

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMEDBOUDIAF - M'SILA



FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : HYDRAULIQUE

DOMAINE : HYDRAULIQUE

FILIERE : HYDRAULIQUE

OPTION : OUVRAGE HYDRAULIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique

Par:

BAHACHE SOUMIA

BOUTCHICHA FATNA

Intitulé

**Modélisation de nappe par l'utilisation de
MODFLOW**

Dirigé par:

Mr. AHMED FERHATI

Année universitaire : 2019 /2020

Résumé

Résumé

L'approvisionnement en eau potable de la population est tributaire des eaux souterraines. Cependant, la croissance rapide de population et la forte demande en eau ont occasionné un déficit en matière d'approvisionnement en eau potable. Face à ce déficit, l'Etat s'est orienté vers l'exploitation de la nappe, Cette étude a donc été entreprise dans l'optique de réaliser un modèle hydrogéologique capable de simuler le niveau de cette nappe dans l'indépendant et de cartographier le cône de rabattement induit par l'exploitation des nouveaux forages. Le modèle, réalisé sous l'interface Visual Modflow, a été conçu en régime permanent et calibré manuellement à partir de la piézométrie de l'année 2000.

ملخص

تعتمد إمدادات مياه الشرب للسكان على المياه الجوفية. ومع ذلك أدى النمو السكاني السريع وارتفاع الطلب على المياه إلى نقص في إمدادات مياه الشرب. في مواجهة هذا العجز، اتجهت الدولة إلى استغلال طبقة المياه الجوفية، لذلك أجريت هذه الدراسة بهدف إنتاج نموذج هيدروجيولوجي قادر على محاكاة مستوى هذا الخزان الجوفي في المنطقة غير المستجيبة ورسم خرائط. مخروط السحب الناجم عن استغلال الآبار الجديدة. تم تصميم النموذج، الذي تم إنتاجه تحت واجهة Visual Modflow، في حالة مستقرة ومعايرة يدوياً من قياس الضغط لعام 2000.

Abstract

The population's drinking water supply depends on groundwater. However, rapid population growth and high water demand have resulted in shortages of drinking water supplies. Faced with this deficit, the state tended to exploit the aquifer, so this study was conducted with the aim of producing a hydrogeological model capable of simulating the level of this underground reservoir in the unresponsive area and mapping. The draft cone created by the exploitation of new wells. The model, produced under the Visual Modflow interface, is designed in steady state and manually calibrated from the 2000 manometry.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A ma mère

A mon père

Pour tous les sacrifices et le soutien moral et matériel dont ils ont fait preuve

Pour que je réussisse.

A mes frères et sœurs

A tous mes amis et spécialement mes amis et frères en ALLAH

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, je leurs dédie ce modeste travail.

Soumia Bahache

REMERCIEMENTS

Je remercie avant tout ALLAH le tout puissant de m'avoir donné le courage, la santé, et m'a accordé son soutien durant les périodes les plus difficiles ;

A l'issu de ce mémoire du master, Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à toute personne qui m'a aidé de près ou de loin tout au long de mes études.

Je remercie également mes parents, ma famille de m'avoir donné le courage tout le temps

Ma reconnaissance va plus particulièrement à :

*Mon promoteur **Mr AHMED FERHATI** pour sa contribution à l'élaboration de ce mémoire.*

L'ensemble des enseignants qui m'ont suivi durant mon cycle d'étude.

Je tiens à remercier aussi :

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

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I: Généralités sur les milieux poreux et recherche bibliographique	
I: Généralité sur les milieux poreux et recherche bibliographique.....	4
I.1. Théorie de continuité	4
I.2. Caractéristiques du milieu poreux	5
I.2.1. La granulométrie.....	5
I.2.3. Infiltration	5
I.2.4. La porosité	5
I.2.4.1. La porosité efficace (η_e), coefficient de porosité	6
I.2.4.2. La porosité cinématique.....	6
I.2.4.3. La porosité effective	6
I.2.5. Indice des vides.....	6
I.2.6. Coefficient de saturation S_r	7
I.2.7. La masse volumique des grains	7
I.2.8. La masse volumique sèche.....	7
I.2.9. Le coefficient d'emménagement.....	7
I.2.10. La perméabilité intrinsèque.....	8
I.2.11. La transmissivité	8
I.3. Classification des aquifères.....	8
I.3.1. Aquifère à nappe libre.....	8
I.3.2. Aquifère à nappe captive	8
I.3.3. Aquifère à nappe semi-captive.....	8
I.3.4. Aquifère à nappe suspendue	8
I.4. Le modèle Mathématique	8
I.4.1. La loi de Darcy.....	8
I.5. Les modèles d'écoulement souterrain.....	10
I.6. La recharge artificielle des nappes alluviales	12
I.6.1. Les dispositifs de la recharge artificielle	13
I.6.2. Quelques exemples de la recharge artificielle des nappes dans le monde.....	15
I.6.3. Alternatives de la recharge artificielle des nappes en Algérie.....	16

Chapitre II : Etude physico-géographique et climatique de bassin versant du Hodna.

II.1 Situation géographique et relief.....	19
II.1.1 Situation géographique de bassin.....	19
II.1.2 Relief et topographie.....	19
II.1.2.1 Les montagnes.....	20
II.1.2.2 La plaine.....	20
II.1.2.3 Chott El Hodna (Sebkha).....	20
II.2 Réseau hydrographique.....	21
II.3 Hydrogéologie.....	22
II.4 Sources d'eau.....	23
II.5 Caractéristiques climatiques.....	23
II.5. 1 La pluviométrie.....	23
II.5. 2 Les vents.....	26
II.5. 3 Température.....	26
II.5. 4 L'humidité relative.....	27
II.5. 5 L'évaporation.....	27
II.6 La végétation.....	28

Chapitre III: L'aquifère phréatique quaternaire.

III.1.Définition.....	31
III.2. Cartographie du toit de l'aquifère quaternaire.....	31
III.3. Carte piézométrique de l'aquifère quaternaire.....	32
III.3.1. Stabilité de la nappe.....	32
III.3.2. Sélection des points d'observation pour la carte de référence.....	33
III.3.3. Hydrochimie de la nappe quaternaire.....	33
III.4. Bilan hydrique.....	33
III.4.1.Description de la zone d'étude.....	33
III.4.2. L'infiltration.....	34
III.4.3.L'irrigation.....	34
III.4.4.Estimation de l'évapotranspiration.....	34
III.4.5. Prélèvements anthropiques (domestiques et pastoraux).....	35

Chapitre IV: Modélisation et simulation numérique par modflow

IV.1. Objectif de la modélisation.....	38
IV.2. Présentation du programme de modélisation.....	38
IV.3. Présentation des fonctions du logiciel Modflow.....	39
IV.3.1. Fonction de recharge.....	39
IV.3.2. Fonction rivière (<i>River</i>).....	39
IV.3.3. Charge initiale.....	41
IV.4. Le modèle.....	41
IV.4.1. Description du modèle.....	41
IV.4.2. Conditions aux limites du modèle.....	42
IV.4.2.1. Maillage.....	42
IV.4.2.2. Limites géologiques.....	43
IV.4.2.3. Le mur.....	43
IV.4.2.4. Le toit.....	44
IV.4.2.5. Conditions de flux.....	44
IV.4.2.6. Conditions de flux internes.....	45
IV.4.2.7. Conditions de potentiel.....	45
IV.4.2.8. Contraintes initiales.....	46
IV.5. Résultats de la modélisation.....	46
IV.5.1. Simulation en régime permanent.....	46
IV.5.2. Les puits de pompage et les forages d'observations.....	47
IV.5. 3. Le fond de la nappe.....	48
IV.5.4. Conclusion sur la sensibilité du modèle.....	54

Conclusion générale.

Références bibliographiques.

