

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل

Université Mohammed Seddik Benyahia - Jijel

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département : des Sciences de la Terre et de
l'Univers



كلية علوم الطبيعة والحياة

قسم: علوم الأرض والكون

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme: Master Académique en Géologie

Option: Hydrogéologie

Thème

**Modélisation des ressources en eaux souterraines
de la plaine alluviale d'Oued Nil**

Membres de Jury Présenté par:

Président: DEROUCHA

Examineur: kiniouar .H

Encadrant: MAHDID Souhil

BOULAHLIB Hadjer

DAHOUA Selma

Année Universitaire 2018-2019

Numéro d'ordre (bibliothèque)

Remerciements

Avant tout, nous remercions DIEU qui nous a illuminé notre chemin et qui nous a armés de courage pour achever nos études.

Nous remercions fortement notre promoteur : Mr Mahdid Souhil, pour nous avoir encadrés pour qu'on puisse terminer cette étude, et surtout pour n'avoir jamais hésité à nous soutenir dans les différentes étapes de ce travail et de nous avoir conseillés et orientés.

Nous tenons à saluer sa patience, sa compréhension, sa modestie et sa disponibilité.

Nous tenons à remercier aussi :

Les membres de jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail

Le corps d'enseignants et les étudiants du département de Science de la Terre et l'Univers.

M^{ME} BOULAHLIB.H ET M^{ME} DAHOUA. S

Dédicace

Je dédie ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance à :

*Mes chères parents « BOUDJAMAA et NAFISSA » et je souhaite seulement
que Dieu me les garde ;*

Mes frères : fateh, Mouhamed.

Mes sœurs : ROKIA, SARA, fatima.

Aux enfants de mes frères et spécialement Simo

À ma grande famille BOULAHLIB

*À tous mes collègues de promotion de master et mes amis, spécialement :
MERIEM ET SELMA*

À tous ceux qui j'aime et qui m'aime.

Dédie par *HADJER*

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à tous ceux qui ont Contribué de Prés ou de loin à l'élaboration de ce travail plus particulièrement à :

Mon Père "Ibrahim"

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour lui. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien- être.

À ma belle-mère « Daloula »

"Tu m'as donné la tendresse et le courage pour réussir tout ce que je peux offrir ne peut exprimer l'amour et la reconnaissance que je te porte, je t'offre ce modeste travaille pour te remercier pour les sacrifices et pour l'affection dont tu m'as toujours donnée.

A mon cher frère et mes sœurs :

Elles sont présentes et disponibles dans tous les moments de la vie par leur soutien moral et leurs belles surprises sucrées. Je leur souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité.

À toutes ma famille Dahoua

À toutes mes amies et spécialement : Hadjer, Abla et Meriem ;

À tous ceux qui me sont chers.

Finalement, et si par inattention j'ai oublié quelqu'un, qu'il me pardonne et qu'il soit remercié.

Dédie par **SELMA**

Résumé

Les eaux souterraines constituent un maillon important du cycle de l'eau et l'évaluation et la prévision de la disponibilité et de la qualité de ces eaux représente une tâche primordiale dans la connaissance de la gestion des ressources en eau.

La nappe de la plaine alluviale d' oued Nil renferme des ressources en eaux souterraines très importantes, ces ressources sont exploités beaucoup plus pour l'irrigation avec une quantité estimée a l'AEP, dans cette optique notre travail de mémoire a pour objectif de faire un modèle prévisionnel afin d'estimé les entrées et les sorties de la nappe.

Le modèle hydrodynamique établi grâce au logiciel Visual Modflow 3.0, qui tient compte de la géométrie, des entrées et des sorties dans le système, des lois de formalisation des processus, de l'état initial et des conditions aux limites du système. Le calibrage des paramètres dynamiques (K, flux, porosité et conditions aux limites) a été fait en régime permanent sur les forages et les puits de la campagne d'avril 2015.

Les résultats obtenus permettent d'obtenir une répartition spatiales des paramètres hydrodynamique sur l'ensemble de la plaine, le calage de la piézométrie en régime permanent a donnée une erreur de 4.66%, un écart type de 5.85 et une erreur moyenne absolue de 3.64m.

Mot-clés : Modélisation, Hydrodynamique, eaux souterraines, nappe alluviale d'oued Nil, jijel, calage.

Summary

Groundwater is an important link in the water cycle and assessing and predicting the availability and quality of these waters is a critical task in understanding water resources management.

The water table of the alluvial plain of Wadi Nile contains very important underground water resources, these resources are exploited much more for the irrigation with a quantity estimated at the AEP, in this optics our work of memory aims at making a predictive model to estimate the inputs and outputs of the water table.

The hydrodynamic model established by the Visual Modflow 3.0 software, which takes into account the geometry, the inputs and outputs in the system, the formalization laws of the processes, the initial state and the boundary conditions of the system. Calibration of the dynamic parameters (K, flux, porosity and boundary conditions) was done in steady state on the wells and wells of the April 2015 campaign.

The results obtained make it possible to obtain a spatial distribution of the hydrodynamic parameters over the whole of the plain, the calibration of steady-state piezometry gave an error of 4.66%, a standard deviation of 5.85 and a mean absolute error of 3.64m.

Keywords: Modeling, Hydrodynamics, groundwater, Wadi Nile alluvial aquifer, jijel, rigging.

ملخص

تعتبر المياه الجوفية حلقة مهمة في دورة المياه وتقييم وتوقع مدى توافر هذه المياه وجودتها مهمة بالغة الأهمية في فهم إدارة موارد المياه.

يحتوي منسوب المياه في سهل وادي النيل الغربي على موارد مياه جوفية مهمة للغاية ، حيث يتم استغلال هذه الموارد أكثر من ذلك بكثير للري بكمية تقدر في AEP ، في هذه البصريات يهدف عمل ذاكرتنا إلى صنع نموذج تنبؤي لتقدير المدخلات والمخرجات من المياه الجوفية.

النموذج الهيدروديناميكي الذي أنشأه برنامج Visual Modflow 3.0 ، والذي يأخذ في الاعتبار الهندسة والمدخلات والمخرجات في النظام ، وقوانين إضفاء الطابع الرسمي على العمليات ، والحالة الأولية والشروط الحدودية للنظام. تمت معايرة المعلمات الديناميكية (K ، والتدفق ، وظروف المسامية والحدود) في حالة مستقرة على آبار وآبار حملة أبريل 2015.

النتائج التي تم الحصول عليها تجعل من الممكن الحصول على التوزيع المكاني للمعلمات الهيدروديناميكية على كامل السهل ، أعطت معايرة قياس الضغط الثابت الحالة خطأ 4.66 % ، انحراف معياري قدره 5.85 وخطأ مطلق متوسط قدره 3.64 متر .

الكلمات المفتاحية: النمذجة ، الديناميكا المائية ، المياه الجوفية ، طبقة المياه الجوفية في وادي النيل ، جيغل ، تزوير .

Table de matière

Table de Matière

Remerciement	
Dédécéce	
Summary	
Résumé	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction Générale	1

Chapitre I: Aperçu bibliographique

I.1. Le cycle de l'eau	3
I.2. Description des composantes du cycle hydrologique	4
I.3. Modélisation du fonctionnement hydrodynamique	8
I.3.1. Introduction.....	8
I.3.2. Objectif de la modélisation	9
I.3.3. Types de modèles.....	9
I.3.4. Modèles d'échelle physique	11
I.3.5. Le modèle conceptuel	11
I.3.6. Modèle mathématique.....	11
I.4. Type de donnée et étapes de la modélisation	13
I.4.1. Discrétisation spatiale du domain d'écoulement	14
I.4.2. Conditions aux limites	16
I.4.3. Modélisation en régime permanent.....	17
I.4.4. Modélisation en régime transitoire	17
I.5. Simulation et utilisation du logiciel MODFLOW.....	18
Conclusion	20

Chapitre II. Caractérisation de la zone d'étude

Situation géographique

Introduction	22
II.1. Situation et présentation de la région d'étude	22

II.2. Géomorphologie et relief.....	23
II.3. Climat	24
II.4. Végétation.....	24
II.5. Réseau hydrographique	25
II.6. Population.....	25
II.7. Les voies de communication	26
Conclusion.....	26

La géologie

Introduction	27
II.1. Géologie régionale.....	27
II.2. Aspect structural de la région d'étude	27
II.3. Aspect lithologique de la région étude	28
II.4. Géologie locale	29
II. 5. Aspect lithostratigraphique de la Zone d'étude.....	30
II.6. Tectonique et paléogéographie	34
II.7. Sismologie	34
Conclusion.....	35

Chapitre III. Hydroclimatologie et Hydrodynamique

Hydroclimatologie

Introduction	37
III.1. Aperçu général sur le climat de l'Algérie	37
III.2. Climat wilaya de Jijel	37
III.3. Caractéristique climatiques	38
III.4. Le diagramme Ombrothermique	45
III.5. Bilan hydrologique :.....	26
III.6. Caractérisation du climat.....	53
III.7. Comparaison des indices climatiques	55
Conclusion :.....	55

Hydrodynamique

Introduction	56
III.1. Les formations perméables et imperméables	56
III.2. Description des formations aquifères.....	57
III.3. Inventaire des points d'eau	57
III.4. Interprétation des profiles.....	58
III.5. Cartespiézométriques	63
III.6. La Transmissivité	65
III.7. La perméabilité.....	67
Conclusion.....	69

Chapitre IV. Modélisation

Introduction	71
IV.1. Logiciel de modélisation.....	71
IV.2. Intérêt d'une modélisation en hydrogéologie.....	72
IV.3. Le maillage du modèle	72
IV.4. Géométrie du système aquifère.....	74
IV.5. Les caractéristiques Hydrodynamiques du modèle	75
IV.6. Les conditions limites	77
IV.7. Calage du modèle	81
Conclusion.....	85
Conclusion générale	87
Référence	89
Annexes	

Liste des Figures

Liste des figures

Figure I-1 : Cycle de l'eau dans la nature.....	4
Figure I-2 : Profil d'infiltration d'un sol (Zone Non saturée et partie supérieure de la nappe) ..	5
Figure I-3 : Différents types de finalité des modèles hydrogéologiques et leurs applications (Mercer & Faust, 1980).....	10
Figure I-4 : Cycle de modélisation par simulation (Tranouez, 2005).....	11
Figure I-5 : Taille et nombre de maille	15
Figure I-6 : Schéma de résolution aux différences finies	15
Figure I-7 : Étape de la modélisation hydrogéologique (Dassargues A, 2011)	18
Figure I-8 : Modèle pouvant être simulé par Modflow.....	19
Figure II-1 : la localisation de la zone d'étude	22
Figure II-2 : Carte du relief du bassin versant de l'oued Nil.	23
Figure II-3 : Agriculture maraichère dans la plaine alluviale d'Oued Nil.....	24
Figure II-4 : Carte du bassin versant de l'oued Nil et ses affluents.....	25
Figure II-5 : Esquisse géologique de la région d'oued Nil.....	29
Figure II-6 : Coupe géologique montrant les principaux corps alluvionnaires aquifères du bassin néogène de Jijel - Algérie Nord-Est	32
Figure II-7 : log stratigraphique	33
Figure III-1 : Position de la station climatologique de la station de Taher-Achouat	38
Figure III-2 : Précipitations moyennes annuelles de la Station de Taher Achouat (1988-2015).....	39
Figure III-3 : Distribution des précipitations moyennes mensuelles à la Station Taher Achouat (1988-2015).....	40

Figure III-4 : Variation des températures moyennes mensuelles à la Station Taher-Achouat (1988-2015).....	41
Figure III-5 : L'histogramme de Variations de la température moyenne mensuelle Station Taher-Achouat (1988-2015)	42
Figure III-6 : Les variations d'évaporations moyennes mensuelles à la station Taher-Achouat (1991-2008).....	43
Figure III-7 : Evaporations moyennes annuelles à la station Taher-Achouat (1991-2008)	43
Figure III-8 : Humidité moyenne mensuelle à la station Taher-Achouat (1991-2008).....	44
Figure III-9 : Humidité moyenne annuelle à la station Taher-Achouat (1991-2008)	45
Figure III-10 : Diagramme Ombrothermique pour la période 1988-2015	46
Figure III-11 : Abaque de l'Indice d'aridité De Martonne	54
Figure III-12 : La carte inventaire des points d'eau	58
Figure III-13 : Carte des positions des profils	59
Figure III-14 : Coupe lithologique (Profil A-A').....	60
Figure III-15 : Coupe lithologique (Profil B-B')	61
Figure III-16 : Coupe lithologique (Profil C-C')	62
Figure III-17 : Carte piézométrique de la plaine alluviale d'Oued Nil	64
Figure III-18 : Carte de la transmissivité de la plaine alluviale d'Oued Nil	66
Figure III-19 : Carte de perméabilité de la plaine alluviale d'Oued Nil	68
Figure IV-1 : Maillage de la zone d'étude.....	73
Figure IV-2 : Répartition des couches dans le modèle	75
Figure IV-3 : Répartition des perméabilités dans les 3 couches du modèle	76
Figure IV-4 : Conditions aux limites.....	78
Figure IV-5 : Potentiel imposé.....	79

Figure IV-6 :Position des forages et piézomètre.....	80
FigureIV-7 : Calage de la piézométrie calculée et observé en régime permanent	82
Figure IV-8 : La différence entre les piézomètres calculée et observée en régime permanent	83
Figure IV-9 : Droite de calibrage entre les niveaux piézométriques calculée et observée.....	84

Liste des Tableaux

Liste des tableaux

Tableau II-1 : La répartition de la population dans la plaine alluviale d'oued Nil	26
Tableau III-1 : Coordonnée de la station pluviométrique	39
Tableau III-2 : Calcul l'ETP par la formule de Thornthwaite.....	48
Tableau III-3 : Bilan hydrique selon Thornthwaite a la station Taher-Achouat (1988-2015) ...	50
Tableau III-4 : Calcul l'ETR par la formule de Turc	51
Tableau III-5 : Variation de l'indice de Martonne caractérisant les différents climats (Martonne, 1950).....	54
Tableau IV-1 : Limites géographiques du modèle	74
Tableau IV-3 : Porosité totale et efficace	77
Tableau IV-4 : Le coefficient d'emmagasinement.....	77
Tableau IV.5 : les résultats entre les niveaux piézométriques calculée et observée.....	85

Introduction Générale

Introduction Générale

L'Algérie, à l'instar des autres pays arabes et africains, est confronté aux problèmes d'approvisionnement en eau. Ceci est dû, non seulement, à la raréfaction des eaux de pluie, mais aussi à la surexploitation des eaux de surfaces et des nappes souterraines.

La nappe de la plaine alluviale d'oued Nil renferme une ressource locale d'importance actuelle et future. Il constitue un grand réservoir exploité dans tout le bassin et pour tous les usages. L'eau du bassin destiné pour irriguer de nombreuses exploitations agricoles, alimente des milliers d'habitants. Ainsi pour continuer à satisfaire cette demande sans cesse croissante, et pour une gestion durable de celles-ci, le travail de recherche présente dans ce document se fonde sur l'ensemble des études précédentes et a pour but d'apporter une vision actualisée et synthétique du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère.

Cette démarche est rendue possible par l'utilisation de la modélisation hydrogéologique qui permet de rassembler les différents éléments du système.

Pour mener à terme ce travail, cette présente étude comporte 5 chapitre qui sont :

Chapitre I : Un rappel bibliographique sur le cycle de l'eau, l'origine de l'eau et les différents types d'eau; et les différents principes et objectifs de la modélisation hydrodynamique, les différentes étapes de la modélisation, les conditions aux limites, la modélisation en régime permanent et transitoire .

Chapitre II : Présente le contexte géographique, géologique de la plaine alluviale d'oued Nil.

Chapitre III : Etude hydroclimatique afin d'établir un bilan hydrique pour une estimation rigoureuse de la lame d'eau ruisselée et celle infiltrée ainsi que l'évapotranspiration potentiel et réelle.

Chapitre IV : Présente la piézométrie et l'hydrodynamique et détaille la géométrie de l'aquifère qui permettra d'établir un schéma conceptuel du fonctionnement hydrodynamique du système aquifère.

Chapitre V : Une approche par modélisation hydrogéologique permettra de valider le schéma du fonctionnement du système précédemment établi en expliquant les différentes procédures et étapes qu'on permis d'établir ce modèle.

Chapitre I : Aperçu bibliographique

Introduction

I.1. Le cycle de l'eau

I.2. Description des composantes du cycle hydrologique

I.3. Modélisation du fonctionnement hydrodynamique

I.4. Type de donnée et étapes de la modélisation

I.5. Simulation et utilisation du logiciel MODFLOW

Conclusion

Introduction

Afin d'avoir une meilleure compréhension du fonctionnement hydrodynamique du système aquifère de la nappe alluviale d'oued Nil, cette étude bibliographique a été effectuée elle commence par une étude sur le cycle de l'eau, les mécanismes hydrodynamiques et enfin la modélisation mathématique.

I.1. Le cycle de l'eau

La notion de cycle de l'eau englobe les phénomènes du mouvement et du renouvellement des eaux sur la terre. Cette définition implique que les mécanismes régissant le cycle hydrologique surviennent conjointement. Le cycle hydrologique n'a donc ni commencement, ni fin. Le cycle de l'eau est favorisé par le rayonnement solaire.

Le cycle de l'eau débute par l'évaporation lente des fleuves, des lacs et des mers...etc. Provoque la formation dans la haute atmosphère, des nuages qui par condensation se transforment en pluie. Une fraction des eaux de pluie ruisselle à la surface du sol et va grossir les cours d'eau et les lacs. L'eau est aussi évaporée comme elle peut s'infiltrer à travers le sol. Une partie des eaux est reprise par la végétation qu'elle alimente avant d'être rejetée dans l'atmosphère: c'est l'évapotranspiration. L'autre partie s'accumule dans le sous-sol pour former des nappes souterraines qui, à leur tour peuvent former des sources émergentes à la surface du sol.

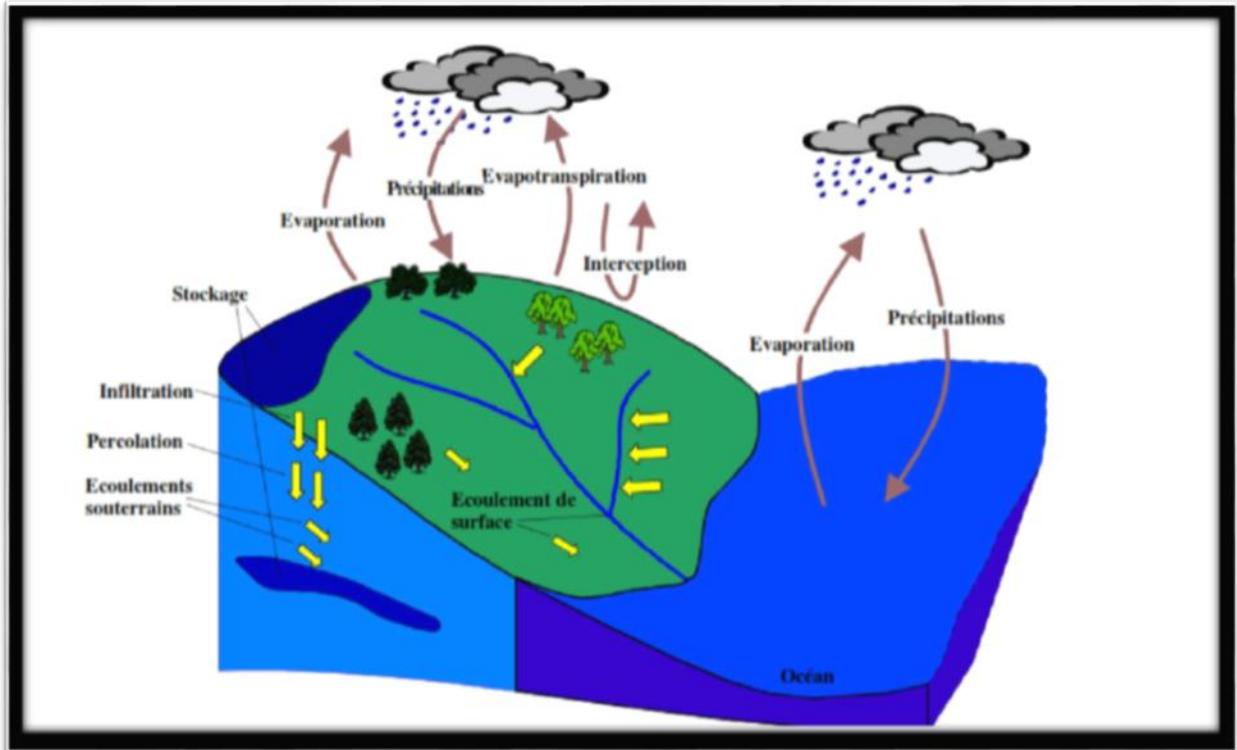


Figure I-1 : Cycle de l'eau dans la nature [1]

I.2. Description des composantes du cycle hydrologique

A. L'interception:

L'interception des précipitations désigne le processus selon lequel les eaux météoriques sont retenues par le feuillage, les branches et la litière. Cette fraction peut être restituée soit par égouttage ou par ruissellement, soit stockée pour ensuite être évaporée.

La quantité d'eau interceptée est fonction des caractéristiques de la pluie, des espèces, de l'âge et de la densité de la végétation.

B. Rétention et stockage superficiels:

La rétention superficielle désigne la partie de la pluie qui reste piégée dans les nombreuses dépressions de la surface du sol et qui peut par la suite seulement s'infiltrer ou s'évaporer. Elle dépend de la texture du sol, de la pente et de la taille des dépressions.

Le stockage superficiel se réfère à la fraction de la pluie qui reste à la surface du sol pendant l'averse et qui, graduellement, s'écoule vers l'aval; à la fin de la pluie, ce volume d'eau stocké peut s'infiltrer ou donner lieu à un écoulement superficiel retardé.

C. L'infiltration:

Désigne le passage généralement le passage de l'eau de l'extérieur vers l'intérieur du sol ainsi que sa redistribution dans la zone non saturée. Le processus d'infiltration a été largement étudié aussi bien par les physiciens du sol que les hydrologues a montré que lorsque la pluie atteint la surface du sol, elle s'infiltrer à une vitesse décroissante avec le temps.

La figure 2 illustre le processus d'infiltration d'un sol pour une zone non saturé et la partie supérieure de la nappe.

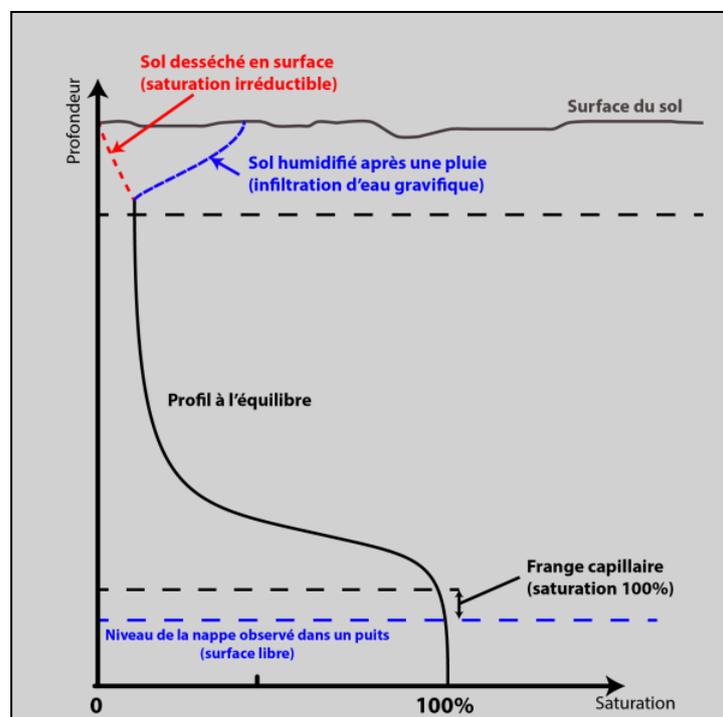


Figure I-2 : Profil d'infiltration d'un sol (Zone Non saturée et partie supérieure de la nappe).

La vitesse d'infiltrabilité du sol est égale à l'intensité de la pluie et ceci jusqu'a ce que les premiers centimètres du sol (10cm environs) soient saturée; elle décroît ensuite easymptotiquement vers une valeur constante K_s , appelée infiltrabilité finale ou permanente. La diminution de la capacité d'infiltration au cours d'une averse est due à deux phénomènes principaux:

- La dégradation de l'état de la surface du sol pars des mécanismes tels l'intensité de la pluie qui crée une pellicule (cas des limons) empêchant l'eau de s'infiltrer;

- La diminution du gradient de succion matricielle. En effet, malgré une augmentation de la conductivité du sol, le gradient de succion diminue laissant le gradient gravitationnel comme seule force d'entraînement de l'eau vers le bas. De nombreux tests réalisés par les hydrologues sur différents types de sol ont montré que la diminution est plus rapide et la constante plus faible pour les sols argileux que pour les sols sableux.

D. Le ruissellement

Le ruissellement est l'écoulement des eaux à la surface des sols, contrairement à celle qui pénètre par infiltration. L'intensité des précipitations favorise le ruissellement en proportion de l'insuffisance de l'infiltration et de la capacité de rétention de la surface du sol. La lame d'eau ruisselée dépend de l'intensité et de la hauteur des averses, de la succession des pluies, de l'état d'humidité et de la structure de l'horizon superficiel du sol avant l'averse, du couvert végétal, de la pente et de la rugosité de la surface du sol. L'influence de tous ces facteurs fait que le ruissellement est très difficile à estimer avec une précision (Ndiagasow, 2006).

E. L'évapotranspiration

L'évaporation représente le processus au cours duquel l'eau se transforme en vapeur. L'ensemble des processus d'évaporation et de transpiration est connu sous le nom d'évapotranspiration. Cette dernière est l'une des composantes fondamentales du cycle hydrologique. La précision avec laquelle elle est estimée est essentielle pour le calcul du bilan d'eau, du calcul de l'irrigation, de la gestion des ressources hydriques. En général, la végétation n'est pas toujours aussi bien fournie en eau si bien qu'on a défini le terme évapotranspiration réelle (ETR) qui est inférieur ou égale à l'ETP et qui reflète mieux la réalité. Plusieurs méthodes sont disponibles pour le calcul de l'ETP. Les plus usuelles sont celle de PENMAN (1948), THORNTHWAITE (1948), TURC (1961).

L'évaporation est importante dans le cycle hydrologique du fait que la fraction de la pluie tombant sur la surface du sol qui retourne à l'atmosphère varie entre 50% pour les régions humides à presque 100% pour les régions arides.

F. La percolation ou recharge

Après la pluie, une partie des eaux infiltrées dans le sol ayant échappée à l'évaporation s'écoule vers les couches les plus profondes pour faire augmenter le stock d'eau.

L'humidification du sol progresse plus on se rapproche du bas. Après reconstitution du stock d'eau de rétention du sol, l'excès d'eau continue son cheminement pour aller alimenter les réserves des nappes aquifères. C'est ce cheminement sans fixation que l'on désigne par percolation ou recharge. tout le problème de l'alimentation des nappes repose en fait sur l'évaluation de cet excès qui atteindra finalement la nappe (Ndiagasow, 2006).

G. Eaux souterraines

Les nappes phréatiques constituent le réservoir le plus important en eau potable, Elles sont formées par l'infiltration dans le sol et l'accumulation en profondeur des eaux de pluies. Les nappes situées dans les cavités formées par l'érosion des massifs calcaires constituent d'immenses réservoirs souterrains qui se rechargent facilement et peuvent s'étendre sur des milliers de kilomètres carrés. En revanche, les nappes piégées sous des couches d'argile ou de grès, souvent à plusieurs centaines de mètres de profondeur, se sont constituées sur des millions d'années. Ces nappes phréatiques se renouvellent peu du fait de la faible perméabilité de leurs formations. Elles contiennent une eau d'une rare pureté.

La nature du terrain sous lequel se trouvent ces eaux constitue un facteur déterminant de leurs compositions chimiques. Ces eaux sont appelées aussi, les eaux propres car elles répondent en général aux normes de potabilité. Elles sont exemptes de pollution. Cependant, partout dans le monde les nappes souterraines sont menacées. Certaines d'entre elles sont surexploitées pour les besoins de l'irrigation et mettront des décennies à se reconstituer.

H. Eaux de surface

Composées d'eaux de mer, de fleuves, de rivières, de marigots, ces eaux couvrent la terre. La terre « planète bleue » en raison de la présence d'eau. 97,5% des ressources en eau sont constitués d'eau salée dont l'essentiel est dans les océans et 2,5% seulement en eau douce.

La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains traversés par ces eaux durant leurs parcours dans l'ensemble des bassins versants.

Les cours d'eau peuvent posséder des caractères différents suivant leurs débits et leurs régimes. Ils sont cependant considérés comme des milieux à renouvellement rapide avec un pouvoir auto-épurateur, même si celui-ci présente bien évidemment des limites.

Cette eau de surface est naturellement alimentée par les précipitations et naturellement perdue par l'évaporation et l'infiltration souterraines dans le sol, en général les précipitations sont le principal apport pour les eaux de surfaces. Elle jouent un très grand rôle dans la formation de l'hydrosphère de la planète terre.

I. Eaux superficielles

Les eaux superficielles qualifient toutes les eaux naturellement ouvertes sur l'atmosphère, y compris les fleuves, les rivières, les lacs, les réservoirs, les ruisseaux, les lacs de barrage, les mers, les estuaires, etc. Le terme s'applique également aux sources, aux puits et autres collecteurs d'eau qui subissent directement l'influence des eaux superficielles.

L'eau superficielle est toute l'eau sous forme liquide à la surface d'une planète. Elle contraste avec les eaux souterraines qui jaillissent dans les sources, l'eau et la vapeur d'eau sur les pôles et dans les glaciers sous forme de glace dans l'atmosphère.

Les eaux superficielles sont souvent riches en matières en suspension ou en substances dissoutes (TDS). Étant donné que les charges en suspension et en solution peuvent contenir des polluants, les eaux superficielles ne peuvent en principe être utilisées à des fins industrielles qu'après un traitement en tant qu'eau potable ou eau industrielle.

I.3. Modélisation du fonctionnement hydrodynamique

I.3.1. Introduction

Un modèle est une simplification de la réalité, devant être la plus conforme possible du point de vue des mécanismes et processus simulés. Un modèle mathématique décrit le modèle conceptuel (décrivant explicitement les éléments et leurs dépendances et la manière dont on traduit la réalité) en termes d'équations mathématiques.

En hydrogéologie la modélisation c'est de simplifier la représentation d'un système hydrogéologique. Cette approche permet de comprendre et de prévoir le comportement de systèmes hydrogéologiques complexes vis-à-vis des sollicitations anthropiques qui sont variables dans le temps et l'espace. Les modèles tiennent compte de la géométrie, des entrées et sorties dans le système, des lois de formalisation des processus, de l'état initial et des conditions aux limites du système (Singh, 1995). A cet égard, les modèles varient en degré de complexité allant d'une représentation simplifiée des systèmes (boîte noire, boîte grise) aux

modèles les plus élaborés représentant de façon détaillée les processus principaux et les propriétés d'un système.

I.3.2. Objectif de la modélisation

L'objectif global de la modélisation est de fournir une meilleure compréhension du fonctionnement hydrodynamique du système aquifère.

Les objectifs spécifiques consistent en: une synthèse et une intégration des données existantes:

- ✓ une quantification des flux échangés à l'intérieur du système aquifère entre les différents compartiments, de même que les flux de drainance.
- ✓ une quantification des flux entrants et sortants du système aquifère.
- ✓ réaliser des prédictions sur le comportement du système considéré en réponse a des sollicitations;
- ✓ fournir des informations pouvant aidé a l'organisation de nouveau tests in situ (pompage, traçage).

