, géologie et hydrogéologie.

La région d'étude est caractérisée par un climat très différencié. Elle est influencée à la fois par son éloignement de l'océan et par sa proximité de la chaîne du Haut Atlas. La zone est marquée par un climat continental de type aride, caractérisé par une faible pluviosité, et des températures moyennes élevées avec des écarts mensuels importants qui varient dans le temps et dans l'espace.

L'hydrologie de la zone d'étude est caractérisée par la présence de six cours d'eau, qui ne sont pas pérennes. Les oueds de la région ont des régimes annuels et mensuels très irréguliers avec des débits qui varient d'une année à une autre.

Les eaux des oueds de la région d'étude présentent une qualité moyenne à mauvaise. La détérioration de la qualité est essentiellement due aux rejets urbains et à l'utilisation des engrais au niveau des secteurs agricoles.

La lithostratigraphie de la zone d'étude montre une série stratigraphique, allant du primaire au quaternaire moyen. Ce bassin à joué au tertiaire et au quaternaire le rôle d'un avant fossé d'origine tectonique qui a été progressivement comblé par les matériaux de démantèlement de la chaîne Atlasique.

La zone d'étude renferme des nappes profondes importantes de point de vue superficie et débit. Ces réservoirs sont généralement calcaires à perméabilité de fissure, et se biseautent vers le Nord.

La nappe phréatique plio-quaternaire constitue de loin le réservoir d'eau le plus important dans la région d'étude, elle permet l'alimentation en eau potable de la région et l'approvisionnement en eau pour l'irrigation des parcelles agricoles et des parcours de golfs.

Le développement hydroagricole que connaît la région conjugué à l'effet des années successives de sécheresse ont engendré une surexploitation de la nappe phréatique.

Le faciès chimique des eaux souterraines est généralement bicarbonaté-calcique, résultant de l'infiltration d'eau ayant lessivées les calcaires et les silts du Haut Atlas. Plus à l'Est au niveau du bassin versant du Zat, ce faciès devient chloruré sodique.

**CHAPITRE II : MODELISATION DE LA PARTIE CENTRALE DU SYSTEME
AQUIFERE DU HAOUZ**

I. METHODOLOGIE

Dans l'objectif de visualiser à court, moyen et long termes l'impact de l'évolution croissante des prélèvements effectués sur la nappe du Haouz, en particulier dans le Haouz Central, le recours à la modélisation est l'un des moyens les plus adéquats à cette approche. Le modèle ainsi mis en place concerne la nappe phréatique du mio-plioquaternaire qui constitue la principale ressource en eau de la région. L'objectif de cette modélisation est une quantification des débits naturels transitant dans la nappe et la détermination de ces caractéristiques hydrodynamiques. Ceci dans le but de proposer un schéma global du fonctionnement de l'aquifère mio-plioquaternaire.

L'étude a consisté d'abord en l'analyse de la documentation analytique existante (rapports de thèses, études antérieures,...) puis en la collecte des données existantes archivées dans les services techniques spécialisés. Les études et monographies relatives à la géologie, l'hydrogéologie et les ressources en eau dans la région ont été collectées et exploitées.

Les données points d'eau ont été puisées dans les fichiers IRE auprès de l'Agences du Bassin Hydraulique de Tensift (ABHT) ainsi que dans les thèses soutenues à l'Université Cadi Ayyad de Marrakech (UCAM)

Les données relatives aux périmètres irrigués parviennent de l'office national de mise en valeur agricole (ORMVAH).

Ces données ont été traitées, corrigées et mises en base de données SIG pour les besoins de la présente étude. La modélisation a été réalisée par le logiciel GMS6.5, au niveau duquel un modèle conceptuel à été créé en utilisant les données géologiques et hydrogéologiques disponibles. Le but de ce modèle est de simplifier la réalité pour permettre au logiciel de calculer les paramètres souhaités. Cette étape est suivie par le calage du modèle en régime permanent, l'analyse de sensibilité des paramètres du modèle et le calage du modèle en régime transitoire.

II. SYNTHÈSE CRITIQUE DES DONNÉES

II. 1 INTRODUCTION

D'une manière générale, la fiabilité d'une modélisation hydrogéologique dépend avant tout de la quantité et de la qualité des données sur les caractéristiques et le fonctionnement de l'aquifère (Moustadraf, 2002). La première étape de cette étude consiste donc à rassembler et à faire une synthèse critique des données disponibles. Elle permet de rassembler tous les éléments nécessaires pour l'élaboration du modèle conceptuel du système aquifère.

Pour ce faire, sur la base des données recueillies auprès de l'ABHT, de l'ONEP, ORMVAH, des anciennes études sectorielles et des travaux de Sinan (1986), Razoki (2001), Abourida (2004), Lyakhloufi (2001), une synthèse des connaissances géologiques, climatologiques, hydrogéologiques, a été élaborée en s'attachant plus particulièrement à rassembler les éléments nécessaires à la mise en œuvre de la modélisation tels que :

- La géométrie de l'aquifère ;
- Les caractéristiques hydrauliques de l'aquifère ;
- La piézométrie ;....etc.

II. 2 DONNÉES GÉOLOGIQUES

Elles ont été obtenues en faisant une synthèse générale des données géologiques, dans des anciennes thèses telles que Sinan (1986) et Razoki (2001). Elles donnent une idée sur les différents terrains aquifères suivant les secteurs de la nappe. Elles permettent ainsi une reconnaissance verticale de la zone d'étude. La partie concernant la géologie est développée dans le chapitre I.

II .3 DONNÉES GEOMETRIQUES

La géométrie de l'aquifère est déterminée à partir de la connaissance des côtes du toit et du mur. Les valeurs des côtes du toit de l'aquifère du Haouz dans la zone d'étude correspondent à la surface topographique.

La zone d'étude (Haouz central) a été couverte par cinq campagnes de prospection électrique, réalisées respectivement en 1969, 1974, 1975, 1979, et 1980. Ces prospections avaient pour objectif la détermination de l'extension et l'épaisseur de la nappe ainsi que les côtes de son substratum. Malheureusement la carte du substratum n'a pas été faite au cours de cette étude et cela est dû au manque de données généralisées sur tout le secteur.

La carte du substratum adoptée correspond à celle obtenue dans le cadre de l'« Etude de gestion des principales nappes de la région hydraulique du Tensift ».

II .4 DONNEES CLIMATOLOGIQUES

Les données climatiques proviennent de l'ABHT, elles concernent les stations de Marrakech et de Tahanaout. On note l'absence de stations de mesure de l'évaporation, pour cela, on a utilisé les données de la station « lalla Takerkoust ». Les séries des données de précipitations et de températures ont été corrigées avant leur utilisation pour décrire la région de point de vue climatique.

II .5 DONNEES HYDROGEOLOGIQUES

II .5 .1. Cartes Piézométrique

Les cartes piézométriques utilisées sont celle de 1962 établie par Cochet et celle de 1971 établie par Bernert et Prost. Les deux Cartes ont présenté beaucoup de difficultés au moment de la digitalisation au niveau de la partie Sud – Ouest, car au niveau de cette partie les isopièzes sont fortement collés les un aux autres

II .5 .2 Historique piézométrique

Les fichiers du suivi piézométrique ont été collectés auprès de l'ABHT, ces fichiers représentent beaucoup de lacunes, parfois on note l'absence de données pendant 3 ou 4 ans successives.

II .6 PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES

Les paramètres hydrodynamiques ont été déterminés d'après l'analyse statistique des paramètres hydrodynamiques effectuée par Sinan. Pour la partie modélisation les valeurs de perméabilité et des coefficients d'emménagement utilisées sont obtenues à partir de l'ancien modèle du Haouz effectué en 2008.

II .7 DONNEES SUR LES PRELEVEMENTS SOUTERRAINS

II .7.1 Prélèvement pour l'alimentation en eau potable (AEP)

La région d'étude dispose d'un réseau important de puits et forages pour l'alimentation en eau potable. Les données relatives a l'AEP et qui sont nécessaires à la modélisation sont disponible auprès de l'office nationale de l'eau potable (ONEP), mais malheureusement on n'a pas pu avoir accès a ces données.

La seule information qu'on pouvait avoir auprès de l'ABHT, était sous forme de fichiers IRE contenant les coordonnées x, y des puits, la date de création, et le débit autorisé, sans avoir le suivi des prélèvements.

II .7.2 Prélèvements agricoles :

Les prélèvements agricoles ont fait l'objet de plusieurs enquêtes et estimations depuis 1971. Les fichiers établis lors de ces enquêtes sont archivés au niveau des directions responsables à savoir l'office régional de mise en valeur agricole (ORMVAH) et la direction régionale de l'hydraulique de Tensift (DRHT). De même que pour les données de l'alimentation en eau potable, on n'a pas pu avoir le suivi des prélèvements agricoles. Pour les besoins de la modélisation et notamment en régime transitoire, une base de données a été préparée, en saisissant un grand nombre de points qui dépasse les 8000 points, avec les débits autorisés appropriés.

III. MODELISATION DE LA PARTIE CENTRALE DE LA NAPPE DU HAOUZ

III.1. INTRODUCTION

Le constat établi depuis plusieurs années, de la baisse importante de la nappe du Haouz, fait apparaître la nécessité de disposer d'un outil numérique susceptible de simuler le comportement de ce système aquifère.

Plusieurs modélisations en régimes permanent et transitoire ont été réalisées dans le but d'une meilleure compréhension de l'écoulement de la nappe (PDAIRE, 1986. ABHT, 2004. ABOURIDA, 2007). Chacun de ces modèles utilise une discrétisation différente du domaine spatial et un état de référence également différent pour le calage.

Dans l'étude du Plan Directeur d'Aménagement Intégré des Ressources en Eau (PDAIRE) du bassin de Tensift réalisée en 1986, le modèle a été élaboré avec un maillage carré de 2 Km de côté, il a été calé en régime permanent en utilisant le logiciel « MHYDRO2D » et cela en se basant sur deux états piézométriques différents : L'état piézométrique de 1962 pour le secteur de N'fis et celle de 1972 pour le Haouz central et la Tessaout, ce découpage a été fait car c'était impossible d'identifier une période alliant une relative stabilité piézométrique de la nappe du Haouz sur son ensemble. Le calage en régime permanent a permis d'avoir un ordre de grandeur de la transmissivité sur l'ensemble du domaine d'étude.

Le calage en régime transitoire a été fait sur la période comprise entre 1972 et 1986, avec un pas annuel en utilisant le logiciel « MARTHE » et il a permis d'avoir un ordre de grandeur du coefficient d'emménagement au niveau domaine.

En 2004, et dans le cadre de l' « Etude de Gestion des Principales Nappes de la Région Hydraulique du Tensift ». Un modèle numérique de la nappe phréatique du Haouz-Mejjate a été élaboré sous environnement GMS3.1 avec le code Modflow 2000. Il est composé d'un maillage régulier de mailles carrées de 500 m de côté, couvrant une superficie totale de 5200 Km². Le modèle a été calé en régime permanent en utilisant l'état piézométrique de 1972, et en considérant négligeables les infiltrations des pluies sur toute la plaine.

Le calage en régime transitoire a été fait sur la période comprise entre 1972 et 2001. Après calage, le modèle a restitué la distribution des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère a savoir les perméabilités et les coefficients d'emménagement, les bilans

hydrauliques et l'évolution piézométrique. L'état piézométrique final calculé étant celui de 2001.

Le modèle élaboré par ABOURIDA, 2007 couvre une superficie de 4500 Km², la modélisation a été faite par le programme Modflow 2000, sous interface Modflow, en utilisant un maillage kilométrique, la modélisation s'est limitée au niveau permanent et elle a été faite en deux étapes :

- Reproduction du modèle élaboré en 1971 en régime permanent ;
- Mise à jour du modèle en régime permanent, en intégrant les données hydrogéologiques acquises depuis cette date.

Le calage en régime permanent, a permis d'établir une carte piézométrique calculée, ainsi qu'une carte de distribution des perméabilités au niveau de la zone d'étude.

L'ensemble de ces travaux concluait la dégradation de la piézométrie de l'aquifère du Haouz en cas d'augmentation des prélèvements.

Le travail réalisé dans le cadre de cette étude a pour but d'élaborer un modèle numérique de la partie central de la nappe du Haouz en utilisant un maillage fin (250m de côté).

La modélisation de l'aquifère de la zone d'étude va se dérouler selon les étapes suivantes :

- Définition du modèle conceptuel ;
- Construction du modèle d'écoulement de la nappe du Haouz ;
- Calage du modèle en régime permanent ;
- Tests de sensibilité ;
- Vérification du modèle en régime transitoire.

III. 2.MODELE CONCEPTUEL

III. 2. 1 GENERALITES

Un modèle conceptuel est une représentation des différentes unités géologiques et hydrogéologiques d'un système aquifère. Il se présente sous la forme de bloc diagramme ou de coupe géologique. La nature de ce modèle va déterminer la dimension et la forme de la grille du modèle hydrodynamique (Moustadraf, 2002). Le but de cette

étape est de simplifier la réalité du terrain afin de permettre au modèle hydrodynamique de calculer les données souhaitées. Cette étape est primordiale car la simplification ne doit pas dénaturer le problème. Il est très important que le modèle conceptuel soit une représentation fidèle des conditions hydrogéologiques. Ceci nécessite une bonne connaissance de la géologie et de l'hydrogéologie du secteur. Dans tous les cas, il faut justifier la simplification.

La première étape dans la construction d'un modèle conceptuel est la définition de l'extension et des limites du domaine de modélisation hydrodynamique. En effet un modèle hydrodynamique nécessite de définir ses conditions aux limites (potentiel imposés, flux imposés ou flux nul...).

III. 2. 2 CHOIX DES LIMITES DU DOMAINE DE MODELISATION

Le système hydrogéologique dans la région du Haouz, est constitué par une succession complexe de séries lenticulaires, argilo-marneuses ou formées d'éléments grossiers, d'âge plio-quaternaire reposant sur un substratum marneux d'âge miocène. Ce système renferme une nappe libre dont l'épaisseur varie entre 10 à 20 m au Nord et 70 m au Sud. (Sinan, Razack, 2006).