Liste des tableaux

Tableau II.1 Coordonnées des stations pluviométriques et caractéristiques climatiques de bassin versant du HODNA.....	25
Tableau II.2 Nombre de jours de neige dans le HODNA.....	26
Tableau II.3 Les valeurs de la température de quelques stations du HODNA.....	27
Tableau II.4 Les valeurs de l'évapotranspiration potentiel de quelques stations du HODNA.....	28

Liste des figures

Chapitre I :

Figure(I.1) : Les différents types de porosité.....	6
Figure (I.2): Dispositif expérimental pour la loi de Darcy.....	10

Chapitre II :

Figure (II.1) Situation du Hodna par rapport ou wilaya.....	19
Figure (II.2) Réseaux hydrographiques du HODNA.....	22
Figure (II.3) : Carte pluviométrique du HODNA.....	24

Chapitre III :

Figure (III.1) : Carte topographique issue d'une interpolation par krigeage de points cotés (ronds noirs).....	31
Figure (III.2) : Carte topographique 3D issue d'une interpolation par krigeage de points cotés.....	32

Chapitre IV :

Figure (IV-1): Schéma de la condition-limite « Rivière » [McDonald et al, 1988].....	40
Figure (IV-2): Discrétisation spatiale d'un aquifère.....	42
Figure (IV-3): carte 3D, interpolée par Krigeage, du mur des sables du Pléistocène Inférieur.....	43
Figure (IV-4) : maillage du model, avec la représentation des lignes de flux nul (lignes de partage des eaux), des limites de potentiel et des limites géologiques.....	44
Figure (IV-5) : calcul des conditions de potentiels selon MODFLOW.....	45
Figure (IV-6) : Grid d'un modèle de bassin versant HODNA par Modfla.....	47
Figure (IV-7): représentation des puits dans le bassin versant HODNA	48

Figure (IV-8) : la nappe-profonde de bassin versant HODNA.....	49
Figure (IV-9) : la nappe-phréatique de bassin versant HODNA.....	49
Figure (IV-10) : Chott HODNA.....	50
Figure (IV-11) : Courbe représenté le changement de tête résiduel et max par rapport au nombre d'itération.....	50
Figure (IV-12): Show Grid modflow 2000.....	51
Figure (IV-13): Show contours modflow 2000.....	51
Figure (IV-14): Show color Map modflow 2000.....	52
Figure (IV-15):représenté un colonne de modèle par Modflow.....	52
Figure (IV-16) : représenté un ligne de modèle par Modflow.....	53
Figure (IV-17) : Bassin versant HODNA par modflow.....	53

Introduction générale

Introduction générale

La construction du modèle hydrogéologique constitue une part importante de la modélisation. La principale difficulté étant de représenter fidèlement les écoulements en simplifiant au maximum le modèle

Le modèle doit répondre à plusieurs exigences :

- Flexibilité : le modèle doit pouvoir évoluer pour notamment intégrer de nouveaux captages d'eau ainsi que de nouvelles chroniques de prélèvements ou même de suivre une pollution dans la nappe.
- Simplicité : le modèle doit simuler les écoulements en étant le plus précis possible tout en restant le plus simple possible. En effet, le temps de calcul du modèle est proportionnel à sa complexité. Or on cherche à avoir un outil avec un temps de réponse rapide et des résultats fiables.

Principe général

- Différences finies, qui permet la résolution de problèmes régionaux d'écoulement des nappes, en une ou deux dimensions, dans des systèmes multicouches ou en trois dimensions. Toutefois, elle peut représenter les hétérogénéités des propriétés du milieu.
- Eléments finis, plus compliquée à utiliser mais tout de même capable de traiter toutes les directions d'anisotropie. Elle est idéale pour résoudre les problèmes à limites mobiles, ceux ayant une surface libre et une interface abrupte entre eau douce et eau salée ou entre deux fluides immiscibles.
- Des approches d'éléments aux limites ou d'intégrales de limites ont été proposées dont l'avantage principal réside en leur précision du calcul qui ne dépend pas de la taille des éléments utilisés.

Objectifs

- Les objectifs de la modélisation sont la quantification des débits naturels transitant dans la nappe et la connaissance de la distribution des perméabilités permettant la reconstitution de la piézométrie et ainsi mieux appréhender le fonctionnement hydrodynamique du système. Dans cette partie, on a tenté de construire un modèle mathématique de simulation des écoulements souterrains des nappes HODNA ,
- d'abord en régime permanent qui participera à la compréhension du fonctionnement du système aquifère des nappes. Ensuite en régime transitoire avec une simulation d'un plan de captage d'eau pour l'alimentation en eau potable de la population et l'irrigation

qui permettra le suivi de l'évolution du comportement piézométrique des nappes en fonction des débits de pompage.

Outils

- La modélisation est réalisée avec l'interface Processing Modflow . Ce logiciel est une version de l'interface Visual MODFLOW qui utilise le code de calcul Modflow 2000 développé en Fortran par l'USGS (McDonald et Harbaugh, 1988). Ce code de calcul permet de résoudre l'équation de diffusivité aux dérivées partielles des écoulements par une combinaison de l'équation de continuité et de la loi de Darcy par la méthode des *différences finies (M D F)*.

***Chapitre I: Généralités sur les
milieux poreux et recherche
bibliographique***

Chapitre I: Généralités sur les milieux poreux et recherche bibliographique

I. Généralités sur les milieux poreux et recherche bibliographique

Nous nous intéressons dans cette étude à l'écoulement dans les milieux poreux aquifères. Un aquifère est une formation géologique contenant de l'eau et à travers laquelle, en conditions normales, une quantité significative de cette eau s'écoule. Un milieu poreux est un matériel constitué par une matrice solide et des vides, appelés pores. Le pourcentage de vide d'une roche définit sa porosité totale. Ces vides peuvent être occupés par de l'eau, de l'air ou d'autres fluides. [Louis. J, 1980]. Dans notre étude nous nous intéressons aux milieux saturés en eau c'est-à-dire dans lesquels tous les vides sont remplis d'eau. En hydrogéologie, l'analyse de la porosité n'est pas exclusivement géométrique mais se réfère également à l'eau contenue dans le milieu poreux, à ses liaisons physiques avec la matrice solide et à ses mouvements possibles. En effet, la porosité totale d'une roche n'est pas une condition suffisante à l'écoulement d'eau. C'est l'interconnexion des pores ainsi que les relations fluides-solide qui définiront la circulation du fluide. [Besnard. K, 2003] Dans ce chapitre, nous définissons d'abord les caractéristiques du milieu poreux puis nous décrirons mathématiquement les modèles d'écoulement de l'eau dans un milieu poreux.

I.1. Théorie de continuité

Les milieux poreux naturels sont caractérisés par une extrême complexité de la distribution des pores, irrégulière, aussi bien en forme qu'en taille. Le modèle continu s'oppose au modèle discret dans lequel le milieu est traité comme une succession de sub-systèmes connectés entre eux. Chaque élément a ses propres paramètres.

Les propriétés physiques caractéristiques du milieu poreux peuvent être définies à l'aide de la notion volume élémentaire représentatif (VER) ou théorie de la continuité. Dans cette théorie le système physique réel discret est remplacé par un système continu dans lequel les propriétés physiques le décrivant varient continûment dans l'espace [Bear. J, 1972]. La théorie de la continuité repose sur l'hypothèse qu'un système physique réel peut être approximé par un système dans lequel les variations dans l'espace des propriétés étudiées sont suffisamment lisses pour permettre l'utilisation de calculs différentiels pour décrire les processus s'y déroulant.

L'intérêt est ainsi de pouvoir formuler les changements dans le système en termes d'équations aux dérivées partielles.

I.2. Caractéristiques du milieu poreux

Les milieux poreux naturels sont essentiellement les alluvions constituées de matériaux granuleux ou bien par des roches compactées fissurées.

On dit qu'un milieu poreux est homogène quand, en n'importe quel point, la résistance à l'écoulement est la même, par rapport à une direction donnée. Le concept d'homogénéité est fondamental pour l'étude théorique.

Etant donné l'irrégularité des milieux poreux naturels, il importe de définir l'échelle de l'homogénéité. Ainsi, une alluvion constituée par des grains d'environ 1mm de diamètre sera considérée homogène à l'échelle du dm³.

Le milieu poreux est dit isotrope, si quelle que soit la direction considérée, la résistance à l'écoulement ou toute autre propriété est la même dans toutes les directions. La plupart des milieux poreux naturels sont anisotropes.

I.2.1. La granulométrie

Elle est définie par la courbe granulométrique correspondant au pourcentage, en poids, des grains de diamètre inférieur à un diamètre donné (*exemple* : d₁₀ : représente le diamètre tel que 10 % du poids du matériau sont constitués par des particules de diamètre inférieur à d₁₀).

I.2.2. Infiltration

Quand l'eau arrive à la surface du sol, elle tend de pénétrer dans le sol par infiltration. Le flux infiltré est limité par l'infiltrabilité locale de la surface. L'eau entre dans le sol soit par l'effet de la gravité soit par l'effet de gradient de pression si le sol n'est pas saturé. L'infiltrabilité, ou la capacité d'infiltration du sol, est proportionnelle au gradient hydraulique total et à la conductivité hydraulique au potentiel hydrique considéré [Ambroise. B, 1998].

I.2.3. La porosité

Le sol et le sous-sol ne peuvent contenir de l'eau que s'ils possèdent une porosité significative. La porosité totale d'un sol ou d'une roche est le rapport du volume des vides et des interstices (V_v) de cette roche par rapport au volume total de l'échantillon (V_t). La porosité totale n s'exprime en pourcentage.

$$n = \frac{V_v}{V_t}(\%)$$

La porosité est dépendante de la forme, de l'agencement des grains constituant la roche, mais aussi de leur degré de classement, de compaction, de cimentation. La fracturation et l'altération par dissolution des niveaux rocheux peuvent également constituer des facteurs favorables au développement de la porosité (figure 1).