I.3.3. Types de modèles

La justification du modèle repose sur le fait que les mêmes équations régissent les phénomènes en vraie grandeur et en modèle réduite. Actuellement, différent types de modèle hydrogéologique existent:

A. Modèles de type " boîte noire "

Les modèles de type « boîte noire » sont des modèles globaux où le système est considéré comme une entité unique. La résolution du problème consiste à chercher un opérateur dont l'application sur l'entrée soit une représentation satisfaisante de la sortie (De Marsily, 1978). Cette approche est utile quand les mécanismes étant à la base du comportement d'un système sont inconnus ou mal compris, ou quand les mécanismes connus sont trop complexes pour être traduits par les lois physiques (Flores et al, 2006). Cette approche ne peut être en aucun cas utilisée pour des prédictions (Dassargues A, 1991).

B. Modèles physiquement basés

Les termes "Physique", "mécaniste" ou "boite blanche" sont utilisés pour désigner les modèles dont la structure est basée sur des lois physiques, chimiques ou biologiques. Les

modèles physiquement basés tiennent compte de la connaissance à priori des phénomènes modélisés et utilisent l'expression mathématique des lois physiques décrivant ces phénomènes.

Ces modèles sont dit spatialement distribués s'ils tiennent compte de la variabilité spatiale des processus et/ou des variables d'entrée et/ou des conditions aux limites et/ou des caractéristiques du système (Carstensen et al, 1997).

C. Modèles " boîte grise "

Les modèles " boîte grise " combinent certaines caractéristiques des modèles " physiquement basé " ou " boîte noire ". Ces modèles tiennent compte du principe des modèles physiquement basé pour modéliser les processus bien connus et le principe des modèles « boîte noire » pour modéliser les relations moins connues ou pour améliorer l'efficacité du modèle (Flores et al., 2006).

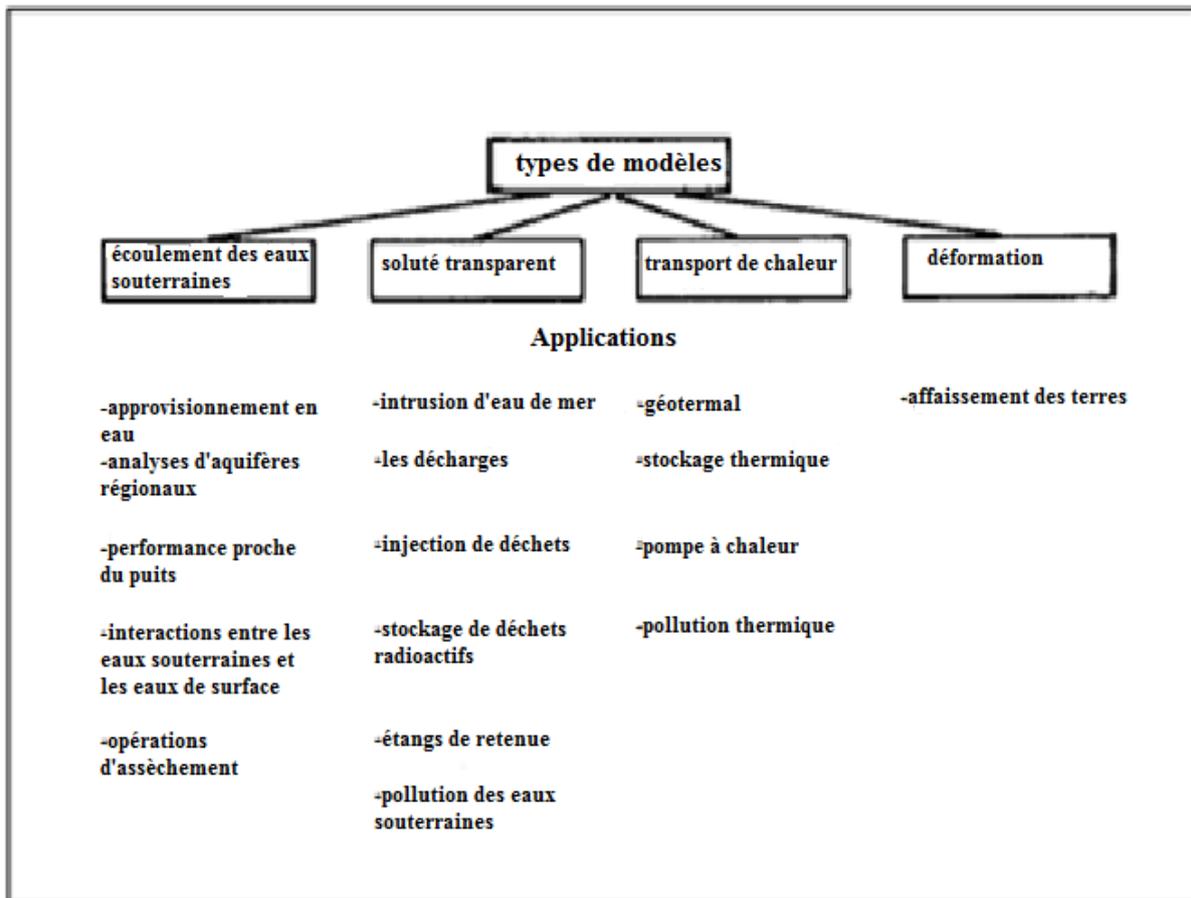


Figure I- 3 : Différents types de finalité des modèles hydrogéologiques et leurs applications (Mercer & Faust, 1980)

I.3.4. Modèles d'échelle physique

La modélisation physique en hydrogéologie se fait grâce à des modèles de simulations du milieu expérimental pour étudier les paramètres physique (perméabilité, transmissivité, la turbulence, l'érosion, etc.).

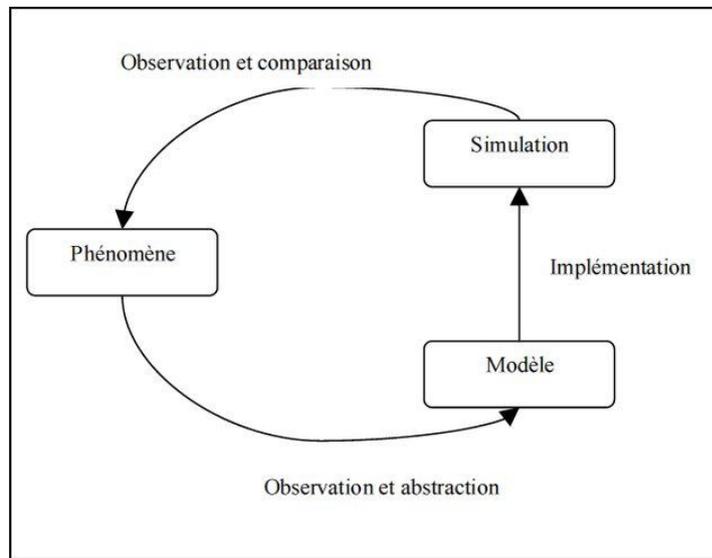


Figure I-4 : Cycle de modélisation par simulation (Tranouez, 2005)

I.3.5. Le modèle conceptuel

Le modèle conceptuel constitue la façon de traduire ou de représenter la réalité dans le modèle hydrogéologique.

La conceptualisation ou la construction d'un modèle conceptuel du problème à étudier consiste à choisir les hypothèses fondamentales qui vont sous-tendre toute la modélisation. Ces hypothèses réduisent le problème réel en un problème simplifié qui doit être acceptable au vu des objectifs de modélisation et des questions spécifiques aux quelles il faut répondre (Dassargue A, 2015).

I.3.6. Modèle mathématique

On peut distinguer plusieurs types de modèles:

A. Le modèle déterministe

S'appuie sur la description du bassin versant et prend en compte une ou plusieurs de ses caractéristiques physiques (pente, superficie, type de sol, occupation du sol, ...). Les modèle

déterministes ont pour application la prévision hydrologique pour la gestion des ouvrages ou pour la prévision des crues, la délimitation des zones inondables, la gestion territoire, la quantification des impacts potentiels des changements climatiques.

Il y a aussi les modèles cinématiques (descriptifs) ou dynamiques (explicatifs), suivant que l'évolution temporelle du système est simplement décrite ou mise en relation avec les forces qui en sont la cause.

B. Le modèle probabiliste

Sert à établir des critères de conception d'ouvrages (par exemple: dimensionnement des évacuateurs de crue des ouvrages hydrauliques grâce au calcul de la crue et de la cote de projet) ou à vérifier les performances d'ouvrages existants. La finalité du modèle probabiliste est de fournir des grandeurs statistiques de variables hydrologiques : débits maximum de pointe crue d'une occurrence donnée, précipitations minimales d'une durée donnée et d'une période de retour donnée (Medane, 2012).

B.1. Le modèle statistique et stochastique

Au sein des modèles probabilistes, on distingue les modèles statistiques – ajustement de lois statistiques, méthode du Gradex et les modèles stochastiques qui représentent la nature aléatoire des phénomènes hydrométéorologiques à l'aide de distributions statistiques. Le générateur stochastique de pluie horaire de la méthode SHYPRE (Cernesson, 1993, Arnaud, 1997) permet ainsi la simulation de longues séries de précipitations grâce à la connaissance de lois de probabilité décrivant les phénomènes pluvieux (durée et nombre des averses, intensité maximale de l'averse, position du maximum, ...) et issues des observations.

C. Le modèle global ou distribué

Selon comment sont considérés le territoire étudié et les processus hydrologiques, on parle de Modèle global ou de modèle distribué. Le bassin est considéré comme une seule entité qui réagit dans son ensemble. Les caractéristiques physiques et les grandeurs météorologiques sont considérées comme uniformes à l'échelle du bassin versant assimilé à une unité ponctuelle. Il s'agit de valeurs moyennes applicables à tout le bassin versant. Les processus hydrologiques sont simulés pour l'ensemble du bassin versant (Medane, 2012).

I.4. Type de donnée et étapes de la modélisation hydrogéologique

Quatre types de données sont nécessaires à la modélisation hydrogéologique (Dassargues, 2011):

- des données sur la géométrie de la zone à modéliser, d'un points de vue géologique, topographique, hydrologique...
- des valeurs des caractéristiques du système influençant les processus simulés (conductivités hydrauliques, coefficients d'emmagasinement spécifiques, porosité effective...)
- des données sur les sollicitations appliquées au système à modéliser (pompages, injections,)
- des données historiques mesurées de la variable du problème ou sa dérivée (hauteurs piézométriques mesurées...), indispensables pour la calibration du modèle.

La construction d'un modèle hydrogéologique, comme tout autre modèle, comprend plusieurs étapes indispensables, reprises dans la figure I.5 ci-dessous:

- la définition des buts poursuivis;
- la construction du modèle conceptuel (niveau d'échelle, régime, dimensionnalité, frontières...)
- la description du modèle mathématique expliquant tous les processus mis en cause dans le modèle conceptuel et leurs relations;
- le choix d'un modèle numérique discrétisant la zone en un maillage et remplaçant la variable continue par une variable discrète;
- l'implémentation traduisant le modèle conceptuel sous une forme utilisable pour la modélisation;
- la calibration, engendrant l'optimalisation des paramètres pour faire correspondre les résultats aux mesures;
- l'étude de sensibilité, donnant l'influence des valeurs des paramètres sur les résultats obtenus;
- la validation, similaire à la calibration mais utilisant d'autres mesures;
- l'application du modèle et l'analyse des résultats par rapport aux buts poursuivis (Dassargues A, 2011).

I.4.1. Discrétisation spatiale du domaine d'écoulement

La discrétisation géométrique doit tenir compte de nombreux impératifs, la discrétisation spatiale, en cellules, éléments, régions, dépend étroitement du schéma d'intégration spatial utilisé. Le maillage est la représentation du domaine étudié par l'assemblage de cellules. Leur taille est choisie en fonction de plusieurs paramètres, il existe trois méthodes de discrétisation du milieu naturelle.

A. Différences finies:

La méthode consiste à approcher, dans un sous-espace de dimension nie, un problème écrit sous forma variationnelle (comme minimisation de l'énergie en général) dans un espace de dimension infinie. La solution approchée est dans ce cas une fonction déterminée par un nombre fini de paramètres comme, par exemple, ses valeurs en certains points ou nœuds du maillage. Son avantages est un traitement possible de géométries complexes, nombreux résultats théoriques surla convergence, son inconvénient sa complexité de mise en œuvre et grand coût en temps de calcul et mémoire(Da Silva E, 2011).

Permet la résolution de problèmes régionaux d'écoulement des nappes, en une ou deux dimensions, dans des systèmes multicouche, il peut représenter les hétérogénéités des propriétés des milieux. La discrétisation de l'espace en maille carrées, ce maillage peut être raffiné à l'aide de la méthode de maillage de type écossais (Ledoux E, 2003).

En générale la taille des mailles dépond de plusieurs facteurs:

- a) de la précision souhaitée sur les calculs;
- b) des contours plus ou moins sinueux des limites;
- c) du nombre et de l'éloignement des singularités (puits);
- d) mais aussi de la capacité de l'ordinateur

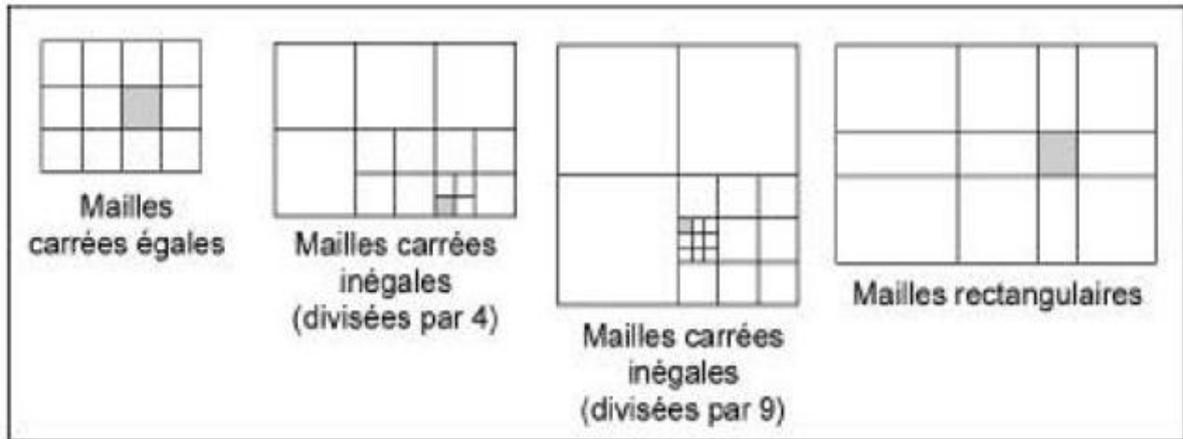


Figure I-5 :Taille et nombre de maille

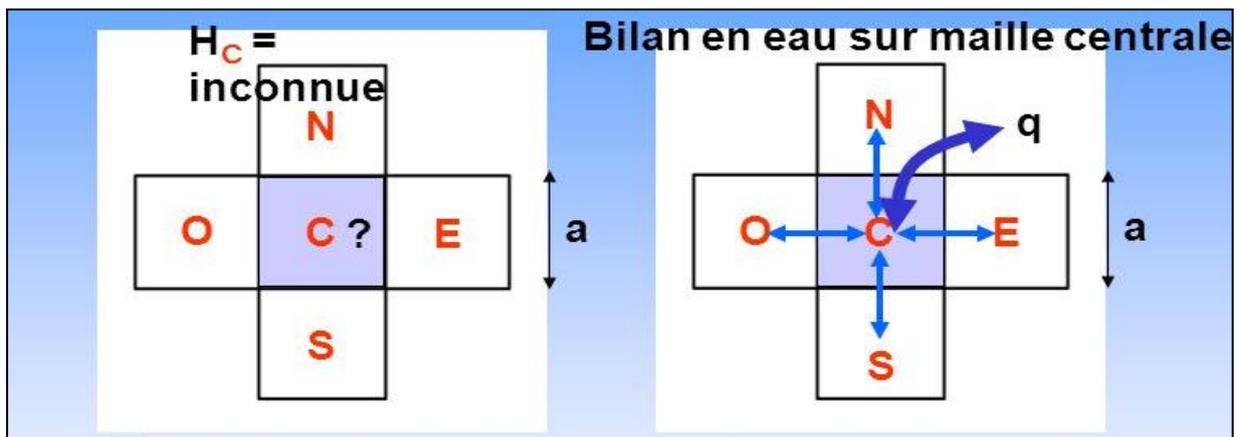


Figure I-6 :Schéma de résolution aux différences finies

B. Eléments finis

L'objectif de la méthode des éléments finis est de simuler le comportement d'un système physique en utilisant l'ordinateur. La description correcte d'un système physique constitue une première étape essentielle de la modélisation numérique. Elle permet la résolution de problèmes régionaux d'écoulement des nappes, en une ou deux dimensions, dans le système multicouches, il peut représenter les hétérogénéités des propriétés du milieu. La discrétisation de l'espace en maille carrées présente une grande facilité d'emploi, néanmoins, dans certaines zones du modèle, ce maillage peut être raffiné à l'aide de la méthode de maillage de type écossais (Ledoux E, 2013).

C. Elément limites

Des approches d'éléments aux limites ou d'intégrales de limites ont été proposées pour résoudre l'équation d'écoulement. L'avantage principal de celle-ci est que la précision du calcul ne dépend pas de la taille des éléments utilisés. Contrairement aux deux méthodes précédemment décrites. Ainsi, on peut se servir de quelques éléments très grands (ou même infinis), ce qui rend la méthode très efficace du point de vue du temps de calcul (Ledoux E., Rouquet S, 2010).

1.4.2. Conditions aux limites

La résolution des équations ne peut pas s'effectuer sans formulation explicite de la condition initiale et des conditions aux limites. La condition initiale consiste à connaître la distribution de potentiel hydraulique en tout point du domaine au temps initial. Les conditions aux limites concernent les règles d'échange des flux entre le domaine modélisé et le milieu extérieur. Dans le cadre de nos préoccupations, il s'agira d'un flux d'eau, d'un flux de matière migrant avec l'eau, ou encore d'un flux de chaleur.

Les relations existantes entre le système à modéliser et son environnement (eau de surface, unités hydrogéologiques environnantes) sont représentées au travers de conditions aux frontières de trois types:

- **Condition de Dirichlet**

La condition de Dirichlet (condition de premier ordre) permet de fixer une hauteur piézométrique au niveau de la frontière. Cette hauteur piézométrique constante en régime permanent peut être variable en régime transitoire.

- **Condition de Neumann**

La condition de Neumann (condition de deuxième ordre ou de flux imposé) permet, dans le cas où les flux d'échanges seraient connus, de fixer le débit susceptible de traverser la limite. par exemple ce flux est nul dans le cas des limites peu perméables ou les flux échangés avec le milieu extérieur peuvent être considérés comme négligeables.

- **Condition mixte**

- La condition mixte (condition de 3ème ordre ou de Fourier ou de Cauchy où de flux dépendant de la hauteur piézométrique) permet par exemple de simuler les relations existantes entre les eaux souterraines et les eaux de surface ou les interactions entre les aquifères.

Pour chacune des 5 formations hydrogéologiques considérées dans le modèle, des conditions aux frontières sont définies en régime permanent et en régime transitoire (Medioun H, 2011).

1.4.3. Modélisation en régime permanent

Dans les conditions en régime permanent, on admet que les termes du bilan en eau de la nappe, exprimés dans les conditions aux limites et dans le débit algébrique prélevé, sont invariants dans le temps et l'on recherche l'état stationnaire correspondant. Le régime permanent est donc une condition qui caractérise un aquifère avant qu'une variation ne lui soit introduite (Bandani et al., 2011). Toutefois, les simulations sont basées sur deux principaux processus: le calage et la validation. D'une part, le calage est le processus d'ajustement de paramètres et flux tels que la perméabilité et la recharge, dans des gammes raisonnables, afin qu'ils puissent correspondre aux observations et mesures de terrain. D'autre part, la validation est un processus visant à tester le modèle calibré en état d'équilibre en démontrant qu'il peut prévoir avec succès un ensemble d'observations non-utilisées précédemment dans son calage (Wels, 2012). La calibration et la validation du modèle hydrogéologique s'assurent donc que le modèle est capable de produire des résultats conformes aux données de terrain. Si les résultats ne sont pas concluants il peut être nécessaire de réviser le modèle conceptuel. Enfin, l'hydrogéologue exploite son modèle pour répondre à l'objectif initialement posé de prédiction, de visualisation de l'état de l'aquifère.

1.4.4. Modélisation en régime transitoire

Les modèles d'écoulement permettent (Jensen, 1987) l'étude de bilans (détermination des tendances régionales des écoulements dans le réservoir et leurs interactions avec les eaux de surface, les autres aquifères), les effets des puits de pompage (cônes de dépression, périmètre de protection) et les nouvelles conditions dans la réalimentation de la nappe (changements climatiques, urbanisation, irrigation). Ces deux derniers objectifs appartiennent au régime transitoire. En régime transitoire, on introduit donc une perturbation et on suit, grâce au modèle, la vitesse d'établissement d'un nouvel équilibre dynamique, c'est à dire le temps nécessaire à l'établissement d'un nouveau régime permanent. On injecte dans le même modèle des débits d'exploitation afin de suivre la réaction de la nappe par rapport aux prélèvements/injection. Si on calcule T et S pour chaque nœud, on peut calculer le rapport T/S, qui est un moyen de gestion de la nappe. Ces modèles simulent des problèmes liés aux stress hydriques, aux épisodes de sécheresse, aux cycles d'exploitation, aux changements d'aménagement de surface, à court, moyen et long termes. Les simulations doivent être

entamées par des conditions initiales représentatives du milieu souterrain à un pas de temps indiqué, et finissent dans une durée de temps spécifiée dans le modèle. En effet, le temps est divisé en des pas de temps, et les charges hydrauliques sont calculées à la fin de chaque pas de temps (Kessasra F, 2015)

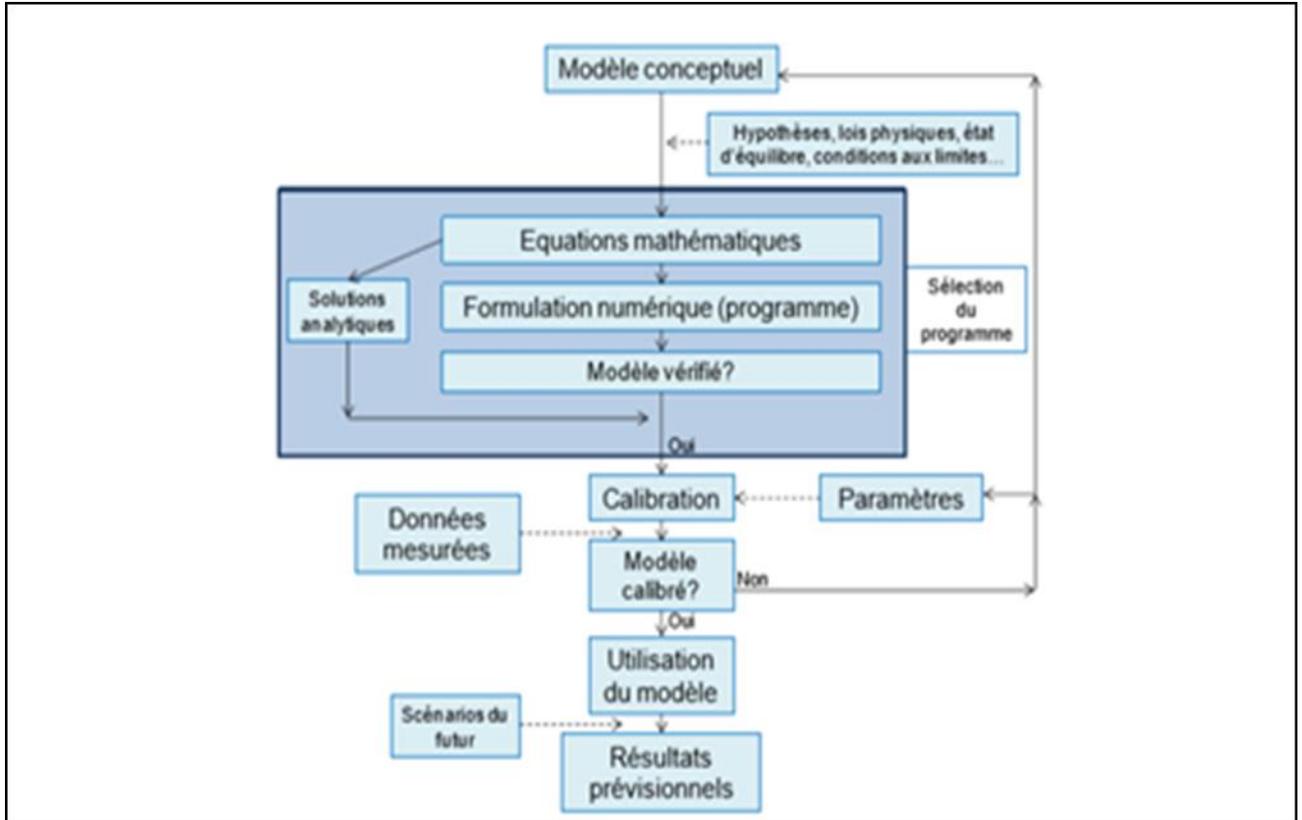


Figure I-7 : Étape de la modélisation hydrogéologique (Dassargues A, 2011)

1.5. Simulation et utilisation du logiciel MODFLOW

Le logiciel Modflow(Harbaugh et al.1988-2005)est un modèle d'écoulement programmé pour simuler l'écoulement à deux ou trois dimensions d'une nappe qui est en régime permanent ou transitoire. sa puissance réside sur le fait qu'il peut simuler une nappe qui est en interaction avec un ensemble de dispositifs tel que les fleuves, drains, réservoirs, puits, évapotranspiration, recharge de la précipitation ou celle de l'irrigation, pouvant commander le comportement de celle-ci (figure 8) Modflow utilise la méthode des différences finies; celle-ci suppose une discrétisation d'un domaine bien défini en un ensemble de couche. chaque couche est, à son tour, divisée en un système de blocs rectangulaires. Chaque cellule (bloc rectangulaire) doit recevoir des paramètres laconcernant c'est a dire des informations telle que les puits, paramètres hydrodynamiques, pouvant influencer sur l'écoulement du volume d'eau contenu dans les cellules.

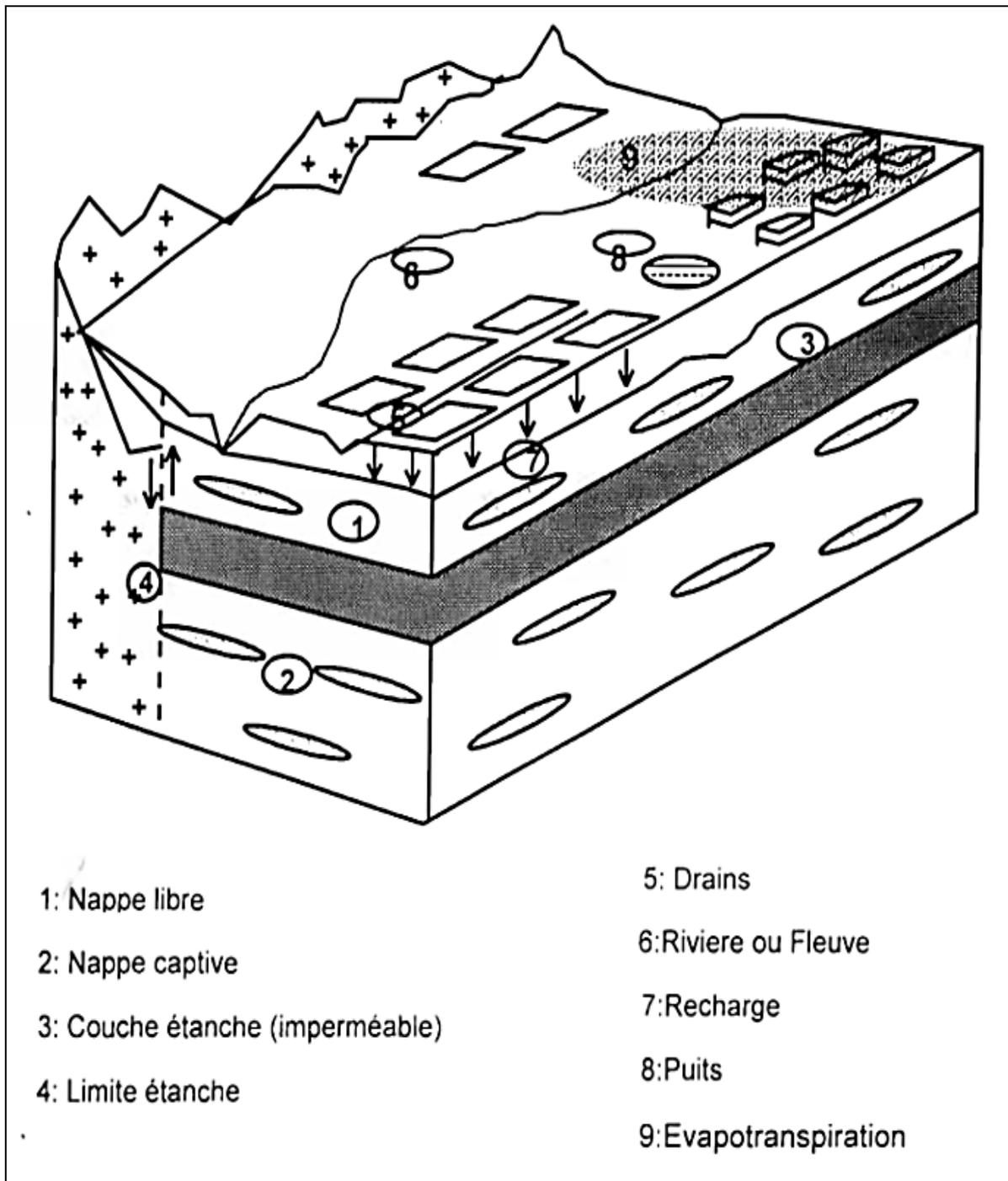


Figure I-8 : Modèle pouvant être simulé par Modflow (CISSE M,2002)

Conclusion

La modélisation d'un phénomène hydrologique ou hydrogéologique peut se synthétiser de la manière suivante:

- ✓ On part des lois élémentaires où l'on déduit des relations entre les variables;
- ✓ Si l'on exprime certaines variables x , y en fonction de l'une d'elles (temps t), ces relations donnent lieu à des équations dont les inconnues sont les fonctions x , y (équations fonctionnelles)
- ✓ On cherche les solutions de ces équations par voie graphique ou numérique;
- ✓ Si les fonctions obtenues mathématiquement (Niveaux piézométriques) sont proches des fonctions données expérimentalement, on valide notre modèle
- ✓ Si le modèle n'est pas valide, il faudrait apporter des modifications ou affinements de la phase de mise en équation (Perméabilités, transmissivités, épaisseur de l'aquifère, conditions aux limites) ou en construire un nouveau
- ✓ S'il est valide, il peut permettre dans des conditions différentes de prévoir l'évolution dans le temps des variables dans de nouveaux scénarios (exploitation),
- ✓ La vérification peut amener à une extension du modèle mathématique en le modifiant. Le modèle permet d'expliquer et de décrire davantage de phénomènes connexes (pollution des aquifère, avancée du biseau sale, etc.).

Chapitre II:

**Caractérisation de la zone
d'étude**

Situation géographique

Introduction

Une étude hydrogéologique exige une bonne connaissance des facteurs physico géographiques, caractérisant le secteur d'étude, qui font appel à des facteurs primitifs (situation géographique, relief, climat, . . .) pour donner une vue générale sur la région d'étude,

Avant de faire appel à d'autres, facteurs plus explicites (la géologie, la géophysique, la climatologie et l'hydrochimie, . . .).