La zone retenue pour la modélisation hydrodynamique couvre une superficie totale de

1 528 Km². Elle est limitée par (Fig.30) :

- l'oued Tensift au Nord ;
- Le Haut Atlas au Sud ;
- l'oued Zat à l'Est ;
- l'oued N'fis à l'Ouest.

III. 2.3 CONDITION AUX LIMITES DU SYSTEME HYDROGEOLOGIQUE

En tenant compte de l'allure piézométrique reflétée par divers états depuis 1962 et en découpant au sein de la zone ciblée par la présente étude, le système hydrogéologique sera délimité comme suit (Fig.36) :

- Une limite à potentiel imposé au Sud-Est correspondant en partie à l'isopièze 810m ;
- Une limite à flux nul le long de la partie infiltrante de l'oued Zat;

- Une limite à flux nul au Sud-Ouest correspondant à la limite de la plaine ;
- Des limites drains, correspondant aux parties drainantes des Oueds N'Fis, Rhéraya, Issil, Ourika et Zat ;
- Une limite drain dans la partie Nord correspondant à l'oued Tensift.

Le toit est représenté par la surface topographique du sol, il constitue une zone de recharge par la pluie pour le système (Fig.31). A l'opposé des études passées, dans le cadre de la présente étude, la recharge par les eaux de pluie a été prise en considération en tenant en compte les affleurements en surface. La carte du toit est obtenue en utilisant le modèle numérique de terrain (30 m), cette carte montre que les altitudes varient entre 320 m dans la partie Nord-Ouest et 900 dans la partie Sud Est.

Au niveau de la plaine, la majeure partie des formations mio-plioquaternaires reposent sur les marnes et argiles du mio-pliocène (Abourida, 2007). D'après la carte du niveau NGM du substratum (Fig.32), on remarque un approfondissement de ce dernier du Nord vers le Sud avec des structures concentriques au niveau de la rive droite de l'oued N'fis.

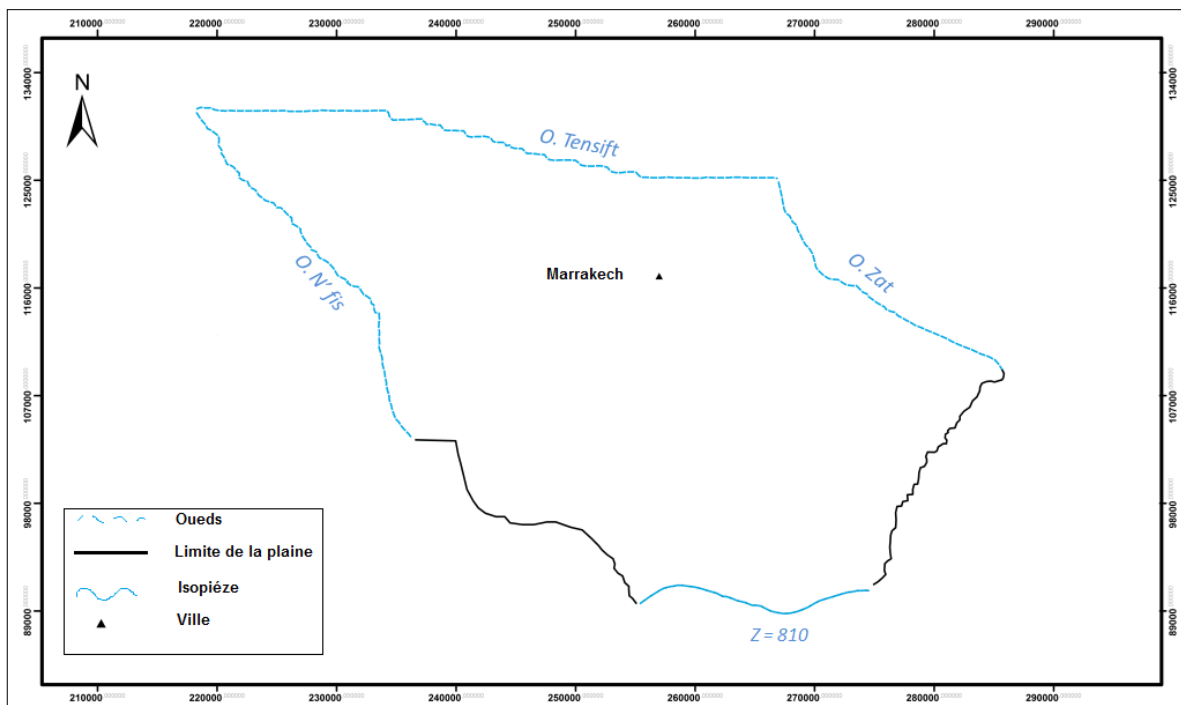


Figure 30 : Localisation de la zone d'étude

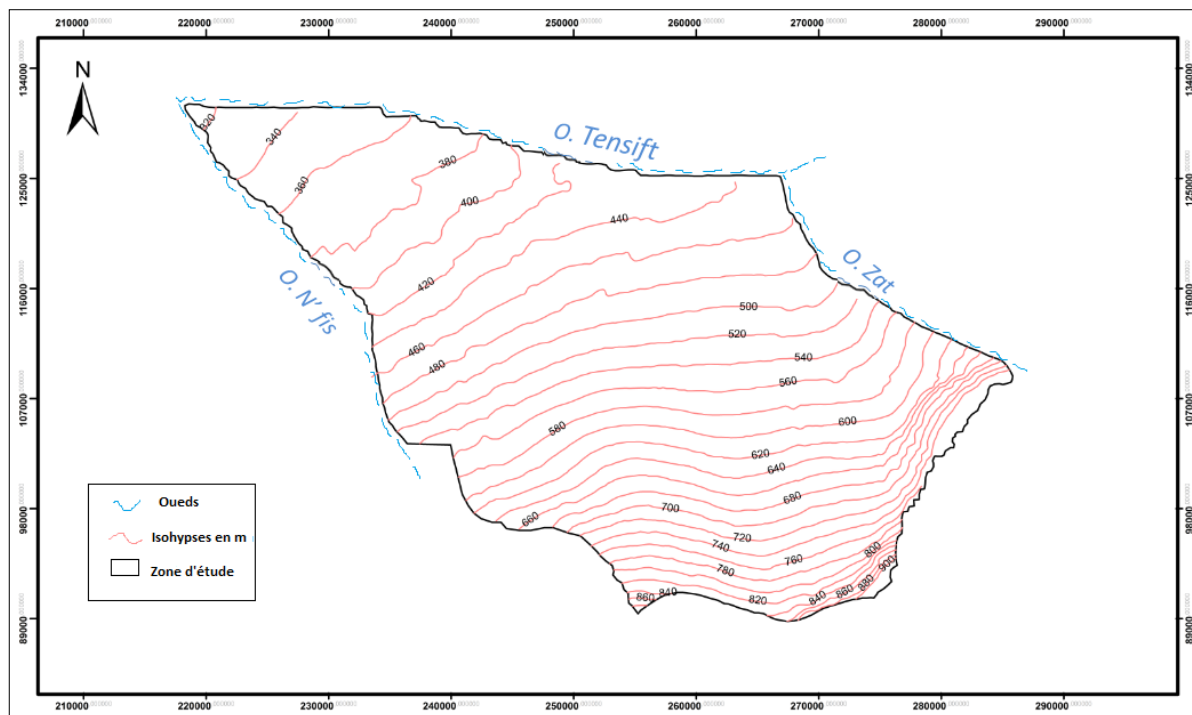


Figure 31 : Carte du toit de l'aquifère

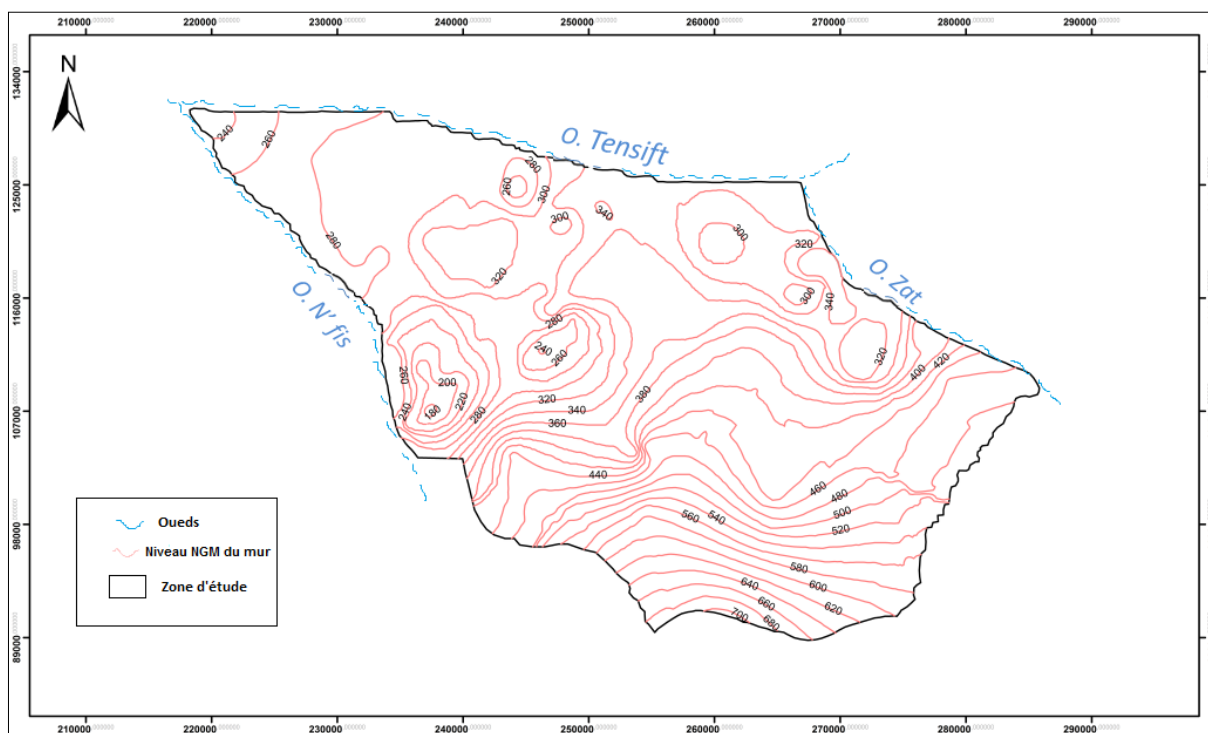


Figure 32 : Carte du mur de l'aquifère

IV. MODELISATION DE L'ÉCOULEMENT DE LA NAPPE

Les objectifs du modèle d'écoulement de la nappe sont la quantification des débits naturels transitant dans la nappe et la validation des conductivités hydrauliques permettant la reconstitution de la piézométrie et ainsi mieux appréhender le fonctionnement hydrodynamique du système.

Le travail de modélisation hydrodynamique est réalisé à l'aide du code de calcul MODFLOW 2000™ ("Modular Three Dimensional Finite Difference Ground-Water Flow Model") développé par l'United State Geological Survey sous interface GMS 6.5.

L'équation générale aux dérivées partielles utilisée dans le code MODFLOW pour résoudre l'écoulement transitoire au sein d'un aquifère tri-dimensionnel, continu, hétérogène et anisotrope est la suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Où :

h : potentiel hydraulique [L] ;

K : tenseur de conductivité hydraulique [L.T-1] ;

Ss : coefficient d'emmagasinement spécifique [L-1] ;

t : temps [T].

La résolution de l'équation générale de l'écoulement est effectuée sur un maillage tridimensionnel, contraint par les conditions aux limites du système. Parmi les grandeurs utilisées, on peut distinguer :

- les variables d'entrée et les variables de sortie ;
- les paramètres hydrogéologiques du système aquifère qui correspondent à sa géométrie et à la distribution spatiale des perméabilités et des coefficients d'emmagasinement.

A partir du modèle conceptuel, un modèle hydrodynamique peut être construit. Cette étape consiste à créer une grille de modélisation dont la forme et la taille dépendent à la fois de la surface de la zone d'étude définie dans le modèle conceptuel et de la répartition des ouvrages de données. Toutes les données qui seront nécessaires pour la modélisation hydrodynamique seront introduites dans le modèle : géométrie des couches aquifères, les conditions aux limites dans le modèle et les valeurs des

paramètres hydrauliques de l'aquifère (conductivité hydraulique, recharge,...). Cette étape est très importante car elle conditionne la suite du travail. Une fois la structure du modèle mise en place (introduction des données, déclaration des différents paramètres), une première tentative de calage en régime permanent sera réalisée.

Toutes les données nécessaires à la modélisation ont été intégrées dans un SIG (géré par le logiciel ArcGis 9.3) notamment les cartes du toit et du mur de l'aquifère, les limites de la zone d'étude, les cartes piézométriques et les points de contrôles, la carte de la conductivité hydraulique, la carte des périmètres irrigués, la carte géologique de la région... Une telle base de données permet :

- de disposer d'une source d'informations unique et homogène ;
- de faire rapidement des mises à jour ;
- de superposer aisément différentes couches de données ;
- de disposer de fonctionnalités avancées pour réaliser des opérations complexes (Sélections, analyses thématiques,...).

IV.1. CONSTRUCTION DU MODELE

Deux approches peuvent être utilisées pour construire un modèle sous l'interface GMS: l'approche « Grille » et l'approche « Modèle conceptuel »

- L'approche « Grille », qui est assez classique, consiste à travailler directement sur une grille 3D et à affecter maille par maille les propriétés hydrogéologiques du système ;
- L'approche « Modèle conceptuel » permet d'utiliser les outils SIG du module « Carte » de GMS pour développer un modèle conceptuel du site à modéliser. Dans la plupart des cas, cette approche est plus efficace que l'approche « Grille » car elle simplifie les tâches d'élaboration du maillage et d'affectation des conditions aux limites.

Dans notre cas, le modèle utilisé concerne l'approche « Modèle conceptuel » les données étant préparées via des « Couvertures » (« Coverages ») spécifiques à chaque type de données sous Arc Gis.

IV.1.1. Discrétisation du domaine d'étude

Les équations hydrodynamiques en milieu souterrain sont des équations différentielles fortement non linéaires difficiles à résoudre avec les moyens analytiques habituels. Pour cela, le système aquifère est alors découpé en réseaux de mailles constituant les lignes et les colonnes.