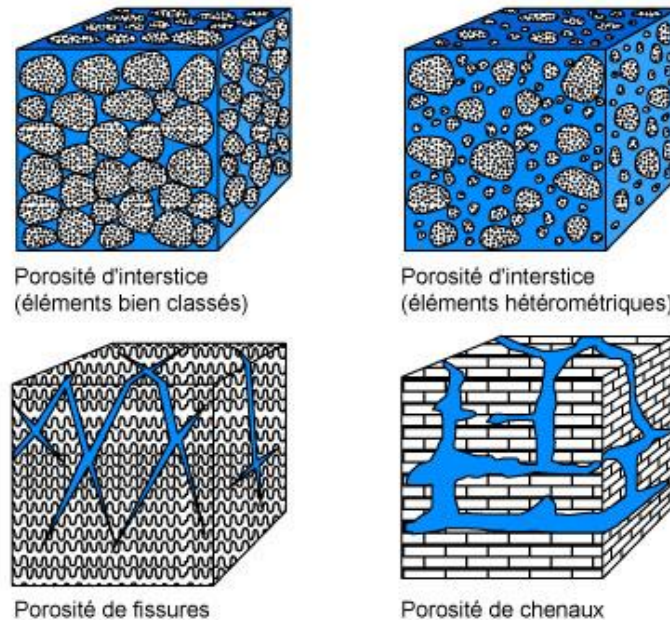


Figure (I.1) Les différents types de porosité.

I.2.3.1. La porosité efficace, coefficient de porosité

Elle se rapporte à l'eau libérée par drainage gravitaire total d'une roche saturée. C'est le volume de l'eau gravitaire, V_e , que l'échantillon peut contenir à l'état saturé, puis libéré sous l'effet d'égouttage complet, à son volume total V_t . Elle dépend essentiellement de l'arrangement de la surface spécifique des grains. Elle est donnée en pourcentage.

I.2.3.2. La porosité cinématique

Elle désigne le rapport de l'eau non liée aux grains, l'eau pouvant circuler et le volume total de la roche. Elle n'est pas mesurable pratiquement. Ce concept est proche la porosité efficace, définit comme un rapport de volume.

I.2.3.3. La porosité effective

Appelée aussi la capacité de rétention. C'est le rapport du volume de rétention V_r (eau non égouttable par gravité) au volume total apparent V_t .

I.2.4. Indice des vides [Lefebvre. R, 2006]

Un autre paramètre caractérisant la proportion de pores dans un matériel est l'indice des vides « e » qui est défini par le rapport du volume des vides V_v sur celui des solides V_s :

Ce paramètre est d'usage courant en géotechnique car il a l'avantage d'utiliser un volume de référence (celui des solides) qui demeure constant contrairement au volume total qui peut varier considérablement dans des matériaux fortement compressibles tels que les silts et argiles.

Le lien entre la porosité et l'indice des vides est exprimé par :

$$n = \frac{e}{e + 1}$$

I.2.5. Coefficient de saturation S_r

C'est le rapport entre le volume occupé par l'eau, V_e et le volume, V_v des vides :

$$S_r = \frac{V_e}{V_v}$$

I.2.6. La masse volumique des grains [Hillel, 1998]

La masse volumique ρ_s [M/L³] est la masse des grains solides M_s divisée par le volume de la phase solide V_s :

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s}$$

I.2.7. La masse volumique sèche [Hillel, 1998]

La masse volumique sèche le rapport entre la masse des grains solides M_s et le volume total du milieu poreux V_T :

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_T}$$

I.2.8. Le coefficient d'emménagement:[François. R, 2002]

Le coefficient d'emménagement d'un aquifère est déterminé à partir de la quantité d'eau libérée pour une perte de charge donnée, c'est à dire une baisse de pression. Dans un aquifère, la perte, ou le gain, d'une certaine quantité d'eau se traduit par une variation de la charge hydraulique. Celle-ci est mesurée à l'aide de piézomètres. Pour une nappe libre, c'est la gravité qui provoque l'écoulement de l'eau. Pour une nappe captive, l'expulsion d'une petite quantité d'eau provoque une grande variation de pression et donc une forte perte de charge. D'une façon générale, pour une même différence de charge, la quantité d'eau libérée est beaucoup plus grande dans une nappe libre.

I.2.9. La perméabilité intrinsèque [Besnard. K, 2003]

Est la propriété d'un corps poreux de se laisser traverser par fluides. Cette constante caractéristique d'un milieu poreux est liée à la forme des grains et à la porosité cinématique (Communication entre les pores). Donc, indépendante des caractéristiques des fluides elle ne dépend que de la structure et de la connectivité des pores. La perméabilité intrinsèque est généralement anisotrope et s'exprime donc sous la forme tensorielle.

I.2.10. La transmissivité [Castany. G, 1982]

La transmissivité (T) régit le débit d'eau qui s'écoule, par unité de largeur, d'un aquifère, sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique. Il évalue la fonction conduite de l'aquifère. La transmissivité est égale au produit du coefficient de perméabilité (K) par l'épaisseur de l'aquifère(b). Elle permet de représenter sur des cartes les zones de productivité.

$$T \text{ (m}^2\text{/s)} = K \text{ (m/s)} \times b \text{ (m)}$$

I.3. Classification des aquifères

L'aquifère est un système dynamique caractérisé par sa configuration, sa structure, les fonctions de son réservoir et ses comportements. On distingue quatre types d'aquifère :

I.3.1. Aquifère à nappe libre

Dans l'aquifère à nappe libre la surface piézométrique constitue la limite supérieure de l'aquifère, c'est une limite hydrodynamique. Cette surface peut s'élever ou s'abaisser librement dans une formation hydrogéologique perméable.

I.3.2. Aquifère à nappe captive

Dans les aquifère plus profonds les eaux souterraines sont emprisonnées entre deux formations géologiques imperméables fixes : le substratum à la base et le toit au sommet.

I.3.3. Aquifère à nappe semi-captive

Dans ce type d'aquifère, le toit et/ou le substratum sont constitués par une formation hydrogéologique semi-perméable Celle ci permet, dans des conditions hydrodynamiques favorables des échanges d'eau ou de pression avec l'aquifère superposé. Ce phénomène est appelé drainance.

I.3.4. Aquifère à nappe suspendue

Il existe encore un cas particulier de nappe qui se présente quand une formation imperméable apparaît entre la zone saturée et la surface du sol, donnant origine à la rétention des eaux d'infiltration au-dessus de cette formation.

I.4. Le modèle Mathématique

I.4.1. La loi de Darcy

L'écoulement de l'eau à travers les formations perméables a été étudié par H. Darcy en 1856.

La vitesse de circulation de l'eau dans les milieux poreux sont très variables. Elles dépendent d'un certain nombre de facteurs, dont évidemment la perméabilité de l'aquifère, mais aussi le gradient hydraulique qui est défini par la différence d'élévation entre deux points de la surface de la nappe, divisée par la distance entre ces deux mêmes points, et la viscosité de l'eau.

La loi de Darcy est une loi empirique, obtenue pour un milieu monodimensionnel à travers une colonne de sable homogène et s'écrit comme suit :

$$Q = - K \times A \times \left(\frac{dh}{dl} \right)$$

Avec :

Q : Débit

K : Conductivité hydraulique ou perméabilité

A : Aire de la section perpendiculaire à l'écoulement

dh/dl : Gradient de charge hydraulique

Si on divise le débit par la section A , on obtient une vitesse dite vitesse de Darcy ou vitesse de filtration correspondant à une vitesse fictive puisqu'elle suppose que toute la surface, y compris la matrice, participe à l'écoulement. La vitesse réelle du courant, u , vitesse de pore est égale à la vitesse de Darcy divisée par la porosité cinématique.