II.1. Situation et présentation de la région d'étude

La plaine alluviale d'Oued Nil fait partie des côtières Constantinois (O3), à une altitude moyenne de 486,58m, et à une distance de 20Km au Nord Est de Jijel. Elle couvre une superficie de 58 Km² et elle est limitée au Nord par la mer Méditerranéenne, au Sud par les reliefs de la petite Kabylie, à l'Est par la commune de Chekfa et à l'Ouest par la Daïra de Taher. Le secteur d'étude fait partie du sous bassin N°05, compris dans le bassin des « Côtières Constantinois Ouest » La position géographique du bassin versant est définie par les coordonnées Lambert suivantes: X1= 784, X2= 799.22Km; Y1= 369.73, Y2=397.63Km.

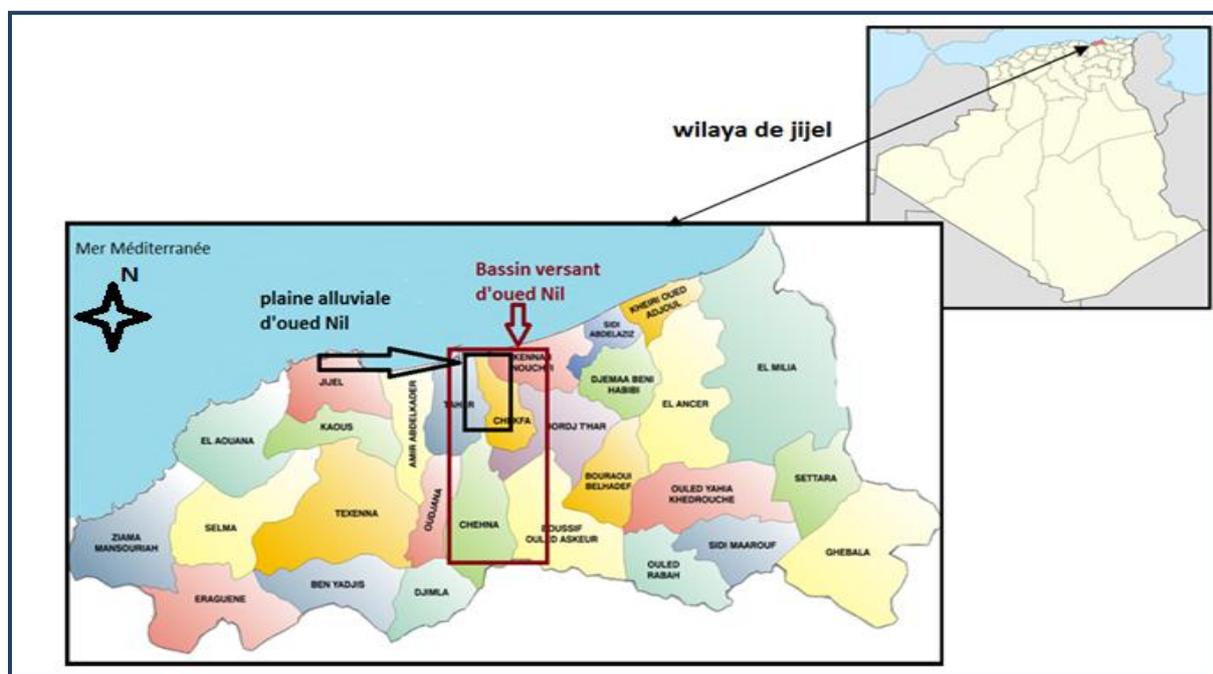


Figure II-1 :la localisation de la zone d'étude

II.2. Géomorphologie et relief

La plaine d'Oued Nil est très basse avec une assez faible pente de 15 à 30%, matérialisée par un sens de d'écoulement superficiel.

La plaine est étagée par différents niveaux de terrasses quaternaires caractérisées par de nombreux petits ravins, ces derniers avec les dépressions fermés ou marécages sont engorgés par les fortes précipitations et par les venues d'eau des massifs montagneux qui se situent aux bordures de la plaine:

- Djebel El Kel'A (311 m)
- Seddet (956 m)
- Touzlant (921 m)
- Echla'la (843 m)
- Tazamt (851 m)
- El Medayene (791 m).

Ces montagnes présentent une zone d'alimentation importante ce qui assure la présence de l'eau durant toute l'année.

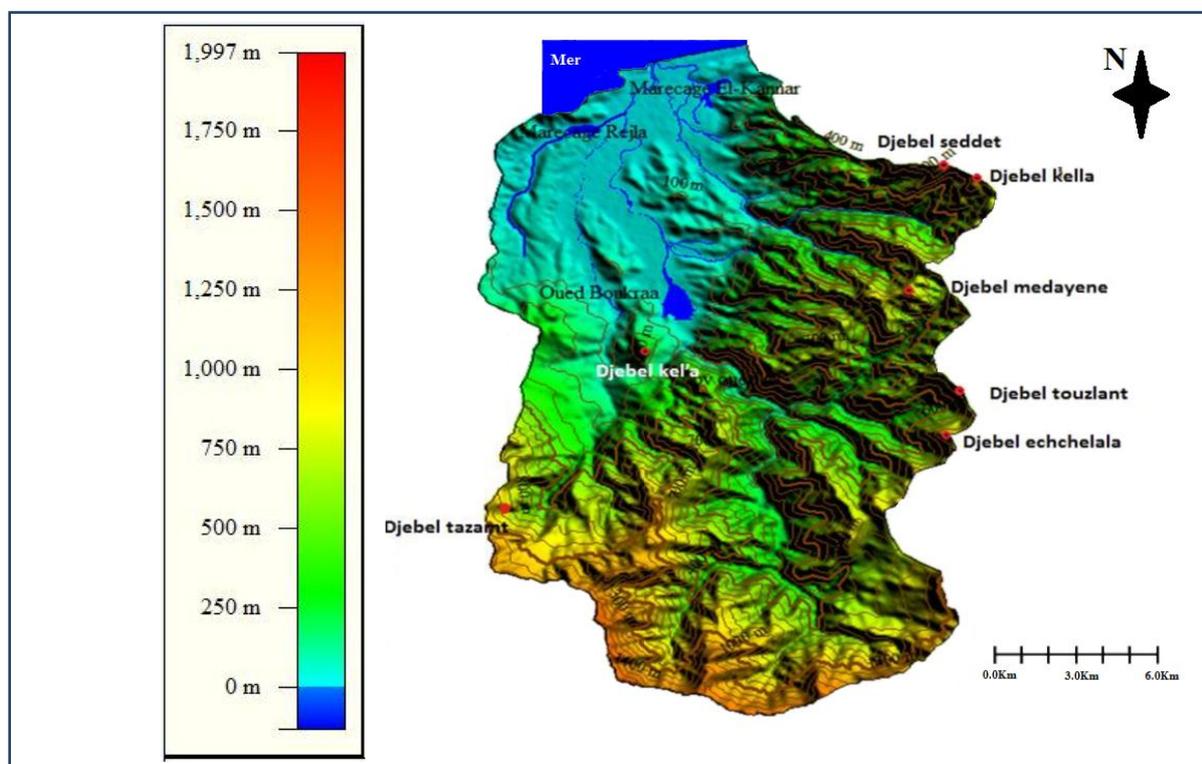


Figure II-2 : Carte du relief du bassin versant de l'Oued Nil.

II.3. Climat

Le climat de la Wilaya est de type méditerranéen, généralement considéré comme chaud et sec en été, avec un maximum de chaleur en Juillet et Aout; il est pluvieux et frais à froid en hiver avec un maximum de rigueur et de pluviosité en Janvier et février.

Dans ce type de climat, trois bandes climatiques peuvent se dégager:

- Une bande climatique littorale avec une grande influence maritime à hiver doux et été

Modéré.

- Une bande climatique sublittorale avec chute de gelée blanche.
- Une bande climatique subtellienne avec beaucoup de chute de neige et de gelée blanche.

Jijel est considérée comme la plus pluviométrique en Algérie avec une moyenne qui peut aller à 1400 mm de précipitation par an. Les vents dominants soufflent généralement de la mer vers le continent de direction Nord-nord ouest-Sud sud est (NNW - SSE).

II.4. Végétation

Suite à l'importance de la lame d'eau reçue annuellement, la région développe en conséquence un couvert végétal assez dense qui se manifeste par des forêts abondantes de chêne-liège qui couvre les terrains, en amont sur les massifs et sur les piémonts, ainsi que des oliviers.

Les parties alluvionnaires de l'aval sont en général dénudées et servent à l'agriculture des serres là où les terres ne sont pas marécageuses. Cette végétation demeure menacée par l'érosion favorisant la dégradation du sol.



Figure II-3 : Agriculture maraichère dans la plaine alluviale d'Oued Nil

II.5. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est très dense. Il est présenté principalement par Oued Nil et Ses deux affluents: Oued Boukaraa et Oued Saayoud et Oued Tassift.

Les lits de ces Oueds ont une largeur de 10 à 35m et une profondeur de 2 à 4m. On les

Considère comme un grand potentielle en eau superficielle destinée à l'irrigation.

En plus des Oueds, on trouve aussi les marécages et les Ghedirs (dépression fermées).

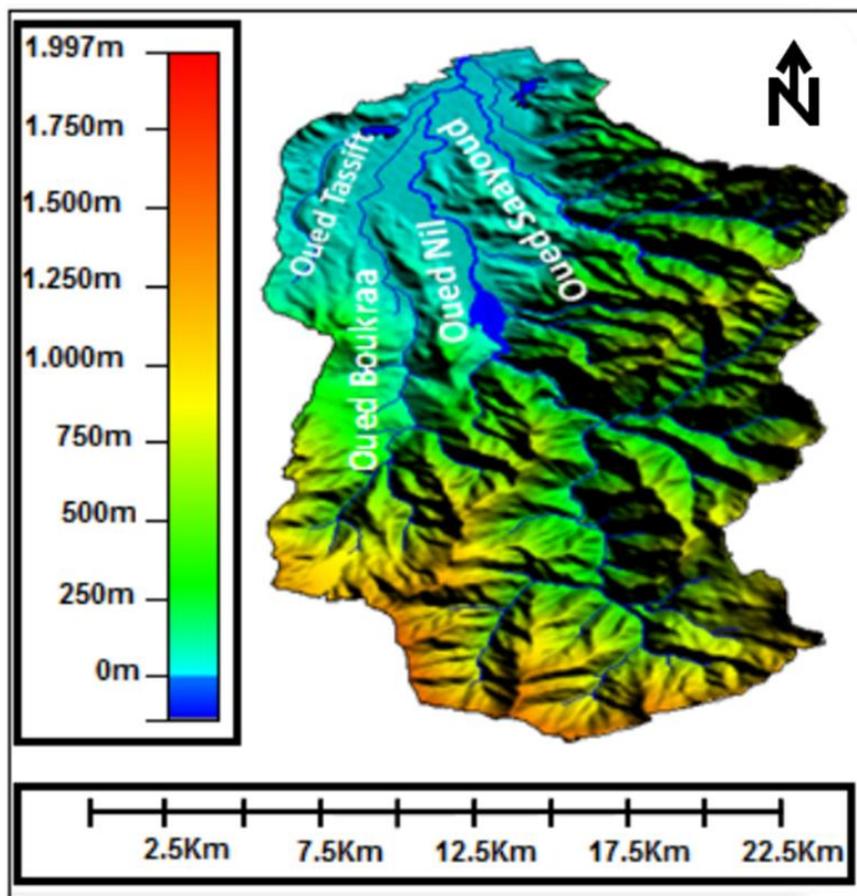


Figure II-4 : Carte du bassin versant de l'Oued Nil et de ses affluents

II.6. Population

La wilaya de Jijel compte une population de 710.000 habitants (RGPH, 2014). Les populations se concentrent principalement dans le Nord de la wilaya. Les communes de Jijel, Taher, El Milia regroupe 50% de la population totale.

La plaine d'oued Nil comptait en 2014 environs 52000 habitants distribués entre les régions d'alentour comme indiquée dans le tableau ci-dessous:

Tableau II.1. La répartition de la population dans la plaine alluviale d'oued Nil

Les Régions	Le nombre d'habitant
Bazoul	6000
El Rejla	1000
Taher	20000
Beni Metrane	5000
Bouachir	2000
Zouitna	3000
Sbat	4000
Laazib	2000
Boudakak	800
La Kaf de Jimar	8000
Totale	52000

II.7. Les voies de communication

Les voies de communication sont nombreuses, elles assurent le lien entre les différentes communes. On note également, la présence de la route nationale N°43 qui relie les wilayas de Jijel, Mila, Constantine, la route N°43 franchis oued Nil avant son exutoire marin à 20 Km a l'est de la ville de Jijel.

Conclusion

Sur le plan géographique, la zone d'étude fait partie des plaines côtières dans la Wilaya de Jijel avec un climat méditerranéen de type subhumide à humide, occupant un endroit stratégique du point de vue agricole et c'est l'une des régions les plus arrosées d'Algérie.

La géologie

Introduction

La géologie est un moyen d'investigation indispensable à l'hydrogéologie, par ce fait, elle permet l'identification des formations susceptibles d'être aquifère et de suivre leurs évolutions dans le temps et dans l'espace.

II.1. Géologie régionale

La géologie de l'Algérie du Nord est d'une grande complexité, elle est caractérisée par des mouvements orogéniques Hercyniens et Alpins. Le système géotectonique Alpin qui n'a pas encore achevé son évolution a donné naissance à une variété d'ensembles géologiques très individualisés. Ils se regroupent en trois domaines:

- Le socle kabyle et sa couverture.
- Le flysch interne et le flysch externe.
- Qui regroupent, le domaine Tellien, le domaine Néritique, les séries Sud Sétifiennes et les séries de l'avant-pays Atlasique.

La quasi-totalité de la petite Kabylie est constituée par une couverture tertiaire formée par des sédiments littoraux déposés dans un bassin qui s'est individualisé durant le Néogène (bassin Sahélien de Jijel) surmontant soit un vieux socle métamorphique (socle kabyle), soit des terrains Crétacé appartenant à des séries de type flysch.

II.2. Aspect structural de la région d'étude

Le plan structural de l'Algérie du Nord, auquel appartient la Wilaya de Jijel, s'est formé durant l'ère paléozoïque Mésozoïque et cénozoïque au cours des trois grands cycles tectoniques (Calédonien, Hercynien et Alpin).

Les affleurements du paléozoïque en Algérie du Nord ne sont observables qu'en de rares points (petite et grande Kabylie, Edough).

Les épaisseurs, le degré de métamorphisme et de granitisation du paléozoïque inférieur des kabylies (Wilaya de Jijel) font croire que la bande axiale du géosynclinal calédonien de l'Afrique du Nord se trouvait dans la partie méridionale de la méditerranée actuelle.

Il est possible de donner schématiquement l'allure générale de l'édifice structural quicomporte.

A. Le socle kabyle (antétriasique)

Juxtaposé aux zones externes suivant un décrochement chevauchant dextre fait ressortir:

- Un substratum gneissique polymétamorphique (Précambrien)
- Une couverture décalée de phyllades Cambro-ordovicien, qui surmonte en transgression des calcaires non métamorphiques du Siluro-dévonien.

B. Sous le socle Kabyle

Un ensemble de roches sédimentaires et volcaniques (Jurassique à Sénonien basal) très déformé, débité en écailles. Cet ensemble chevauche vers le Sud les zones externes (telliennes).

C. Sur le socle Kabyle

Un groupe de nappes pelliculaires traversé par une microdiorite quartzifère et surmonté par une nappe structurée forme le flysch de Guerrouche. Ces différentes nappes sont scellées par des dépôts du Miocène terminal, puis, par le Paléocène et enfin par le Quaternaire des vallées.

II.3. Aspect lithologique de la région d'étude

La région de Jijel se trouve sur l'emplacement d'un énorme fossé maritime dans lequel s'accumulent à l'ère secondaire une importante couche sédimentaire.

A l'ère tertiaire, les violentes contractions de la croûte terrestre rapprochent les deux bords du fossé et provoquent le plissement des sédiments du secondaire. L'érosion fluviale intervient alors pour modifier le relief et combler les nouvelles zones de dépression par d'autres couches de sédiments. Au quaternaire, le profil géologique de la région est fixé et les alluvions s'accumulent dans les vallées.

De ce fait, la région de Jijel comprend les zones géologiques suivantes:

- La zone des roches granitiques qui occupent le Sud-ouest d'El-Aouna et une partie d'El-Milia;
- Une zone de micaschiste et de gneiss qui couvre la majeure partie de la région d'El Milia;

- Un massif du secondaire qui occupe la région Est de Sidi-Maârouf, le M'Sid-Aïcha et le Sidi-Driss;
- La zone fragmentée du tertiaire et quaternaire qui occupe principalement les zones de dépressions: plaine de Jijel, de Taher, d'El-Milia, et en altitude les Djebels érodés.

Les dépressions résultant des contractions qui eurent lieu au tertiaire (dépressions de Jijel, d'El-Milia) sont comblées par des alluvions quaternaires.

II.4.Géologie locale

La plaine de l'oued Nil consiste en un remplissage alluvionnaire d'une anciennevallée creusée dans les marnes éocènes à l'Ouest (rive gauche de l'oued Nil) et les terrainsmétamorphiques à l'Est (rive droite de l'Oued Saayoud). Sur ces alluvions se déposent desformations dunaires plus au moins-récents comme celle de Bazoul et d'El-Kennar.

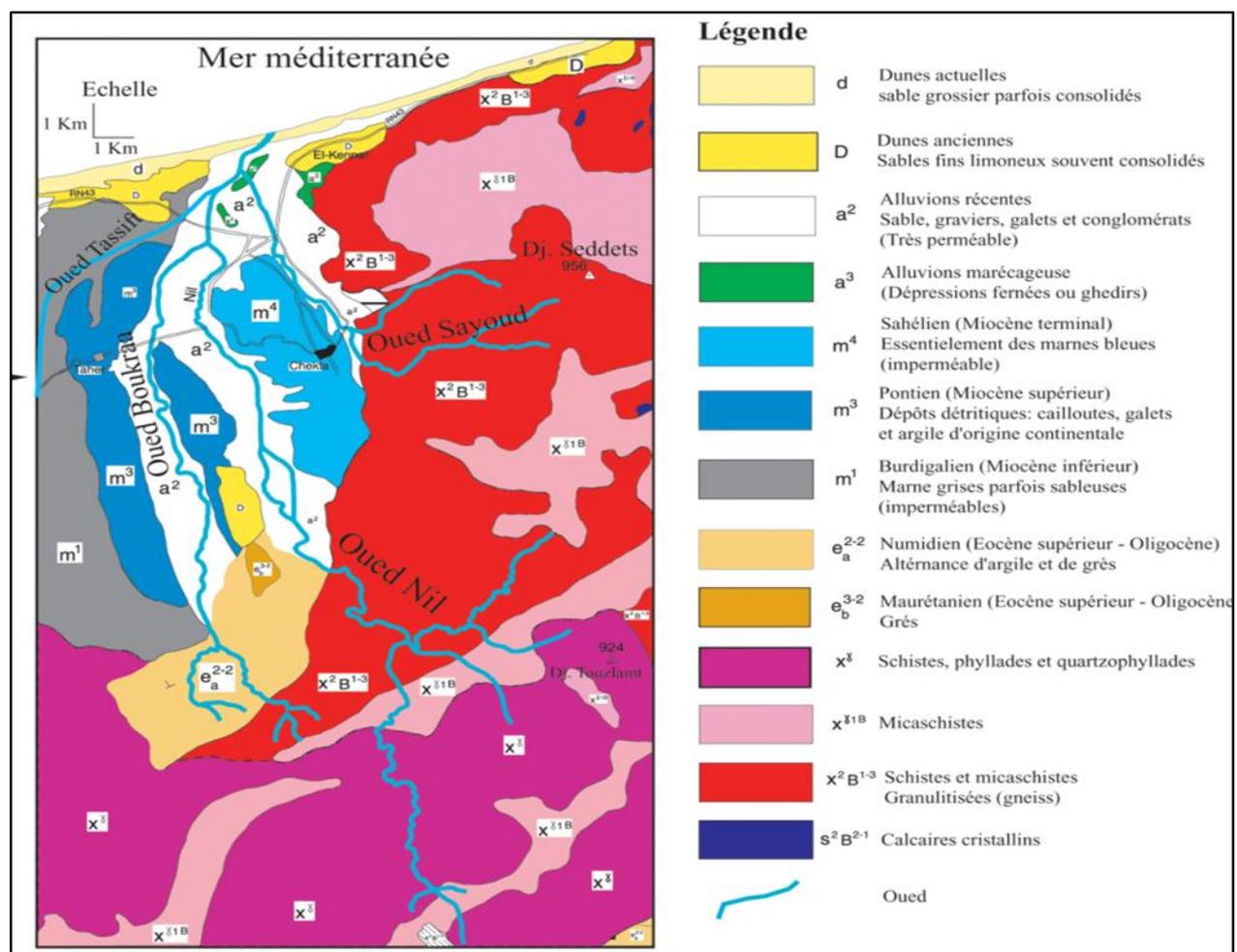


Figure II-5 :Esquisse géologique de la région d'oued Nil (Ehrman F, 1926) in (Lehtihet A, 1983)

II. 5. Aspect lithostratigraphique de la Zone d'étude

II. 5.1. Terrains sédimentaires

Quaternaire

A. Alluvions quaternaire

Elles affleurent à l'Ouest de la plaine. Ce sont des terrasses anciennes des vallées généralement aquifères, constituées d'éléments grossiers (graviers, galets et conglomérats) qui sont très perméables avec une épaisseur variant de 30 à 50 m (Delga D, 1955).

B. Alluvions marécageuse

Elles affleurent au Nord de la plaine. On les trouve dans les dépressions fermées ou ghédirs constitués essentiellement d'éléments argilo-limoneux parfois sableux peu perméables. L'épaisseur varie de 20 à 25m (Delga D, 1955).

C. Alluvions récentes

Sont constituées d'éléments grossiers: graviers, conglomérats et galets très perméables. On les rencontre le long des Oueds principaux, leur épaisseur est inférieure à 10 m (Delga D, 1955).

D. Dunes anciennes

Elles sont constituées de sables fins limoneux souvent consolidés. On les rencontre au Nord de la plaine avec une épaisseur de l'ordre de 25 m. Ces formations sont potentiellement aquifères (Delga D, 1955).

E. Dunes actuelles

Constituées essentiellement de sables fins souvent consolidés. On les rencontre à la bordure de la mer d'une épaisseur de 20 à 25 m (Delga D, 1955).

Tertiaire**A. Paléogène**

Des formations gréseuses affleurent au Sud de la plaine. L'épaisseur varie de 500 à 1000 m. Ce sont surtout le :

A.1. Maurétanien (Eocène supérieur-Oligocène)

Constitué essentiellement de grés.

A.2. Numidien (Eocène supérieur-Oligocène-Miocène inf)

C'est une formation de flysch comportant des alternances de grés avec une prédominance d'argiles, des marnes à la base et des grés au sommet.

B. Néogène**B.1. Miocène inférieur (Burdigalien)**

Affleure dans la partie Ouest de la plaine. Constitué essentiellement par des marnes grises parfois sableuses ou jaunâtres par oxydation, le facies très constant avec des intercalations des

niveaux détritiques et de gros nodules calcaires jaunâtres. L'épaisseur varie de 200 à 300m.

B.2. Miocène moyen (Pontien)

Il apparaît à l'affleurement dans le coté Est et Ouest de l'oued Boukraa. Il est composé de dépôts détritiques, cailloutis et argiles d'origine continentale. De bonne perméabilité et d'une épaisseur de 20 à 25 m.

B.3. Miocène supérieur marin (Sahélien)

Affleure au centre de la plaine et à l'Est de l'Oued principal, il est constitué essentiellement par des marnes bleues.

II.5.2. Terrains métamorphiques

Ils constituent le socle Kabyle, d'âge paléozoïque avec:

A. Schiste phyllade

Argileux micacés ou satinés de teintes très variées, traversés de filons de Quartzlaiteux s'intercalant de couches détritiques.

B. Calcaires métamorphiques (Cipolins)

De couleur blanc, gris ou bleuâtre, parfois micacé et pyriteux s'intercalant en bandes irrégulières ou en amas dans les schistes et les micaschistes.

C. Micaschistes et schistes micacés

Ces formations sont riches en micas noirs et blancs.

D. Schistes granulitisés et gneiss

Ce sont des gneiss schisteux résultant de l'injection des granulites dans les micaschistes, parfois fortement kaolinisés.

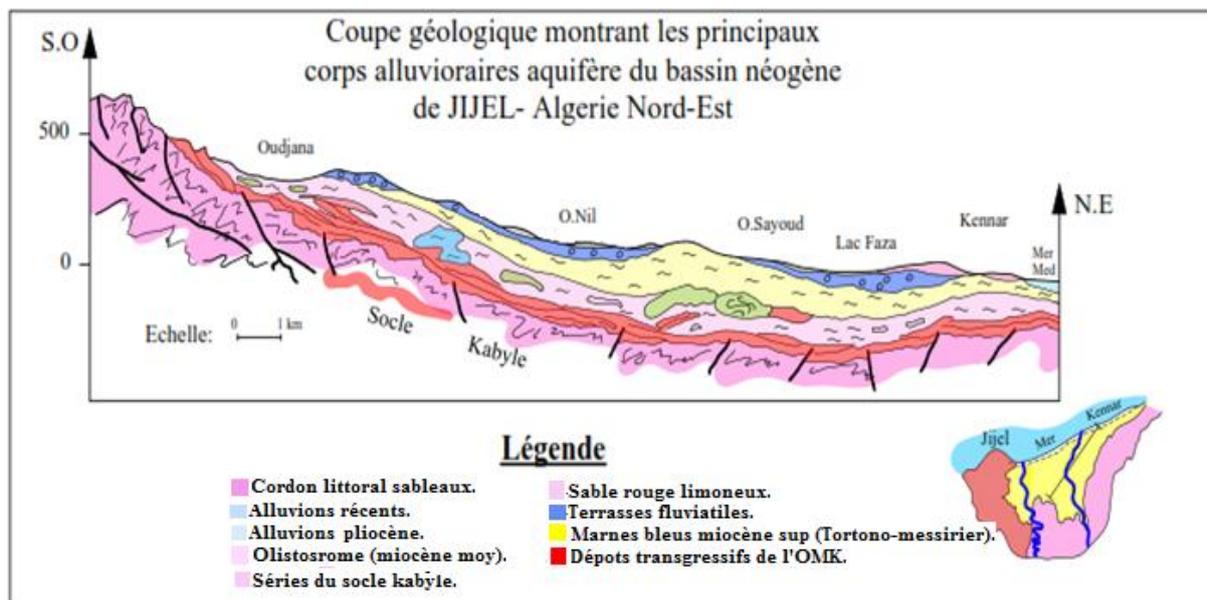
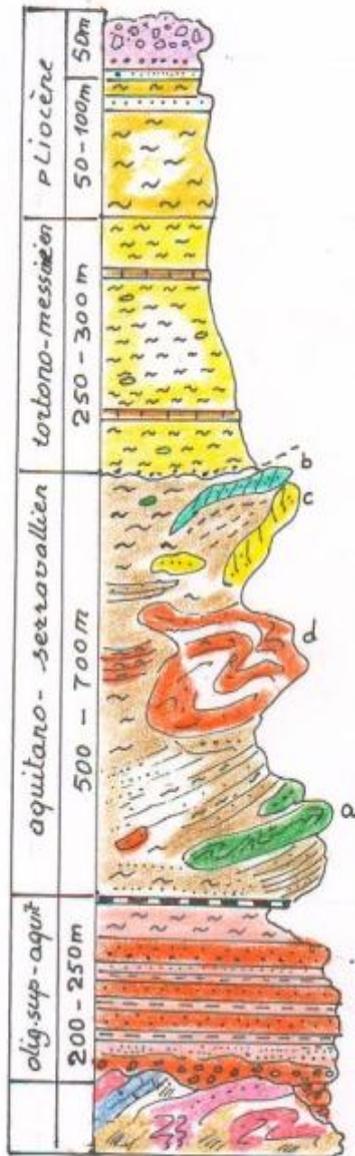


Figure II-6 : Coupe géologique montrant les principaux corps alluvionnaire aquifère du bassin néogène de Jijel - Algérie Nord-Est



dépôts post nappes
sables, graviers et tout venant alluvionnaires
parfois indurés. grossiers, polygéniques
marnes jaunâtres à claires à passées rares
de grès ocres légèrement consolidés

marnes bleues à miches calcaires
et passées calcaireuse (clm)

distostrome à matériel flysch :

a: maurétanien ; b: massylien
c: numidien ; d: grés-micacé.
noyés

dans une molasse marneuse micacée.

O.M.K

silexiles minces passées
marnes jaunes verdâtes micacées
série épaisse de grès turbiditiques
granoclassés, micacés, à élément de socle

conglomérat de base polygénique
substratum kabyle métamorphique

colonne lithostratigraphique du bassin
néogène de Fijel. P^{te} kabyle occid.

Figure II-7 :log stratigraphique

II.6. Tectonique et paléogéographie

Les observations de M. Durant Delga (1949), sur la structure géologique de Texenna et ses environs ont permis de tracer brièvement l'évolution paléogéographique de la région de Jijel.

A. Le Crétacé

Au Sud, on constate que les flyschs maurétaniens du Crétacé sont parfois recouverts par le socle cristallin de la petite Kabylie. Cela est dû à l'existence des klippes à matériel paléozoïque posés sur le Crétacé.

B. Numidien Allochtone

Il s'est déposé après l'ensemble des mouvements responsables du chevauchement du socle cristallin kabyle sur le Crétacé, il est probablement d'âge oligocène discordant jusqu'au Burdigalien sur n'importe quel autre terme plus ancien ou de même âge.

C. Burdigalien

Transgressif et discordant avec une sédimentation marine riche en plancton. Cette sédimentation surtout marneuse se déroule lors d'une période calme.

La mer s'est ensuite retirée pour ne revenir qu'au Paléocène sur la marge côtière de Jijel et plus à l'Est, on a la vallée de l'Oued Kebir d'El-Milia. Les seules traces visibles de la tectonique résident dans le contact entre les séries telles que la discordance entre le socle métamorphique et les marne du Burdigalien.

Le métamorphisme se développe lors de la phase Mésocrétacée.

II.7. Sismologie

Le peu de données concernant la sismicité de la région d'étude (Sismicité de Kherrata par J. Roté, 1947) a permis de résumer ce qui suit:

Les Babors étant périodiquement secoués et vu le fait qu'ils se trouvent à l'Ouest de notre bassin versant, ce dernier se trouve automatiquement concerné par ces secousses, et parmi les

principales secousses qui ont ébranlé la région entre 1850 et 1970, nous avons:

- Le 09 Février 1850 à 36°3'N-4°8'E a eu lieu un séisme de XIII à IX d'intensité sur l'échelle de Mercalli, macroséismique et qui a été ressenti jusqu'à Alger soit 170 Km plus loin de l'épicentre;
- Le 21 et 22 Août à 37°1'N-5°7'E a eu lieu un Séisme d'intensité de X à IX sur l'échelle macroséismique.

Ce séisme et ses répliques occupent une place dans l'histoire sismique de la région, il a détruit une bonne partie de la cote Algérienne, son foyer s'est localisé en mer, il a été suivi par un raz de marée. Ni Jijel, ni Skikda, ni Bejaia n'ont été épargnés et les dégâts ont été importants.

Conclusion

La nature lithologique de la formation est un facteur limitant la perméabilité des sols. Elle influe aussi sur la quantité et même sur la qualité des eaux pouvant s'y infiltrer.