Le domaine d'étude a été discrétisé par un maillage carré régulier de 250 m de côté. La dimension des mailles a été choisie en fonction de la superficie de la zone d'étude et de la densité des données caractérisant certains secteurs. En général, plus les mailles sont petites mieux elles représentent les contours de l'aquifère et meilleure est la précision.

Ces mailles sont distribuées sur 212 lignes et 288 colonnes selon la direction Est-Ouest et Nord-Sud (Fig.33).

Dans l'ensemble du modèle, on compte 61056 mailles. Chaque maille est un parallélépipède dont la face supérieure correspond au toit de l'aquifère et la face inférieure au mur.

IV.1.2. Construction de la géométrie du modèle

L'affectation des valeurs des côtes du toit et du mur dans chaque maille du modèle hydrodynamique a été réalisée par interpolation à partir des cartes numérisées. Cette interpolation a été réalisée par la méthode linéaire au niveau de GMS.

Des coupes verticales (Fig.34, 35) ont été effectuées pour chaque rangée de mailles du modèle hydrodynamique afin de vérifier la cohérence de l'ensemble de la géométrie, les courbes ne montrent aucun chevauchement ce qui signifie que la géométrie de l'aquifère est bien reproduite.

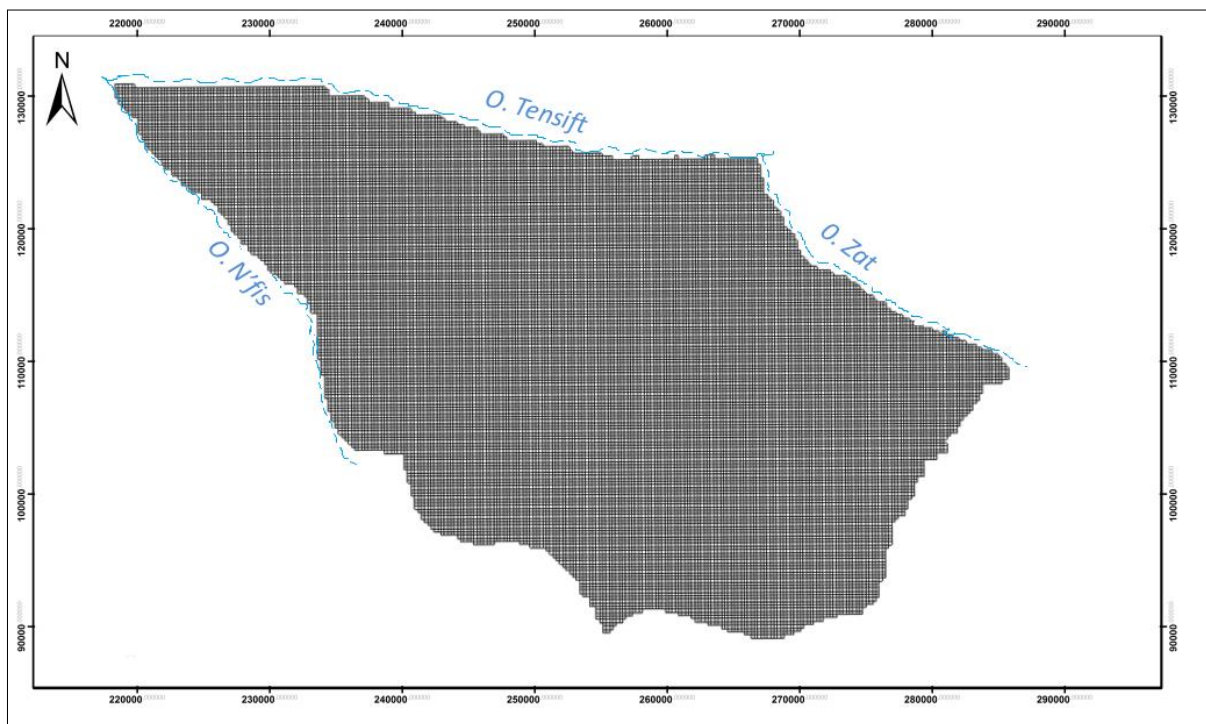


Figure 33 : Maillage du secteur d'étude

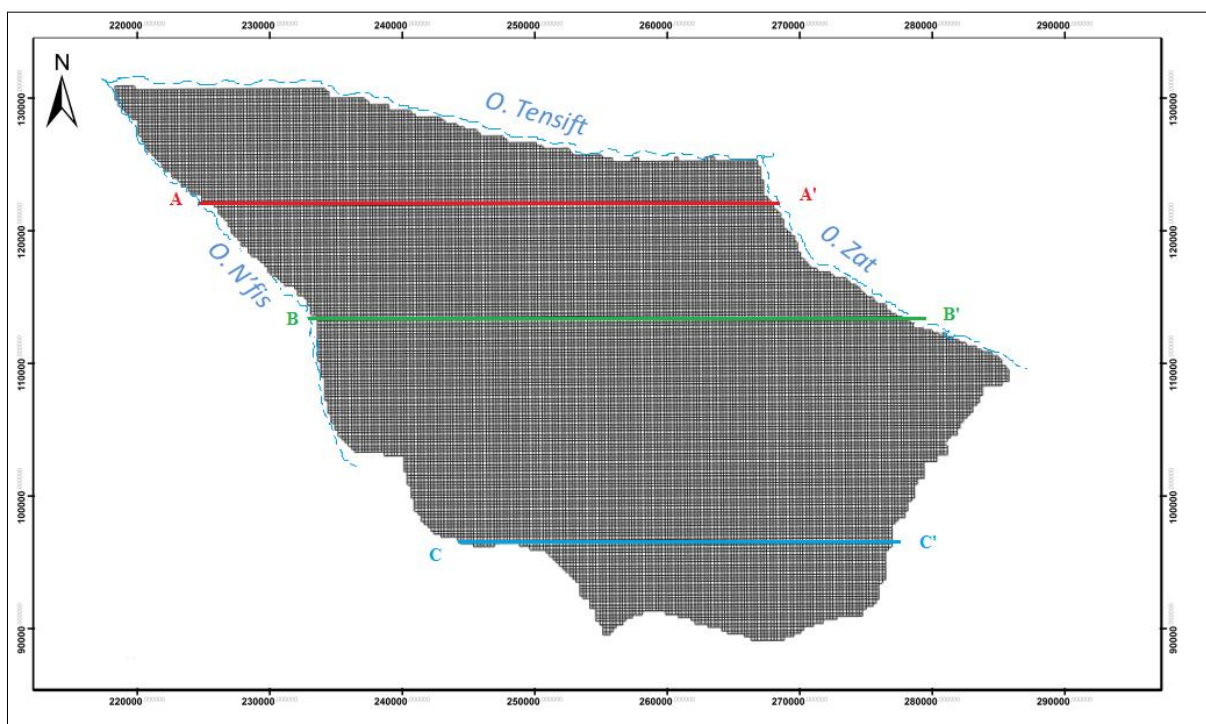


Figure 34 : Emplacement des coupes, permettant la détermination de la géométrie de l'aquifère dans le Haouz central

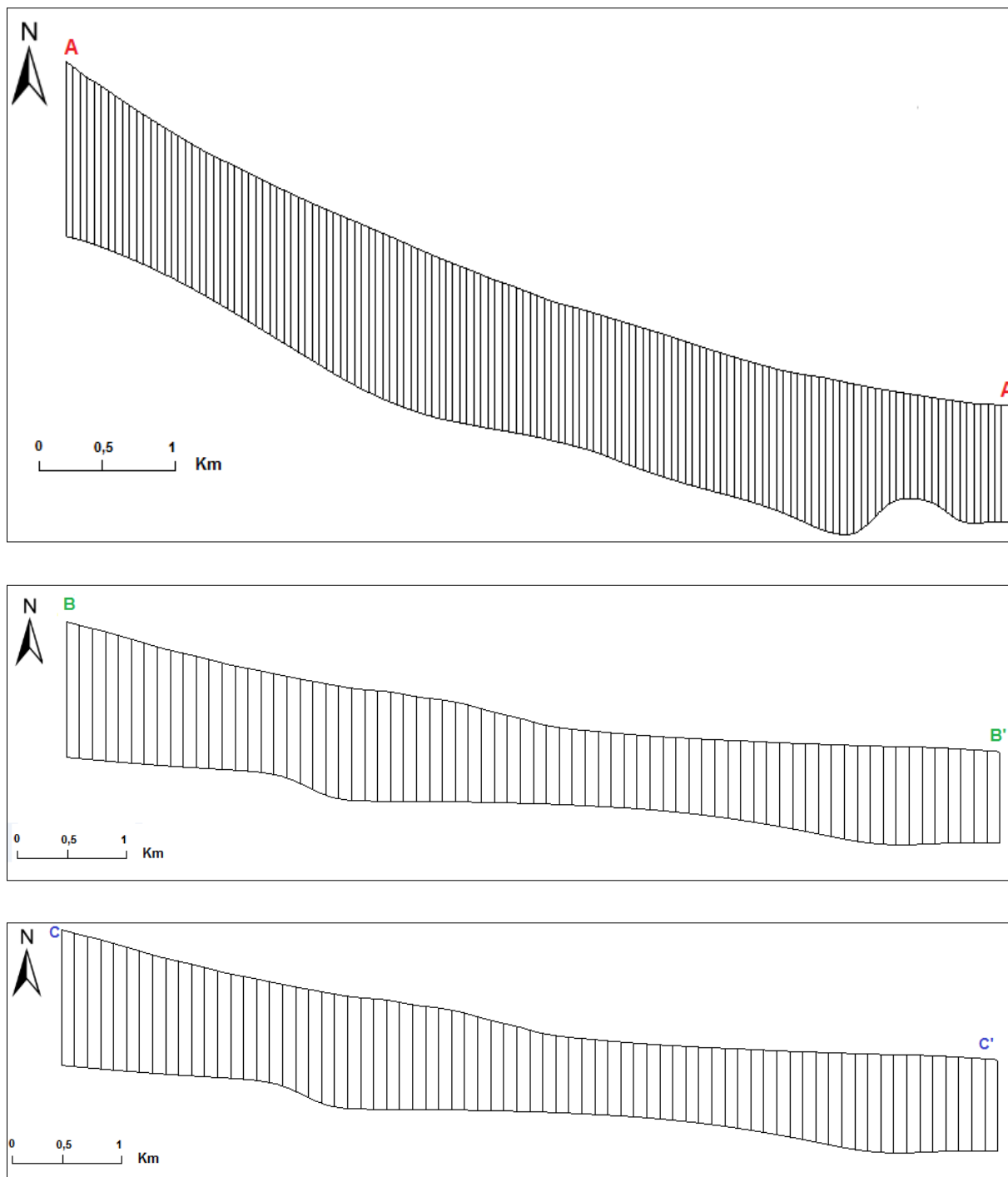


Figure 35 : Coupes verticales représentant la géométrie de l'aquifère
Exagération : 30

IV.1.3. Conditions aux limites

Les limites du modèle ont déjà été précisées dans la partie « modèle conceptuel ». Ce paragraphe les reprend et explicite la façon de les prendre en compte avec GMS. Elles sont de trois types (Fig.36) :

IV.1.3.1 Condition à charge imposée

Ce type de limite se traduit par un potentiel fixé par l'utilisateur. Quels que soient les paramètres utilisés et quelles que soient les sollicitations décrites (pompage, infiltration,...), ce potentiel ne change pas.

Cette condition se manifeste dans la limite Sud-Est du modèle correspondant en partie à l'isopièze portant la valeur 810 m.

IV.1.3.2 Condition drain

Ce type de conditions correspond à une alimentation des oueds par les eaux de la nappe phréatique.

Cette condition est appliquée au niveau des parties drainantes des oueds de N'fis, Rhéraya, Issil, Ourika, Zat et sur l'oued Tensift qui constitue le principal drain de la nappe du Haouz au niveau de toute la plaine.

IV.1.3.3 Conditions à flux nul

Ce type de condition a été affecté aux autres limites du domaine correspondant à la partie non drainante de l'oued Zat dans le côté Est et la limite de la plaine dans la partie Sud-Ouest.

IV.1.4 Recharge

Pour le secteur d'étude, la recharge s'effectue essentiellement par :

- Les pluies efficaces. Pour le régime permanent se sont les pluies de 1962 qui ont été prises pour le calcul de l'infiltration. Les infiltrations ont été calculées en adoptant des coefficients d'infiltration propres à chaque formation géologique de la zone d'étude (Tab.7).
- L'infiltration au niveau de la partie amont des oueds parcourant la région d'étude à savoir le Zat, l'Ourika, le Rhéraya et le N'Fis, le volume infiltré a été calculé en tenant compte des débits transitant par les Oueds, leur surface, et du coefficient d'infiltration adopté.

- Le retour des eaux d'irrigation. Pour cette partie, ce volume est négligé, car en cette date les périmètres irrigués n'étaient pas encore installés.

Tableau 7: Coefficients d'infiltration des formations géologiques

Formations géologiques	Indice d'infiltration (%)
Quaternaire moyen dépôt encroûtés	6
Villafranchien (conglomérats)	7
Mio-pliocène (dépôt encroûtés)	6
Quaternaire	9

IV.1.5. Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère

IV.1.5.1. La conductivité hydraulique

Les valeurs de la conductivité hydraulique qui ont été introduites dans le modèle correspondent à celles obtenues par l'ancien modèle de la nappe du Haouz établi en 2004 dans le cadre de l'« Etude de Gestion des Principales Nappes de la Région Hydraulique du Tensift »

IV.1.5.2. Le coefficient d'emmagasinement

Pour une nappe libre, le coefficient d'emmagasinement est égal à la porosité efficace de l'aquifère. En régime permanent, il n'est pas nécessaire d'introduire les valeurs de ce paramètre.