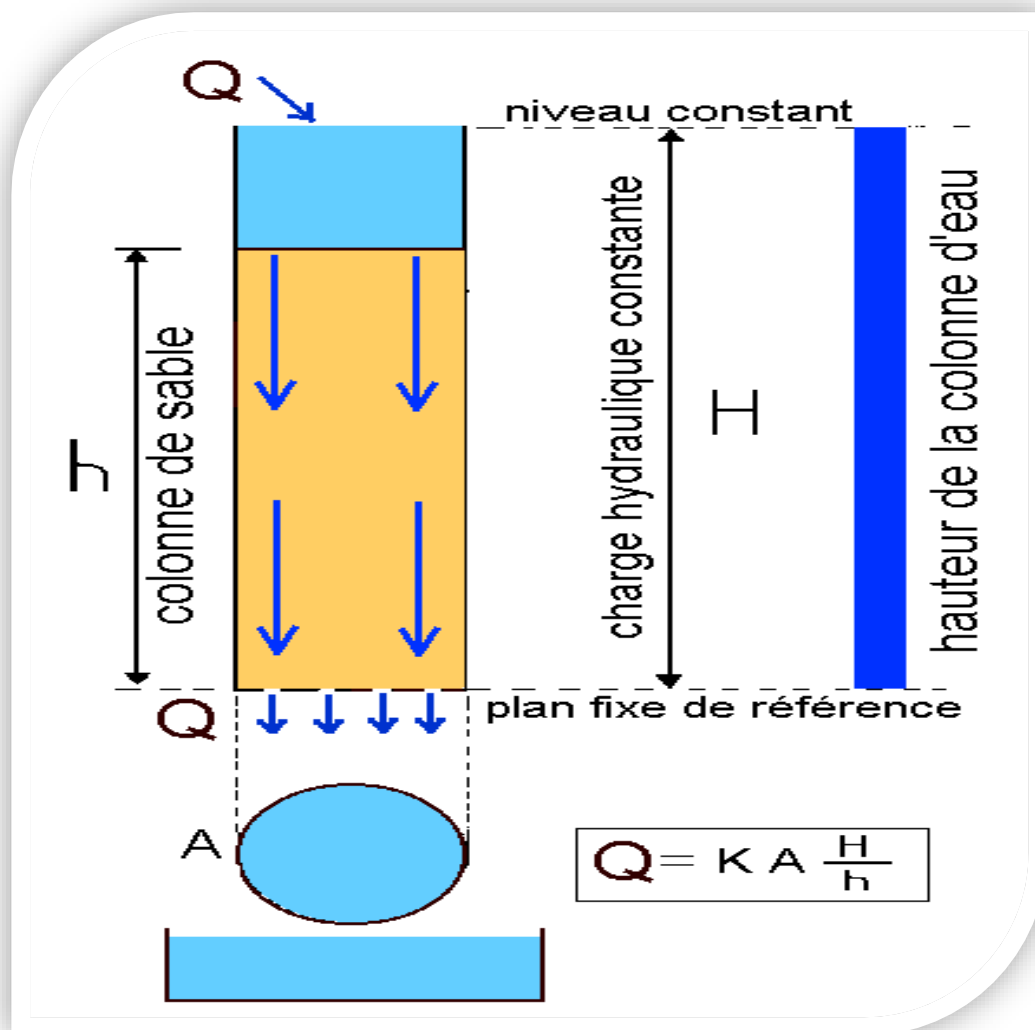


Figure (I.2) : Dispositif expérimental pour la loi de Darcy.

I.5. Les modèles d'écoulement souterrain

Pour la résolution de ces équations et la simulation numérique de l'écoulement souterrain plusieurs modèles sont employés par nombreux auteurs, on peut citer quelques modèles:

Les modèles numériques 3D sont largement utilisés en hydrogéologie [Oreskes et al, 1994; Bradley, 1996; Barone, 2000] Ils permettent de comprendre et de caractériser les écoulements souterrains, les transports de solutés, ou encore les bilans hydrologiques des systèmes souterrains

[Su et al, 2000; Bradley, 2002; McKenzie et al, 2002; Meriano et Eyles, 2003; Triganon et al., 2003; Weng et al., 2003; Zhang et Mitsch, 2005].

La difficulté de la modélisation des nappes souterraines est liée au fait que le matériau n'est pas homogène **[Bradley, 2002]**. Les dépôts organiques et les dépôts alluviaux sont mélangés et leur organisation évolue au cours du temps. De plus, la tourbe a la particularité d'avoir des caractéristiques hydrauliques variables dans le temps et dans l'espace **[Bradley, 1996]**. En effet, la conductivité hydraulique du milieu poreux varie avec la profondeur et la hauteur de la surface libre.

Plusieurs modèles hydrologiques ont déjà été développés et utilisés dans des contextes de zones humides. Hydrus 2D est un modèle 2D d'écoulements saturés – non saturés **[Joris et Feyen, 2003]**. Appliqué à un transect de zone humide riveraine de la Dijle (Belgique), il a montré son efficacité à reproduire la dynamique des eaux souterraines. Marthe, développé par le

BRGM, modélise les écoulements saturés – non saturés à 3D **[Weng et al, 2003]**. Il a permis de quantifier les interactions hydrologiques entre la zone humide des marais de Rochefort (France) et l'aquifère sous-jacent, et de caractériser les flux échangés entre les deux. Wetlands décrit les écoulements souterrains dans des conditions de saturation du sol et d'évapotranspiration variable et simule efficacement la variabilité de la surface libre et l'évolution du niveau d'eau dans le marais **[Mansell et al, 2000]**.

Modflow 3D est un modèle 3D d'écoulement souterrain saturé-non saturé **[Saltel. M (2008)]** appliqué à un système d'aquifères profonds des antiformes du sud de Bordeaux. Il a représenté les échanges entre les 6 aquifères composants ce système. Et il a montré aussi l'impact à grand échelle de l'implantation de champ captant exploitant la nappe de la base du Crétacé sud sur ses entourages.

Le modèle SEEP/W résout les équations qui gouvernent le comportement hydraulique des eaux souterraines en utilisant les méthodes numériques telles que la méthode des éléments finis (MEF). Elle est très utile pour résoudre les problèmes d'ingénierie environnementale. Ce logiciel permet de simuler l'écoulement naturel dans les sols composés par un ou plusieurs aquifères à nappe libre ou confinée, l'évaluation de la migration de contaminants lors d'une fuite. Les simulations faites par SEEP/W peuvent être en régime transitoire ou permanent.

Plusieurs validations ont été effectuées pour tester le pouvoir de résolution de SEEP/W **[Chapuis et al, 1993; Crespo, 1994]**. Ces auteurs arrivent à la conclusion que le logiciel présente l'avantage d'avoir une bonne résolution à déterminer de nombreux problèmes en hydrogéologie. Des modèles physiques ont aussi été utilisés, ils consistent en des modèles réduits d'aquifères, toutefois, dans le cadre de l'étude des interactions entre les écoulements souterrain et en cours d'eau.

L'ordre de grandeur des facteurs d'échelles à considérer pose des difficultés techniques majeures

[Bear, (1979)]. Les modèles physiques sont surtout utilisés pour le développement et la validation de modèles théoriques à partir d'analyses en laboratoire sur une colonne de sol.

Certains de ces modèles divisent le domaine en éléments homogènes du point de vue hydrologique **[Wanakule (1995)]**, ce qui permet de tenir compte de la distribution spatiale des caractéristiques du sol et d'avoir une meilleure approximation de la hauteur de la nappe et des vitesses d'écoulement sur le bassin. De plus, la distribution spatiale des caractéristiques permet de simuler différents scénarios de modifications sur le bassin. De façon à prévoir leur impact sur l'écoulement souterrain.

Ces différents modèles aux approches variées représentent efficacement la dynamique des eaux souterraines dans des contextes des aquifères.

I.6. La recharge artificielle des nappes alluviales

Le concept de la recharge artificielle des nappes n'est pas récent, il apparut au moment où commençait à imposer la nécessité de gérer l'ensemble des ressources en eaux superficielles et souterraines dans le cadre des grands bassins naturels.

Cette technique consiste à introduire de l'eau dans des formations perméables du sous sol par l'intermédiaire d'aménagements appropriés (les pertes des retenues, canaux, réseaux d'irrigation en sont exclues). Elle intègre en effet l'idée de ressources supplémentaires apportées à la nappe et évoque implicitement la réutilisation de ce supplément dans des conditions de régime et de qualité différentes.

Cette méthode présente un grand intérêt et un large spectre d'application en raison des objectifs qu'elle permet d'atteindre :

a- Restauration d'un équilibre perturbé et protection contre des perturbations diverses :

- Surexploitation d'une nappe;
- Déviation d'un cours d'eau;
- Intrusion d'eaux salées ou polluées dans la nappe;
- Etc...

b- Amélioration de la qualité des eaux :

- Epuration naturelle des eaux infiltrée (dans des dispositifs superficiels de la recharge artificielle et à travers la zone non saturée).
- Diminution de la minéralisation des eaux souterraines en réinjectant des eaux douces.
- Régularisation thermique des eaux réinjectées (pour le refroidissement industriel).
- Etc...

c- Accroissement de la ressource en eau et optimisation du régime d'exploitation pour une gestion rationnelle et durable des eaux superficielle et souterraines (d'un bassin ou d'un groupe de bassins naturels) afin d'atténuer ou de régler les problèmes de pénuries saisonnières, d'alimenter une région déficitaire par une autre, etc.

La recharge de la nappe varie spatialement et temporairement. Dans la réalité plusieurs sources participent à la recharge de l'aquifère à savoir:

- ✓ Infiltration directe d'une partie des précipitations sur la plaine;
- ✓ Infiltration provenant des bassins versants périphériques;
- ✓ Infiltration d'une partie des eaux d'irrigation en particulier dans les secteurs irrigués;
- ✓ Infiltration provenant des pertes du réseau de distribution urbain.

I.6.1. Les dispositifs de la recharge artificielle

On peut citer plusieurs types de la recharge artificielle :

- ✓ Des lâchées d'un barrage.
- ✓ Injection de l'eau douce à travers des forages et galeries souterraines.
- ✓ A partir des bassins d'infiltration.

➤ Infiltration autochtone favorisée

Une méthode fréquemment employée est la construction de petits barrages sur les cours d'eau afin de réguler les écoulements de surface et de favoriser l'infiltration dans les retenues ainsi créées. Les exemples sont nombreux en zones semi- désertiques comme dans le sud tunisien où une vaste campagne de construction des oueds est conduite depuis plusieurs années. Cette technique offre de plus l'avantage de stocker des terres arables et de permettre ainsi des cultures.

Sur l'île de Malte, des retenues collinaires ont été mises en place sur les oueds pour favoriser l'infiltration, dans le but de limiter l'intrusion saline induite par les pompes.