Les empreintes tectoniques que porte le socle métamorphique sont un bon témoignage de l'instabilité et de la tectonique prononcée qu'a subie la région de Jijel (métamorphisme, lacunes des séries secondaires, transgression des flysch Crétacé, charriage du socle kabyle).

Les études géologiques et géométamorphiques montrent que le secteur d'étude (plaine d'Oued Nil) est le siège d'une topographie ancienne dont les dépressions ont été recouvertes par des alluvions récentes et des Terraces anciennes (formations quaternaires).

La nappe se localise dans les alluvions appartenant essentiellement au niveau des sables et des graviers.

La zone d'étude est soumise à une intensité sismique qualifiée de moyenne à forte.

Chapitre III:

Hydroclimatologie et

hydrodynamique

Hydroclimatologie

Introduction

Dans l'optique de cette étude hydrologique, nous s'attacherons plus particulièrement à la détermination des apports d'eau dans la zone d'étude en mettant l'accent sur les quantités reçues et les quantités perdues des eaux par évaporation. Dans ce cas le but est d'aboutir à un bilan hydrique ainsi que à la reconnaissance du régime caractéristique du fonctionnement de tout le système hydrologique qui influe directement sur le comportement piézométrique et hydrodynamique des aquifères dans la zone d'étude

III.1. Aperçu général sur le climat de l'Algérie

Du Nord vers le sud, le climat en Algérie est caractérisé par une grande variationsurtout au niveau de températures et de précipitations et cela est confirmé par les différentstypes de couvert végétal d'une zone à l'autre.

Le climat est de type méditerranéen sur toute la frange nord qui englobe le littoral etl'Atlas tellien (étés chauds et secs, hivers humides et frais), semi-aride sur les hauts plateauxau centre du pays, et désertique dès que l'on franchit la chaîne de l'Atlas saharien. Les écartsde température dans une même journée peuvent être considérables, c'est le cas dans le Saharaoù le mercure peut osciller d'un extrême à l'autre en l'espace de quelques heures seulement.

III.2. Climat wilaya de Jijel

En ce qui concerne la wilaya de jijel qui fait partie de littoral Algérien, comprise dans le Côtier Constantinois Ouest, limité au Nord par la mer Méditerranée, au Sud et à l'Est par le bassin Kébir-Rhumel et à l'Ouest par soummame (03-04).

Le climat est de type méditerranéen, caractérisé par:

- **Une période froide a humide**, caractérisée par une forte précipitation avec des températures faibles qui peuvent atteindre jusqu'a9°C au mois de Janvier.
- **Une période chaude et sèche**, caractérisée par de faibles précipitations avec une élévation dans les températuresqui s'étend du mois de mai jusqu'au mois D'octobre.

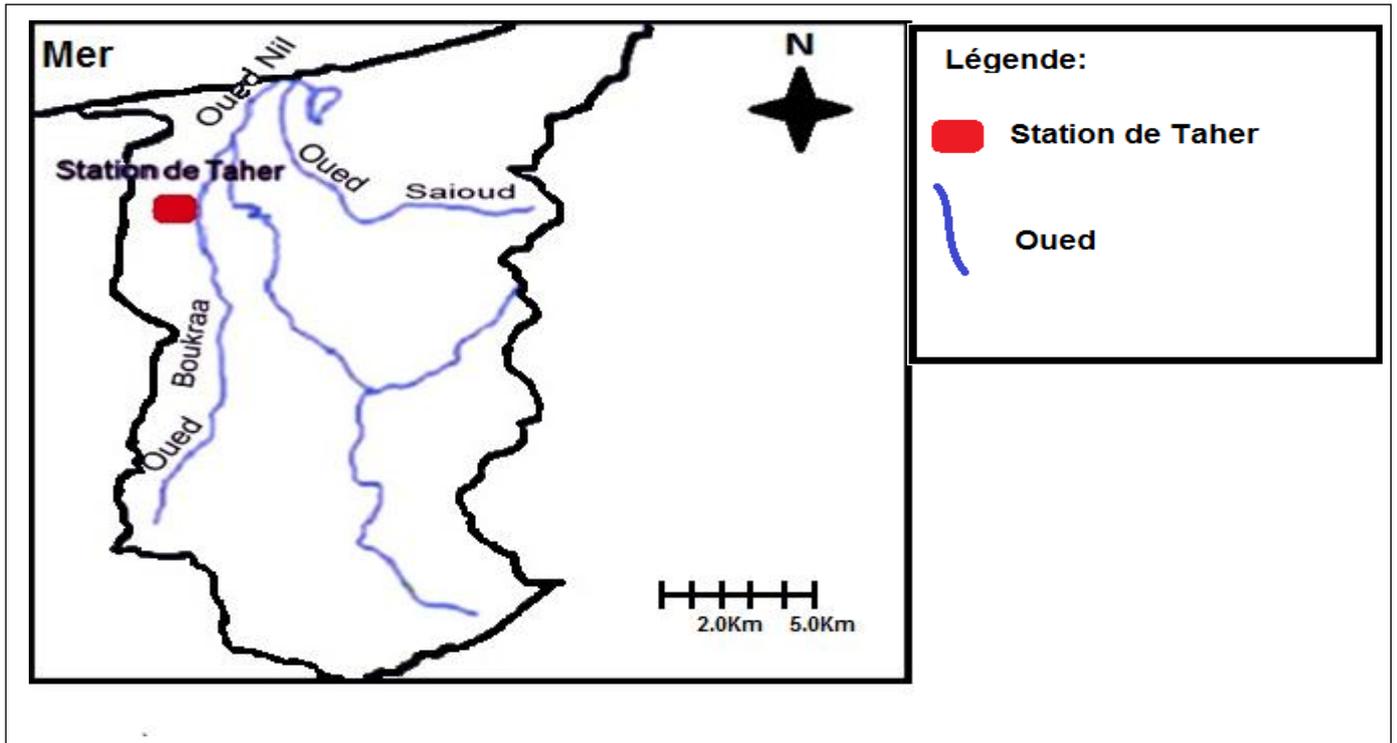


Figure III-1 : Position de la station climatologique de la station de Taher-Achouat (ANRH, 2012)

III.3. Caractéristiques climatiques

III.3.1. La précipitation

Les précipitations constituent le phénomène physique qui décrit le transfert de l'eau de la phase liquide (pluie) au solide (neige et grêle) entre l'atmosphère et le sol. C'est également l'élément le plus important du cycle de l'eau.

En plus de son influence sur les eaux de surface, la précipitation a une influence sur le volume d'eau emmagasinée, par conséquent, abaissant ou augmentant le niveau piézométrique de la nappe.

La Wilaya de Jijel est caractérisée par une pluviométrie décroissante du Nord vers le Sud. Elle est assez élevée sur les monts de Texenna avec plus de 1200 mm/an, alors qu'au niveau des plaines les valeurs varient de 900 à 1000 mm/an (ANRH).

On appelle hauteur de précipitation, la hauteur en mm du volume total des précipitations exprimé en eau, par unité de la surface collectrice et pour des

durées variables (jour, mois, saisons ou années). Pour cela nous allons traiter les données obtenues sur la stations indiquée dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.1: Coordonnées de la station pluviométrique

Station pluviométrique	Code Station	Coordonnée Lambert		Altitude	Pluie annuelle (mm)
		X (Km)	Y (Km)		
Taher-Achouat	030504	785.6	390.5	56	1008

III.3.1.1 Variations interannuelles des précipitations:

L’analyse de la courbe des variations inter-annuelles des précipitations (figure III-02), montre une alternance entre les années déficitaires et les années excédentaires, sur une période de 28 ans (1988-2015) ont distingués 13 année excédentaires et 15 année déficitaires.

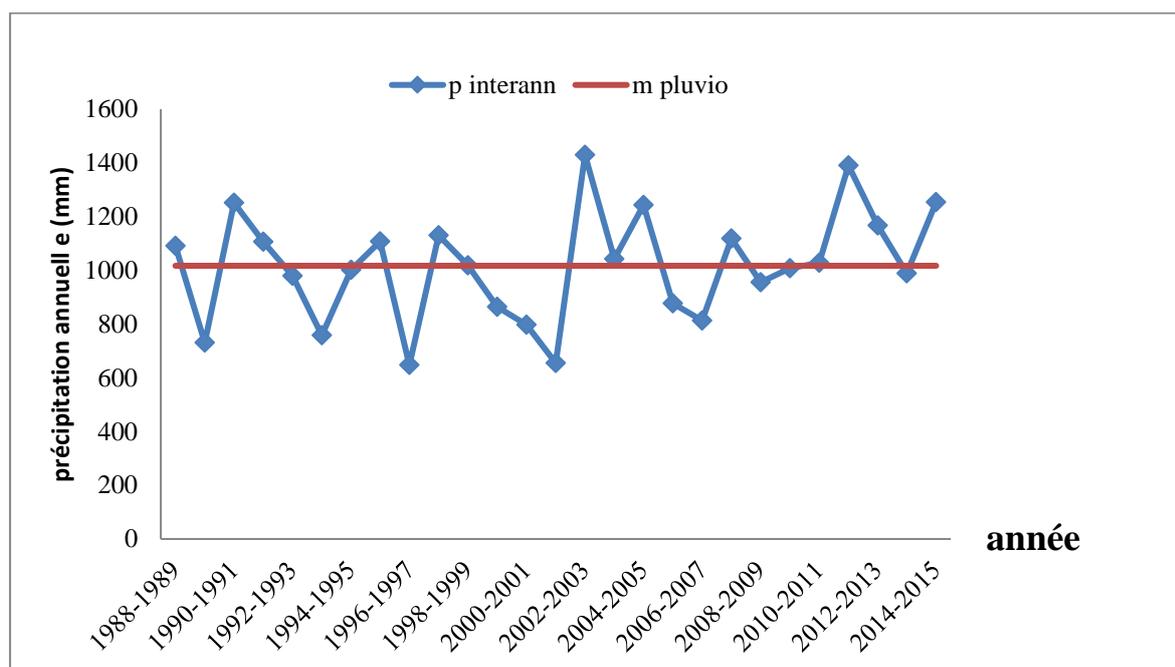


Figure III-2 : Précipitations moyennes annuelles de la Station de Taher Achouat (1988-2015)

III.3.1.2. Variations moyennes mensuelles des précipitations:

Les précipitations moyennes mensuelles montrent plus clairement les mois de hautes précipitations des mois les plus secs.

La courbe des variations des moyennes mensuelles des précipitations, sur une période de 18 ans (1988-2015), montre que le mois de Décembre est le plus pluvieux, avec 185.78 mm, alors que le mois de juillet est le plus sec, avec 2.89mm (Figure III-3).

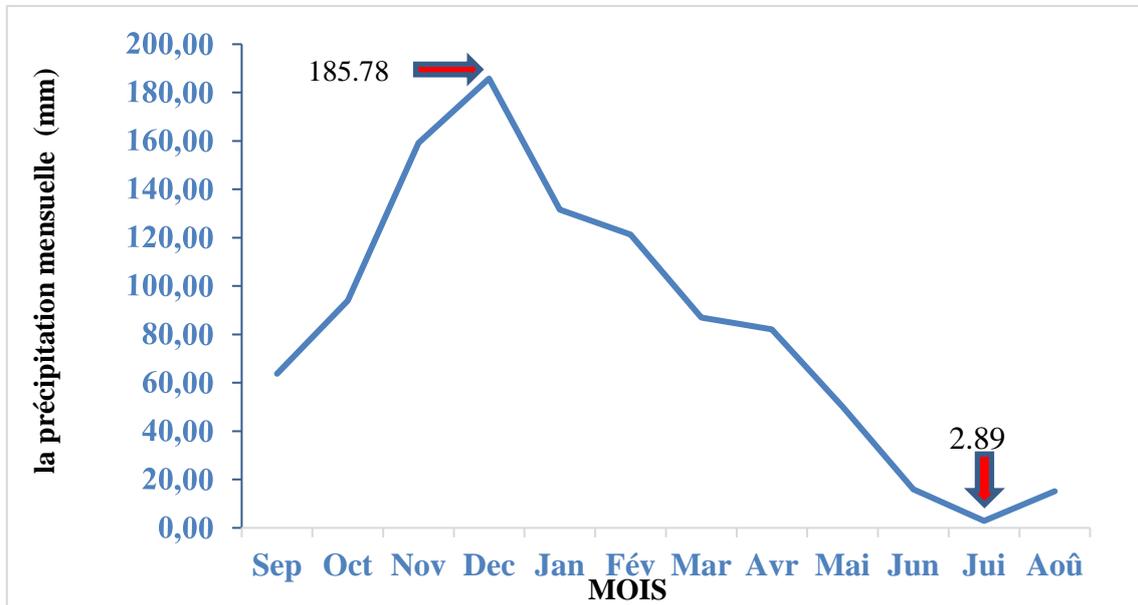


Figure III-3 : Distribution des précipitations moyennes mensuelles à la StationTaher Achouat (1988-2015)

III.3.2. LaTempérature

La température est un élément fondamental du climat. Elle est liée à la radiation solaire. Sa variation influe sur la transformation des eaux en vapeur, que ce soit à la surface ou dans le sous-sol.

De ce fait, elle influe sur le degré d'évapotranspiration et par conséquent elle agit sur le taux de salinité des eaux. Toutefois, la température a un rôle important dans la variation des Composantes du bilan hydrologique.

III.3.2.1 Variations des températures moyennes annuelles:

La courbe représentant la variation annuelle de la température, sur une période de 28 ans (1988/2015), montre que l'année la plus chaude est l'année 2014 avec une moyenne de 19.30°C, et l'année la plus froide est l'année 1992, avec une moyenne de 16.06°C (figure III-04). Signalons que la température moyenne inter-annuelle est de l'ordre de 15,58 °C.

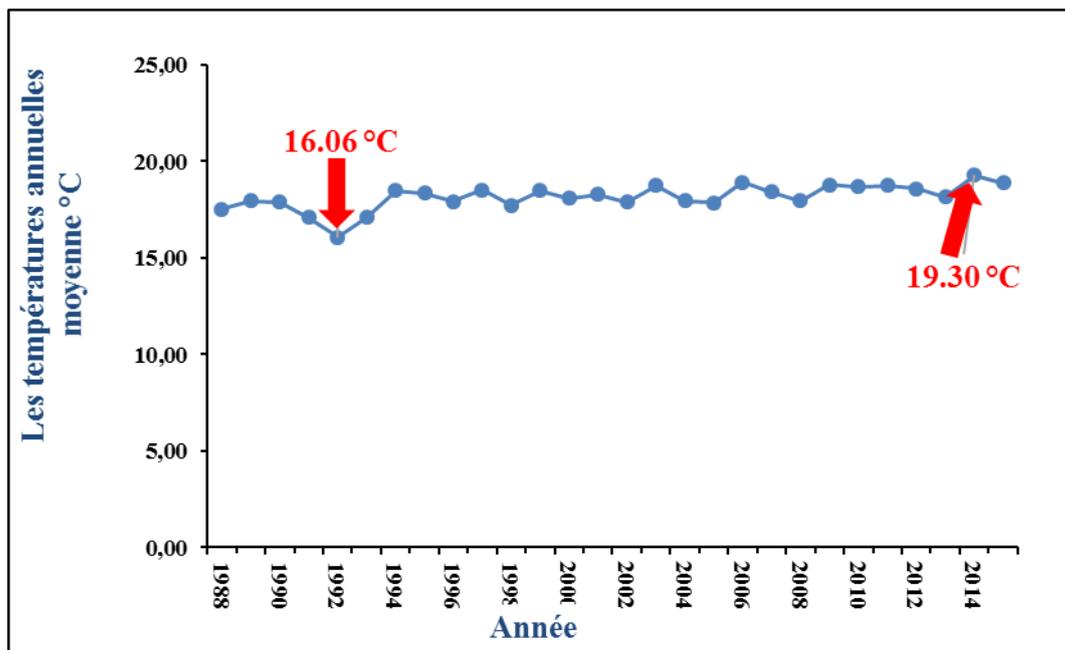


Figure III-4 : Variation des température moyennes annuelles à la Station Taher-Achouat (1988-2015)

III.3.2.2. Variations de la température moyenne mensuelle:

L'analyse de l'histogramme de variation de la température moyenne mensuelle, sur une période de 28 ans (1988-2015), montre que les valeurs les plus élevées sont observées pendant l'été (juin- septembre) avec des températures allant de 23.34 °C à 24.60 °C. Les valeurs les plus basses, qui varient de 12.06 à 19.10°C, sont observées durant la période hivernale (décembre – mars), avec un minimum pendant le mois de janvier 12.06°C).

L'influence de la température sur la qualité chimique se fait sentir pendant la période d'été, où on a une concentration des éléments par évaporation

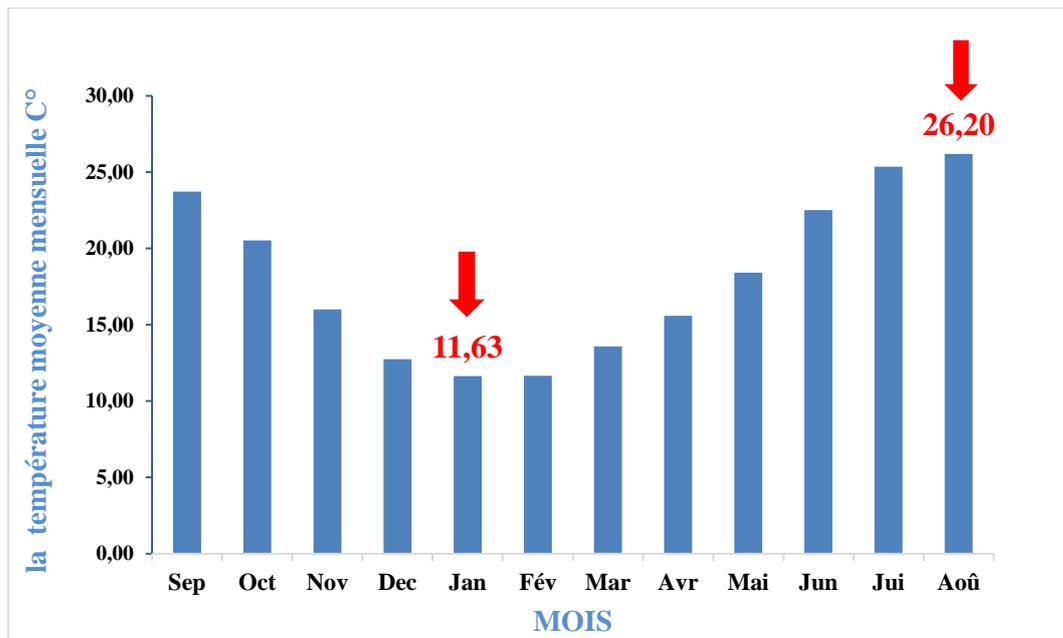


Figure III-5 : L'historique de Variations de la température moyenne mensuelle Station Taher-Achouat (1988-2015)

III.3.2.3.L'évaporation

L'évaporation, est un processus physique de transformation d'un liquide en gaz.L'évaporation est la source de la création des masses nuageuses et constitue de ce fait, une phase essentielle du cycle d'eau, elle dépend de plusieurs paramètres qui sont difficiles à déterminer(Berkane, 2011).

A) Les variations d'évaporations moyennes mensuelles:

La variation d'évaporation est proportionnelle à la température. Dans notre zone d'étude on obtient une évaporation moyenne mensuelle pour une période de 18 ans (1991-2008). On note que l'évaporation moyenne mensuelle la plus basse est celle du mois de février (52.35mm) alors que l'évaporation la plus élevée est celle du mois d'août (117.29mm) (Figure III-6).

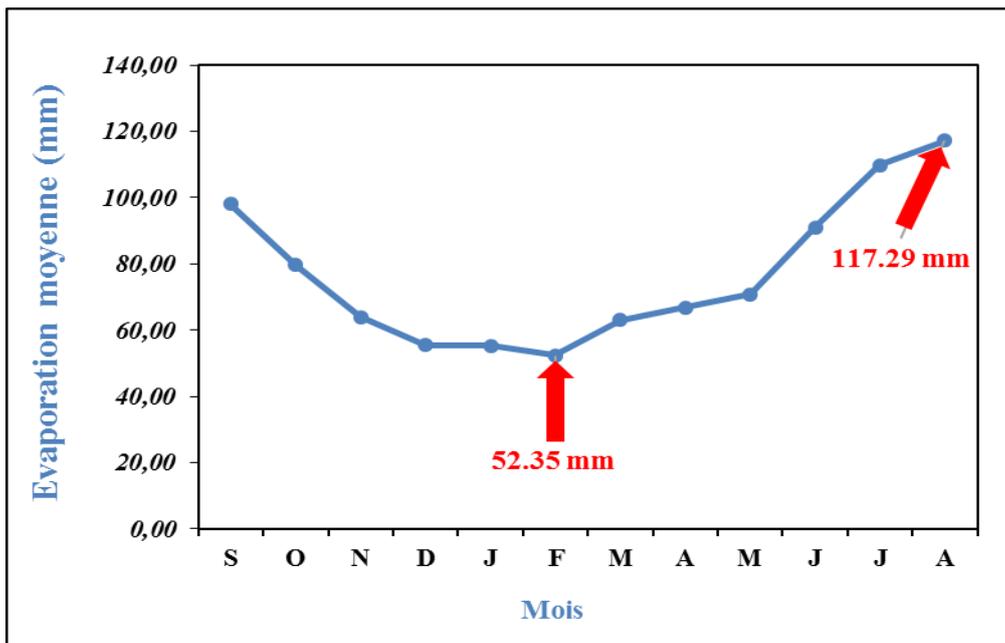


Figure III-6 : Les variations d'évaporations moyennes mensuelles à la station Taher-Achouat (1991-2008)

B/ Les variations d'évaporations moyennes annuelles:

L'évaporation moyenne annuelle dans notre zone d'étude, elle atteint son maximum durant l'année 1994 avec une moyenne d'évaporation égale à 100.17 mm, alors que la valeur minimale est atteinte durant l'année 1998 avec 54.92mm (figure 07).

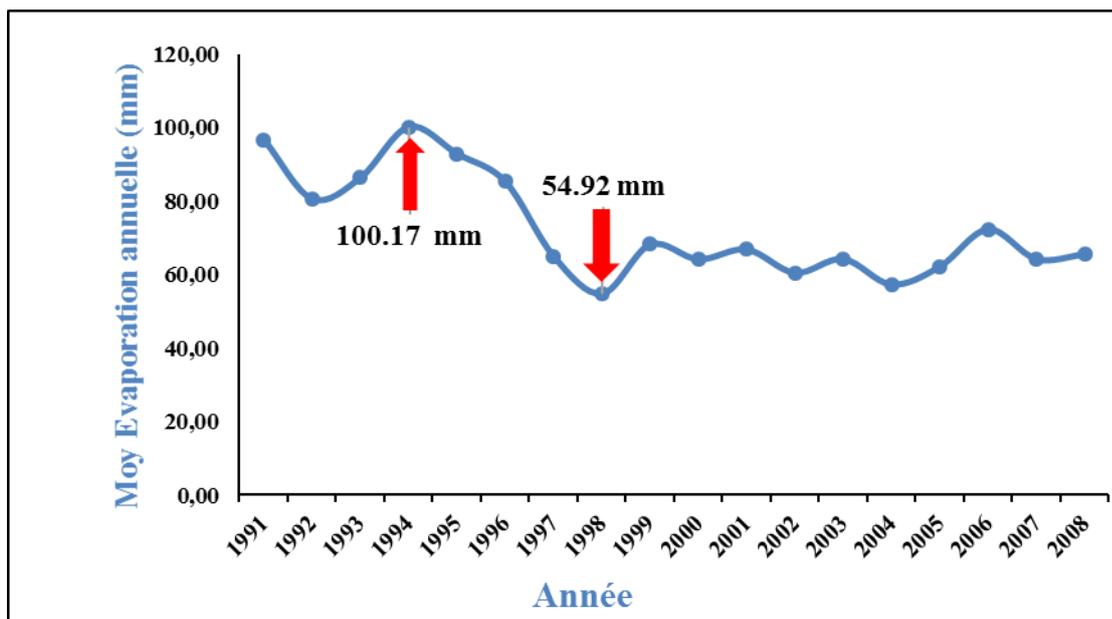


Figure III-7 : Evaporations moyennes annuelles à la station Taher-Achouat (1991-2008)

III.3.2.4. L'humidité relative:

C'est la quantité de vapeur d'eau qui se trouve dans une particule d'air. L'humidité est présente en permanence dans l'atmosphère et même au niveau du Sahara La raison est la suivante: les rayons du Soleil réchauffent la surface de la Terre et provoque l'évaporation de l'eau des Océans ou de certaines réserves d'eau dans le Sahara. A l'inverse, l'humidité peut être absorbée, c'est le processus d'hygroscopique. Il arrive à un moment donné qu'une particule d'air soit saturée en vapeur d'eau mais pas tout le temps, l'humidité relative est donc la quantité d'eau présente dans une particule d'air sur la quantité d'eau que peut contenir la particule d'air

A) Les variations d'humidité relative moyennes mensuelles:

La courbe de la figure III-8, indique une variation de l'humidité moyennes mensuelles avec une valeur maximum de 79.78% enregistrée au mois de mai et une valeur minimum de 71.17% au moi d'aout.

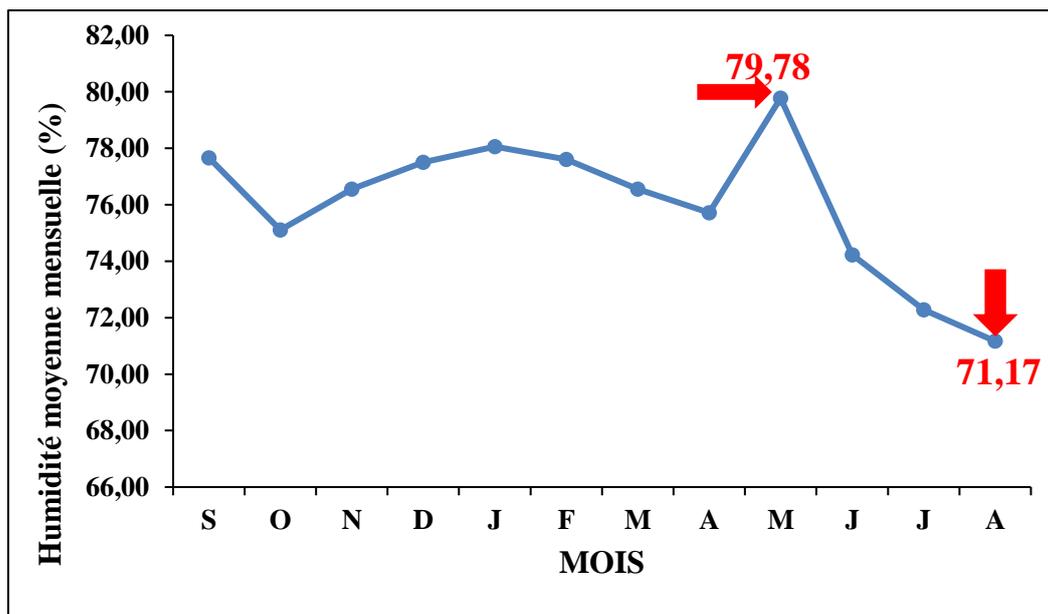
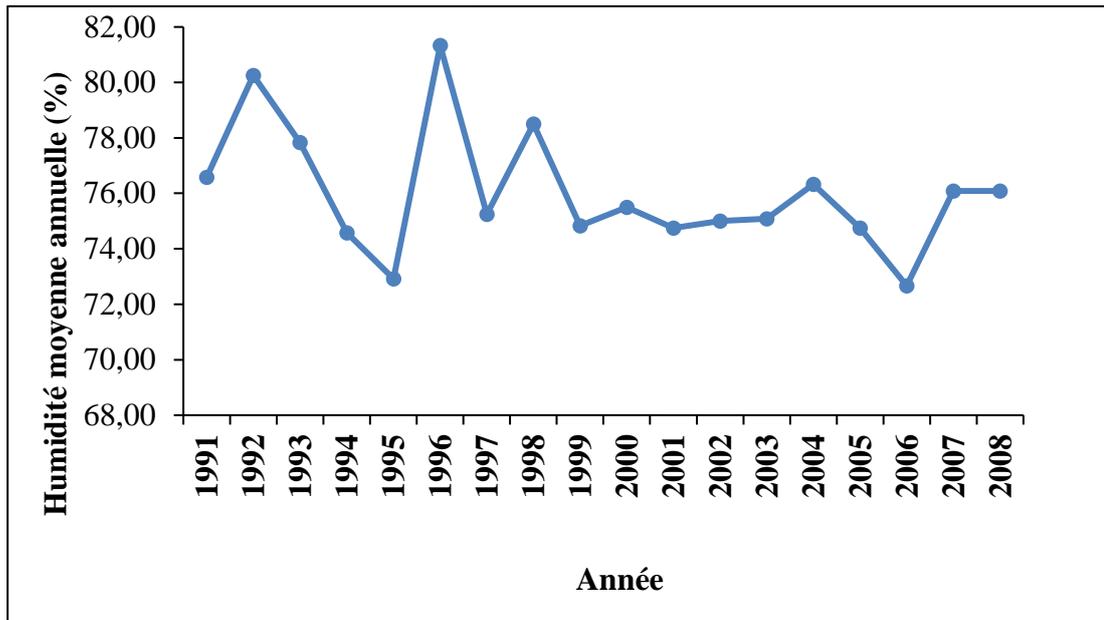


Figure III-8 : Humidité moyennemensuelleà la station Taher-Achouat (1991-2008)

B) Les variations d'humidité relative moyennes annuelles:**Figure III-9 :** Humidité moyenne annuelle à la station Taher-Achouat (1991-2008)

La région d'étude se caractérise par une humidité élevée durant toute l'année, elle varie de 72.67% jusqu'à 81.33%.

III.4. Le diagramme Ombrothermique

Le diagramme Ombro-thermique est établi selon la méthode de Gaussen et Bagnoulis.

Les températures sont reportées à l'échelle double des précipitations. Cela permet de déterminer la période sèche durant laquelle la moyenne mensuelle des précipitations du mois

est inférieur ou égale au double de la température ($P < 2T$).

Grâce à ce diagramme (Figure III-10), on peut distinguer deux saisons. L'une humide qui s'étend du mois de septembre jusqu'à mi-mai, tandis que l'autre sèche, s'étendant de la mi-mai à la fin du mois d'août.

Nous notons que la saison sèche nous indique un déficit de précipitation, par contre la Saison humide présente un excédent.