IV.2. SIMULATION DE L'ÉCOULEMENT DE LA NAPPE

Les simulations ont été réalisées en régime permanent, puis en régime transitoire. La simulation en régime permanent a porté sur les données de l'année 1962. Elle a pour objet de caler le modèle en ajustant la répartition spatiale de la conductivité hydraulique ainsi que la recharge du système. La simulation en régime transitoire nécessite les résultats provenant du calage du modèle en régime permanent et a pour objet de simuler l'évolution hydrodynamique du système aquifère sous diverses conditions d'exploitation

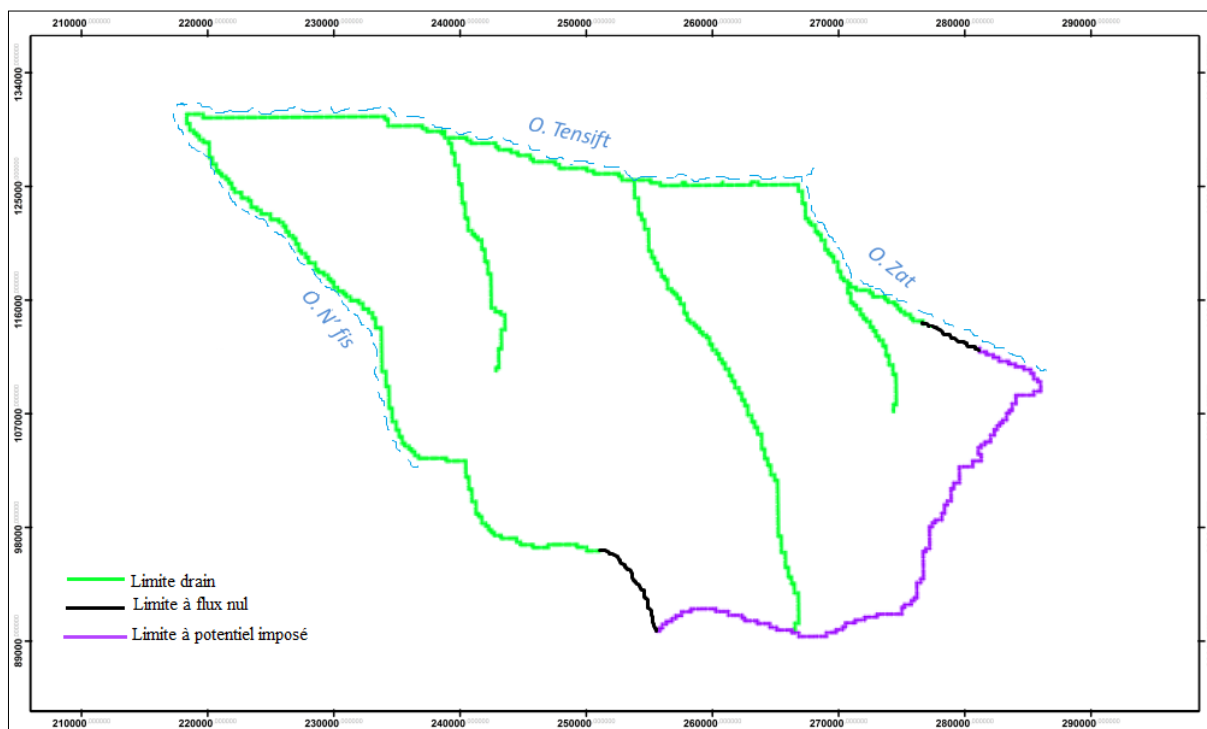


Figure 36 : Conditions aux limites du modèle numérique de la nappe du Haouz central

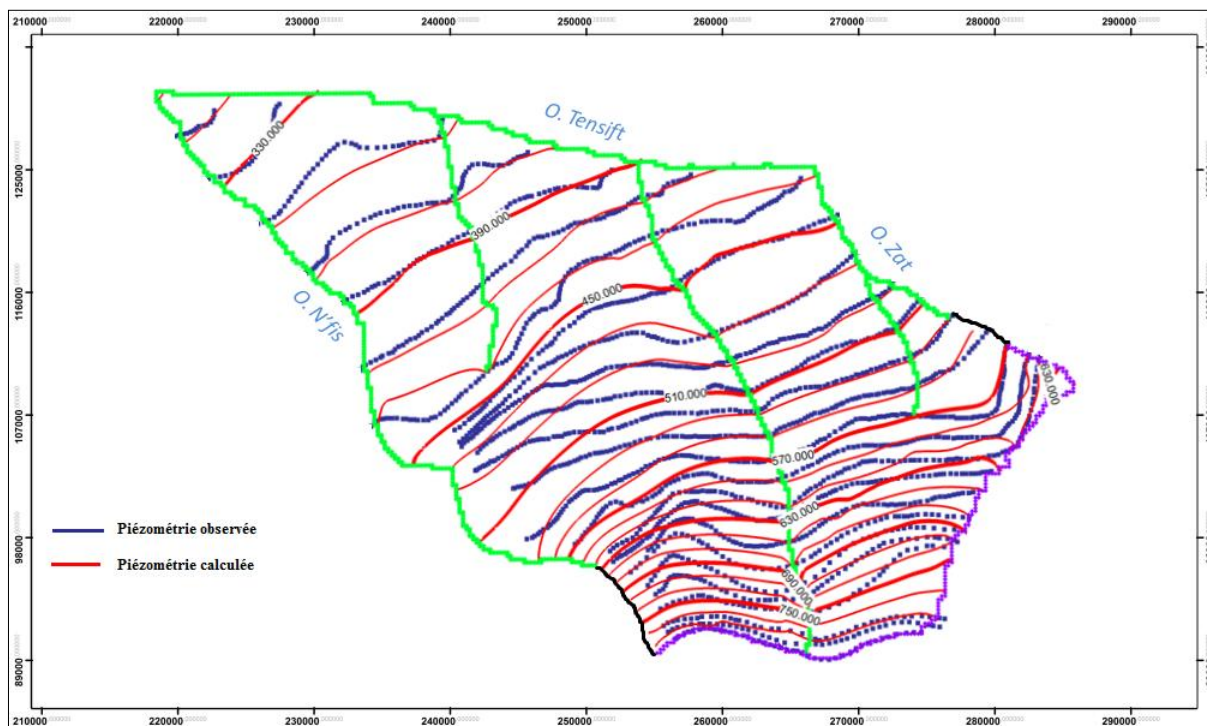


Figure 37 : Comparaison de la piézométrie calculée et observée (1962)

IV.2.1.Simulation en régime permanent

La simulation d'un régime hydrodynamique permanent est nécessaire et essentielle à toute simulation en régime transitoire. Cette étape permet de valider les choix effectués sur la répartition spatiale des paramètres hydrodynamiques au cours de la phase du calage (Dupuy, 1997).

Le champ de conductivité hydraulique introduit dans le modèle constitue une base solide du modèle hydrodynamique. Pour cela, il a été décidé de caler le modèle en ne faisant varier dans un premier temps que la recharge du système. Des valeurs respectivement de 6, 7 et 9% des précipitations ont été utilisées pour restituer la piézométrie observée. La variation de la recharge seule n'a pas pu aboutir à un calage satisfaisant. Le champs de conductivité hydraulique a été ensuite modifié dans la partie Nord, Sud et Sud-Sud-Ouest jusqu'à ce que les équipotentielles résultant de la simulation vérifient la carte piézométrique mesurée, en admettant une certaine marge d'erreur acceptable.

La figure 37 représente la carte piézométrique obtenue après calage des conductivités hydrauliques et des recharges pour l'année 1962.

Comme le montre l'analyse visuelle de la carte obtenue, le tracé des courbes isopièzes issues de la simulation représente d'une façon générale le tracé obtenu manuellement sur l'ensemble du territoire modélisé. Les gradients hydrauliques et le sens d'écoulement relevés lors de la campagne piézométrique sont bien reproduits par la simulation. Le calage semble donc satisfaisant.

Le modèle calé permet d'accéder au bilan hydrique du domaine. Le tableau 8 ci-dessous montre le bilan des flux qui entrent dans le système et ceux qui en sortent pour la simulation en régime permanent pour l'année 1962. Ce tableau montre que les drains constituent la principale sortie du système aquifère.

Tableau 8: Bilan hydrique en m³/s du secteur d'étude donnée par le calage du modèle en régime permanent

Termes du bilan en m³/s	Entrées	Sorties	Entrées - Sorties
Limite Sud - Est	3,895	0,249	3,646
Recharge	2,609	0,000	2,609
Drains	0,000	6,197	-6,197
AEP	0,000	0,060	-0,060
Total	6,505	6,506	

Le bilan donné par le logiciel a été comparé au bilan calculé (Tab.9) pour l'année 1962 afin de vérifier les résultats obtenus.

Tableau 9: Bilan hydrique calculé en m³/s du secteur d'étude, année 1962.

Termes du bilan (m³/s)	Entrées	Sorties	Entrées - Sorties
Limite Sud - Est	3,827	0,240	3,687
Recharge	2,504	0,00	2,564
Drains	0,00	6,04	-6,204
AEP	0,00	0,06	-0,06
Total	6,331	6,34	

Les termes du bilan ont été calculés comme suit :

Les débits transitant au niveau de la limite Sud-Est et au niveau des drains ont été calculés en utilisant la loi de Darcy :

$$Q = T \times L \times I$$

Avec : **Q** : Débit (m³/s)
T : Transmissivité (m²/s)
I : Gradient hydraulique
L : Longueur du front d'écoulement (m)

La carte piézométrique de base utilisée pour le calcul des gradients hydrauliques est celle de 1962, élaborée par Cochet. La longueur des fronts a été calculée sous ARCGIS. Les valeurs de transmissivité ont été prises de la carte de transmissivité du Haouz élaborée par l'ABHT (2008).

Les recharges de la nappe par les pluies et par les oueds ont été calculées en utilisant les relations suivantes :

- **Recharge par les précipitations**

$$R_{(Précipitations)} = P_{(m/s)} \times S_{(m^2)} \times CI$$

Avec :
P: Pluies (m/s)
S: Surface (m²)
CI: Coefficient d'infiltration

- **Recharge par les oueds**

$$R_{(Oueds)} = Q_{(m^3/s)} \times CI$$

Avec : **Q** : Débit (m³/s)
CI : Coefficient d'infiltration.

En analysant les tableaux 8 et 9, on constate qu'ils représentent approximativement les mêmes valeurs sur tous les termes du bilan.

Les figures 38 et 39 représentent respectivement la carte de distribution des conductivités hydrauliques et la carte de répartition de la recharge du système aquifère obtenue par le logiciel après le calage en régime permanent. La carte de la distribution des perméabilités montre que la quasi-totalité du secteur présente une perméabilité comprise entre $1,28.10^{-6}$ et $1,1310^{-4}$ m/s

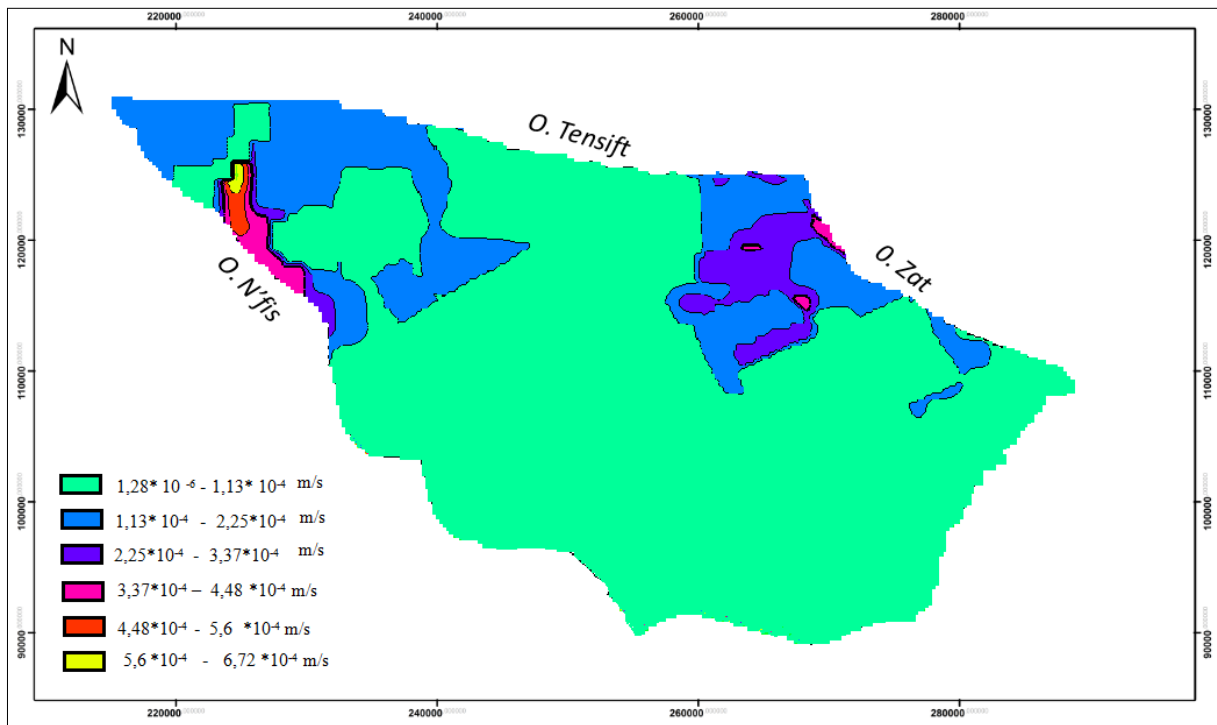


Figure 38 : Répartition géographique des conductivités hydrauliques après calage en régime permanent