➤ Apport allochtone par dérivation de cours d'eau [Gilli. E, 2008]

L'eau de surface d'un cours d'eau peut être détournée pour alimenter un aquifère. Les milieux karstiques, grâce à leurs propriétés de recharge rapide, peuvent donner lieu à l'intéressante recharge, comme c'est le cas de Cisjordanie où l'aquifère du Yaqon-Taninim (formation carbonatée du Cénomano-turonien) sollicitée à raison de 400.106 m³ /an, reçoit un complément de

100.106 m³/an par infiltration des eaux de surface du Jourdain.

Mais l'action quantitative peut aussi se faire en utilisant l'aquifère comme système capacitif régulateur. On peut ainsi réguler le débit de certains cours d'eau en injectant leur eau dans les aquifères bordiers. L'eau de l'Oise ainsi prélevée en périodes de crues, infiltrée dans l'aquifère

crayeux est restitué en périodes d'étiage pour augmenter le débit d'étiage de l'Oise d'environ 1m³.s⁻¹.

➤ **Réalimentation artificielle des aquifères [Gilli. E, 2008]**

La réalimentation artificielle d'une nappe (RAN) implique des déposes d'une ressource en eau superficielle (cours d'eau ou lac), d'une qualité suffisante pour éviter des traitements préalables trop coûteux, et d'un débit compatible avec les objectifs de recharges. Le réservoir aquifère doit de plus obéir à plusieurs contraintes :

- ✓ Importante tranche de terrains non saturé au-dessus de la nappe pour autoriser le stockage et permettre l'autoépuration ;
- ✓ Transmissivité favorable ;
- ✓ Conductivité hydraulique verticale forte pour faciliter la formation d'une réserve ;
- ✓ Conductivité horizontale modérée pour permettre la conservation de la réserve constituée.

Ces paramètres se retrouvent dans les craies et les formations poreuses (sable, gravier).

Les aquifères fissurés et les karsts, dans lesquels l'eau circule trop rapidement, sont généralement peu favorables à la réalimentation artificielle, mais d'autres méthodes de gestion active peuvent être développés.

La réalimentation artificielle des aquifères se fait généralement à partir de bassins ou de fossés d'infiltration (Figure (II-2)), souvent d'un lit de sable. Le taux d'infiltration est compris entre 15 m et 0,1 m /jour selon les installations. Il se situe en général autour d'

1 m/jour. On peut aussi procéder à des aménagements des berges des cours d'eau pour augmenter la surface de contact avec la formation géologique contenant l'aquifère. Des barrages de dérivation permettant de diriger l'eau des cours d'eau vers les bassins d'infiltration. Des barrages gonflables en caoutchouc sont utilisés en Californie (Etats-Unis), pour dériver vers des bassins d'infiltration d'eau de la rivière Santa Ana et recharger artificiellement un aquifère alimentant 2 millions d'habitants. 70 % de l'eau prélevée provient de ce dispositif. Les barrages se gonflés et dégonflés à volonté, en fonction du débit de la rivière et de la turbidité, afin de ne recueillir que des eaux limpides et éviter le colmatage des bassins.

➤ **La réalimentation artificielle des aquifères par injection**

Des forages ou des puits atteignant la nappe peuvent être utilisés pour injecter de l'eau douce dans l'aquifère que l'on souhaite soutenir. Cependant les forages se colmatent rapidement; aussi une méthode a-t-elle été développée aux Etats-Unis, l'ASR (aquifer storage recovery) utilisant le même forage pour l'injection et le pompage.

Ces actions alternées évitant le colmatage. Cette méthode offre l'intérêt de ne nécessiter que des espaces réduits contrairement aux bassins ou fossés d'infiltration.

I.6.2. Quelques exemples de la recharge artificielle des nappes dans le monde

- **Au U.S.A** en 1895 : la recharge artificielle s'impose comme un exemple particulièrement intéressant, les premiers essais ont apparus à la Californie.

Malgré le recours à la recharge artificielle depuis déjà fort longtemps; jusqu'au années 60, la quasi-totalité des nappes du sud restaient surexploitées avec des rabattements atteignant les 60 m de profondeurs (le niveau initial se trouvait à 2.5 m sous le sol). Et le biseau salé continuait à avancer dans la plaine côtière de Los-Angeles jusqu'à plus 1000 m.

Pour pallier à cette situation, il a été décidé vers les années 70, la mise en œuvre progressive et la gestion rationnelle des ressources en eau de toute la Californie.

Le projet « California water plan » consiste à transférer l'eau du nord vers le sud sur un réseau de 700 km de long, avec un débit en tête fixé à 850 m³/s. Au niveau de la plaine côtière de Los-Angeles (au sud) le débit prévu est de 175 m³/s.

- **En Europe:**

1. Aux Pays-Bas, la ville d'Amsterdam est alimentée en eau potable grâce à des lacs artificiels d'infiltration aménagés dans des dunes littorales et recevant de l'eau du Rhin à raison de 1.5 m³/s après un transfert par conduite de 53 km.

2. En France : La nappe alluviale de la Garonne a fait l'objet d'une recherche expérimentale prometteuse à la fin de l'année 1995 et au début de 1996. Un volume d'eau de 132 000 m³ a été injecté à partir d'eau de surface via un fossé d'environ 4 m de profondeur. Les résultats permettent, selon les niveaux calculés par un modèle numérique monocouche développé aux déférences finis, d'évaluer un volume disponible de l'ordre de 70 000 à 80 000 m³ un mois après l'arrêt de l'injection et 20 000 à 30 000 m³ à la fin du suivi soit environ 2 mois plus tard ; ceci réparti sur une superficie environ 1.5 Km². [David et al ,1995)]

- **Au Maghreb :**

La recharge artificielle est utilisée au Maroc sur plusieurs sites (Tanger, nappe de Haouz...) et plusieurs auteurs ont essayé d'étudier la possibilité de cette technique.

- L'étude de faisabilité de la recharge artificielle du complexe « Alluvions-Calcaires » draine par l'oued Tagmoute est basée sur une modélisation mathématique des débits à différentes périodes de retour. Le calcul des volumes infiltrés en absence et en présence du barrage a été fait par le logiciel ECRET qui a permis d'estimer l'apport en eau vers la nappe. Le

prolongement du temps de contact entre le complexe « alluvions-calcaires » et les eaux de la crue, par l'écrêtement du barrage a induit, un volume infiltré 12 fois plus important qu'en conditions naturelles. [Saïd et al, 2006].

- **En Tunisie** (la nappe de Sousse, Nable...).

- A la mise en eau des retenues collinaires, il est remarqué sur certain puits en aval des digues des barrages la remontée de leurs niveaux d'une manière impressionnante (plus de 10 m). Le niveau phréatique a été rencontré à 3 à 4 m de la surface du sol lors du creusement des puits.

Un modèle unidimensionnel implicite à éléments finis a été développé pour calculer les débits souterrains à chaque heure selon la loi de Darcy en fonction du gradient piézométrique de maille à maille. Ce modèle a permis de quantifier les flux d'eau entre la retenue et l'aquifère alluvial en aval et de simuler le comportement de cette nappe en fonction des variabilités de remplissage de la retenue. [Nasri et al, 2001].

- **En Iran:** Une étude a été menée sur trois sites de recharge artificielle (Kohrouyeh, Bagh-

Sorkh et Kachak) dans la province d'Ispahan (Iran central) dans le but de déterminer les facteurs limitant le taux de la recharge artificielle. Cinq traitements (T1–T5) ont été testés et l'infiltration a été mesurée sur une couche de sédiments déposés; T2, après enlèvement du sédiment; T3, grattage des sédiments et du sol sur 5 cm; T4, grattage des sédiments et du sol sur 10 cm; et T5, enlèvement des sédiments et de 15 cm de sol. La teneur initiale en eau du sol sur les sites va de 1.0 à 2.87% à Kohrouyeh, 1.18 à 3.47% à Bagh-Sorkh, et 1.89 à 3.93% à Kachak. Un accroissement significatif du taux final d'infiltration de la procédure T5 comparée à T1 a été observé sur tous les sites de recharge. Les taux finaux d'infiltration des procédures T1 et T5 à Kohrouyeh, Bagh-Sorkh et Kachak étaient respectivement 0.35 et 7.9,

1.22 et 12.3, et 0.93 et 6.2 cm/h. Les taux d'infiltration des procédures T2, T3 et T4 ne présentaient pas statistiquement de différences significatives. On en conclut donc qu'en moyenne la capacité d'infiltration de la recharge non traitée s'est accrue de 20.3 % par rapport aux valeurs initiales, et que le grattage du sommet du sédiment et du sol sur 15 cm peut améliorer 68.3 % de la capacité initiale d'infiltration [Mousavi et al, 1999].