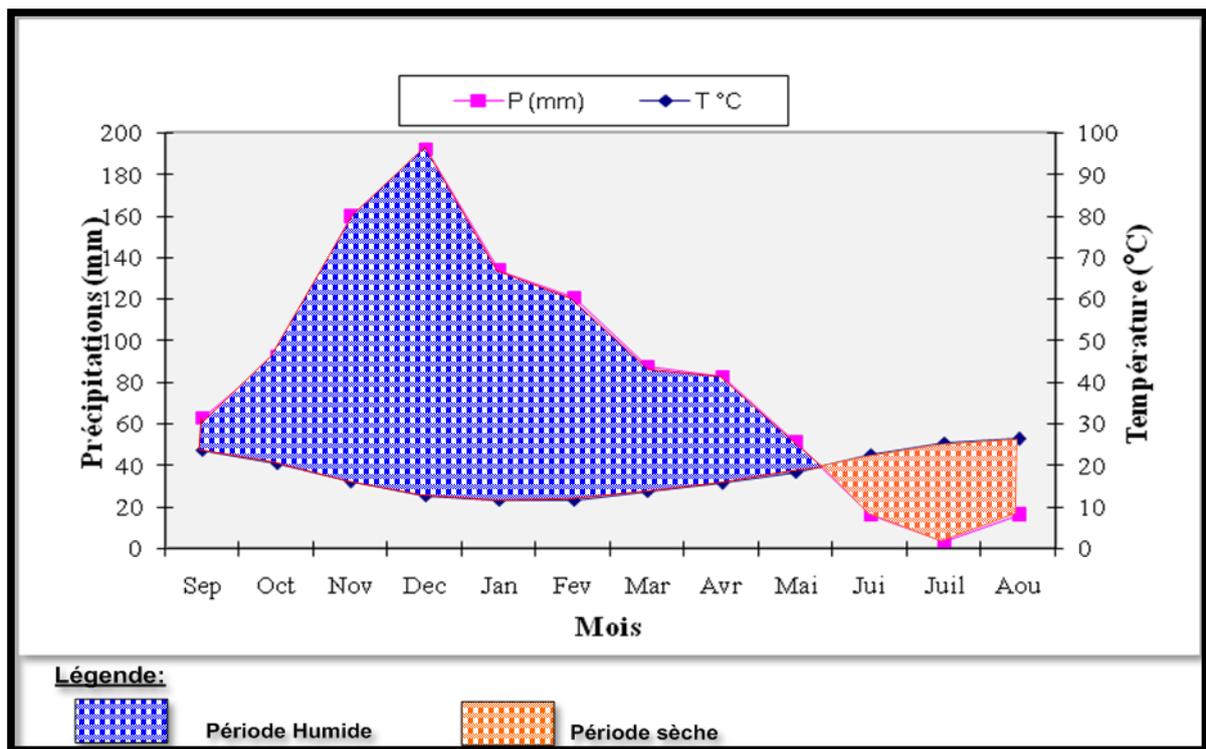


Figure III-10 :Diagramme Ombrothermique pour la période 1988-2015

III.5. Bilan hydrologique:

Le cycle de l'eau peut être analysé schématiquement selon les trois éléments suivants:

- Les précipitations;
- Le ruissellement ou écoulement de surface et l'écoulement souterrain;
- L'évaporation.

Dans chacune des phases on retrouve respectivement un transport d'eau, un emmagasinement

Temporaire et parfois un changement d'état.

L'estimation des quantités d'eau passant par chacune des étapes du cycle hydrologique peut donc se faire à l'aide d'une équation de bilan appelée "**bilan hydrologique**" qui représente le bilan des quantités d'eau entrant et sortant d'un système défini dans l'espace (entité naturelle générale) et dans le temps, à savoir l'année hydrologique (période d'une année très souvent différente de l'année civile).

L'équation du bilan hydrique se fonde sur l'équation de continuité et peut s'exprimer comme suit, pour une période et un espace donnés:

$$P = ETR + R + I + W$$

Avec:

- P: précipitations (liquide et solide) (mm)
- ETR: évapotranspiration réelle en (mm)
- R: ruissellement de surface et écoulements souterrains (mm)
- I: l'infiltration en (mm)
- W: variation des réserves en mm qui peut être considéré comme négligeable.

III.5.1. Estimation de l'évapotranspiration

Elle a pour but de quantifier les pertes en eau par retour à l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau ces pertes peuvent représenter l'évapotranspiration des eaux de surface, du sous-sol et Par transpiration des végétaux.

Faute d'appareils de mesure, il existe des formules d'approximation que traduisent-le phénomène sous forme analytique, parmi lesquelles la formule de Thornthwaite (1948).

III.5.1.1. Calcul de l'évapotranspiration potentiel (ETP):

L'évapotranspiration potentielle (**ETP**) correspond à l'évapotranspiration d'une surface qui serait suffisamment approvisionnée en eau pour évaporer la quantité d'eau maximale permise par les conditions climatiques.

Nous avons tenté d'utiliser plusieurs méthodes d'estimation de l'**ETP** afin de comparer les résultats et de déterminer la plus fiable d'entre-elles. En raison de non-disponibilité de certains paramètres, nous nous limitons seulement à la Méthode de C.W Thornthwaite (1948).

Thornthwaite a établi une corrélation entre la température moyenne mensuelle et l'E.T.

$$ETP = 16 [10T/I]^a$$

P, où le pouvoir évaporant pour chaque mois est déterminé à partir de la relation suivante:

Avec:

$$I = \sum_{i=1}^{12} i$$

$$I = (T / 5)^{1.514}$$

$$a = 0.016 * I + 0.5$$

$$ETP_C = ETP * K$$

ETP: évapotranspiration potentielle non corrigée (mm).

T: température annuelle moyenne (C°).

I: indice thermique annuel.

i: indice thermique mensuel.

a: exposant Climatique (fonction de la durée du jour).

ETPc: évapotranspiration potentielle corrigée (mm).

K: facteur de correction.

Tableau III.2: Calcul l'ETP par la formule de Thornthwaite.

MOIS	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jui	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Année
P (mm)	131.53	121.29	86.91	82.11	50.19	15.88	2.89	15.16	63.79	93.90	159.15	185.78	1008.60
T (C °)	11.63	11.67	13.59	15.60	18.41	22.51	25.35	26.20	23.72	20.53	16.01	12.74	18.16
I	3.59	3.61	4.54	5.60	7.20	9.76	11.68	12.28	10.56	8.49	5.82	4.12	87.24
ETP	27.63	27.81	37.14	48.27	66.12	96.89	121.43	129.28	107.02	81.34	50.71	32.85	826.50
K	0.87	0.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	1.03	0.97	0.86	0.84	/
ETPc (mm)	24.04	23.64	38.26	53.10	80.01	118.20	150.57	149.97	110.23	78.90	43.61	27.60	898.12

III.5.1.2. Evapotranspiration réelle (ETR) ou déficit d'écoulement (De):

Cette méthode est utilisée pour les climats sub-humide et semi-aride, et vu les caractéristiques intermédiaires du climat méditerranéen, cette formule a été appliquée. Elle est basée sur la notion de la réserve d'eau facilement utilisable (RFU). On admet que la hauteur d'eau stockée dans le sol qui est reprise par l'évapotranspiration est de 100 mm au maximum (Gaude, 1976).

Le bilan hydrique de Thornthwaite est un bilan établi à l'échelle mensuelle et basé sur les données connus des précipitations P et de l'évapotranspiration potentielle E.T.P, pour déterminer les variations des paramètres suivants:

- **E.T.R.:** l'évapotranspiration réelle
- **R.F.U. :** la réserve facilement utilisable
- **Da:** déficit agricole
- **W :** excédent ou water surplus.

Le principe de calcul du bilan hydrologique de Thornthwaite est le suivant :

- Si pour un mois $P = ETP$ on pose que $ETP = ETR$, la quantité d'eau qui reste ($P - ETR$) va alimenter la RFU jusqu'à son maximum (100 mm) et si elle dépasse cette valeur il y aura un excès qui va partir soit sous forme d'infiltration efficace vers la nappe, soit sous la forme de ruissellement.

Le principe de calcul est basé sur les cas suivants :

- Si $P > ETP$ → $ETP = ETR$, la quantité ($P - ETP$) alimente la RFU jusqu'au maximum.
- Si $P < ETP$ → $ETR = P$ + toute une partie de la RFU jusqu'à égaliser la valeur de l'ETP,

Si malgré l'apport de la RFU, l'ETR est toujours inférieure à l'ETP ($ETP < ETR$), il existe un

Déficit agricole $Da = ETP - ETR$.

- Si $P = ETR$: les précipitations sont justes suffisantes pour alimenter le sol. Il n'y aura de vapeur alimenter la RFU.

On commence le calcul du bilan par le mois de septembre où on considère que le RFU est nul pour notre cas on prend la RFU maximum égal à 100mm.

Tableau III.3: Bilan hydrique selon Thornthwaite a la station Taher-Achouat (1988-2015)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Année
P (mm)	63,79	93,90	159,15	185,78	131,53	121,29	86,91	82,11	50,19	15,88	2,89	15,16	1008,60
ETPc (mm)	109,32	78,43	43,51	27,51	23,81	23,73	38,34	53,07	79,87	118,09	150,19	149,38	895,26
P-ETPc	- 45,53	15,46	115,64	158,27	107,73	97,57	48,57	29,04	- 29,67	- 102,21	- 147,30	- 134,22	/
ETR	63,79	78,43	43,51	27,51	23,81	23,73	38,34	53,07	50,19	86,21	2,89	15,16	506,64
Déficit (Da)	45,53	0	0	0	0	0	0	0	0	31,88	147,3	134,22	327,05
Excédent	0	15,46	31,1	158,27	107,73	97,57	48,57	29,04	0	0	0	0	/
RFU	0	15,46	100	100	100	100	100	100	70,33	0	0	0	/

III.5.1.3. Estimation de l'ETR par la méthode de TURC

La formule de Turc et déduite d’observation faites sur de nombreux bassins et applicable à tous les climats. elle fait intervenir les hauteurs des précipitations annuelles et la température moyenne annuelle. Cette formule s’écrit:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + p^2 / L^2}}$$

Avec: $L = 300 + 25T + 0.05T^3$

Ou:

- ✚ ETR : désigne l'évapotranspiration réelle, exprimée en (mm);
- ✚ P : désigne la précipitation annuelle, exprimée en (mm);
- ✚ L : pouvoir évaporant de l’atmosphère ;
- ✚ T : température moyenne annuelle, exprimée en (C°).

L'application de la formule de Turc donne les résultats suivants pour des valeurs de Précipitations et températures enregistrées à la station d'Achouat (période 1991-2008).

Tableau III.04: Calcul l'ETR par la formule de Turc

Paramètre	P (mm)	T(C°)	L	ETR (mm)	ETR/P(%)
Station de Taher-Achouat (1988-2015)	1008.60	18.16	1053.45	752.68	74.62

III.5.1.4. Estimation de l'ETR par la méthode de Coutagne :

Le déficit d'écoulement (De) ou ETR est exprimée par la formule suivante :

$$\text{ETR} = P - \lambda P^2$$

Cette formule n'est valable que pour p compris entre :

$$\frac{1}{8\lambda} < P < \frac{1}{2\lambda} \quad \text{Avec : } \lambda = 1 / (0.8 + 0.14T)$$

$$\text{Si: } P > \frac{1}{2\lambda}$$

Le déficit est indépendant de P et obtenu à l'aide de la formule suivante :

$$\text{De} = 0,20 + 0,035t$$

$$\text{Si: } P < \frac{1}{8\lambda}$$

Le déficit est égal à la précipitation : **De = P.**

Où :

De : déficit d'écoulement en (mm)

P : précipitation moyennes annuelles en (m)

λ : paramètre dépendant de la température

T : température moyenne annuelle en(C°)

Dans notre cas on a :

$$P=1.0086 \text{ (m)}$$

$$T=18.16 \text{ (C}^\circ\text{)}$$

$$\lambda=0.29$$

$$1/8\lambda=0.43$$

$$1/2\lambda=1.72$$

$$\text{ETR} = 1.0086 - 0.29 * 1.0086^2 \text{ (m)} = 718.6 \text{ (mm)},$$

III.5.1.5. Détermination du ruissellement et de l'infiltration

✓ Ruissellement

Il est important de connaître la quantité d'eau ruisselée sur le bassin versant topographique et la quantité d'eau infiltrée dans les aquifères contenues dans ce bassin pour estimer les réserves en eau pour différents besoins.

Ce paramètre joue un rôle important sur le plan hydrologique et il difficile à évaluer à cause du manque d'une station de jaugeage dans la zone étudié. Le ruissellement superficiel est estimé à partir de la formule de **Tixeront_Berkaloff**.

$$R = P^3 / 3(\text{ETP})^2$$

R : Ruissellement en (mm)

P : Précipitations moyennes annuelles en (mm)

ETP : évapotranspiration potentielle d'après Thornthwaite en (mm).

Cette formule est discutable car elle ne tient pas compte de la nature de sol, de la couverture végétal ... etc (Lehtihet, 1983).

Et dans le cas où la précipitation est supérieure à 600mm nous utiliseront la formule de RAUMONTCHOK pour estimer le ruissellement

$$R=P^3/3 \longrightarrow (1008.60)^3/3 = 324.007 \text{ mm}$$

✓ **Infiltration**

Ce paramètre est aussi important d'un point de vue hydrologique, pour l'estimer on a la formule suivante :

$$P = ETR + R + I \quad \longrightarrow \quad I = P - (ETR + R)$$

L'application à la Station de Taher-Achouat (période 1988- 2015)

$$P = 1.0086 \text{ (m)}$$

$$ETR = 0.45 \text{ m}$$

$$I = 1.0086 - (0.506 + 0.324) \quad \longrightarrow \quad I = 0.178 \text{ mm}$$

III.6. Caractérisation du climat

La caractérisation du climat d'une zone donnée à l'aide d'indices ou de diagrammes permet de comparer les climats d'une région à l'autre. Ils prennent généralement en compte l'offre pluviométrique, la demande évaporative et les températures. Ceux qui sont les plus couramment utilisés sont les suivants :

A/ Indice De Martonne

Cet indice est fonction des températures et des précipitations, il est calculé par la relation suivante :

Où :

$$I = P / T + 10$$

I : indice d'aridité

P : précipitations moyennes annuelles en mm

T : températures moyennes annuelles en °C

Application :

$$P = 1008.60 \text{ mm}$$

$$T = 18.84 \text{ °C}$$

Ce qui donne :

$$I = 34.97$$

Suivant les valeurs de (I), **De Martonne** a établi la classification suivante:

Tableau III.05: Variation de l'indice de Martonne caractérisant les différents climats (Martonne, 1950).

Indice d'aridité (I)	Type de climat
$I > 30$	Climat humide
$20 < I < 30$	Climat tempéré
$10 < I < 20$	Climat semi-aride
$7.5 < I < 10$	Climat steppique
$5 < I < 7.5$	Climat désertique
$I < 5$	Climat hyperaride

La station de Taher-achouat se caractérise par un climat humide et un écoulement Exoréique. (Figure III-11)

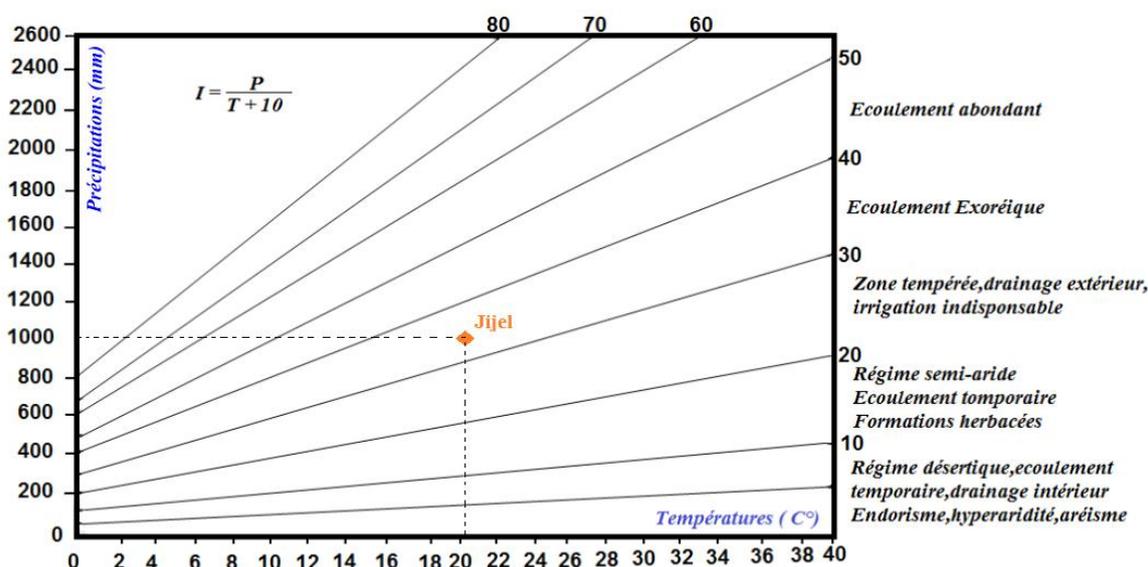


Figure III-11 : Abaque de l'Indice d'aridité De Martonne

B/ Indice de Paul Moral

Les résultats précédents sont confirmés par l'indice pluviométrique de Moral (IM), qui utilise aussi la hauteur annuelle des précipitations (en mm) et les températures moyennes annuelles

$$IM = P / (T^2 - 10T + 200)$$

en °C. Cet indice permet de dire :

Si $IM < 1$ on a climat sec et si $IM > 1$ on a climat humide.

Pour :

$$P = 1008.60 \text{ mm}$$

$$T = 18.83 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Ce qui donne

$$IM = 2.900$$

On peut dire que le climat caractérisant la plaine alluviale d'Oued Nilest de type humide.

III.7. Comparaison des indices climatiques

Sachant que les éléments climatiques les plus importants pour caractériser un climat sont les Précipitations, les températures et l'évaporation, les méthodes combinant ces éléments sont plus intéressantes que celles qui incluent un seul élément. Toutes ces méthodes ont qualifié le climat caractérisant la plaine alluviale d'Oued NIL comme étant humide.

Conclusion :

Notre région d'étude est caractérisée par un climat méditerranéen de type humide avec un hiver doux et un été sec. Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 1008.60 mm, alors que la moyenne annuelle de la température enregistrée est de 18.16°C; Les paramètres climatiques secondaires humidité relative, évaporation, présentent une variation saisonnière remarquable due à la variation du climat d'une saison à une autre.

Le bilan hydrique de la région de Jijel :

- L'évapotranspiration potentielle calculé selon la méthode de Thorntwaite est de l'ordre 74.62% des précipitations. L'évapotranspiration réelle moyenne évaluée par Thorntwaite est de l'ordre de 506,64mm.
- Le déficit agricole selon la méthode de Thornthwaite est de l'ordre de 327,05mm, qui correspond à 32.42 % des précipitations moyennes annuelles.
- Le ruissellement obtenu est de 342mm soit 33.90 % des précipitations moyennes annuelles.
- L'infiltration calculée est de l'ordre de 178,60mm, cette dernière est relativement faible est présente un pourcentage de l'ordre de 17.70 % des précipitations moyenne annuelles.

Hydrodynamique

Introduction

L'hydrogéologie est la science des eaux souterraines. C'est la partie de la géologie qui s'occupe de la circulation des eaux dans le sous-sol (recherche de nappes, évaluation des réservoirs, captages et débits possibles).

Le bassin versant d'oued Nil est caractérisé par l'abondance des ressources en eaux superficielles.

Les aquifères sont contenus dans un domaine d'espace souterrain fini et continu que l'on appelle réservoir. Ce domaine est constitué de formations litho-stratigraphiques.

D'après les résultats obtenus par les différentes études (Bechkite M, 2005) et (Berkane S, 2011) sur les différents aquifères de la plaine alluviale d'oued Nil (les formations dunaires, les alluvions Quaternaire et le Pontien (Miocène moyen), sur cette étude hydrogéologique on va s'intéresser à :

- Définir les formations aquifères existants.
- Suivre l'évolution spatio-temporelle du niveau piézométrique.
- Déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère.
- Classer l'aquifère suivant sa perméabilité.

III.1. Les formations perméables et imperméables

Les formations ayant la propriété de se laisser traverser par l'eau à des vitesses appréciables (de l'ordre de quelques dizaines de mètres par an) sous l'effet de gradient sont dites perméables. Il s'agit de gravier, sable, grès, calcaire fissuré ou karstifié, roche cristalline fissurée.

Les formations aquifères qui constituent les réservoirs sont limitées par des formations différentes, caractérisées par une perméabilité relativement plus faible.

Parmi celles-ci on distingue les formations imperméables et des formations semi-perméables. Les formations imperméables, ou à très faible perméabilité, sont constituées par les argiles, les marnes, les silts et les roches massives ou cristallines non fissurées, ainsi que, selon les cas, par les évaporites.

Les formations semi-perméables, jouent un rôle important en hydrogéologie car elles permettent sous certaines conditions (importants gradients, grandes surfaces de contact) des

échanges généralement verticaux entre aquifères superposés, on appelle ce phénomène la drainance.

III.2. Description des formations aquifères :

A/ Les formations dunaires

Ce cordon dunaire est représenté par des sables anciens fins parfois consolidés, il se dépose sur les alluvions du Quaternaire, son épaisseur est importante, comme la montre les études géophysiques. En conséquence ces dunes peuvent constituer un réservoir non négligeable mais leur position limitée par la mer nécessite une exploitation réglementaire. Ces dunes ont une mauvaise perméabilité (la présence des lentilles argileuses), celle-ci ralentisse l'écoulement de l'eau de la nappe vers la mer et empêche le cas échéant l'avancement rapide du biseau salé (Bechekit, 2005)

B/ Les alluvions du Quaternaire

Ces formations sont les plus importantes du point de vue hydrogéologique, ce sont des alluvions récentes et des cônes de déjection des différents Oueds. Ils sont constitués essentiellement de graviers fins, moyens et grossiers avec des passages de quartz, sables et schistes, comme le montrent les logs stratigraphiques des forages ON12, ON09. En amont, les alluvions sont les plus grossières et elles présentent une bonne perméabilité (Supérieur à 10^{-4} m²/s). Par contre en aval, ces alluvions sont plus fines et présentent une perméabilité qui varie de 10^{-4} à 10^{-5} m²/s.

L'épaisseur de ces alluvions augmente de l'amont vers l'aval, et de l'Est à l'Ouest. Elle varie de 30 à 50m en amont jusqu'à 80 m en aval et peut atteindre des valeurs maximales au niveau de la confluence de l'Oued El Nil et l'Oued Saayoud (Bechekit, 2005).

III.3. Inventaire des points d'eau

Notre plaine d'étude recouvre une grande superficie, ce qui lui donne la priorité d'avoir le maximum de points d'eau qui se dispersent inégalement du Nord vers le Sud.

Le suivi du niveau de la nappe souterraine s'effectue au moyen de piézomètres, ce sont des points d'accès à la nappe (puits, forages) dans lesquels on mesure le niveau de l'eau.

Le niveau est mesuré soit manuellement lors de tournées, au moyen d'une sonde que l'on descend dans l'ouvrage. Nous avons procédé à la reconnaissance et l'inventaire des points d'eau de la plaine alluvial d'oued Nil et les autres affluents (Boukaraa, Saayoud).

Nous avons identifié 27 puits d'eau. La majorité des puits sont utilisées pour l'irrigation et ils sont repartis sur toute la plaine.

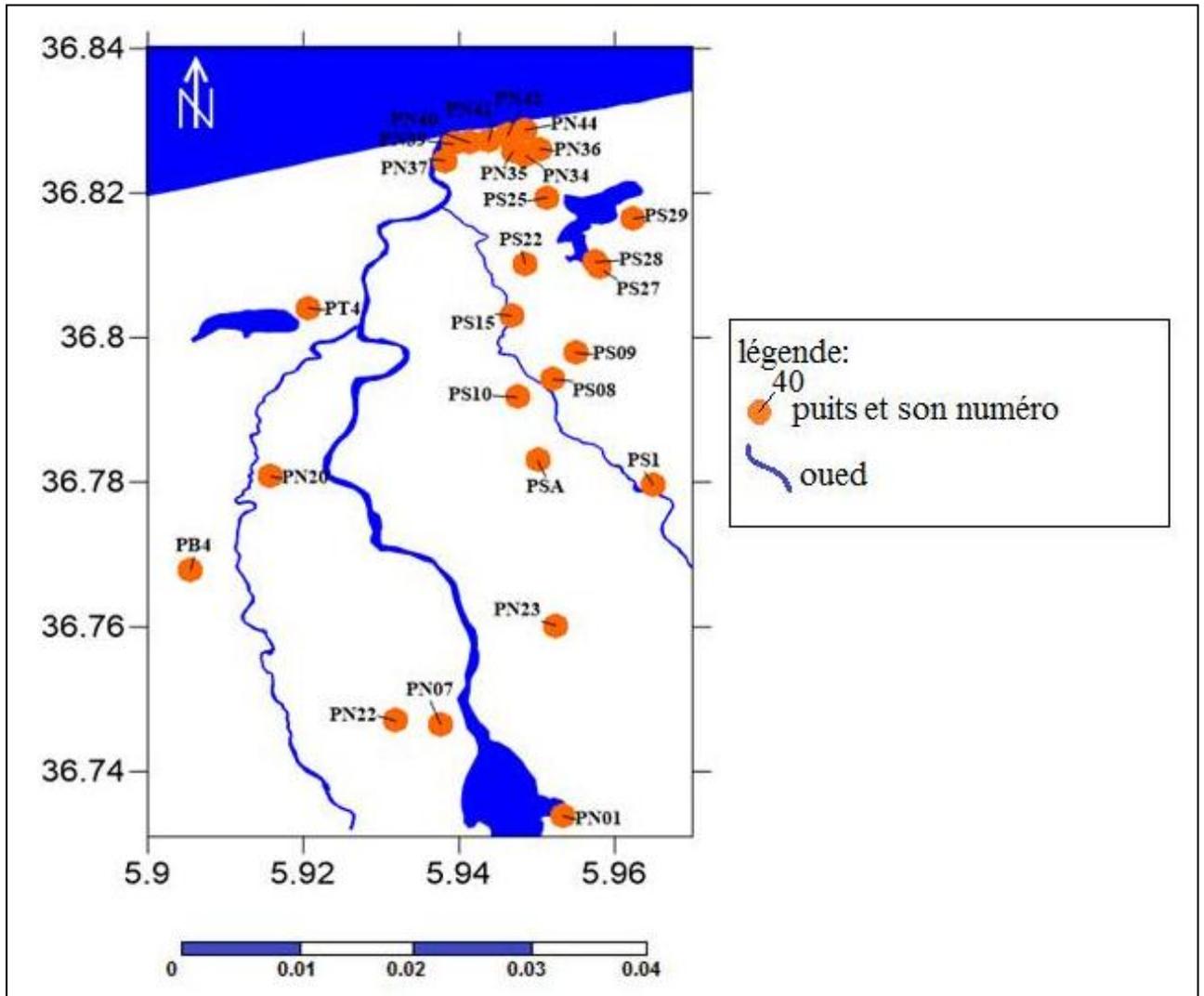


Figure III-12 :La carte inventaire des points d'eau

III.4. Interprétation des profils

Les profils sont établis à partir des logs stratigraphiques donnés par les forages répartis à travers la plaine, on se basant sur la position et la profondeur de chaque forage (Figure III-14).

L'intérêts de l'établissement de ces différents profils est de connaître :

- La variation de la lithologie
- Déterminer la géométrie de l'aquifère.

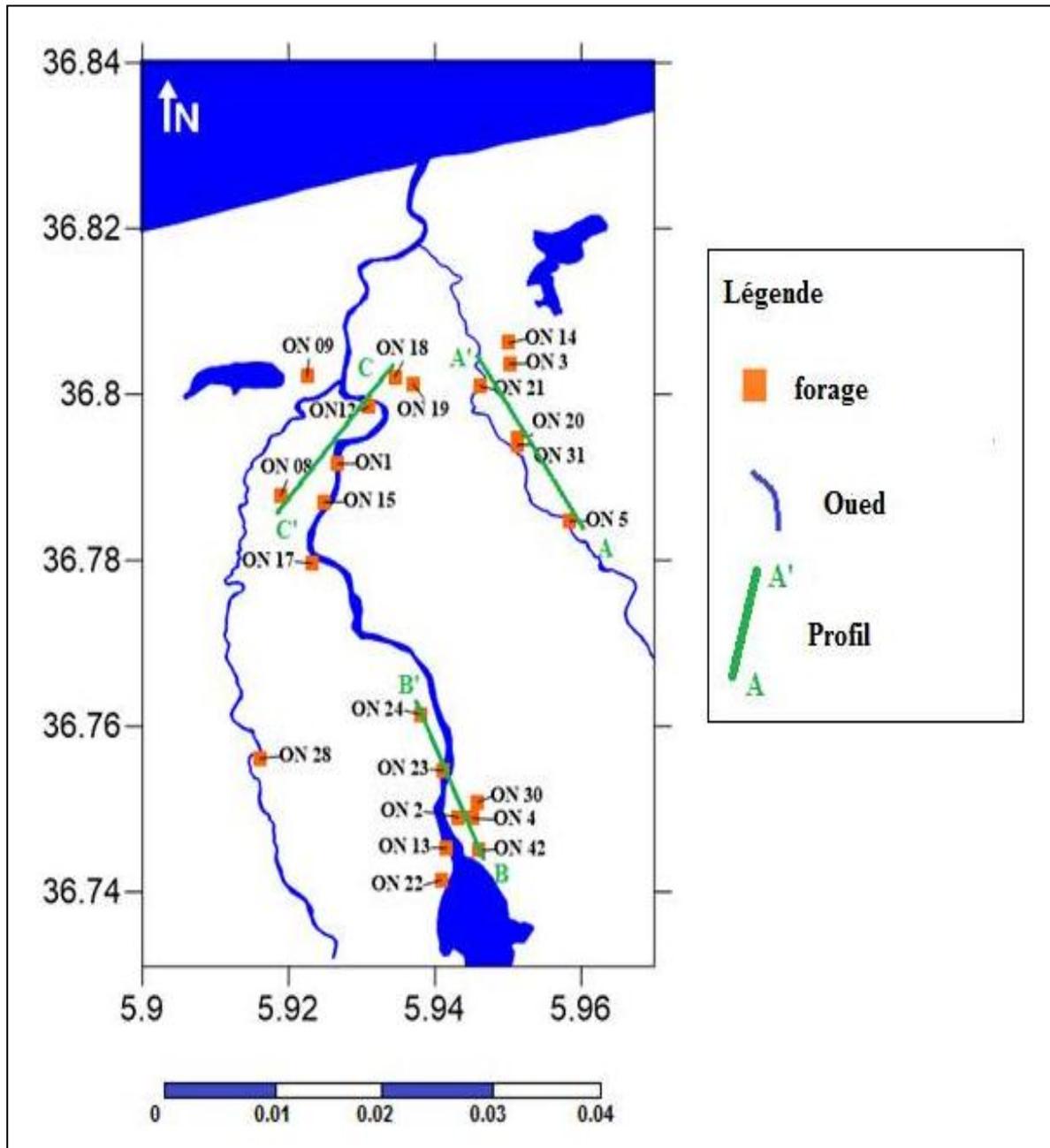


Figure III-13 :Carte des positions des profils

a) Le profil A-A'

C'est un profil orienté SE-NW (Figure III-15), il indique une épaisseur de recouvrement augmentent du sud vers le nord, les formations existantes sont des formations perméables avec des lentilles argileuses, indiquant la présence de formation semi-perméable et que la nappe dans sa quasi totalité est libre. Le substratum est peu profond dans la partie sud et profond dans la partie Nord

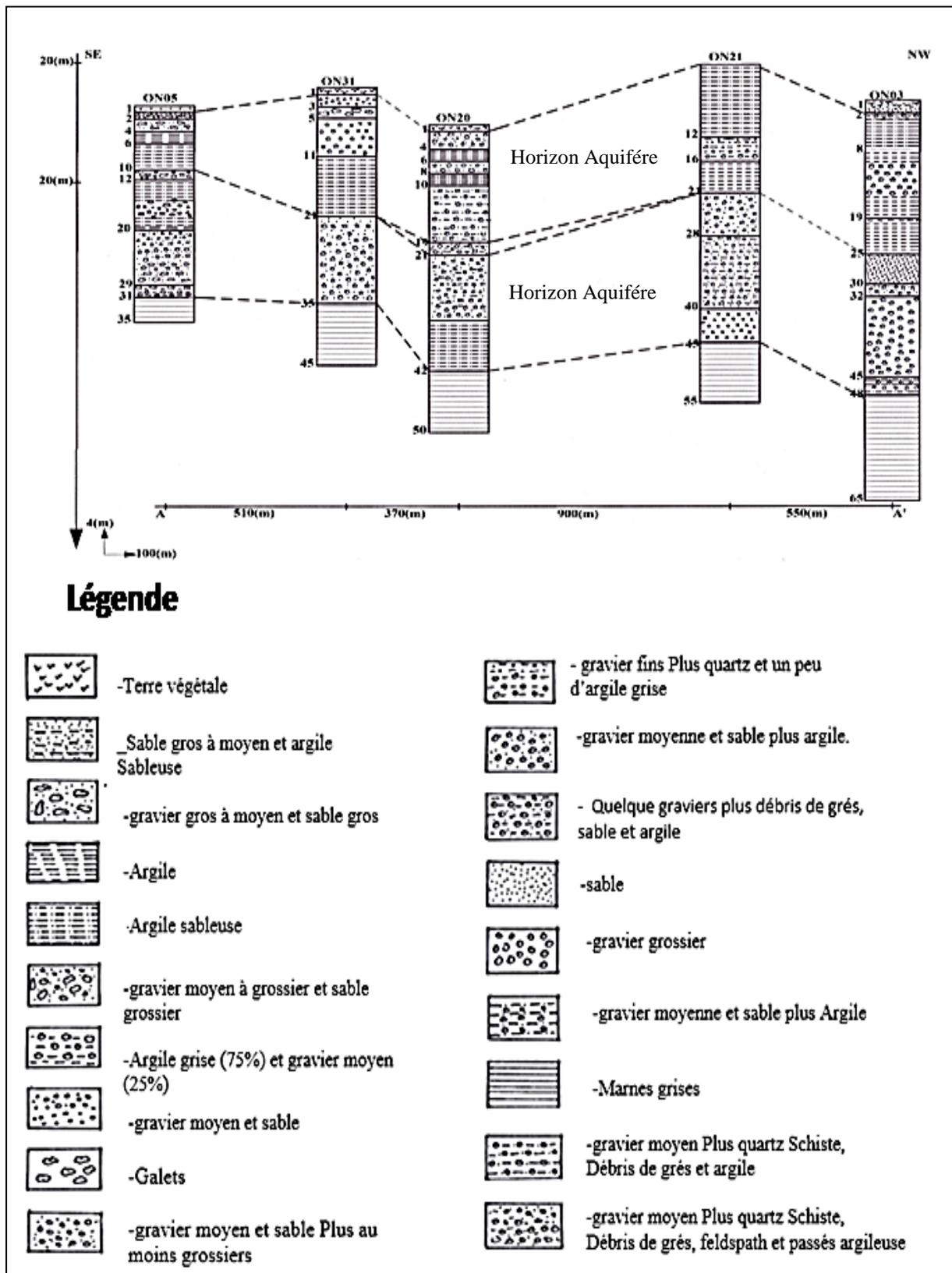


Figure III-14 :Coupe lithologique (Profil A-A')

b) Le profil B-B'

C'est un profil orienté NE-SW (Figure III-16), il englobe les forage ON2, ON23, ON24, ON42, il indique une épaisseur de recouvrement diminue du sud vers le nord, avec la présence de lentille argileuse au niveau du forage ON42.