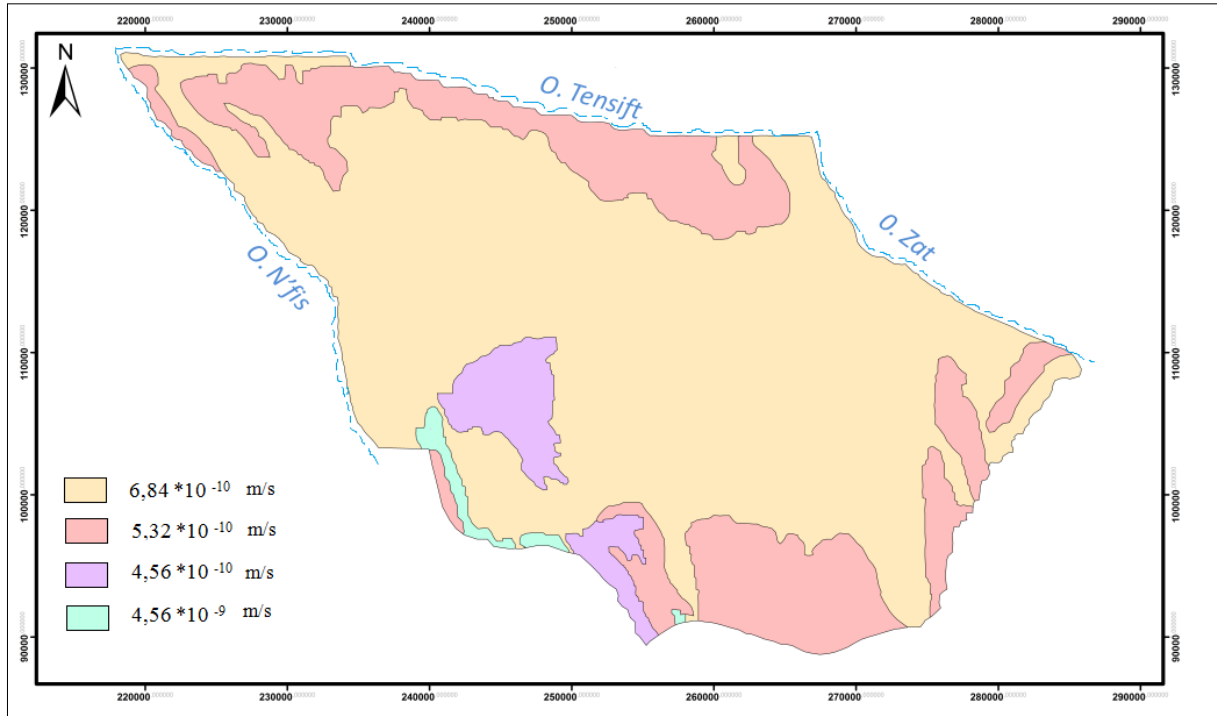


Figure 39 : Répartition géographique de la recharge du système aquifère après calage en régime permanent rapportée à la géologie de surface

IV.2.2. Sensibilité du modèle hydrodynamique

Les tests de sensibilité ont été effectués sur les paramètres utilisés pour le calage, c'est-à-dire la recharge par les précipitations et la conductivité hydraulique.

La sensibilité du modèle est testée par l'impact sur la piézométrie suite à la modification d'un seul des paramètres, les autres étant inchangés. Afin d'étudier la sensibilité du modèle, 11 points d'observations (Fig. 40) bien répartis sur l'ensemble du secteur ont permis d'évaluer les variations des charges hydrauliques après chaque modification.

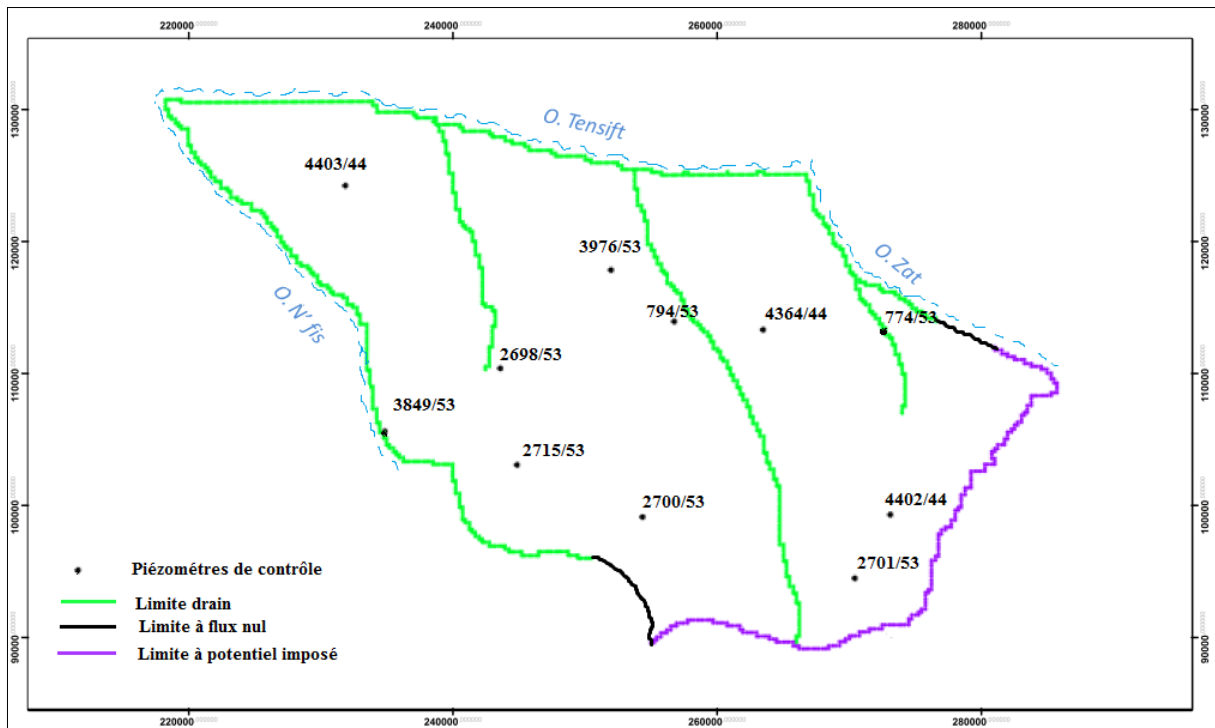


Figure 40 : Répartition géographique des points d'observation

Les critères que nous avons choisis pour quantifier la sensibilité du modèle dans chaque cas sont :

- **L'écart relatif moyen** : c'est à dire la moyenne des valeurs absolues des erreurs relatives d'estimations.

Elle est définie par la relation :

$$\bar{\epsilon}_r = \frac{1}{N} \sum_t \left| \frac{X_{sim1} - X_{sim2}}{X_{sim1}} \right|$$

- \bar{E}_r : Ecart relatif moyen
 N : Nombre de données
 X_{sim1} : Mesure simulée avant modification
 X_{sim2} : Mesure simulée après modification

- **La moyenne des valeurs absolues des écarts $|\bar{R}|$** c'est la moyenne des valeurs absolues des écarts, définie par l'équation :

$$|\bar{R}| = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |R_i|$$

Avec :

$$|R_i| = |X_{sim1} - X_{sim2}|$$

$|R_i|$: L'écart absolu entre les valeurs simulées avant et après modification

IV.2.2.1 Sensibilité à la recharge

Lors de la simulation et du calage du modèle, nous avons retenu pour la recharge des valeurs de $4,56 \cdot 10^{-10}$, $4,56 \cdot 10^{-9}$, $5,32 \cdot 10^{-10}$ et $6,84 \cdot 10^{-10}$ (m/s), selon les formations géologiques.

Pour une variation de la valeur initiale de $\pm 5 \%$, $\pm 10 \%$, $\pm 20 \%$, et $\pm 50 \%$, les tests de sensibilité ont montré les points suivants :

- La zone la moins sensible aux variations est la zone Est (piézomètres 774 et 4364), même pour des changements des recharges de 50%, les écarts entre les charges calculées avant et après modification ne dépassent pas les 0,013 m.
- La zone la plus sensible du secteur est la partie Sud-Ouest (piézomètres 2700 et 2715) avec une variation de 1,52 m pour une variation de recharge de 10% et peut atteindre 8m pour une variation de 50% de la recharge. La moyenne des valeurs absolues des écarts $|\bar{R}|$ est égale à 0,21 m et 2,08 m pour des modifications des recharges de $\pm 5 \%$ et $\pm 50 \%$ respectivement. (Tab. 10)

Ces résultats montrent que les incertitudes sur les données de recharge n'auront pas les mêmes effets sur les résultats du modèle et cela est dû au fait que le secteur ne représente pas la même sensibilité en toutes ses parties.

Tableau 10: Moyennes des valeurs absolues des écarts ($|\bar{R}|$) et écarts relatifs moyens ($\bar{\epsilon}_r$) calculés dans la zone d'étude après modification de la recharge

	R-5%R	R+5%R	R-10%R	R+10R	R-20%R	R+20%R	R-50%R	R+50%R
(\bar{R}) (m)	0,21	0,21	0,43	0,42	0,87	0,84	2,24	2,08
($\bar{\epsilon}_r$) (%)	0,0004	0,0004	0,0008	0,0008	0,0017	0,0016	0,0043	0,0040

Tableau 11: Moyennes des valeurs absolues des écarts ($|\bar{R}|$) et écarts relatifs moyens ($\bar{\epsilon}_r$) calculés dans la zone d'étude après modification de la conductivité hydraulique

	R-5%	k+5%	k-10%	k+10%	k-20%	k+20%	K-50%	K+50%
(\bar{R}) (m)	0,22	0,20	0,47	0,39	1,04	0,71	4,06	1,45
($\bar{\epsilon}_r$) (%)	0,0004	0,0004	0,001	0,001	0,002	0,001	0,008	0,003

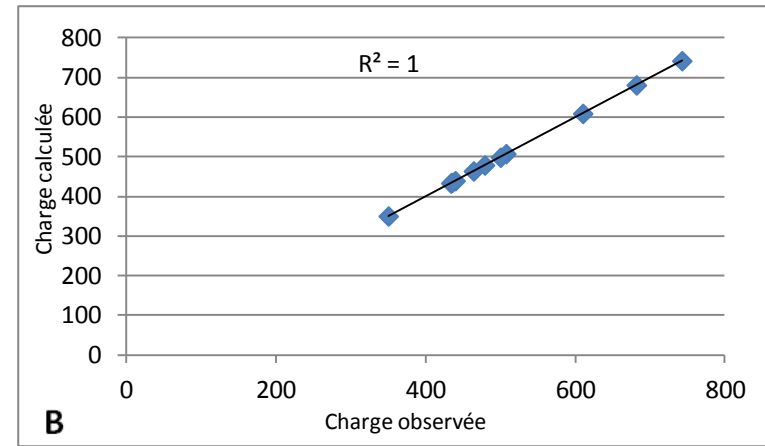
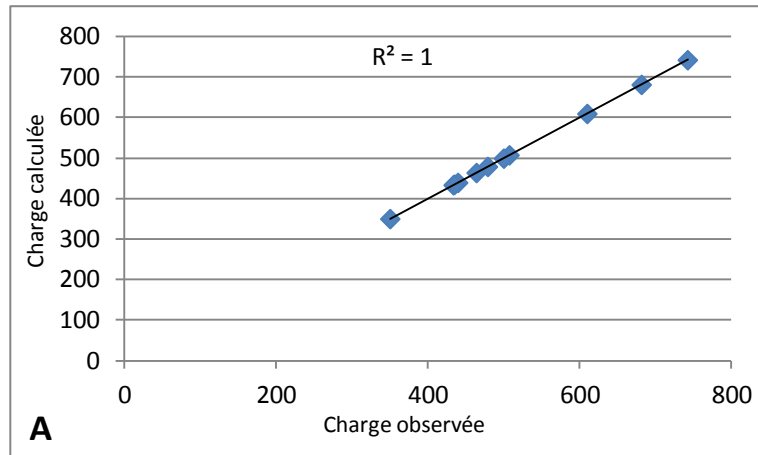


Figure 41 : Courbe de sensibilité obtenue pour des variations de recharge de R-5%R (A) et R+5%R (B)

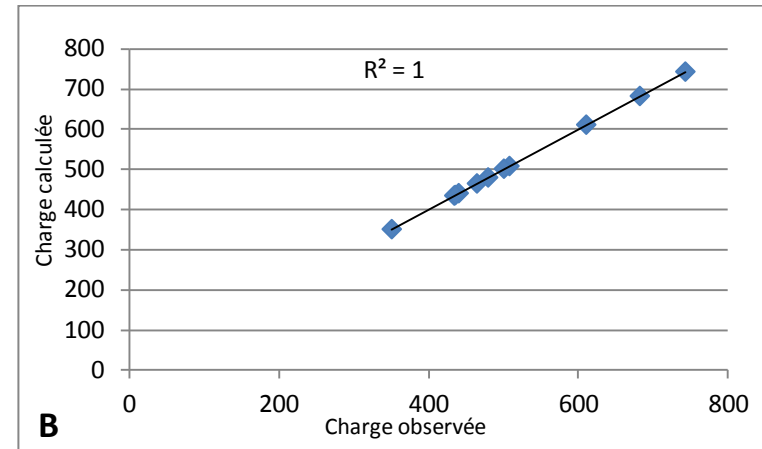
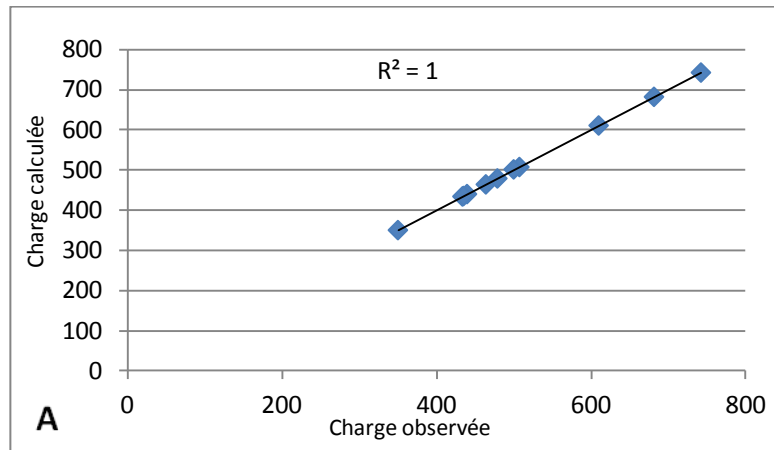


Figure 42 : Courbe de sensibilité obtenue pour des variations de recharge de R-10%R (A) et R+10%R (B)