II.6.3. Alternatives de la recharge artificielle des nappes en Algérie

Cette technique est très peu pratiquée dans notre pays, on peut citer quelques exemples :

- La seule application sur le terrain a eu lieu le 27 avril 1998 par des compagnes de lâchers des eaux du barrage de Boukourdane (Ouest d'Alger) pour recharger la nappe alluviale d'Oued

- El Hachem dont le volume total infiltré est 52,3 m³, soit une infiltration de 10,87% du volume lâché [**Remini. B, 2005**].
- **Kadri e Al:** Dans le cadre d'un projet de recherche « Réalimentation artificielle de la nappe de Sébaou à partir du barrage de Taksebt – exploitation, gestion et protection » un modèle de simulation numérique de la recharge artificielle a été établi, il nous donne l'évolution dans le temps de l'échange d'eau de la nappe avec le domaine extérieur pour différents types de recharge. Ce modèle peut être utilisé pour la simulation de la recharge d'une nappe réelle et tient compte de la différence de perméabilité du sol [**Kadri et Al, 2005, 2006**]
- **Lagha-Bouزيد. S :** En 2000 elle a proposé une étude de faisabilité de la recharge pour la nappe de Metidja et la technique proposée est l'implantation des bassins d'infiltration au Sud
- Ouest de la plaine de Metidja au niveau de la vallée de l'Oued Chiffa. Il a proposé un dispositif de 10 bassins, disposé côte à côte suivant un alignement parallèle à l'oued à une distance comprise entre 700 à 1000 m. Le débit d'infiltration est estimé à 40 m³ /jour par mètre linéaire. Mais ce dispositif demande une station de pompage pour pomper l'eau dans l'oued et alimenter les bassins d'infiltration. [**Lagha-Bouزيد. S, 2000**].
- **Seghir. K :** Elle a présenté les résultats d'une étude de faisabilité de la technique de la recharge artificielle des nappes dans la région de Tébessa à travers une communication. Elle est basé sur l'augmentation de l'infiltration efficace du sol du site en question par des bassins d'infiltration et galeries verticales de profondeur 30 m remplies par des graviers (Ø2-5 mm) avec l'implication des matériaux synthétiques. [**Seghir. K, 2008**]

***Chapitre II : Etude physico-
géographique et climatique du
bassin versant du Hodna***

Chapitre II : Etude physico-géographique et climatique du bassin versant du Hodna

II.1 Situation géographique et relief

II.1.1 Situation géographique de bassin

Le bassin versant du Hodna est le 5^{ème} grand bassin versant de l'Algérie, Il est situé au centre, entre les bassins versant Isser, Soummam, Hauts plateaux constantinois, Chott Merlhir, Zahrez et Chelif.

Il occupe une surface de 26000 km² divisée entre 8 Wilayets : M'sila, Batna, BBA, Djelfa, Médéa, Bouira, Sétif, et Biskra, le bassin se trouve entre deux grands ensembles topographiques des Atlas tellien et Saharien, il est limité au nord par les monts du Hodna, à l'Est par les monts Belezma et Metlili, à l'Ouest par le Djebel Salat qui finit la plaine de Sidi Aissa, et au sud par le Djebel Kesaad et les monts du le Zab

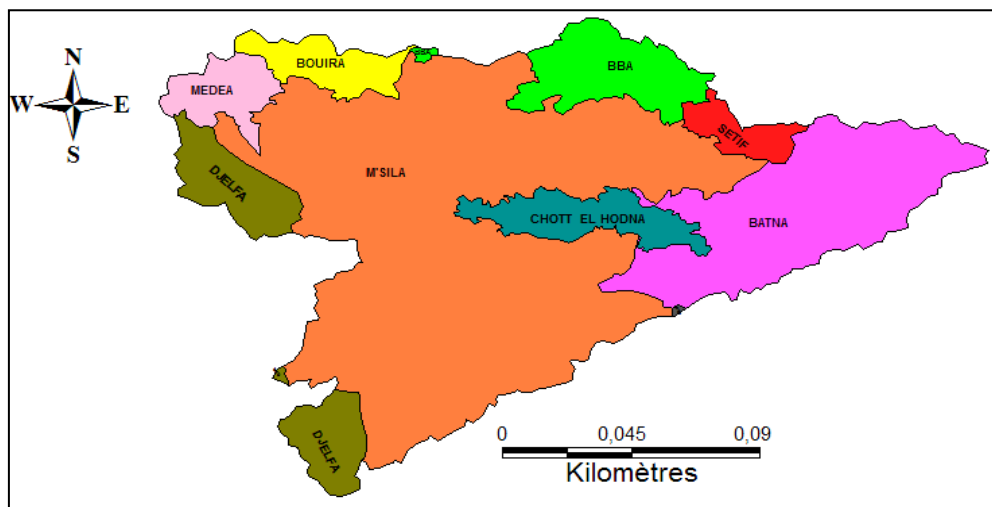


Figure (II.1) Situation du Hodna par rapport au wilaya.

II.1.2 Relief et topographie

Le relief est le résultat d'une conjugaison de plusieurs facteurs et particulièrement par l'évolution géologique et par l'action de l'érosion à une grande échelle (des milliers ou des millions d'années).

La topographie est une description du relief qui a une forte influence sur les précipitations ; également sur l'écoulement car il détermine l'aptitude au ruissellement des terrains, l'infiltration et l'évaporation.

Chapitre II : Etude physico-géographique et climatique du bassin versant du Hodna

Une pente provoque un écoulement très rapide donc un temps de concentration très courts ce qui donne une montée très rapide de la branche de crue ; ainsi elle facilite le choix du site des barrages et des retenues.

II.1.2.1 Les montagnes

Ces reliefs forment une barrière naturelle qui joue un rôle climatique et hydrologique important. Le bassin du Hodna est situé entre deux formations montagneuses d'altitude 1800 m à 1900 m au Nord et d'altitude 600 m à 900 m au Sud où il est hydrologiquement un bassin endoréique. Au Nord, on trouve les monts du Djebel Tarf, du Djebel Kteuf (1860 m), du Djebel Gourin et du Djebel Maadhid (1840 m), qui soutiennent les Hauts Plateaux de la Medjana.

Au Sud, Boussaâda (à 560 m d'altitude) englobe la partie septentrionale de l'Atlas Saharien et ne présente aucune homogénéité de point de vue topographique. On distingue une série de massif montagneux, sans liaison nette entre eux et d'orientation (Nord-est / Sud-ouest) tel que : Boudenzir (1416 m), Tsegna (1609 m), Fernane (1675 m), entre ces massifs s'étendent des plaines d'altitude moyenne comprise entre 800 et 1000 m.

En ce qui concerne l'Est, le bassin versant amont d'Oued Barika est plus montagneux culmine à l'Est à 2178 m d'altitude (Hadjret El Beida) où l'Oued prend source et continue son cours au Sud Ouest. Le relief du bassin de Barika est moyennement accidenté avec une pente moyenne de 1.5 % ; une altitude moyenne de 1018 m aux pentes douces qui deviennent plus accusées vers les limites extrêmes (**Zorrig, 2007**).

II.1.2.2 La plaine

Cette zone plutôt plate à relief peu accusé occupe la plus grande partie du bassin versant, la cuvette du Hodna a une superficie de 8500 km² avec des plaines coincées à l'Est et au Nord de Sebkhia, au Sud des monts du Hodna et à l'Ouest des monts des Aurès d'altitude varie entre 420 et 800 m. Elles communiquent au Nord-est avec les hautes plaines constantinoises (800 à 1100 m d'altitude) par un étroit couloir et à l'Ouest, avec les hauts plateaux algérois (800 à 1200 m) par la plaine alluviale de l'oued El leham (**Seddi ,2012**).

Les dépôts accumulés dans cette plaine sont composés dans l'ensemble, de sable, gravier, et de limon, résultants de la charge solide des oueds qui perdent leur compétence avant d'atteindre les lacs salés, Ce terrain est utilisé pour les activités agricoles saisonnières (**Belagoune, 2012**).

II.1.2.3 Chott El Hodna (Sebkhia)

Le Chott a une forme elliptique et est une large dépression d'altitude moyenne de 392 m, Au milieu du bassin et est constitué de deux zones concentriques : une zone périphérique ou zone du Chott et une zone central ou zone de la sebkhia (une zone d'eau libre salée), qui sépare le

Chapitre II : Etude physico-géographique et climatique du bassin versant du Hodna

Hodna proprement dit de la région saharienne il s'agit d'un lac temporaire d'une altitude pratiquement constante (395- 400 m) fortement salée sans aucune végétation, il est alimenté par des eaux des écoulements superficiels et souterrains de la région. Il couvre une surface totale de 1 150 km² se divisée entre les wilayas de M'sila sur 1 000 km² et de Batna sur 150 Km² (Bourenane, 2007).

II.2 Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est l'ensemble des cours d'eau, affluents et sous affluents permanents ou temporaires, par lesquels s'écoulent toutes les eaux de ruissellement et convergent vers un seul point de vidange du bassin versant (exutoire).

Le régime hydrographique du Hodna est lié au régime pluviométrique caractérisé par de fortes irrégularités et de ruissellement moyen varie entre 2 et 10 % avec des apports solides importants (0,8 10⁶ m³ par an, 2% des apports annuels de l'oued K'sob) (A.N.R.H).

La majorité des cours d'eau n'ont pas de débits pérennes, à l'exception des oueds Elham, Lougmane, K'sob, Soubella alimentés par des sources et retenues (ceds). A cela s'ajoute une multitude de petits cours d'eau (châaba) à sec pratiquement toute l'année et qui coulent lors des chutes et pluies.