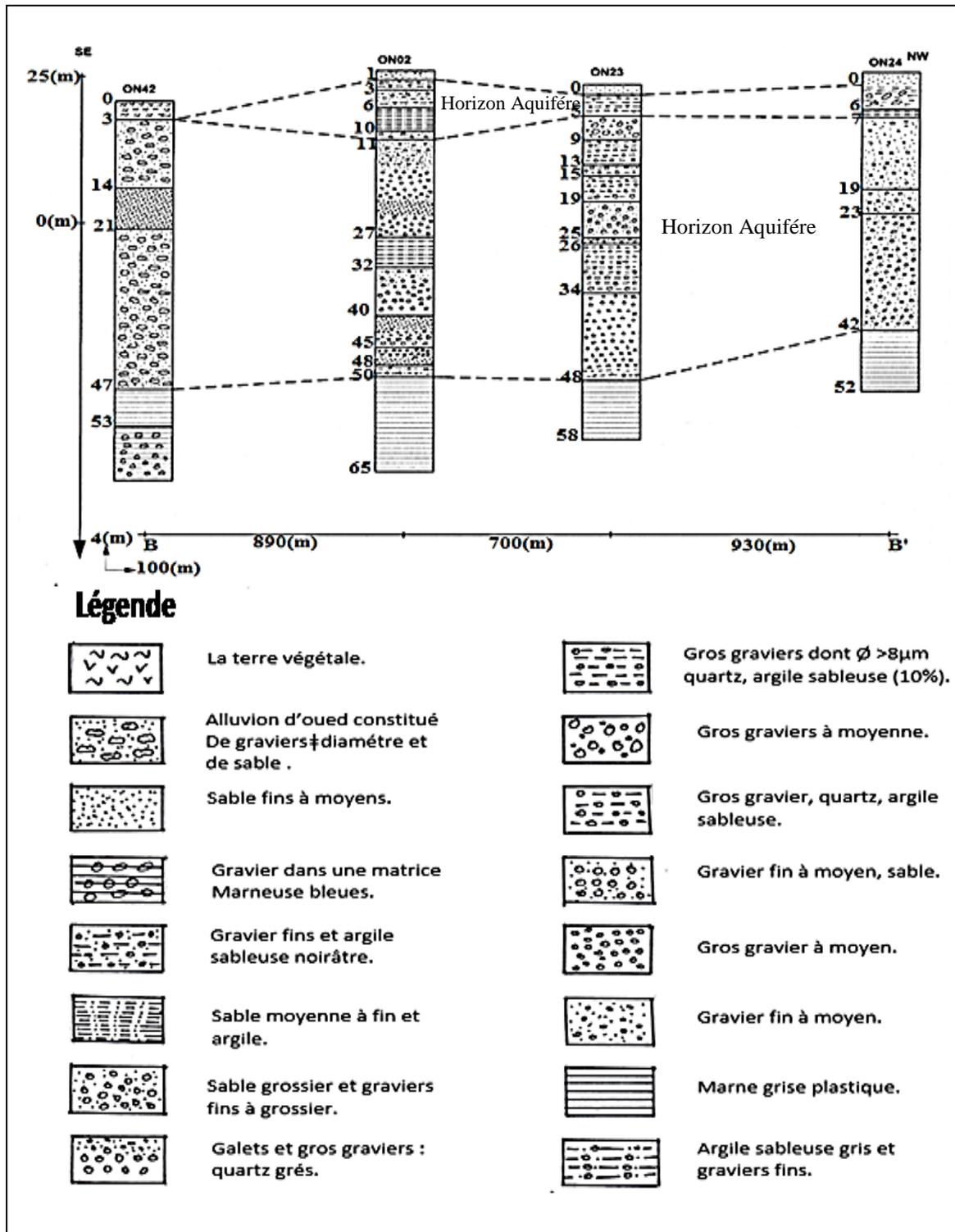


Figure III-15 : Coupe lithologique (Profil B-B')

c) Le profil C-C'

C'est un profil orienté NE-SW (Figure III-17), il englobe les forage ON8, ON9, ON12, ON15, ON18, il indique que le substratum est plus élevé au sud qu'au nord, et que l'épaisseur de recouvrement diminue du sud vers le nord, on note la présence de lentille argileuse qui rendent la nappe localement captive.

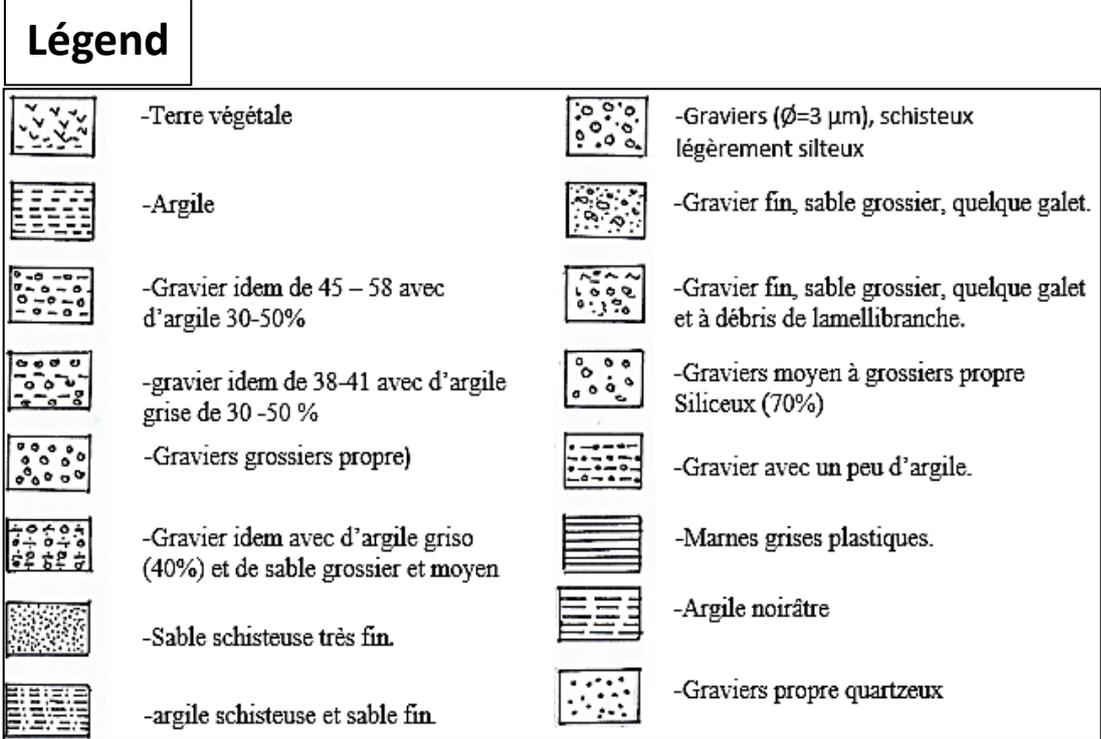
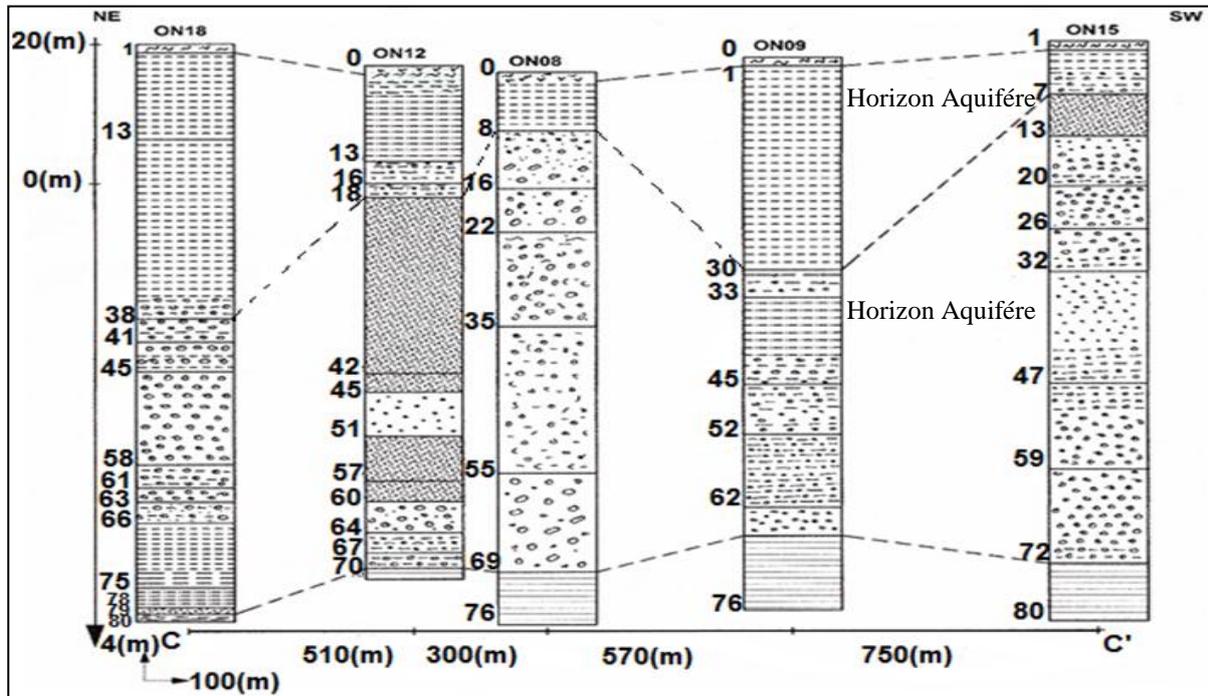


Figure III-16 :Coupe lithologique (Profil C-C')

III.5. Cartes piézométriques

Les cartes piézométriques sont une retranscription cartographique de la surface des nappes d'eau souterraine. Elles peuvent être lues comme des cartes topographiques, les courbes de niveau (ou isopièzes) correspondant aux altitudes de la nappe.

La lecture d'une carte piézométrique permet donc de connaître le niveau de la nappe, avec un niveau d'incertitude variable selon la densité de points de mesure utilisés pour l'établissement de la carte. Elle permet également de déterminer les sens d'écoulement de la nappe.

L'examen du fonctionnement des lignes de courant permet de distinguer les zones hydrogéologiques suivantes :

➤ La partie **Nord-Ouest** : la divergence des filets de courant montre une alimentation de la nappe par Oued Nil avec une direction d'écoulement est SE-NW, le marécage "Redjla" reçoit des apports d'eau du côté sud et alimente la nappe du côté Nord.

➤ La partie **Nord-Est** : La nappe est caractérisée par une zone d'alimentation, l'écoulement est de direction SE-NW, le marécage d'El Kennar reçoit des apports d'eau du côté Est et alimente la nappe du côté Nord.

➤ La partie **Sud-Est** : indique que l'écoulement est principalement de direction Sud-Nord. On note qu'Oued Boukraa a une alimentation avec un écoulement de direction SE-NW, l'alimentation de la plaine se fait essentiellement par les monts qui entourent la plaine vers le Sud.

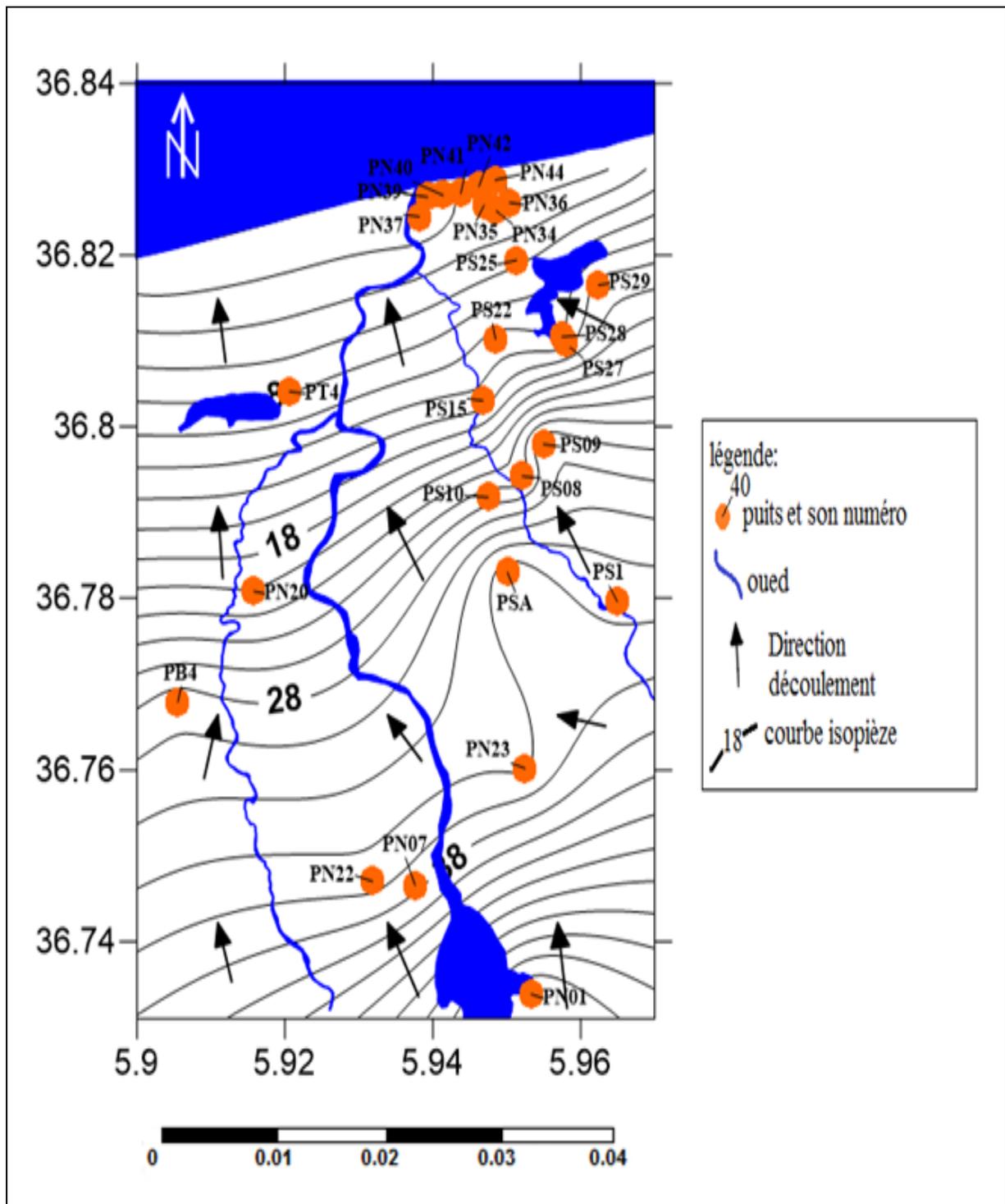


Figure III-17 : Carte piézométrique de la plaine alluviale d’Oued Nil (avril 2015).

III.6. La Transmissivité

La transmissivité permet d'évaluer le débit que peut capter un forage. C'est un paramètre qui régit le débit d'eau qui s'écoule par unité de largeur de l'aquifère, sous l'effet de du gradient hydraulique, incluant l'épaisseur de l'aquifère.

$$T = K e$$

T : transmissivité (m^2/s)

K : Perméabilité (m/s)

e : épaisseur de la nappe (m).

Géographiquement, les valeurs de la transmissivité ont tendances à être proportionnelle à la perméabilité.

D'après la figure (Figure III-19) la carte de transmissivité représente les changements des valeurs dans la plaine alluviale d'Oued Nil à partir des mesures effectuées sur 18 forages.

Les valeurs les plus élevées sont observées au Sud et au Nord-Ouest de la plaine elles varient entre 0.0509 à 0.0759 m^2/s due à l'existence d'une grande épaisseur de la nappe dans ses localités, ainsi que l'existence des formations lithologiques perméables de l'aquifère telle que les graviers comme le montre le forage ON13 et ON2.

Alors que les faibles valeurs de transmissivité varient entre 0.0009 et 0.0209 m^2/s résultent des faibles épaisseurs de l'horizon aquifères et des faibles perméabilités des couche aquifères en raison de la présence des graviers fins, des argiles grisâtres graveleuses, selon les forages ON15, ON17 et ON12.

Les cartes de transmissivité mettent en évidence que les zones situées au Sud-Est et au Nord-Ouest de la plaine constituent l'emplacement idéale pour l'implantation des forages.

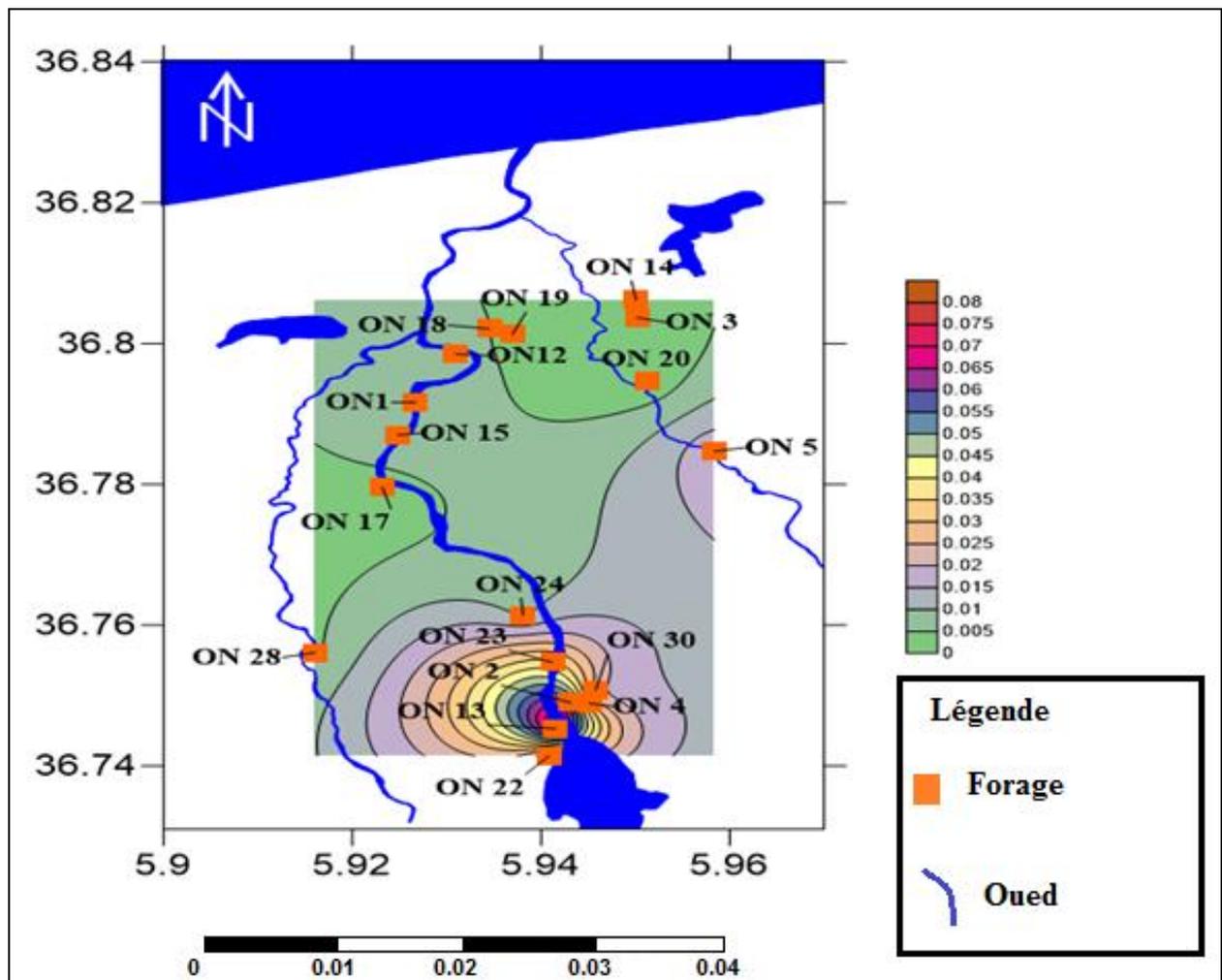


Figure III-18 :Carte de la transmissivité de la plaine alluviale d’Oued Nil (avril 2015).

III .7. La Perméabilité

Est l'aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide (liquide ou gaz).

La perméabilité traduit la capacité d'une roche à se laisser traverser par l'eau, sous l'effet d'une pression (ou gradient hydraulique). Plus la perméabilité est élevée, plus l'eau s'écoulera vite.

Henri Darcy a défini un coefficient de perméabilité **K** en (m/s), dépendant du milieu poreux, qui correspond au volume d'eau qui percole à travers une surface pendant un temps donné.

La formule utilisée pour définir la perméabilité est donnée comme suite :

$$Q = K S i \quad \longleftrightarrow \quad K = Q/Si$$

Où :

Q : Débit de la nappe dans la zone considérée (m²/s)

K : Perméabilité (m/s)

i : Gradient hydraulique (Guechi, 2004).

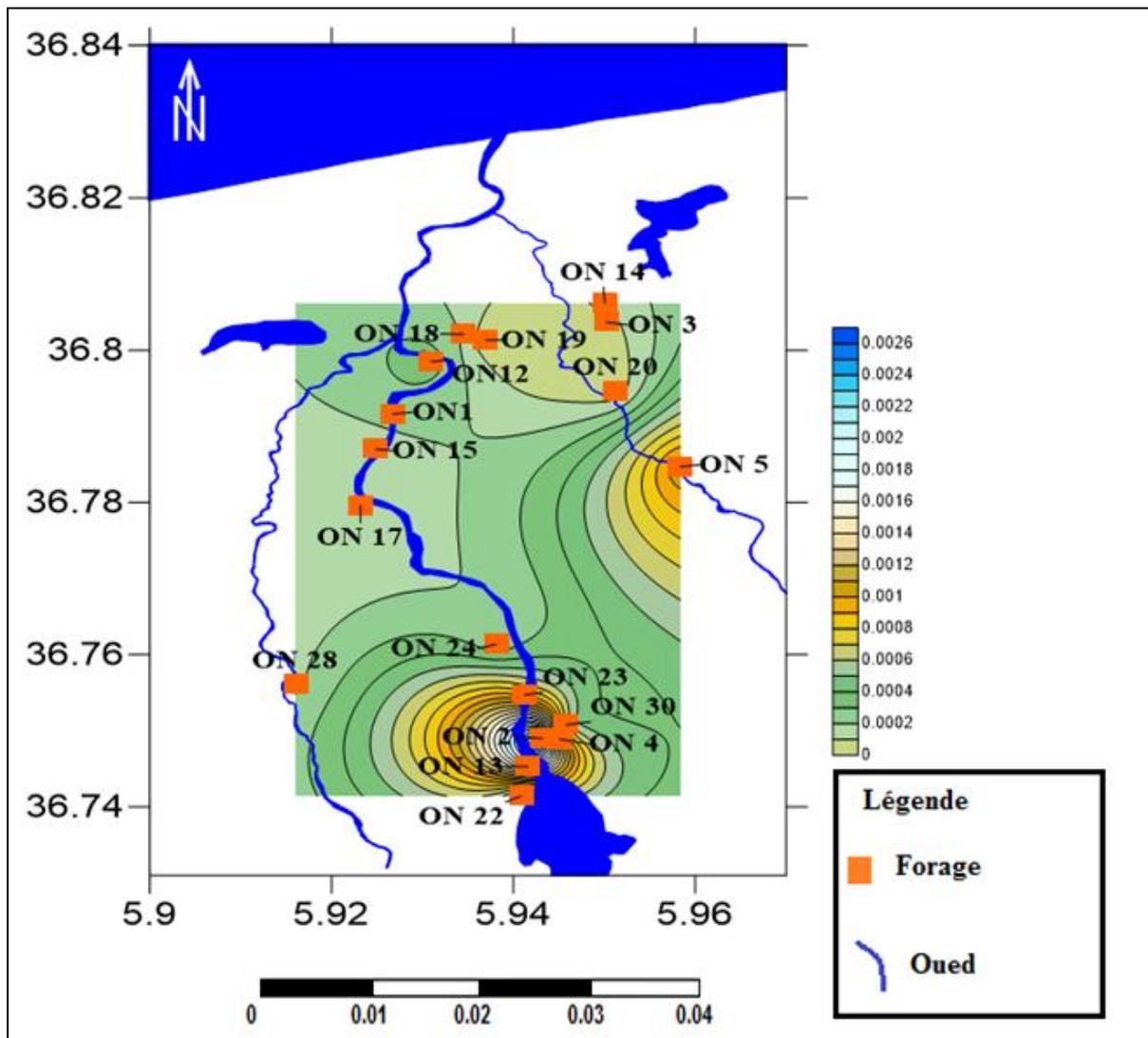


Figure III-19 :Carte de perméabilité de la plaine alluviale d'Oued Nil (avril 2015).

La carte de la perméabilité représentée par les valeurs mesurées sur 18 forages ont permis d'établir la carte représentée dans la figure (Figure III-20).

La carte de perméabilité indique des valeurs de perméabilité qui varient entre $2.3 \cdot 10^{-5}$ et $2.7 \cdot 10^{-2}$ (m/s), aussi on peut constater l'existence de 3 zones qui sont :

- Les plus grandes valeurs de la perméabilité se trouvent au Sud et au Nord-ouest de la plaine où l'on observe l'existence des formations perméables (Graviers grossiers et moyens, sable gros et moyens), et leur grande épaisseur comme indiqué par les deux forages suivants : ON2 et ON13.

- Les valeurs moyennes de la perméabilité sont observées dans la partie Est au niveau du forage ON12, due à l'existence des formations semi perméables comme l'argile grise légèrement graveleuse, Graviers et sables très fins schisteux, Silts et sables très fins.

➤ Les valeurs faibles sont observées au Nord et Ouest de la causée par les formations semi perméable et imperméable représenté par des gravier moyen avec une matrice marneuse et gravier moyen avec une matrice argileuse comme indiqué dans le forage ON28.

Conclusion

La plaine alluviale d'oued Nil contient un seul aquifère formé de remplissage Plio-Quaternaire et des formations dunaires.

L'aquifère se dépose sur un substratum d'âge miocène varient entre 40 et 80m.

Le sens général de l'écoulement des eaux se fait du Sud vers le Nord-est, l'aquifère est capté par un nombre élevé des puits et forages, installés le long des oueds

Les cartes de transmissivité (T) et de perméabilité (K) indiquent deux zones à fort potentielle en eau l'un au sud et au Nord-ouest. Dans ses localité l'épaisseur des formations perméable est importante.

Chapitre IV : Modélisation

Introduction

Les modèles mathématiques permettent de mieux comprendre la complexité des aquifères et de réaliser des prédictions en fonction d'un ou de plusieurs paramètres. Par exemple, en fonction des précipitations, on pourra prédire le niveau d'une nappe en un point et le débit d'un cours d'eau. Il existe plusieurs types d'outils, mais qui sont tous basés sur les mêmes approches méthodologiques, avec une phase de mise en point en rentrant les données, une phase de calage sur les observations de terrain que les modèles tentent de reproduire (chronique et carte piézométrique...), une phase d'utilisation à travers des simulations.

Un modèle hydrogéologique correspond à la simplification d'un système en étant forcément réducteur (Payraudeau, 2004). Il doit répondre à un problème spécifique. Le type de modèle à adopter et sa structure dépend ainsi de la question posée.

Dans cette étude, nous nous interrogeons sur le comportement de la nappe alluviale d'oued Nil et sur les variations piézométriques en cas de modification du régime actuel. Nous devons donc utiliser un modèle capable de simuler les transferts d'eau dans des systèmes multicouches tout en prenant en compte les différents paramètres influant sur ce transfert et susceptibles d'évoluer dans le temps sous l'effet de phénomènes naturels et anthropiques.

IV.1. Logiciel de modélisation

Le modèle hydrodynamique élaboré à partir des données et des résultats décrits et commentés dans les chapitres précédents est implémenté avec le programme de modélisation hydrogéologique MODFLOW (Modular finite-difference groundwater flow model) développé par l'US Geological Survey (USGS). MODFLOW est un programme de résolution numérique en trois dimensions de l'équation de diffusivité en milieu poreux saturé pour des flux à densité constante (McDonald et Harbaugh, 1988 ; Harbaugh et McDonald, 1996 ; Harbaugh et al., 2000).

MODFLOW est un programme adaptable à de nombreux contextes hydrogéologiques, chaque module est documenté et les fichiers sources sont libres de droit. Sa longévité et son développement régulier depuis la première version du programme en 1983 (McDonald et Harbaugh, 1983) en font un produit performant et fiable. Les différentes interfaces graphiques de pré et post-traitement facilitent son utilisation et l'exploitation des résultats tout en gardant un contrôle sur l'ensemble des paramètres.

La version utilisée dans ce travail fonctionne sur une interface en Visual Basic [Visual Modflow (Waterloo Hydrogeologic Software 1995-2003)]. C'est un modèle à base physique, déterministe, capable de représenter des écoulements laminaires, monophasiques et tridimensionnels dans des systèmes multicouches.