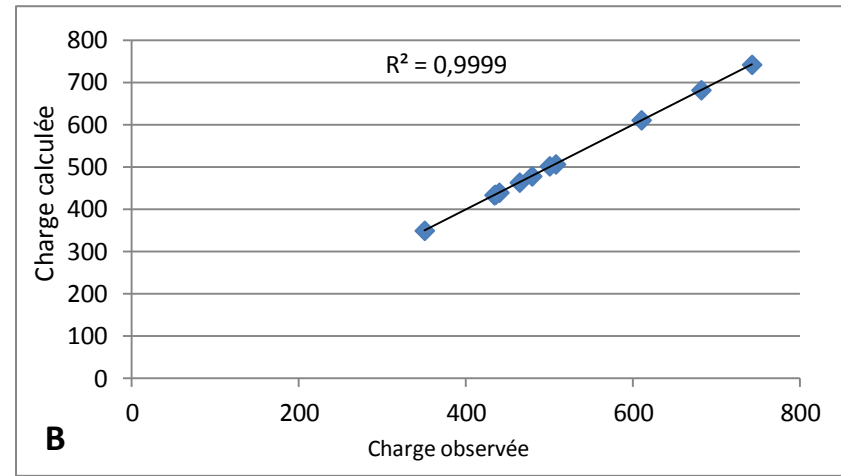
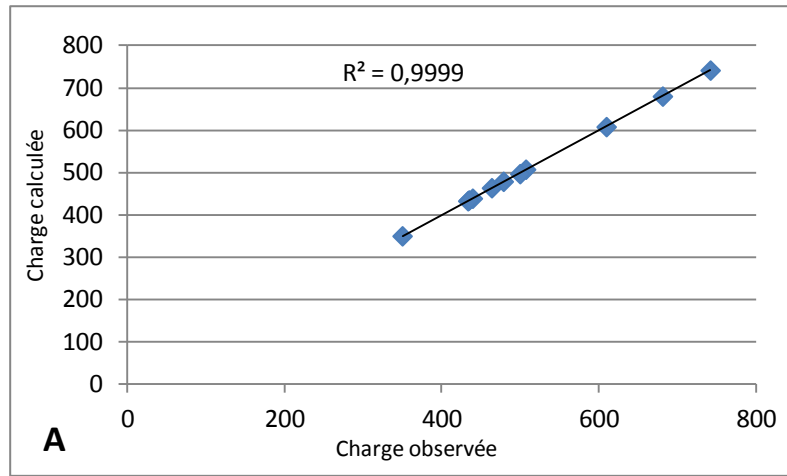


Figure 43 : Courbe de sensibilité obtenue pour des variations de recharge de R-20 %R (A) et R+20 %R (B)

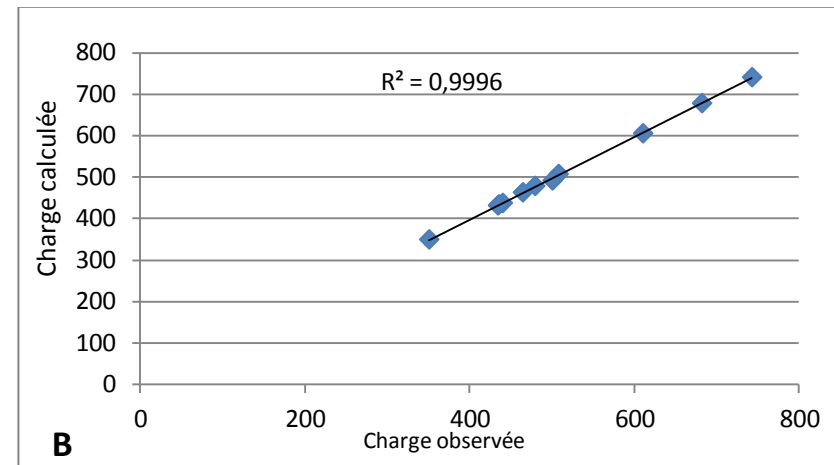
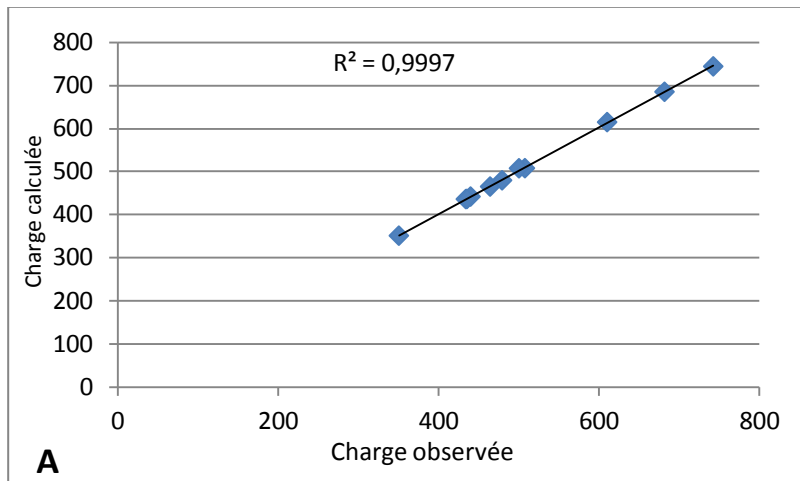


Figure 44 : Courbe de sensibilité obtenue pour des variations de recharge de R-50 %R (A) et R+50 %R (B)

Les figures 41, 42, 43, 44 présentent les courbes de sensibilité obtenues sur l'ensemble du domaine pour les différents essais. Ces figures montrent que le modèle réagit de façon quasi symétrique pour une même variation positive ou négative de la recharge par rapport à l'état non modifié.

IV.2.2.2 Sensibilité à la conductivité hydraulique

L'étude de la sensibilité du modèle à la conductivité hydraulique a montré les points suivants :

- La zone la plus sensible à ce paramètre est le Sud-Ouest. Au niveau de cette dernière l'écart absolu entre les valeurs simulées avant et après modification dépasse 1 m dès un changement de 10% de la conductivité hydraulique et atteint 14 m avec un changement de 50% (piézomètres 2715).
- Le piézomètre qui enregistre les variations les plus faibles même avec de grands changements de la conductivité hydraulique est 774 situé à l'Est.

Le tableau 11 résume les moyennes des valeurs absolues des écarts ($|\bar{R}|$) et les écarts relatifs moyens ($\bar{\epsilon}_r$), obtenus sur l'ensemble du domaine après modification de la conductivité hydraulique.

Les figures 45, 46, 47, 48 présentent les courbes de sensibilité obtenues sur l'ensemble du domaine pour les différents essais. Elles représentent l'évolution de la charge calculée en fonction de la charge observée.

D'après l'analyse des tests de sensibilité à la recharge par les précipitations et à la conductivité hydraulique, on peut déduire que le secteur d'étude réagit de la même façon vis-à-vis des changements des deux paramètres. La différence c'est que l'amplitude des variations est plus importante pour la conductivité hydraulique que pour la recharge par les précipitations.

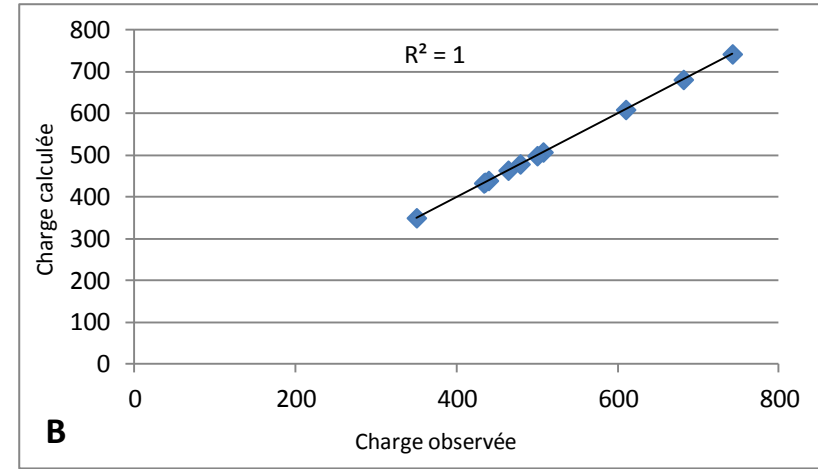
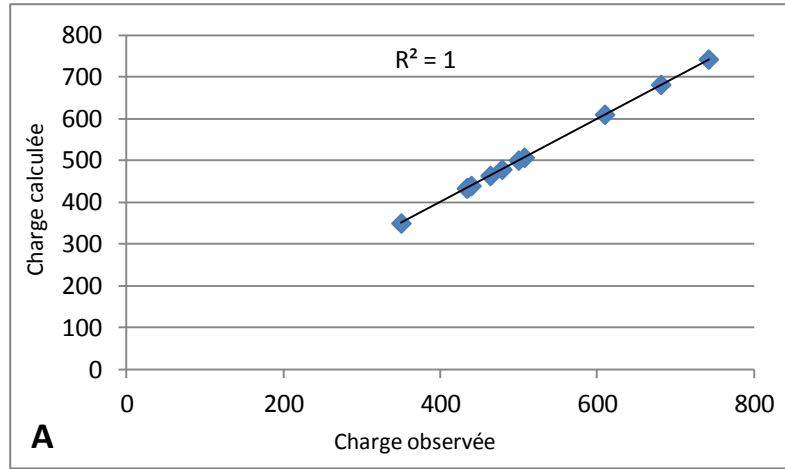


Figure 45 : Courbe de sensibilité obtenue pour des variations de conductivité hydraulique de K-5%K (A) et K+5%K (B)

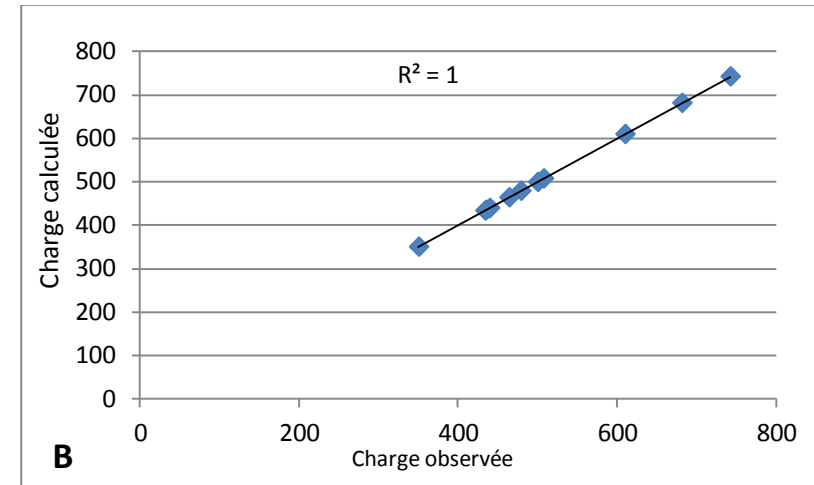
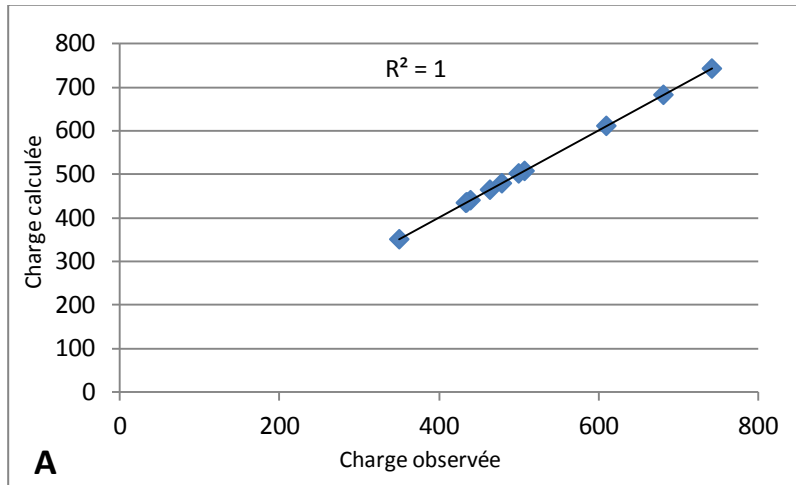


Figure 46 : Courbe de sensibilité obtenue pour des variations de conductivité hydraulique de K-10%K (A) et K+10%K (B)

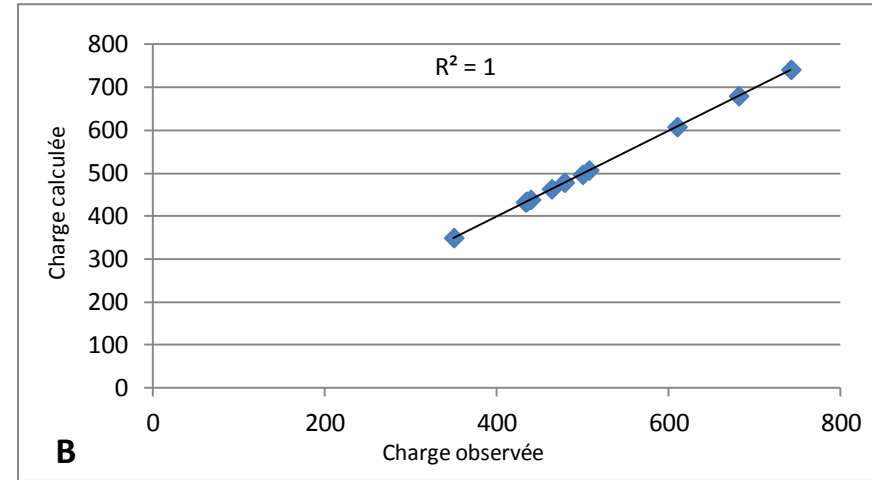
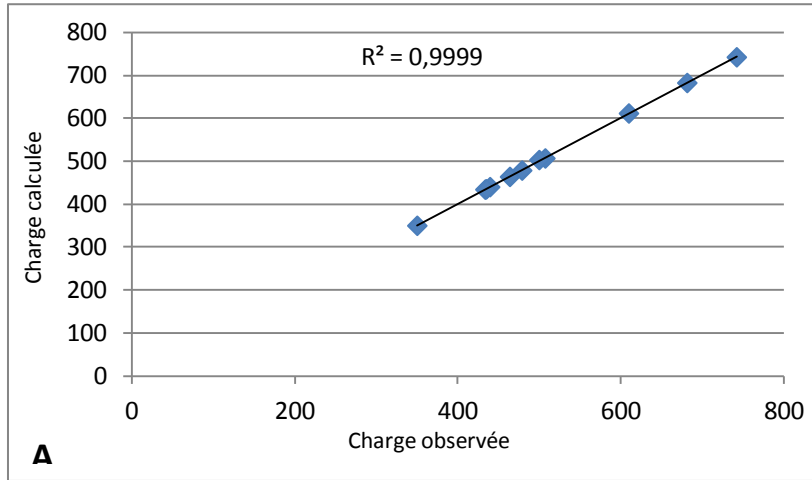