Les divers Oueds (cours d'eau temporaires à l'écoulement intermittent) se déversent dans la dépression du Chott El Hodna, on distingue :

- ✓ **OUED EL HAM:** qui est le plus cours d'eau dans le bassin, il prend naissance du Djebel Dira (Wilaya de Médéa), son bassin Versant a une surface atteignant 6130 km² où il fournit un apport moyen annuelle de 44.4 hm³.
- ✓ **OUED K'SOB:** il prend source dans les monts de Boutaleb où il draine un bassin versant comprend la plaine de Medjana dans les environs de BBA et les bordures Nord du Maadhid. Il creuse une vallée étroite et descend dans le bassin du Hodna par deux cluses successives, au défilé de Medjèz et au pied du Kef Matrek à travers des roches de calcaires noir excessivement dures.
- ✓ **OUED BARIKA:** ses premières eaux viennent de Djebel Hadjret El Bida (2 178 m) et continue son parcours au Sud-ouest avec un réseau hydrographique couvrant la totalité du bassin versant ; il reçoit plusieurs affluents dont les plus importants sont " Oueds : Khelid, Akheri, Merzoug, ElMerdja, Gouriane, Tabeggart, ElMelah". Il collecte un apport annuel de 35.5 hm³.

- ✓ **OUED BITAM:** Il se situe dans la partie Est du bassin, il départ dans un petit bassin particulier au Sud-est de la dépression du chott El Hodna et que l'on appelle « le petit chott ».
- ✓ **OUED LOUGMAN:** il descend du Djebel Kteuf (1 860m d'altitude), c'est un torrent rapide qui reçoit les eaux de montagnes boisées.
- ✓ Au sud, on trouve Oued Boussaâda avec un apport de 15 hm³/an, Oued Chair (leur vallée creuse les monts d'Ouled Nayl) et Oued EL Melh drainent les eaux des versants de l'Atlas Saharien.

On trouve aussi Oued Chellel : ses affluents descendent des montagnes Nord-Ouest qui sont à des grandes altitudes, Oued Barhoum qui prend ses sources dans Djebel Boutaleb.

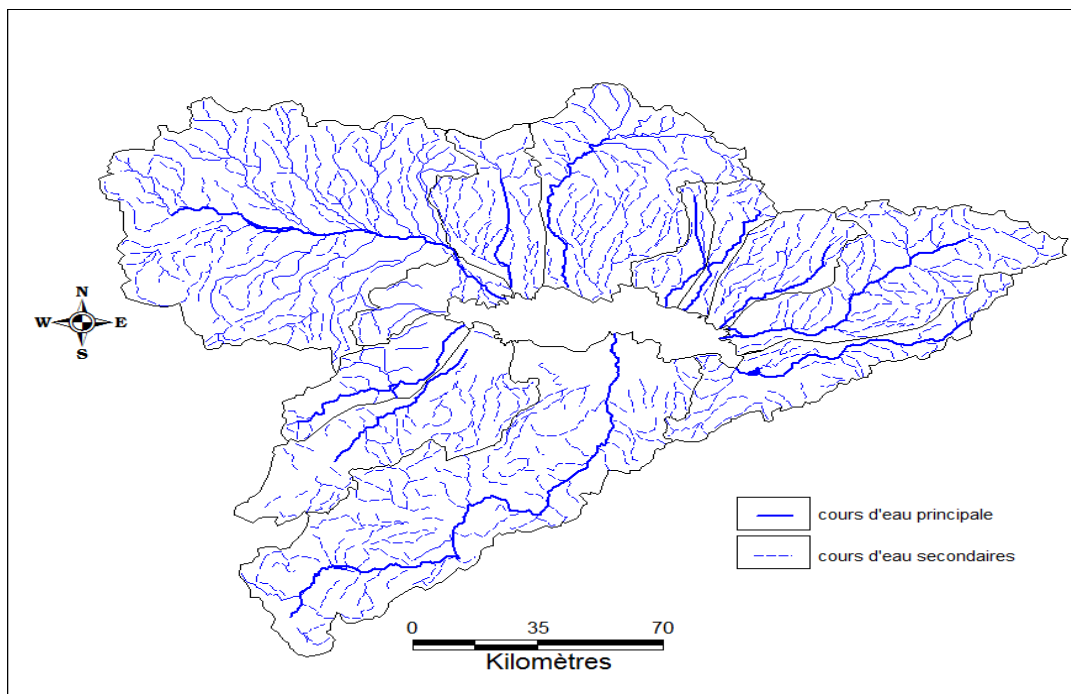


Figure (II.2) Réseaux hydrographiques du Hodna.

II.3 Hydrogéologie

Dans ce vaste bassin, le sous-sol renferme beaucoup de formations aquifères réparties en plusieurs niveaux, depuis le jurassique jusqu'au quaternaire. Ces formations aquifères affleurent plus ou moins largement sur les reliefs contournant le bassin du Hodna.

La communication de loin ou de près des aquifères s'équilibre au sous-sol du Hodna dans les eaux dans les deux nappes de grande étendue qui se superposent : La nappe phréatique et la nappe en charge (captive) du Hodna. Elles communicantes entre elles en fonction de la différence de leur charge et de la transmissibilité du terrain intercalaire.

II.4 Sources d'eau

Les sources de Chellal a l'Ouest du chott se situent sur la bordure Sud du Synclinal de M'sila, leur débit est inférieur à 10 l/s. La plupart d'entre-elles provient de l'aquifère Albo-Aptien, leur concentration dépassant rarement 2 g/l. Les autres sources, probablement d'origine Cénomaniennne, ont une concentration qui dépasse 3 g/l, leur faciès chimique est Chlorure sodique».

Ces sources, vraisemblablement des exécutoires de la nappe captive, provoquent un gonflement de la nappe phréatique. Autour d'elles, les terrains sont généralement sales et la surface irrigable est très limitée.

II.5 Caractéristiques climatiques

Les facteurs climatiques recueillis au moyen des réseaux d'observation sont à la base de toute étude hydrologique car ils régissent l'écoulement dans un bassin versant et jouent un rôle déterminant dans le régime d'un cours d'eau.

On peut classer ses facteurs comme suit : la pluviométrie, la température, l'humidité, l'insolation et la vitesse du vent ; dont :

- ✓ La température est liée essentiellement à l'altitude mais aussi aux conditions locales.
- ✓ Le vent est un facteur favorisant l'évaporation.
- ✓ L'humidité de l'air joue un rôle dans l'évaporation.

Le facteur essentiel intervenant par :

Leur répartition annuelle et mensuelle, leur total journalier et surtout les averses génératrices des crues.

Le bassin de Hodna est l'une des zones semi-arides et arides caractérisées par des cours d'eau temporaires à débit solide élevé, des pluviosités annuelles faibles, des précipitations d'intensité variable et très inégalement réparties.

II.5. 1 La pluviométrie

L'information pluviométrique est un paramètre plus important dans la connaissance préliminaire de la nature de la transformation pluie – débit (générateur de l'écoulement).

La précipitation moyenne annuelle est variable sur le Hodna, elle est à moins de 200 mm au niveau de la zone plus basse (du Chott, à 400 m d'altitude) et passe de 600 à 700 mm dans les plaines et les zones hautes à 1800 m d'altitude environ.

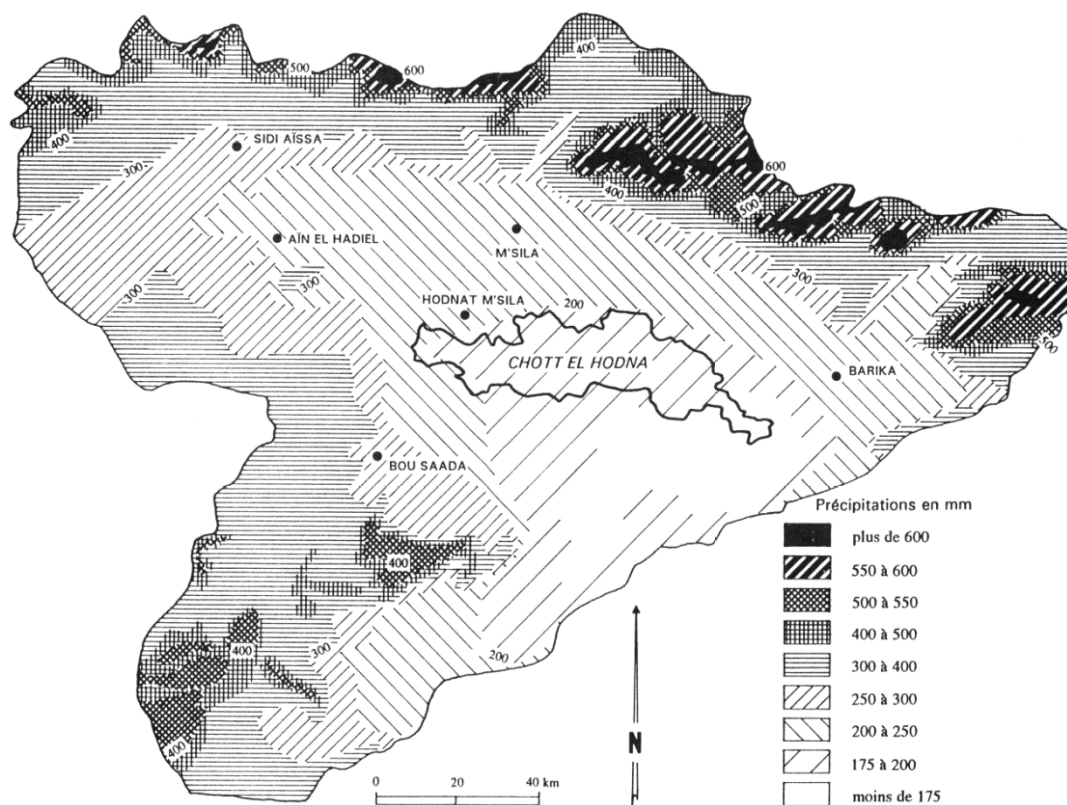


Figure (II.3) : Carte pluviométrique du Hodna

Chapitre II : Etude physico-géographique et climatique du bassin versant du Hodna

Tableau II.1 Coordonnées des stations pluviométriques et caractéristiques climatiques du bassin versant du Hodna.