IV.2. Intérêt d'une modélisation en hydrogéologie

Différents types de finalité des modèles hydrogéologique existe qui sont :

- Prédire la réponse d'un système aquifère face à des conditions de stress (pompage, pollution) pour une gestion durable des ressources en eau (Molina ; 2009).
- Les modèles hydrogéologiques sont aussi appliqués à la simulation des écoulements et au transport de soluté (ORBAN et al, 2010).
- Les modèles prennent en considération les relations entre les eaux de surface et les eaux souterraines en se basant sur le concept de la conductance qui présume une interface distincte qui sépare les deux domaines (Kollet et Maxwell ; 2006).
- Les modèles prennent en compte l'impact des changements climatiques sur les réserves en eaux souterraines.

IV.3. Le maillage du modèle

La complexité de notre zone d'étude, nécessite de prendre en compte un nombre important de paramètres liés aux caractéristiques physiques de l'environnement. Développer un modèle hydrogéologique de la plaine alluviale d'oued Nil demande donc un travail préliminaire de description et de synthétisation de son milieu. Cette approche, nous a permis de conceptualiser notre zone d'étude et d'établir un maillage de 100 m sur 100m, réparti suivant une matrice de 80 lignes et 130 colonnes, soit au total 10400 cellules, couvrant une superficie de 268 Km². Sur chaque maille sont renseignées les caractéristiques physiques du milieu en fonction de la couche qui lui est associée.

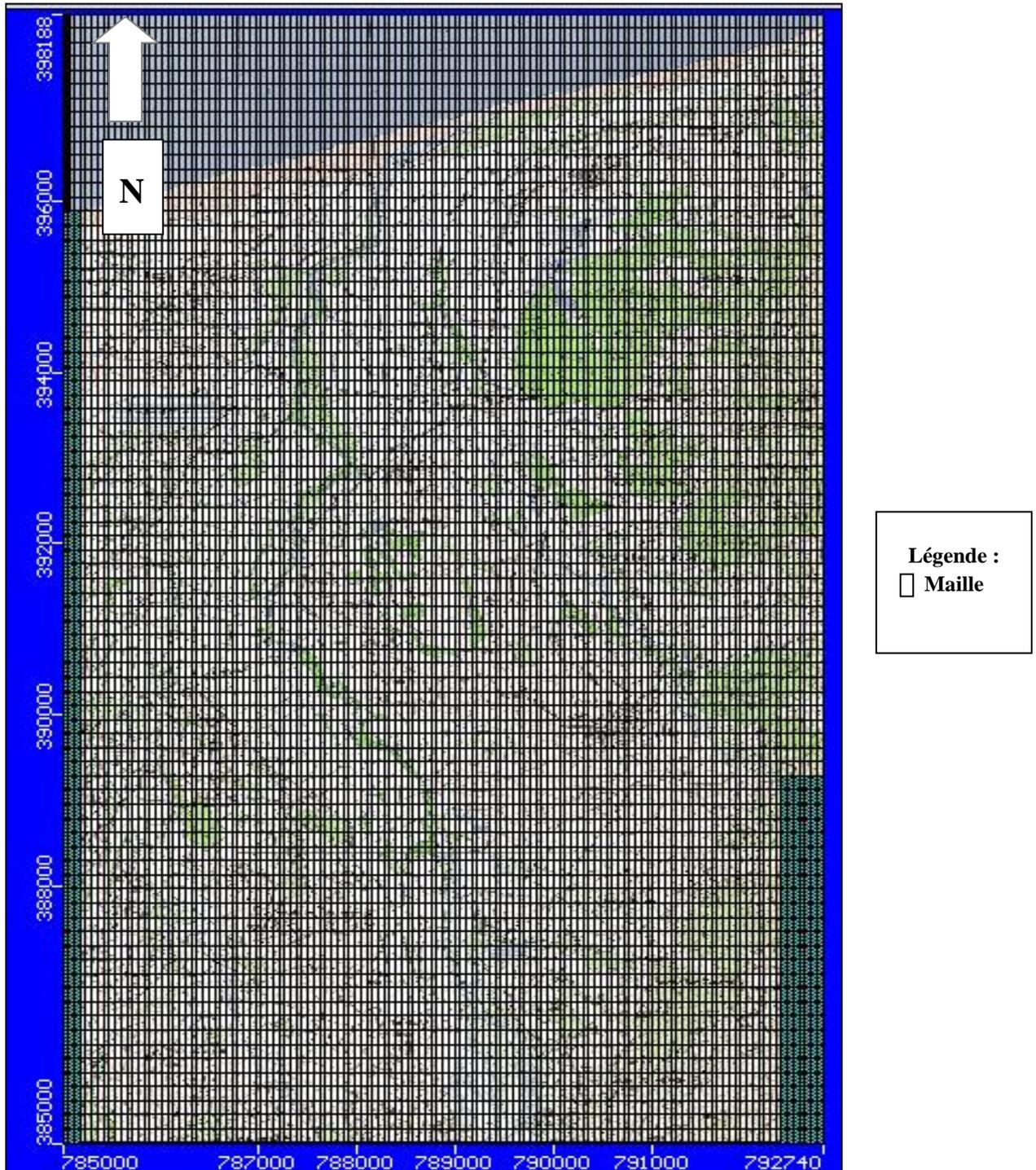


Figure IV-1 : Maillage de la zone d'étude sous l'interface de Visual Mod FLOW 3.0

IV.4. Géométrie du système aquifère**A/ Limite géographiques**

Les limites géographiques du modèle qui englobe la zone d'étude, selon coordonnées Lambert sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.1 : Limites géographiques du modèle

	Limite inférieure	Limite supérieure
X (m)	385000	398000
Y (m)	785000	793000

B/ Substratum

Le substratum de la plaine alluviale d'oued Nil est constituée de marne grise d'âge Burdigalien, suite au log stratigraphiques et aux études géophysiques le toit du substratum présente une allure très irrégulière ou la profondeur varie d'un maximum de -90 m jusqu'a 0 m pour la valeur minimum.

C/ Le toit

La nappe alluviale d'oued Nil est considérée comme libre, les log-stratigraphiques des forages réalisés dans la plaine montrent l'existence de plusieurs lentilles argileuses ou argilo-sableuses dans les alluvions, ce qui rend la nappe localement captive ou semi-captive. Les niveaux perméables apparaissent d'une manière générale à partir de 30 m de profondeur, et d'une épaisseur moyenne estimée à 35 m.

Pour établir ce modèle l'épaisseur de l'aquifère est subdivisé en trois couches :

- La première couche caractérise la nappe superficielle, ou les formations sont perméables, elle se caractérise par une épaisseur de 25 m.
- La deuxième couche est perméable avec la présence de lentille argileuse la rendent localement imperméable, son épaisseur est de l'ordre de 10 m.
- La troisième couche représente les eaux profondes, sa limite inférieure est obtenue à partir des différents forages indiquent le toit du substratum (marnes).

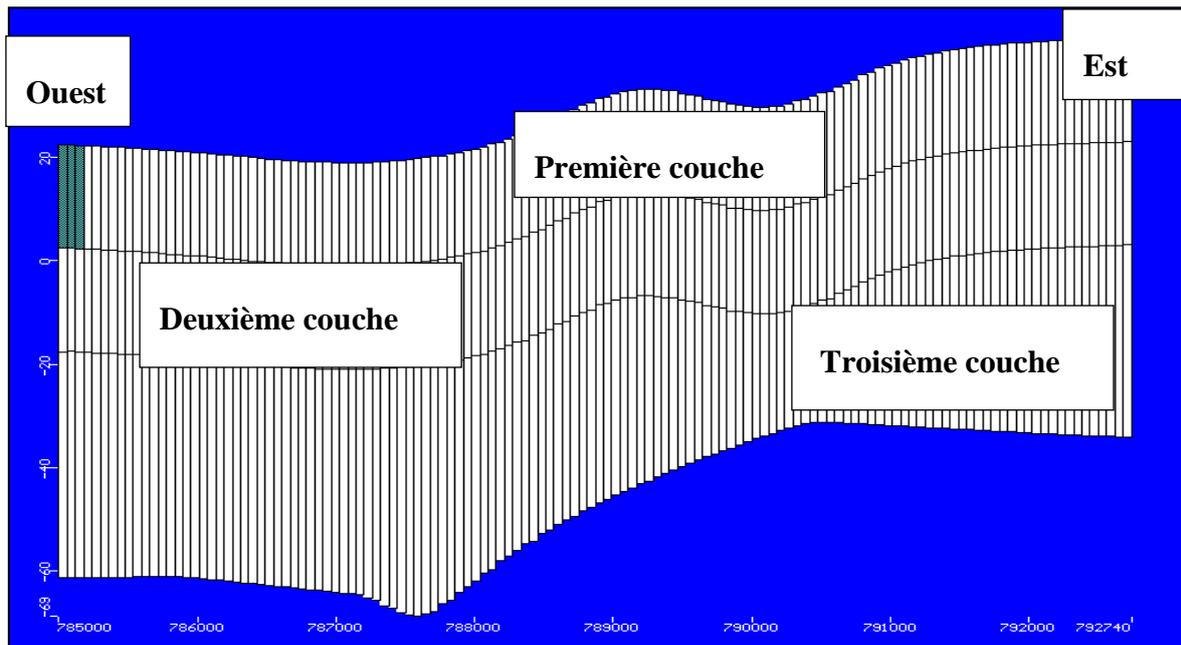


Figure IV.2 : Répartition des couches dans le modèle

IV.5. Les caractéristiques Hydrodynamiques du modèle

A/ Distribution des conductivités Hydrauliques

Un des paramètres hydrogéologiques nécessaires au modèle hydrodynamique est la perméabilité de l'aquifère. Les données sont obtenues à partir des essais de pompage.

Pour simuler le comportement de l'aquifère de la nappe alluviale d'oued Nil, les perméabilités mesurées ont été utilisées. Les valeurs de perméabilité sont indiquées dans la figure suivante :

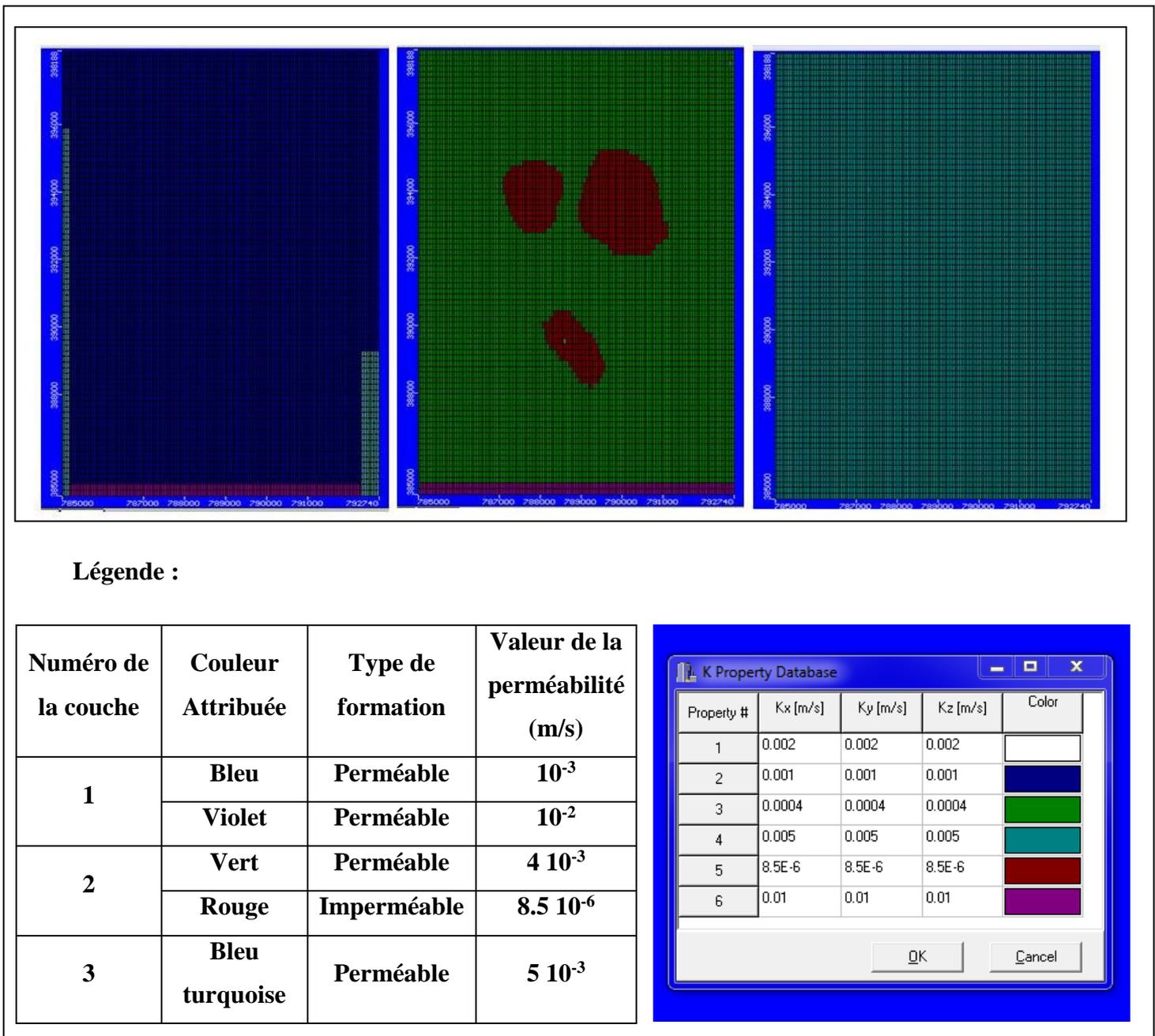


Figure IV.3 :Répartition des perméabilités dans les 3 couches du modèle

B/ Porosité

Nous disposons de certaine valeur de la porosité totale et efficace nécessaire au calcul en régime permanent et transitoire.

Les valeurs considérées dans le modèle pour l'aquifère de la plaine alluviale d'Oued Nil est comprise entre 15% et 30%, elles ont été appliquées de façon uniforme sur toute les couches.

Tableau IV.3 : Porosité totale et efficace

	Porosité totale	Porosité efficace
Couche 1	0.3	0.15
Couche 2	0.6	0.01
Couche 3	0.3	0.3

C/ Le coefficient d'emmagasinement

En régime permanent ce paramètre n'intervient pas, par conséquent sa valeur exacte importe peu. Le coefficient d'emmagasinement est déterminé soit par des essais de pompage ou estimé à partir de la nature lithologique des différentes formations de l'aquifère. Les valeurs choisies sont indiquées dans le tableau IV.4 ci-dessous :

Tableau IV.4 : Le coefficient d'emmagasinement

	S_s	S_y
Couche 1	0.0001	0.2
Couche 2	0.0001	0.2
Couche 3	0.0001	0.2

IV.6. Les conditions aux limites

Les relations existantes entre le système à modéliser et son environnement (eau de surface, unités hydrogéologiques environnantes) sont représentées au travers des conditions aux frontières qui sont :

➤ **Flux entrant**

Pour la recharge de la nappe, nous avons exploités les données utilisées précédemment, on constate que l'alimentation principale provient du sud de la plaine, ou un flux a été imposé égale à 12000 mm/an.

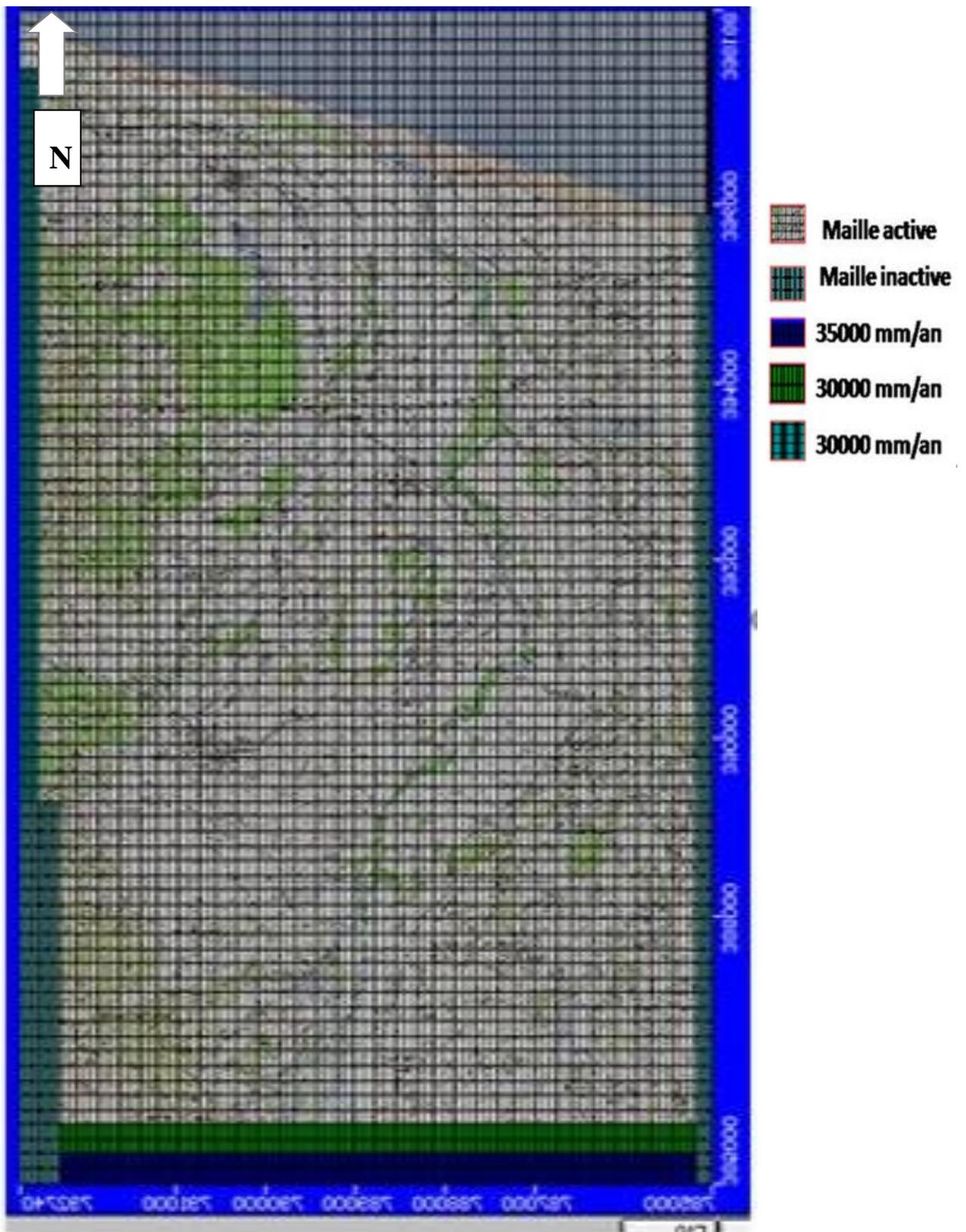


Figure IV-4 : Conditions aux limites sous l'interface de Visual Mod FLOW 3.0

➤ **Potentiel imposé**

Une limite à potentiel nul est imposée le long de la mer méditerranée puisqu'encet endroit, la nappe se jette dans la mer qui, par convention, est de charge nulle. Quels que soient les paramètres utilisés, et quelle que soient les sollicitation imposées (pompage, infiltration, ...), ce potentiel ne change pas.

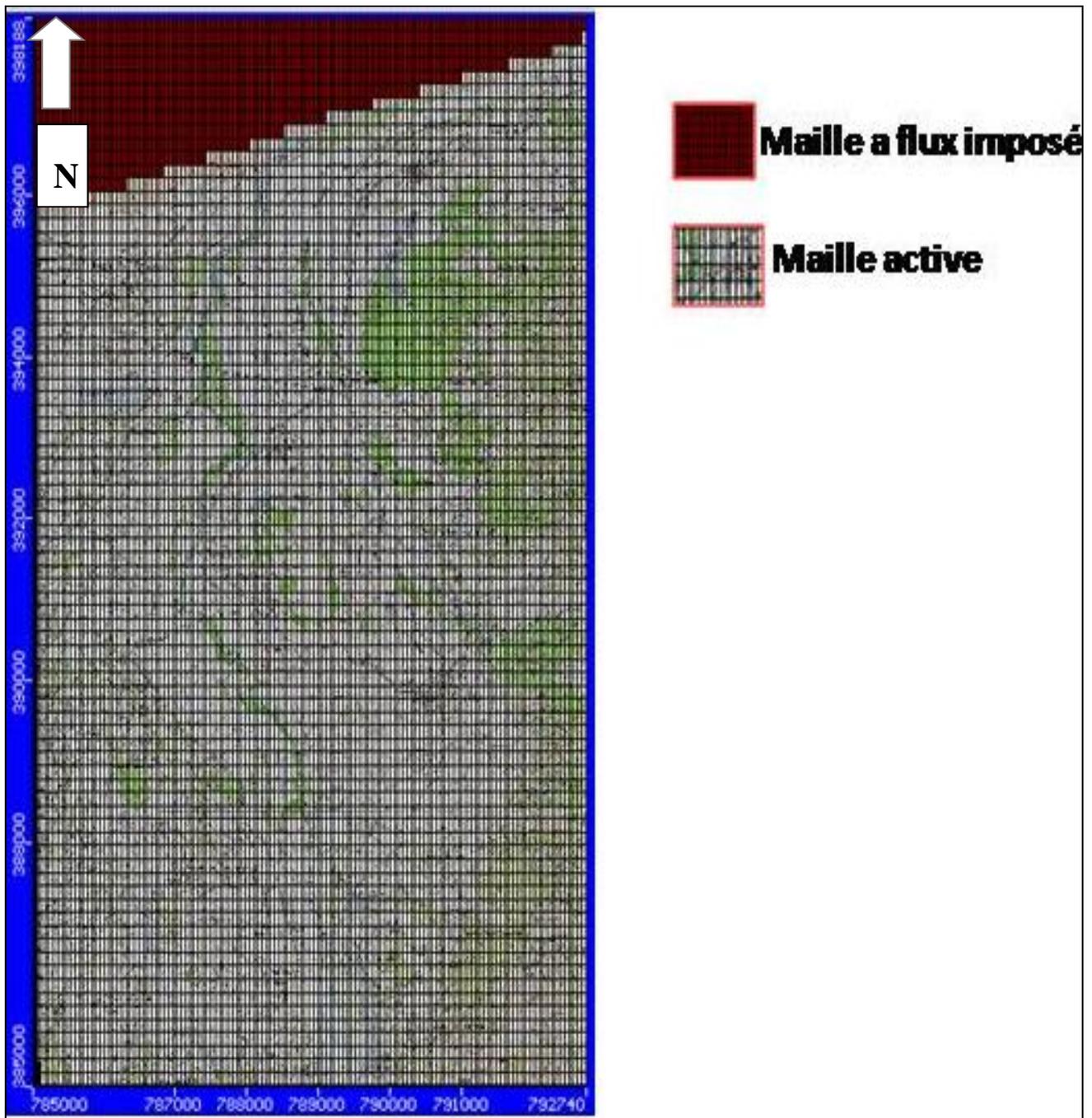


Figure IV-5 : Potentiel imposé sous l'interface de Visual Mod FLOW 3.0

➤ Flux sortant

Les prélèvements de la zone d'étude, sont destinés à l'alimentation en eau potable et à l'irrigation. Ils sont essentiellement représentés par des puits et des forages répartis dans différentes endroits de la plaine alluviales d'Oued Nil.

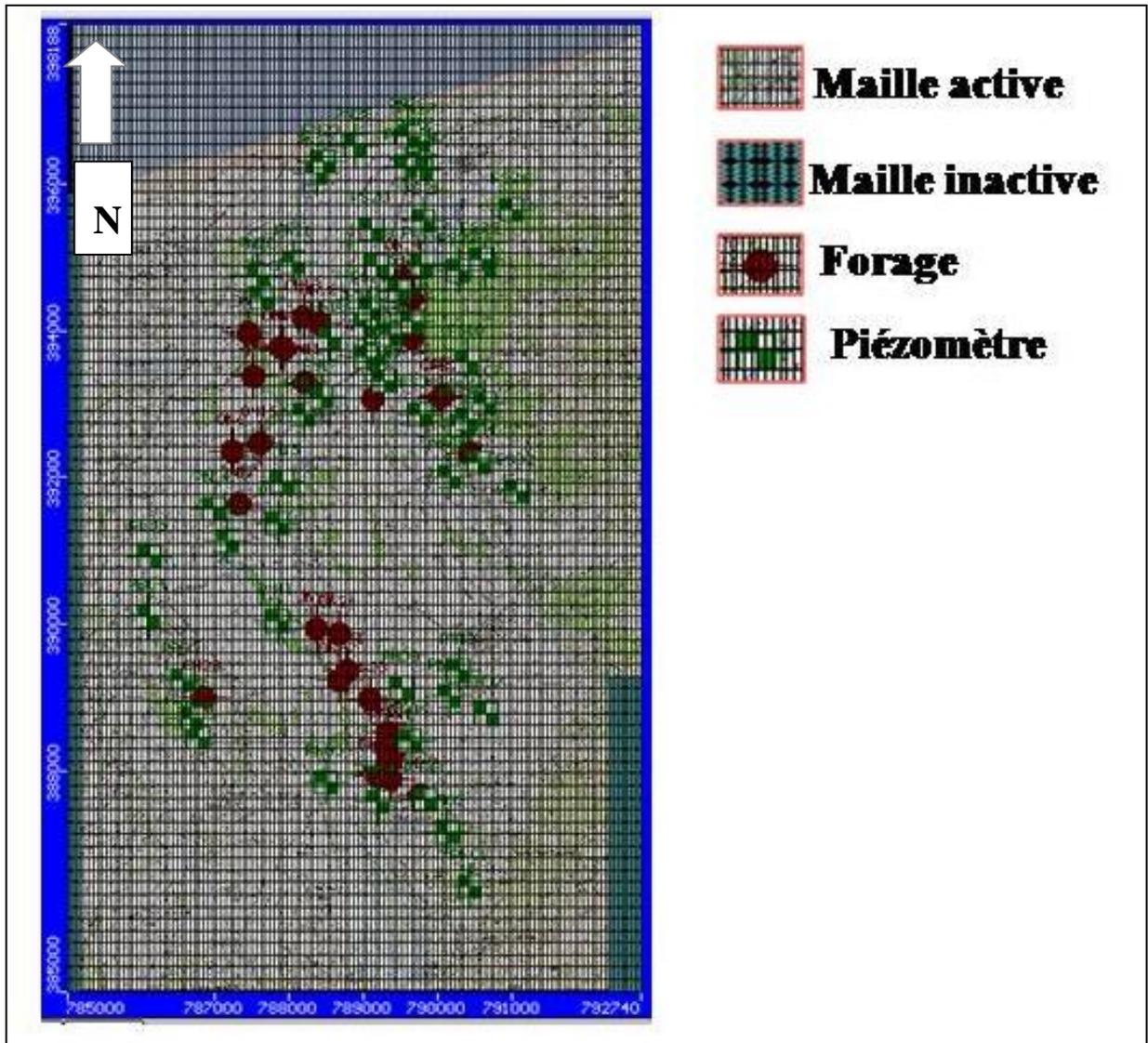


Figure IV-6 : Position des forages et des piézomètres

IV.7. Calage du modèle

IV.7.1. Calage en régime permanent

Introduction

Ce modèle est considéré comme un outil de prévisions des comportements piézométriques. Il est censé fournir des informations relatives à la gestion de la ressource et de prévoir dans le temps l'évolution des besoins en eau de la région considérée.

Le calage du modèle consiste à minimiser la différence entre mesures et résultats par l'ajustement des données d'entrée jusqu'à ce que le modèle reproduise les conditions du champ mesuré avec un niveau de précision acceptable (Dassargue, 1995).

La piézométrie calculée dépend de plusieurs paramètres qui sont la charge piézométrique initiale, les perméabilités (K) obtenues par des essais de pompages, le coefficient d'emmagasinement déterminé par des essais de pompage, la recharge représentée essentiellement par les précipitations, les flux entrants et les flux sortants.

Le modèle est calé sur la campagne piézométrique du mois d'avril 2012, ou un travail a été effectué sur terrain.

IV.7.2. Résultat du calage

La convergence du modèle en régime permanent a nécessité beaucoup d'itérations. Ceci est dû, non seulement au nombre élevé de cellules, mais encore à certains paramètres tels que la recharge et la perméabilité.

Le calage d'un modèle est le fruit de plusieurs tentatives par méthode d'essais/erreurs. A chaque essai, on fait varier un seul paramètre pour converger le modèle vers l'état le plus représentatif de la réalité.

C'est ainsi que seules les valeurs de perméabilités et de recharges ont fait l'objet de modifications lors du calage. Ces nombreuses modifications de la perméabilité, à la suite de chaque simulation, ont permis d'obtenir une piézométrie calculée assez correcte (figure IV-7).