Figure 47 : Courbe de sensibilité obtenue pour des variations de conductivité hydraulique de K-20 %K (A) et K+20 %K (B)

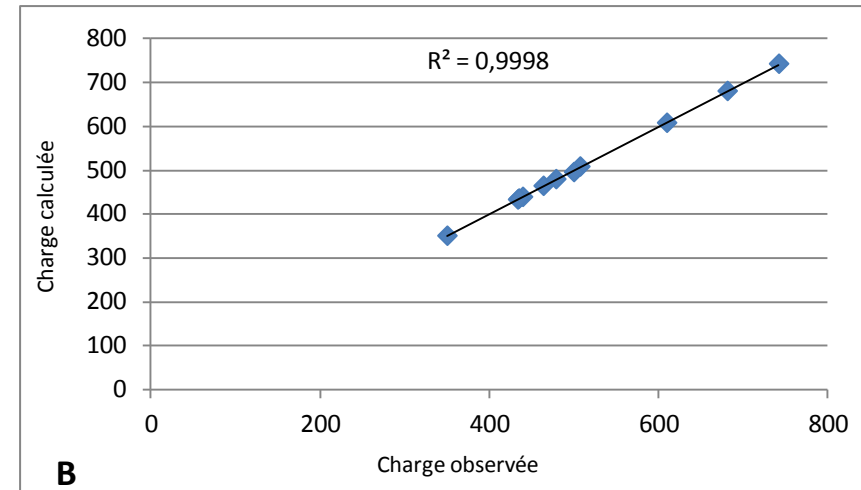
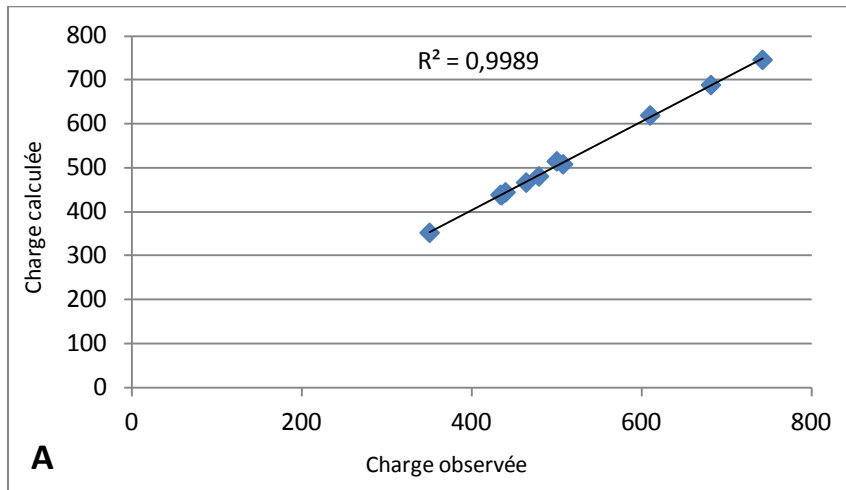


Figure 48 : Courbe de sensibilité obtenue pour des variations de conductivité hydraulique de K-50 %K (A) et K+50 %K (B)

IV.2.3.Simulation en régime transitoire

La simulation en régime transitoire permet de faire une comparaison entre l'évolution des niveaux piézométriques simulés en régime transitoire et l'évolution des niveaux piézométriques mesurés dans chaque piézomètre. Les piézomètres utilisés comme référence pour la modélisation en régime transitoire sont : P3976/53, P794/53, P4364/44, P774/53, P2698/53, P3849/53, P2715/53, P2700/53. (Fig.40).

La simulation en régime transitoire a été faite en utilisant la carte piézométrique de 1971(Fig.25) faite par Bernert et Prost et en adoptant le même champ de conductivité hydraulique obtenu au cours du calage en régime permanent.

IV.2.3.1 Choix du pas du temps

En raison de la non disponibilité des données relatives aux prélèvements, débits des oueds, AEP...sur la période 1962-1971, la simulation en régime transitoire a été effectuée sur une durée de 40 ans : de 1971 à 2011. Le pas du temps utilisé est égal à un an. Des calculs des précipitations annuelles, débits annuels des oueds, ainsi que les niveaux piézométriques moyens annuels ont été effectués pour les besoins de la simulation.

IV.2.3.2 Conditions aux limites

La limite à flux imposé à été contrainte par les variations du niveau piézométrique sur les ouvrages IRE 2701/53 et 4402/44.

Les limites drains ont été contraintes par les variations observées sur les ouvrages suivants:

- IRE 774/53 pour l'oued Zat et Ourika ;
- IRE 4403/44 pour l'oued Tensift ;
- IRE 4403/44 et 3849/53 pour l'oued N'fis ;
- IRE 4403/44 et 2698/53 pour l'oued Rhéraya ;
- IRE 3976/53 et 794/53 pour l'oued Issil.

IV.2.3.3 Recharge

Comme il a été précisé auparavant, la recharge de la nappe est essentiellement assurée par infiltration des eaux météoriques. Des coefficients d'infiltration de 6%, 7% et 9 % ont été retenus dans le secteur (Paragraphe IV.1.4)

Dans cette partie de simulation, le retour des eaux d'irrigation a été ajouté au niveau de la couche recharge. En raison du manque de données relatives à l'évolution des systèmes d'irrigation (gravitaire, goutte à goutte) dans le secteur, l'hypothèse de la dominance du système gravitaire a été adoptée avec un coefficient de retour de 25%.

IV.2.3.4 Prélèvements

La couche « prélèvement » comprend les pompages destinés à l'alimentation en eau potable (29 puits) et les pompages destinés à l'irrigation des terres agricoles (8600 puits) et des parcours de golfs.

IV.2.3.5 Coefficient d'emmagasinement

Etant une nappe libre, le coefficient d'emmagasinement du secteur d'étude est assimilé à la porosité efficace du milieu. Les valeurs du coefficient d'emmagasinement utilisées en régime transitoire correspondent à celles obtenues dans le cadre de l'« Etude de gestion des principales nappes de la région hydraulique du Tensift » faite par l'ABHT. Ces valeurs varient entre 1% et 30%.

IV.3 Calage du modèle en régime transitoire

Plusieurs essais de calage en régime transitoire ont été effectués pour reproduire d'une façon relativement adéquate le comportement moyen de la nappe.

Ces essais consistaient à modifier les deux paramètres principaux suivants :

- 1) Le débit des prélèvements agricoles : Un premier essai a été fait en utilisant les données brutes collectées auprès de l'ABHT, correspondants aux débits fictifs autorisés. Le deuxième a été effectué en utilisant des débits réels, ces derniers ont été calculés en considérant que le pompage se fait pendant les mois de Janvier, Février, Mars, Avril et Septembre, avec 10 heures de pompage au lieu de 24 heures.

2) Coefficient d'emménagement : Des variations de ce paramètre ont été réalisées tout en respectant la géologie du terrain

Malgré les différents essais réalisés, un calage satisfaisant n'a pas pu être obtenu : le modèle permet par endroit de reproduire les fluctuations du niveau de la nappe mais sans garder les mêmes côtes piézométriques. Les écarts entre les niveaux piézométriques enregistrés au niveau des piézomètres de contrôle et ceux calculés par le modèle dépassent par endroit 20m (Fig.49, 50).

Cette différence est due au manque de données réelles relatives aux débits de prélèvements surtout en période de sécheresse ou la nappe est surexploitée. Par conséquent un bilan représentatif de la nappe n'a pas pu être établi.

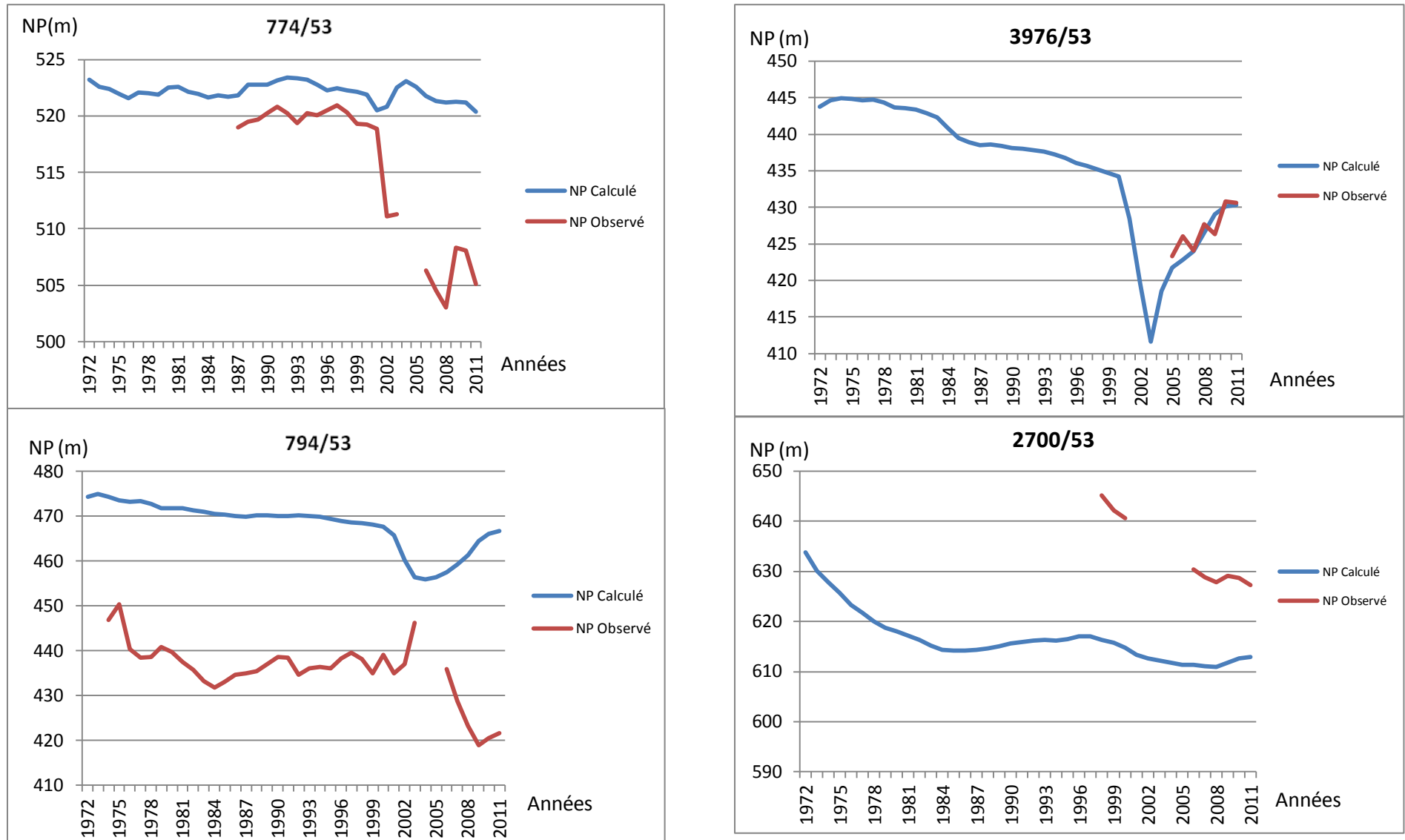


Figure 49: Niveaux piézométriques Observés et calculés pour les piézomètres P774/53, P794/53, P3976/53 et P2700/53

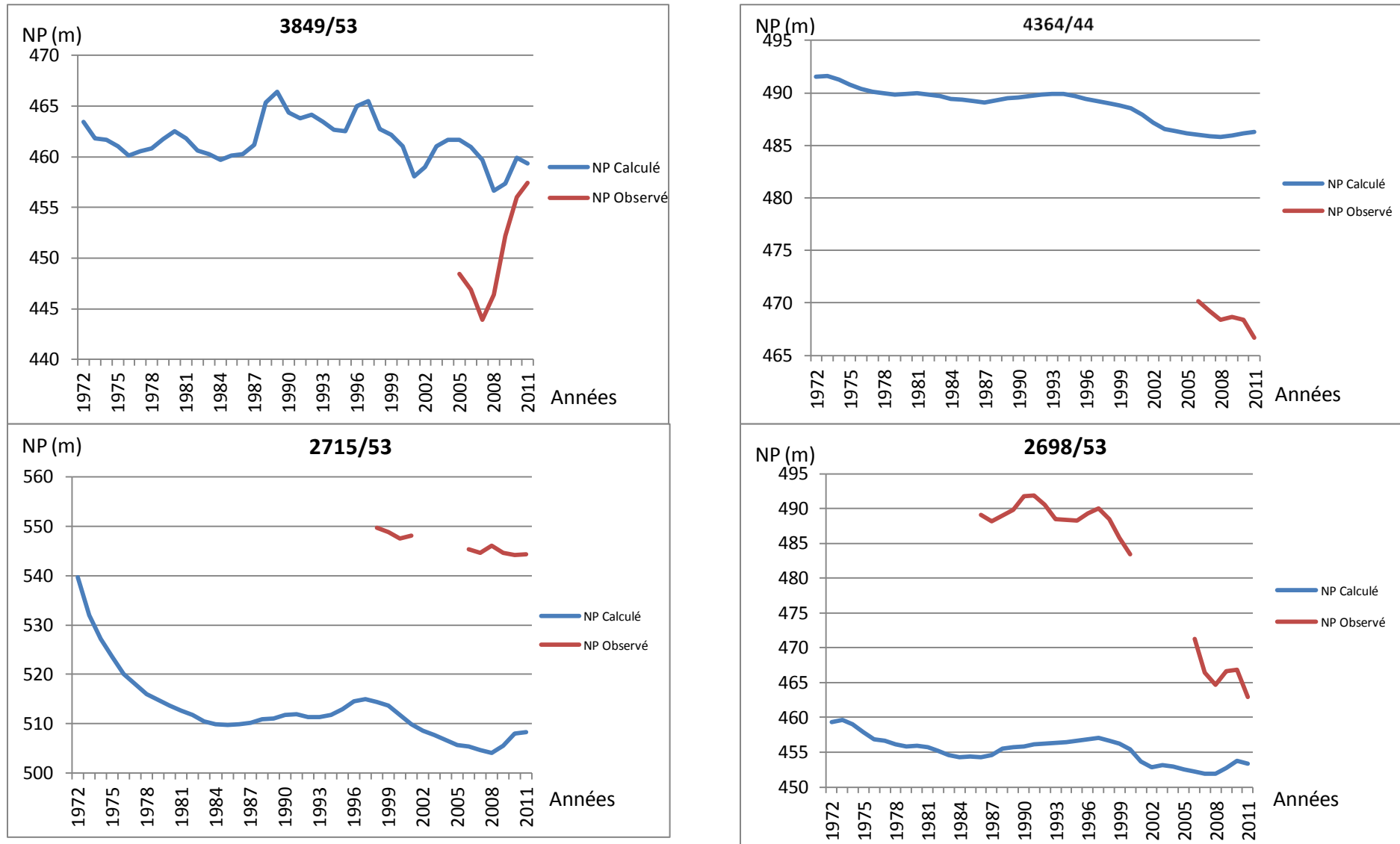


Figure 50 : Niveaux piézométriques Observés et calculés pour les piézomètres P3849/53, P4364/44, P2715/53, P2698/53

V. CONCLUSION

Cette partie a été consacrée à la modélisation numérique de la nappe du Haouz au niveau du secteur d'étude et cela en utilisant le logiciel GMS6.5, et en prenant comme état initial la piézométrie de l'année 1962.

La modélisation nous a permis d'établir une carte piézométrique calculée, après calage du modèle, on a pu reproduire la même configuration de l'année 1962, ainsi que le même sens d'écoulement.

Les tests de sensibilité ont été réalisés sur la recharge par les précipitations et la conductivité hydraulique. Les tests ont montré que la sensibilité du modèle à la recharge et à la conductivité hydraulique n'est pas la même sur la zone d'étude : la partie la plus sensible à ces deux paramètres est la partie Sud-ouest.

Cette partie de la simulation a montré que la 'portion' de l'aquifère choisie dans le cadre de cette étude se comporte bien comme un aquifère individualisé. Celui-ci s'est prêté aux opérations de calage et de restitution des états piézométriques de référence.

Cette approche répond bien aux objectifs de l'étude, à savoir ébaucher une simulation en régime transitoire de l'impact des prélèvements (autorisés ou pas) sur les ressources en eau souterraines ainsi que des aménagements hydrauliques (recharge artificielle, seuils d'infiltration etc.) sur ces mêmes ressources en eau souterraines.

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur la partie centrale de l'aquifère du Haouz. Le but principal était la mise en place d'un outil de gestion quantitative des ressources en eau de cet aquifère qui soit représentatif du système, tenant compte de ses hétérogénéités, de ses propriétés géologiques et hydrogéologiques.

Cette étude a nécessité la synthèse de nombreuses données fournies par différents organismes ainsi que la réalisation d'un système d'information géographique afin d'élaborer un support cartographique à partir des cartes géologiques, hydrogéologiques, piézométriques, du modèle numérique de terrain.

La modélisation numérique de la partie centrale du Haouz présentée dans ce travail est la première faite sur ce secteur à une échelle fine (250 m × 250 m). La modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel GMS6.5. L'objectif de cette étape était l'identification du système (champ de conductivité hydraulique, recharge, conditions aux limites,...etc).

Le calage du modèle a été réalisé en régime permanent en prenant pour référence l'état piézométrique de 1962. Les résultats de calage attestent d'une certaine cohérence du modèle. Parmi les points intéressants de cette phase de calage, on peut citer la détermination du champ de conductivité hydraulique, de la recharge et du bilan hydrique de la nappe.

Le calage du modèle en régime transitoire sur la période 1971-2011 n'a pas été satisfaisant malgré plusieurs essais de calage en raison du manque de données relatives aux prélèvements agricoles.

Le travail de modélisation de la nappe du Haouz doit encore être poursuivi et complété pour aboutir à un modèle représentatif du système. Les développements devront porter sur les points suivants :

- Représentation des oueds dans le modèle hydrodynamique comme de vraies rivières en intégrant les caractéristiques des rivières à savoir la largeur, la hauteur d'eau, la cote du lit de la rivière, le débit et la perméabilité du lit de la rivière ;
- Amélioration de la qualité et de la quantité des données nécessaires au modèle de façon à avoir une précision à l'échelle du maillage utilisé (250m de côté) ;
- Utilisation de l'imagerie satellitaire pour déterminer les vrais volumes pompés de la nappe.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **Abourida, A.**, (2007) : Approche hydrogéologique de la nappe du Haouz (MAROC) par Télédétection, Isotopie, SIG et Modélisation. Th. Doct. Univ. Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc 118p.
- **Bernert G. & Prost J.P.** (1972). : Le Haouz de Marrakech et le bassin du Mejjate .Note et Mém. Du Serv. Géol. N° 231, t2, 432 p
- **Boutakrabt M.**, (2011) : l'état des lieux de l'usage de l'eau et de l'assainissement dans le secteur touristique de la ville de Marrakech. Mémoire Master. Univ. Cadi Ayyad Marrakech, 50p
- **Cochet A.** (1962) : Alimentation en eau de Marrakech, note hydrogéologique en vue de la recherche d'un débit 40 l/s pour 1962 et 100 l/s pour 1966. 241 p.
- Etude du plan directeur intégré d'aménagement des eaux des bassins Sebou, Bouregreg, Oum-Er-rabia et Tensift (1988). Sous mission IIIB. 147p.
- **Dupuy, A.** 1997. Simulation de la contamination diffuse des eaux souterraines par les nitrates à l'échelle du bassin versant. Thèse, Université de Poitiers, 237 p.
- **Lyakhloufi, S.** (2001) : Vulnérabilité et risque de pollution de la nappe phréatique du Haouz de Marrakech. Th. Doct. Univ. Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc 177p.
- **Monographie** des ressources en eau, Province d'El Haouz, Octobre, 2008
- **Moustadraf J.** (2002). Modélisation numérique d'un système aquifère côtier. Etude de l'impact de la sécheresse et de l'intrusion marine (La Chaouia côtière, Maroc). Thèse Univ. Poitiers, France, 208p.
- **Razoki B.** (2001). Mise en place d'un système de gestion de base de données pour la gestion des ressources en eaux souterraines de la plaine du Haouz (MESETA OCCIDENTALE, MAROC).Thèse Univ. Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc, 166p.
- **Sinan M.** (1986) : Paramètres hydrogéologiques et géotechniques en milieu alluvial fortement hétérogène : Relations statistiques et approche géostatistique comparative (exemple de la nappe du Haouz-Maroc). Thèse, Univdes Sci. et tech. Du languedoc. 397p.
- **Sinan M.** (2000) : Méthodologie d'identification, d'évaluation et de protection des ressources en eau des aquifère régionaux par la combinaison des S.I.G, de la géophysique et de la géostatistique : Application à l'aquifère du Haouz de Marrakech (Maroc). Th. Doc. Univ. Mohamed V, Ecole Mohammadia d'ingénieurs Rabat Maroc, 372p.
- **Sinan, M., Mumtaz R** (2006) : Estimation du champ de transmissivité d'un aquifère alluvial fortement hétérogène à partir de la résistance transversale. Application à la nappe du Haouz de Marrakech (Maroc). Revue des sciences de l'eau, 2006.
- **Smaij Z.** (2011). Typologie de la qualité des ressources en eaux du bassin de Tensift Al-Haouz et cadre juridique de protection et de préservation. Mémoire Master. Univ. Cadi Ayyad Marrakech, 94p.
- Sites internet consultés: <http://www.ccismar.ma/html/presentation/index.html>.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation géographique de la zone d'étude	10
Figure 2 : Carte des variations topographiques de la zone d'étude.....	12
Figure 3 : Variations interannuelles des précipitations à Marrakech de 1980 à 2011.....	14
Figure 4 : Variations interannuelles des précipitations à Tahanouat de 1980 à 2011	14
Figure 5 : Précipitations moyennes mensuelles (1980-2011)	14
Figure 6 : Températures moyennes, maximales et minimales interannuelles (1980-2011)	15
Figure 7 : Diagramme Ombro-Thermique pour la station de Marrakech (1961-2011)	15
Figure 8 : Evaporation moyenne mensuelle mesurée au Piche (1983-2011).....	16
Figure 9 : Variations interannuelles des débits moyens de la station Imin hamam	19
Figure 10 : Variations interannuelles des débits moyens de la station Tahanaout.....	19
Figure 11 : Variations interannuelles des débits moyens de la station Taferiat.....	19
Figure 12 : Variations interannuelles des débits moyens de la station Aghbalou	19
Figure 13 : Débit moyen mensuel de l'oued N'fis	20
Figure 14 : Débit moyen mensuel de l'oued Ourika.....	20
Figure 15 : Débit moyen mensuel de l'oued Zat.....	20
Figure 16 : Débit moyen mensuel de l'oued Rhéraya.....	20
Figure 17 : Carte géologique du Haouz.....	23
Figure 18 : Série lithostratigraphique.....	24
Figure 19 : Carte pédologique du Haouz de Marrakech.....	27
Figure 20 : Les niveaux aquifères dans la série lithostratigraphique de la plaine du Haouz	29
Figure 21 : Coupes géologiques des forages du Haouz Centrale et Oriental.....	30
Figure 22 : Localisation de la nappe du Haouz dans le système aquifère de Tensift-el Haouz.	31
Figure 23 : Localisation de la zone d'étude dans la nappe du Haouz.....	32
Figure 24 : Carte piézométrique de 1962.....	34
Figure 25 : Carte piézométrique de 1971.....	34
Figure 26 : Répartition des piézomètres de contrôle dans la zone d'étude.....	35
Figure 27 : Baisse du niveau piézométrique dans la nappe du Haouz central.....	36
Figure 28 : Remontée du niveau piézométrique dans la nappe du Haouz central.....	36
Figure 29: Localisation des puits destinés à l'irrigation dans la zone d'étude.....	39
Figure 30 : Localisation de la zone d'étude.....	50
Figure 31: Carte du toit de l'aquifère.....	51
Figure 32 : Carte du mur de l'aquifère	51
Figure 33 : Maillage du secteur d'étude.....	55

Figure 34 : Emplacement des coupes permettant la détermination de la géométrie de l'aquifère dans le Haouz central	55
Figure 35 : Coupes verticales représentant la géométrie de l'aquifère	56
Figure 36 : Conditions aux limites du modèle numérique de la nappe du Haouz central.....	59
Figure 37 : Comparaison de la piézométrie calculée et observée (1962)	59
Figure 38 : Répartition des conductivités hydrauliques après calage en régime permanent.....	63
Figure 39 : Répartition géographique de la recharge du système aquifère après calage en régime permanent rapportée à la géologie de surface	63
Figure 40 : Répartition géographique des points d'observation.....	64
Figure 41 : Courbe de sensibilité (variations de recharge de R-5 %R (A) et R+5 %R (B)).....	67
Figure 42 : Courbe de sensibilité (variations de recharge de R-10 %R (A) et R+10 %R (B)).....	67
Figure 43 : Courbe de sensibilité (variations de recharge de R-10 %R (A) et R+10 %R (B)).....	68
Figure 44 : Courbe de sensibilité (variations de recharge de R-50 %R (A) et R+50 %R (B)).....	68
Figure 45 : Courbe de sensibilité (variations de conductivité hydraulique de K-5 %K (A) et K+5 %K (B)).....	70
Figure 46 : Courbe de sensibilité (variations de conductivité hydraulique de K-10%K (A) et K+10 %K (B)).....	70
Figure 47 : Courbe de sensibilité obtenue pour des variations de conductivité hydraulique de K-20 %K (A) et K+20 %K (B)	71
Figure 48 : Courbe de sensibilité obtenue pour des variations de conductivité hydraulique de K-50 %K (A) et K+50 %K (B)	71
Figure 49: Niveaux piézométriques Observés et calculés pour les piézomètres P774/53, P794/53, P3976/53 et P2700/53.....	75
Figure 50 : Niveaux piézométriques Observés et calculés pour les piézomètres P3849/53, P4364/44, P2715/53, P2698/53.....	76

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Evolution démographique de certaines communes urbaines de la zone d'étude	12
Tableau 2: Indice de De Martonne calculé pour la station de Marrakech.....	16
Tableau 3: Caractéristiques physiques et lithologiques des oueds de la zone d'étude	17
Tableau 4: Barrages alimentant la zone d'étude	21
Tableau 5: Typologie de la qualité des eaux des oueds	22
Tableau 6: Projets golfiques existants, en cours de réalisation et projetés	40
Tableau 7: Coefficients d'infiltration des formations géologiques	58
Tableau 8: Bilan hydrique en m ³ /s du secteur d'étude donnée par le calage du modèle en régime permanent	60
Tableau 9: Bilan hydrique calculé en m ³ /s du secteur d'étude, année 1962.....	61
Tableau 10: Moyennes des valeurs absolues des écarts (R) et écarts relatifs moyens ϵr calculés dans la zone d'étude après modification de la recharge.....	66
Tableau 11: Moyennes des valeurs absolues des écarts (R) et écarts relatifs moyens ϵr calculés dans la zone d'étude après modification de la conductivité hydraulique.....	66

LISTE DES ABREVIATIONS

AEP :	Alimentation en Eau Potable
ABHT :	Agence du Bassin Hydraulique de Tensift
DRHT :	Direction Régionale de l'Hydraulique de Tensift
MNT :	Modèle Numérique du Terrain
NGM :	Nivellement Général du Maroc
ONEP :	Office National de l'Eau Potable
ORMVAH :	Office Régional de Mise en Valeur Agricole
PDAIRE :	Plan Directeur d'Aménagement Intégré des Ressources en Eau
RGPH :	Recensement Général de la Population et de l'Habitat
UCAM :	Université Cadi Ayyad de Marrakech