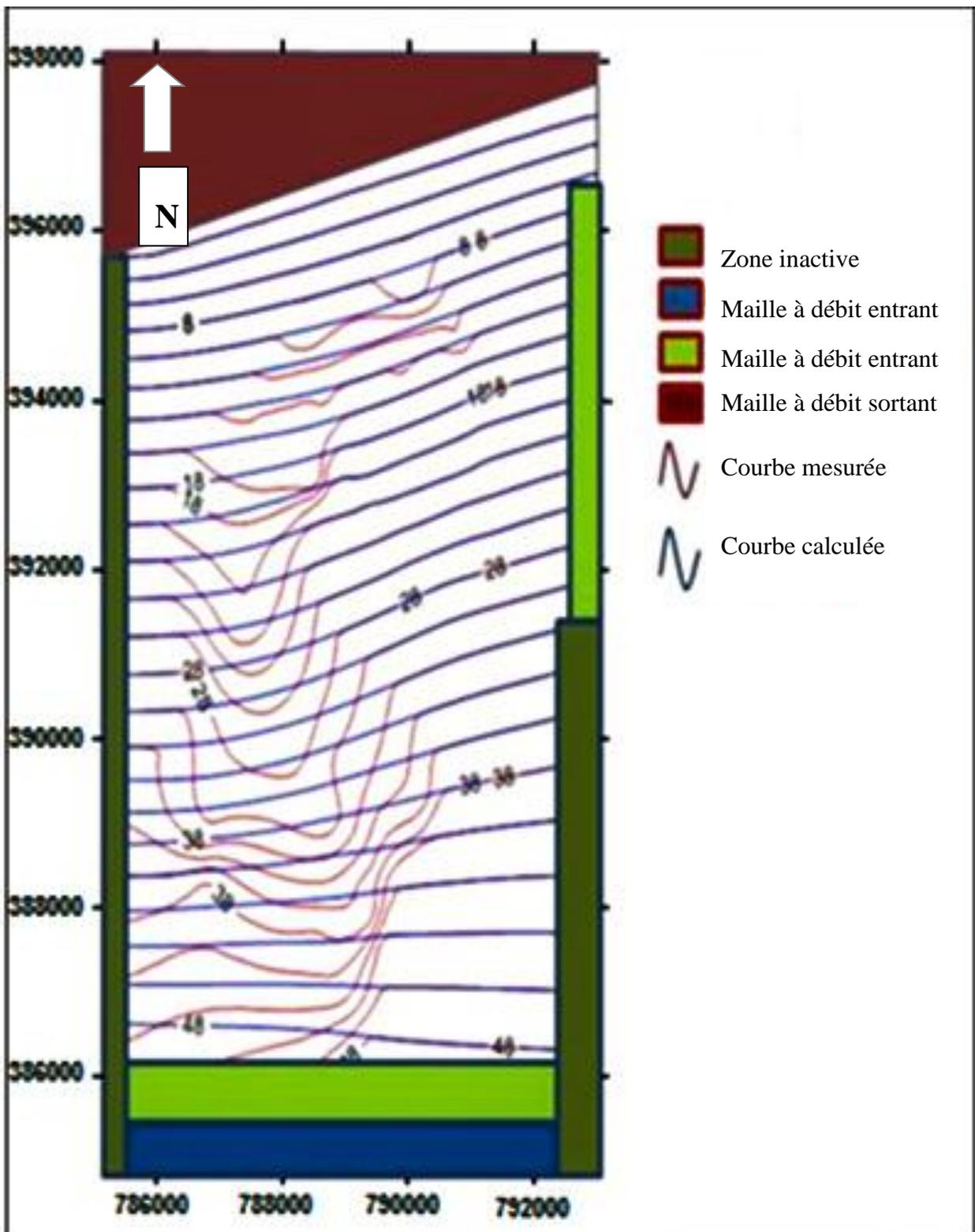


Figure IV-7 : Calage de la piézométrie calculée et observé en régime permanent

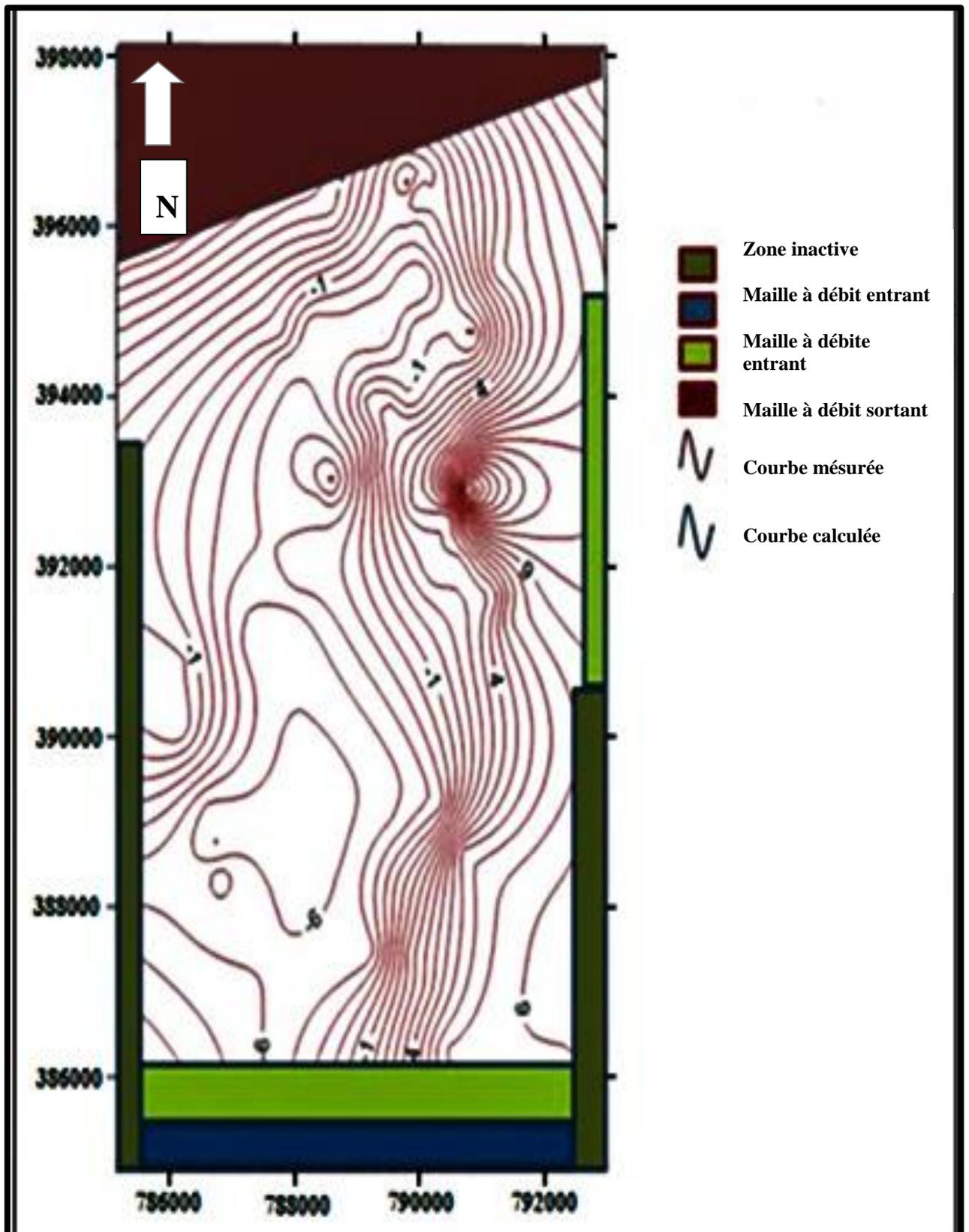


Figure IV-8 : La différence de la piézomètre calculée et observée en régime permanent

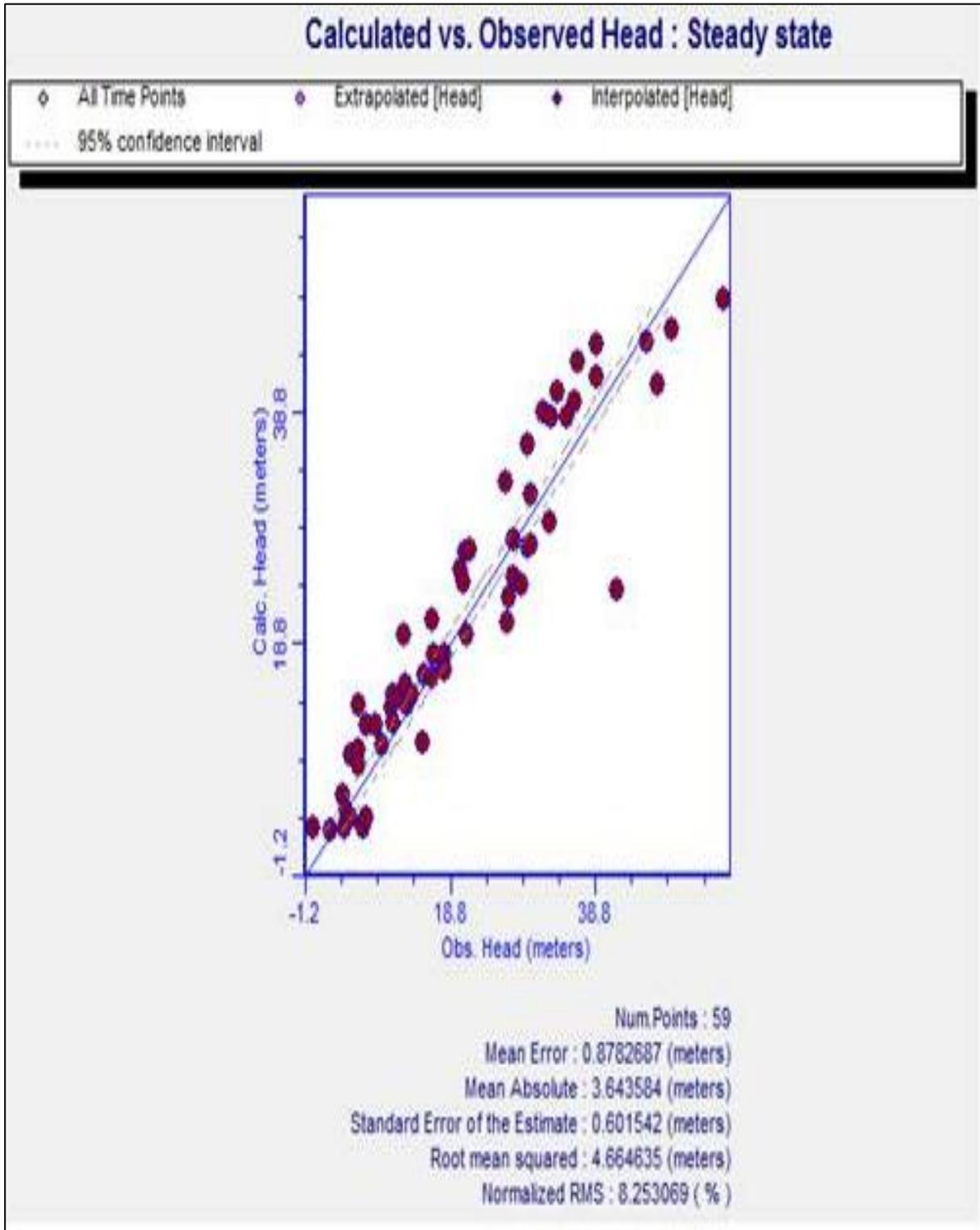


Figure IV-9 : Droite de calibration entre les niveaux piézométriques calculée et observée.

Tableau IV.5 : les résultats entre les niveaux piézométriques calculée et observée

erreur d'environs	4.66%.
La valeur maximum de l'erreur résiduelle	+19.15 m
la valeur minimum de l'erreur résiduelle	- 10.42 m
l'écart type calculée	5.85
l'erreur moyenne absolue	3.64m

Les résultats obtenus par le modèle pour le mois d'avril de l'année 2015 révèlent une erreur d'environs 4.66 m. La valeur maximum de l'erreur résiduelle est de +19.15 m (sur-estimation) et la valeur minimum de l'erreur résiduelle est de -10.42 m (sous-estimation), l'écart type calculée est égale à 5.85 et l'erreur moyenne absolue est de 3.64m.

Pour atteindre une modélisation parfaite avec une erreur résiduelle très faible, des connaissances supplémentaires sont nécessaires surtout en ce qui concerne l'extension et la répartition spatiale des lentilles argileuses qui caractérise la plaine alluviale d'oued Nil.

Conclusion

Pour arriver à mettre en place ce modèle hydrodynamique, caractérisé par une nappe tricouche en régime permanent, les phases suivantes ont été respectées et dans l'ordre durant tout le temps qu'a pris le rapport :

- La localisation de la zone d'études ainsi que l'acquisition de données servant de paramètres d'entrée lors de la simulation. Parmi ces données, il existe celles de campagnes, fiables, qui caractérisent le comportement hydrodynamique de la nappe et par conséquent elles sont introduites telles quelles dans le logiciel visuel Modflow ; et d'autres, disponibles dans les rapports antérieurs, mais qui ont nécessité des modifications lors des différents essais de simulations.

- La discrétisation du domaine de même que la répartition spatiale des paramètres d'entrée ont été effectuées grâce à un logiciel surfer. Ce dernier a permis d'avoir des données d'entrée fiables dans toutes les cellules. Le calage du modèle en régime permanent a permis d'affiner la répartition spatiale de la perméabilité sur l'ensemble de la zone d'étude.

Ce modèle présente des erreurs de l'ordre de 8%, résultant de l'hétérogénéité du système aquifère qui influence grandement le fonctionnement du modè.

Conclusion Générale et recommandation

Conclusion

Ce projet de fin d'étude concerne la modélisation du système aquifère de la plaine alluviale d'oued Nil (NE Algérien). Le système est soumis à une exploitation intensive depuis ces 20 dernières années dues à une augmentation substantielle de la population.

Afin d'atteindre cet objectif une étude bibliographique a été réalisée qui nous renseigne sur les différents modèles utilisés et leurs approches.

Suivi d'une étude géologique de la zone d'étude permettant de caractériser les différentes formations géologiques se trouvant dans notre site, ainsi qu'une étude hydroclimatologique et hydrodynamique de la nappe a travers le traitement des données de la campagne piézométrique d'avril 2015, cela nous a permis de connaître la géométrie de l'aquifère et d'établir les conditions aux limites de la nappe.

Pour arriver à mettre en place ce modèle hydrodynamique, caractérisé par une nappe multicouche en régime permanent, les phases suivantes ont été respectées et dans l'ordre suivant :

- La localisation de la zone d'études ainsi que l'acquisition de données servant de paramètres d'entrée lors de la simulation. Parmi ces données, celles de la campagne d'avril 2015, qui caractérisent le comportement hydrodynamique de la nappe et par conséquent elles sont introduites telles quelles dans le logiciel.
- La discrétisation du domaine de même que la répartition spatiale des paramètres d'entrée ont été effectuées grâce à un logiciel surfer. Ce dernier a permis d'avoir des données d'entrée (perméabilité, porosité, coefficient d'emménagement, épaisseurs des couches, les flux d'entrée et de sortie) et cela dans toutes les cellules.

Les résultats des simulations de la nappe en régime permanent nous ont permis d'avoir une bonne compréhension du fonctionnement du système hydrodynamique de la plaine alluviale d'oued Nil et de déterminer l'effet des différents paramètres sur le comportement de la nappe.

Dans le futur pour obtenir une modélisation plus performante, l'acquisition de nouvelles informations, ainsi que la détermination des différents paramètres hydrodynamiques avec une plus grande précision et la répartition spatiale des lentilles argileuses permettront d'améliorer les résultats de la modélisation.

Référence

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **Arnaud P ; 1997.** *Modèle de prédétermination de crues basé sur la simulation. Extension de sa zone de validité, paramétrisation du modèle horaire par l'information journalière et couplage des deux pas de temps.* Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technique du Languedoc. 251p.
2. **Bechkite M ; 2005.** *Etude hydrogéologique de la plaine alluviale d'oued El Nil,* Université Mentouri- Constantine, 181p (mémoire d'ingénieur d'état en géologie).
3. **Berkane S ; 2011.** **Contribution a l'étude hydrogéologique et hydrochimique de la plaine alluviale d'oued Nil.** (Université Mentouri-Constantine,167 P (mémoire d'ingénieur d'état en géologie).
4. **Carstensen J; Vanrolleghem P; Rauch W; Reichert P; 1997.** *Terminology and methodology in modelling for water quality management a discussion starter.* Water Science and Technology 36 (5) 157-168.
5. **Cernesson F ;1993.** *Modèle simple de prédétermination des crues de frequences courant à rare sur petites bassins versants mléditerranéens.* Thèse de doctorat, Université des sciences et technique du languedoc.
6. **Dassargue A ; 1991.** *Modèles mathématiques en hydrogéologie et paramétrisation.* Annales de la société géologique de Belgique, T, 113 (fascicule 2), 217-229.
7. **Dassargue A ; Monjoie A ; 1991.** *Modèle hydrogéologique en zone aride ou semi-aride utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride.* Ed. AUPELF-UREF. Jhon Libbey Eurotext. Paris p. 17-22.
8. **Dassargue A ; 1994.** *Paramétrisation et simulation des réservoirs souterrains, discrétisation du domaine, couplage et non linéarité des paramètres* Thèse de doctorat en

- Sciences Appliquées de l'Université de Liège collection des publications de la Faculté des Sciences Appliquées N°134, 150p.
9. **De Marsily G ; 1978.** *De l'identification des systèmes hydrogéologiques.* Thèse de doctorat d'état en science naturelle. Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.
 10. **Djellit H ; 1987.** *Evolution tectono-métamorphique du Socle Kabyle et la polarité de mise en place des nappes de flysch en petite Kabylie occidentale (Algérie).* Thèse de Doctorat. Université de Paris-Sud Centre d'Orsay, 206p.
 11. **Durant Delga ; 1955.** *Etude géologique de l'Ouest de la chaîne Numidique.* Thèse d'Etat paris, publ. serv. Carte géol. Algérie, 24,533P.
 12. **Flores-Estrada S ; Merts I ; De Ketelaere B ; Lammertyn J ; 2006.** *Development and validation of "grey-box" models for refrigeration application : a review of key concepts.* International journal of refrigeration 29, 931-946.
 13. **Harbaugh A-w; Batna E-R; Hill M.C. Mcdonald M.G.** *Modflow-2000, the usgs modular groundwater model-user guide to modularisation concepts and the groundwater flow process.* uses open-file report 00-92., 1988-2005.
 14. **Kessasra F ; 2015.** *Modélisation hydrogéologique des écoulements d'eaux souterraines et de surface de la nappe des alluvions de la vallée de la Soummam (Nord-Est Algérie) - Impacts sur l'environnement et les écosystèmes.* Thèse de Doctorat. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, USTHB d'Alger, 434p.
 15. **Kollet SJ; Maxwell RM.; 2006.** *Integrad surface-groundwater flow modeling: A free-surface overland flow boundary condition in a parallel groundwater flow model.* Advances in Water Ressources 29, 945-958.
 16. **Lahtihet A ;1983.** *Etude hydrogéologique de la plaine alluviale d'oued Nil (Région de Jijel).* Mémoire d'ingénieur, Université d'Alger.
 17. **Ledoux E ; 2003.** *Modèles mathématiques en hydrogéologie.* Centre d'informatique Géologique, Ecole nationale Supérieure des mines de paris.

-
- 18. Ledoux E (2013).** *Modélisation hydrogéologique des aquifères de paris et impacts des aménagements du sous-sol sur les écoulements souterrains.* Thèse de doctorat, Université de paris ENMP.
- 19. Medane K. ; 2012.** *Hydrologie et modélisation pluie-débit : cas du bassin versant de l'oued Boumessaoud (tafnanw-algérien).* Mémoire de magister, Université de Tlemcen, 121p.
- 20. Medioune H ; 2011.** *Etude hydrogéologique du système aquifère du horst de Diass en condition d'exploitation intensive (bassin sédimentaire sénégalais) : apport des techniques de télédétection, modélisation, géochimie et isotopie.* Thèse de Doctorat. Université de Liège, 325p.
- 21. McDonald MG; Harbaugh AW., 1988.** *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 6, chap A1, 586p.*
- 22. Mercer JW; Faust CR; 1980.** Groundwater modelling: an overview. *Groundwater* 18 (2) 108-115.
- 23. Molina.J ; Arostegui.J.L.G. Benavente.J ; Varela.C ; de la Hera. A ; Geta.L.J. A (2009).** *Aquifers overexploitation in SE spain.* A Proposal for the Integrated Analysis of water Management water resour Manage 23:2737-2760.
- 24. Ndiaga s ; 2006.** *Modélisation des écoulements en milieux poreux non saturé : Application à la recharge naturelle des nappes,* Mémoire d'ingénieur, Université Cheick Anta Diop de Dakar (Sénégal), 155p.
- 25. Orban.P ; Brouyère.S ; Balte-Aquilar.Jordi ; Couturier.J ; Goderniaux.P, Leroy. Mathieu; Maloszewski. P, Dassargues. A (2010)** *Regional transport modelling for nitrate trendassment and forcasting in a chalk aquifer.* *Journal of contaminant Hydrology* 118,79-93.
- 26. Payraudeau S (2004).** *Modélisation distribuée des flux d'azote sur des petits bassins versants méditerranéens.* Thèse de doctorat, Ecole Nationale Du Génie Rural, Des Eaux Et Des Eaux Et Des Forets, Montpellier-France,451P.

- 27. Sadoun L ; 2013.** *Etude hydrologique et hydrodynamique de la basse plaine alluviale d'Oued Nil. Mémoire de master en eau et environnement.* Université de Jijel (Algérie), 03 p.
- 28. Singh VP; 1995.** *Watershed modelling.* In: Singh V.P, ed. Computer models of watershed hydrology. Colorado, USA. Water Resources Publications, Highlands Ranch, 1-22.
- 29. Tranouez P ; 2005.** *Contribution à la modélisation et à la prise en compte informatique de niveaux de descriptions multiples.* Application aux écosystèmes aquatiques. Thèse de Doctorat, Université du Havre.

Site Web

- [1].<http://echo2.epfl.ch/e-drologie/resumes/chapitr1/resume1.pdf>

Annexes

Tableau de puits

X-degre-10	Y-degre-10	Nouveau Nom	N. piezo
5,91579542	36,78081533	PN20	20,02
5,95330661	36,73385919	PN01	56,06
5,937594	36,746563	PN07	37,32
5,93186064	36,74701089	PN22	35,1
5,95248036	36,7601715	PN23	33,63
5,94845117	36,82524444	PN34	2,14
5,94692758	36,82580769	PN35	2,23
5,95037694	36,82612639	PN36	1,92
5,938179	36,824477	PN37	0,4
5,939313	36,826753	PN39	0,1
5,941407	36,826966	PN40	0,05
5,943786	36,827175	PN41	2,9
5,946222	36,827984	PN42	3,11
5,948428	36,828741	PN44	2,59
5,95208381	36,79422789	PS08	22,62
5,954935	36,79794789	PS09	28,32
5,94749547	36,79176186	PS10	25,16
5,94677775	36,80302619	PS15	12,74
5,94847703	36,81018717	PS22	10,83
5,95136258	36,81941003	PS25	5,7
5,95794433	36,80966653	PS27	11,49
5,95745511	36,81047036	PS28	9,58
5,96240731	36,81649661	PS29	12,87
5,90553867	36,76790003	PB4	29,12
5,95008539	36,78303803	PSA	35,45
5,96492517	36,77963583	PS1	33,17
5,92063592	36,80409964	PT4	7,81

Tableau de forage

N°	Nom du forage	X	Y	Transmissivité (m ² /s)	Coefficient de permeabilité (m/s)
1	ON1	5,92672	36,79162	6,00E-03	2,46E-04
2	ON 2	5,9432	36,749	6,01E-02	2,70E-03
3	ON 3	5,95018	36,8037	1,33E-03	6,65E-05
4	ON 4	5,9451	36,7489	2,87E-02	1,20E-03
5	ON 5	5,95836	36,7847	1,90E-02	1,10E-03
6	ON12	5,93096	36,7985	9,70E-03	3,50E-04
7	ON 13	5,94159	36,7453	7,94E-02	1,73E-03
8	ON 14	5,95006	36,8062	2,77E-03	1,32E-04
9	ON 15	5,92482	36,787	8,42E-03	1,34E-04
10	ON 17	5,92317	36,7796	3,22E-03	1,32E-04
11	ON 18	5,93452	36,8021	5,40E-03	1,90E-04
12	ON 19	5,93696	36,8013	1,25E-03	2,36E-05
13	ON 20	5,95126	36,7946	9,26E-04	2,30E-05
14	ON 22	5,94084	36,74144	1,22E-02	2,77E-04
15	ON 23	5,9412	36,7547	3,66E-02	8,50E-04
16	ON 24	5,93811	36,7614	9,15E-03	2,17E-04
17	ON 28	5,91604	36,7561	4,26E-03	1,80E-04
18	ON 30	5,9458	36,7508	2,24E-02	5,9000E-04

Tableau dedonnées la température

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jui	Aoû	Sep	Oct	Nov	Dec
1988	12,90	10,70	12,60	15,00	18,10	21,50	24,70	25,90	21,50	20,70	15,80	11,10
1989	10,30	11,80	13,80	14,90	17,30	21,10	25,20	26,20	23,50	19,70	16,40	15,30
1990	11,50	13,20	13,90	14,30	18,30	22,10	24,50	24,30	25,40	20,90	15,70	10,70
1991	10,50	10,60	14,40	13,50	15,20	21,20	24,70	25,80	24,60	19,60	14,10	11,20
1992	9,80	11,00	12,30	14,30	7,50	20,40	23,00	24,90	23,70	18,50	15,10	12,20
1993	9,60	10,70	12,10	14,60	18,70	21,60	23,80	25,40	22,50	19,80	14,50	12,10
1994	11,90	12,20	13,60	13,90	19,20	22,00	25,50	28,60	24,90	20,50	16,90	12,60
1995	11,80	13,40	13,10	14,10	19,20	22,40	25,10	26,10	22,80	20,40	16,80	15,00
1996	14,40	11,50	13,80	15,70	18,10	21,70	24,70	25,60	21,50	17,80	16,10	14,30
1997	13,50	12,20	12,90	15,40	19,80	23,90	24,40	25,80	24,00	20,30	16,50	13,70
1998	12,50	12,30	13,50	15,80	18,20	22,90	24,70	25,40	23,70	17,80	14,40	11,40
1999	11,60	10,40	13,60	15,00	20,40	23,30	25,10	27,80	24,80	22,90	14,70	12,20
2000	9,50	11,90	13,60	16,30	19,70	21,90	25,90	26,60	23,50	19,40	15,40	13,40
2001	12,50	11,20	17,00	15,20	18,00	23,40	24,90	26,10	22,90	22,60	15,10	10,70
2002	10,70	11,70	14,00	15,10	18,40	22,40	24,50	25,00	22,80	19,50	16,70	13,90
2003	11,60	11,00	13,70	16,00	18,40	25,30	27,70	28,30	24,00	21,10	16,10	12,00
2004	11,40	12,30	13,60	14,90	17,20	21,70	24,80	26,70	24,10	22,00	14,00	12,80
2005	9,00	9,20	13,00	16,00	19,80	23,50	26,20	25,50	23,70	21,00	15,70	11,80
2006	10,90	11,30	14,20	17,80	20,80	23,40	26,10	25,40	23,40	22,10	17,90	13,60
2007	12,30	13,90	13,20	16,70	19,80	22,80	25,10	26,80	23,50	20,00	14,90	12,30
2008	12,40	13,10	9,00	16,60	18,90	22,30	25,90	26,00	24,20	20,30	15,00	11,90
2009	11,90	11,60	13,20	15,20	20,80	23,60	27,40	27,00	23,40	20,10	16,50	14,70
2010	12,50	13,90	14,40	16,40	18,00	21,50	25,50	25,50	23,30	20,10	19,80	13,20
2011	11,90	11,80	14,40	17,20	19,60	22,50	26,40	26,30	24,40	20,50	17,00	13,10
2012	11,50	8,70	13,90	16,30	19,20	24,90	26,40	27,90	23,10	21,10	17,10	13,00
2013	11,90	10,50	15,20	16,40	18,10	20,90	25,20	25,40	23,70	22,80	15,40	12,50
2014	13,30	13,60	13,40	17,10	18,90	23,20	25,50	26,30	26,20	22,20	18,80	13,10
2015	12,00	11,00	15,00	17,00	20,00	22,90	27,00	27,00	25,00	21,00	16,00	12,90

Tableau de pricipitation a station Achouat-Taher

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jui	Août	Sep	Oct	Nov	Dec
1988	85,00	128,00	70,40	65,60	42,20	18,40	0,00	0,00	134,10	2,30	184,60	284,60
1989	112,60	92,00	67,20	178,40	9,30	8,50	9,20	8,80	52,20	26,70	148,50	124,00
1990	120,10	0,00	54,10	87,20	74,10	8,50	6,20	29,40	0,90	107,40	251,20	411,20
1991	115,40	139,60	126,20	42,20	50,50	3,30	0,00	3,10	40,50	220,60	98,10	67,50
1992	122,90	56,00	201,40	165,50	98,30	26,10	9,50	0,20	11,50	121,90	60,30	319,30
1993	107,90	113,70	66,70	103,70	66,50	7,50	0,00	0,00	32,70	84,30	126,10	158,00
1994	107,10	141,90	0,00	92,40	14,50	0,00	0,30	0,50	93,30	122,90	5,00	371,60
1995	173,30	37,40	104,10	56,50	5,60	20,60	1,70	9,50	58,50	72,30	96,10	94,60
1996	102,10	313,10	122,40	128,80	60,90	45,10	3,20	10,70	45,10	129,70	110,00	128,10
1997	58,00	12,90	12,20	82,20	28,60	27,20	5,80	7,40	110,70	196,50	188,10	121,40
1998	42,30	142,90	67,50	106,10	130,10	3,80	0,00	20,40	94,30	51,50	339,30	151,80
1999	163,20	97,00	62,10	42,70	5,90	4,00	1,60	5,60	27,00	23,90	250,80	247,70
2000	108,60	42,40	17,00	33,20	95,30	13,50	1,40	2,70	25,70	89,80	117,80	84,60
2001	247,70	110,90	14,20	50,70	50,30	3,70	0,00	2,50	38,80	1,10	125,20	142,40
2002	71,80	66,30	37,60	49,70	15,30	4,40	16,20	86,20	49,50	103,00	182,00	407,30
2003	333,10	115,00	30,70	130,00	70,90	0,80	7,10	0,00	128,40	76,00	82,00	220,50
2004	137,20	83,30	75,20	96,60	81,20	56,40	1,30	4,30	75,80	34,80	267,10	158,80
2005	262,10	212,60	85,50	121,80	4,80	0,00	1,20	18,40	56,40	21,40	134,50	171,60
2006	178,20	165,50	54,90	24,10	32,70	2,80	0,00	34,80	45,30	37,90	39,60	215,40
2007	12,30	74,50	268,50	70,60	14,40	26,40	3,30	4,80	70,80	142,90	291,40	211,30
2008	34,30	27,40	172,10	18,80	144,70	3,70	0,00	1,30	86,70	30,80	109,80	145,90
2009	207,90	85,90	78,20	183,80	14,40	0,30	0,50	10,80	172,30	68,10	154,90	139,60
2010	121,40	60,20	105,40	52,50	81,00	49,50	2,10	1,40	53,00	218,50	195,90	110,30
2011	78,60	143,50	89,80	69,70	33,40	27,00	8,10	0,00	14,70	247,10	134,50	160,00
2012	64,90	368,50	95,90	189,40	3,10	0,60	0,40	110,90	105,60	162,80	82,60	81,40
2013	210,30	211,60	81,20	41,90	144,60	0,60	1,60	42,90	48,50	54,20	349,90	125,20
2014	133,70	85,10	154,00	13,10	7,10	13,90	0,20	4,10	24,90	49,00	182,90	338,10
2015	170,95	268,98	119,00	2,00	25,75	68,00	0,00	3,87	89,00	131,75	148,00	9,70

Tableau de l'évaporation a station Achouat-Taher

Année	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
1991	122	90	64	64	65	64	99	89	89	104	147	164
1992	128	91	58	68	44	61	56	76	60	105	93	128
1993	115	99	62	56	48	65	78	81	92	96	125	120
1994	142	78	73	47	75	83	53	83	96	136	157	179
1995	109	81	96	75	87	64	81	74	106	85	123	134
1996	100	79	74	66	88	72	72	71	69	83	133	117
1997	76	64	54	52	63	31	50	61	64	88	87	91
1998	72	51	40	42	49	31	53	52	41	79	75	74
1999	87	101	48	44	33	36	55	52	75	79	100	109
2000	75	65	55	63	33	44	46	78	46	55	105	106
2001	64	84	48	37	49	41	78	54	55	107	89	97
2002	77	68	83	51	38	40	53	48	70	56	64	79
2003	72	61	51	48	48	42	51	45	44	93	110	107
2004	81	80	28	45	39	47	46	48	53	58	75	89
2005	89	58	54	41	43	41	40	52	55	76	102	96
2006	87	79	74	49	56	40	70	66	57	101	97	93
2007	78	62	57	48	37	37	43	46	82	77	88	117
2008	93	62	68	47	46	51	49	59	50	70	98	94

Tableau de l'Humidité Relative a station Achouat-Taher

Année	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
1991	76	79	80	78	77	77	77	77	77	77	73	71
1992	76	79	82	78	83	85	82	81	84	78	81	74
1993	78	76	80	83	81	77	76	77	76	77	76	77
1994	70	79	77	80	83	77	81	68	76	70	69	65
1995	72	73	69	75	75	70	75	77	72	76	72	69
1996	114	77	74	74	72	75	76	76	119	77	69	73
1997	74	76	77	75	72	83	77	74	77	73	74	71
1998	88	77	80	79	78	82	75	76	82	75	74	76
1999	74	67	80	81	81	79	75	75	73	73	70	70
2000	77	74	77	72	80	77	78	71	81	81	69	69
2001	77	71	77	78	77	77	73	77	79	67	73	71
2002	74	73	71	76	78	77	75	76	73	76	75	76
2003	79	76	75	80	78	75	75	79	80	69	68	67
2004	73	69	82	77	80	78	79	76	78	78	75	71
2005	71	77	74	77	80	77	79	76	76	73	69	68
2006	70	73	70	77	73	76	73	74	79	66	70	71
2007	75	80	76	77	80	81	74	80	72	75	73	70
2008	80	76	77	78	77	74	78	73	82	75	71	72