Code	Nom de la Station	coordonnées		Altitude (m)	Période exploitable	La pluie (mm)
		X (m)	Y (m)			
050303	BEL AROUG	597.85	237.45	693	1971-84	
050401	SIDI AISSA	597.05	287.95	662	1904-61/1964-79	309
050901	Medjez	673.35	289.65	636	1974-2006	230.3
051005	K'SOB BARRAGE	668.7	282.65	600	1943-92/01-2003	172.5
051111	SIDI OUADAH	721.5	268.75	720	1973-95/98-2006	222
051201	MEROUANA	790.75	263.65	1000	1970-95/98-2008	288.8
051206	CHER EL AIN	786.1	266.6	900	1974-95/98-2008	223.40
051306	N'GAOUS	764.100	255.100	730	1914-2000	410.3
051203	Oued el ma	798.250	265.750	1050	1919-1999	410.3
050302	Ain El Hadjel	607.1	264.6	545	89-1997/99-2004	242
050703	Rocade Sud	642.8	260.55	440	1968-87	108.1
050801	Ced Fagues	657.1	277.9	504	1978-93	
051001	M'sila	648.28	281.30	470	1922-1982	224

(Source A.N.R.H.)

La neige couvre les monts du Honda de 20 à 30 jours par an, cette variabilité est liée en partie à la diminution de la température avec l'altitude. Elle ne tombe que exceptionnellement dans la cuvette (à M'sila une fois en 1913 ,1959 et en janvier 1971) (A.N.R.H.).

Tableau II.2 Nombre de jours de neige dans le Hodna.

La région	La station climatique	Le nombre de jours d'enneigement
Hautes plaines Sétifiennes	Bordj Bou Arreridj (922 m)	11,1
Monts du Hodna	Bou Thaleb (1250m)	15,3

II.5. 2 Les vents

Le vent est un facteur favorisant l'évaporation, il transporte les couches d'air saturées qui sont près des surfaces de l'eau ou des sols pour être remplacées par des couches d'air plus ou moins sec. Les vents dominant sont ceux de l'ouest et du nord-ouest qui sont fréquent pendant la période hivernale, ils sont relayés par les vents du sud (sirocco) pendant la saison estivale (juin, juillet, août) avec un nombre de jours variant entre 25 et 34 par an (**Bouthelja, 2005**).

D'après les données des deux stations climatiques de l'Office Nationale de Météorologie, à Ghezel (M'sila) et à Bordj Bou Arreridj, c'est dans la période allant d'avril à août que les moyennes mensuelles sont les plus élevées, avec des valeurs supérieures à 4,5 m/s à M'sila et 3 m/s à BBA. Les écarts entre les vitesses moyennes mensuelles, en plus de la moyenne annuelle (4.32 et 2.95 m/s) à M'sila sont plus importants qu'à BBA (Grine, 2009).

II.5. 3 Température

Les températures moyennes varient en fonction de l'altitude et des conditions locales qu'influe sur l'évaporation par la réduction de la lame d'eau ruisselée (le déficit d'écoulement).

Dans le bassin de Hodna les températures maximales moyennes suivent en général une répartition géographique : en plaine entre 24°C et 27 °C, dans les hauts plateaux et dans les zones d'altitude entre 19°C et 21°C. Les températures minimales moyennes varient entre 9°C et 12°C et entre 6°C et 9°C en plaine et en altitude respectivement.

Le gradient thermique annuelle en fonction de l'altitude est de 0,75°C pour une augmentation de 100 m d'altitude, comparé au gradient moyen admis en Algérie qui est de 0,55°C/100m (**Bouthelja, 2005**).

Pour mesurer ce facteur on trouve 5 stations qui sont : M'sila, Barika, Boussaâda, Sidi Aissa et Bordj Bou Arreridj.

Chapitre II : Etude physico-géographique et climatique du bassin versant du Hodna

Des températures inférieures à 0°C sont enregistrées pendant les mois de décembre, janvier, février et mars à M'sila, Boussaâda et Guelalia, à partir de novembre à Barika. Les mois les plus chauds sont juillet et août pour ces quatre stations.

Tableau II.3 Les valeurs de la température de quelques stations dans le bassin du Hodna.

La station de la température	Intervalle de la température (°C)	La température moyenne (°C)
M'sila	2,6 - 42,3	18,3
Barika	6,2 - 47,7	18,5
Bou Saada	1,8- 43,5	17,9
Sidi Aissa	9.1 – 24.1	16.6
Bordj Bou Arreridj	2.6 – 21.7	15.1

Ressource (A. N. R. H)

II.5. 4 L'humidité relative

L'humidité relative est le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau à l'air humide et à la pression de saturation, à la même température, qui joue un rôle très important sur l'évaporation.

D'après l'observation sur le bassin de Hodna on trouve que l'humidité varie pendant l'année entre un maximum de 82 % en novembre et décembre et minimum de 37 à 42 % en juillet et août (ANRH 1974).

II.5. 5 L'évaporation

L'évaporation est un élément influencé par la température de la région, elle favorise le déficit d'écoulement.

L'évaporation annuelle est de 2 548 mm/an à la station de BBA et de 3 106 mm/an à Ghazel. Par les mesures successives de l'évaporation dans quelque station de ce bassin les valeurs minimums et maximums des moyennes mensuelles sont entre 73.2 et 89 mm en décembre et entre 446 et 399 mm en juillet. L'évaporation est supérieure pendant la saison estivale à BBA qu'à Ghazel (M'sila).

Tableau II.4 Les valeurs de l'évapotranspiration potentiel de quelques stations du Hodna.

Les stations	Les valeurs de l'évapotranspiration potentielle (mm/an)
M'sila	1290
Barika	1243
Bou Sâada	1297
Guelalia	1334
Sidi Aissa	1256
Ain oghrab	1162

II.6 La végétation

La végétation joue un rôle essentiel dans la protection du sol de forte activité, elle exerce une protection mécanique directe sur l'écoulement fluvial, en diminuant la force vive des eaux et en favorisant leur infiltration, cette résistance à l'écoulement est d'autant plus grande que le couvert végétal est plus dense.

La couverture végétale d'un bassin versant est un facteur important de l'écoulement et de l'érosion hydrique donc on peut classer par ordre de densité.

En ce qui concerne le bassin du Hodna, qui est bio-géographiquement un représentant assez particulier du milieu steppique, on distingue :

- ✓ Des superficies forestières dominantes Djebels Messaad (33 81 ha), Medjedel (16 321 ha), Slim (14 916 ha), Maadhid (6 448 ha), Hammam El Dalaa (16 819 ha), Bou Saada (3 739 ha) à base de Pin d'Alep et Genévrier de Phoenicie. (D. de planification de M'sila, 2005)
- ✓ Des superficies agricoles dans la plaine de M'sila qui propice aux cultures maraîchères (15 125 ha), aux céréales (741 945 ha) et les arbres fruitiers (14 170 ha).
- ✓ Dans la région du Chott, on remarque des communautés steppiques présentées par 550 taxons recensés tel que des espèces endémiques (*saccoralyx saturoides...*) qu'on ne trouve que dans cette région (Kaabeche, 1990).

Chapitre III : L'aquifère phréatique quaternaire

Chapitre III : L'aquifère phréatique quaternaire

III.1.Définition : Un aquifère est un sol ou une roche réservoir originellement poreuse ou fissurée, contenant une nappe d'eau souterraine et suffisamment perméable pour que l'eau puisse y circuler librement

III.2. Cartographie du toit de l'aquifère quaternaire

Nous avons vu que pour l'exploitation de la plupart de nos données, il était primordial de connaître, même grossièrement, les altitudes absolues des points de mesure. En effet, pour le calage, la modélisation nécessite la connaissance de la surface réelle de l'aquifère et non pas la profondeur de la nappe par rapport au sol.

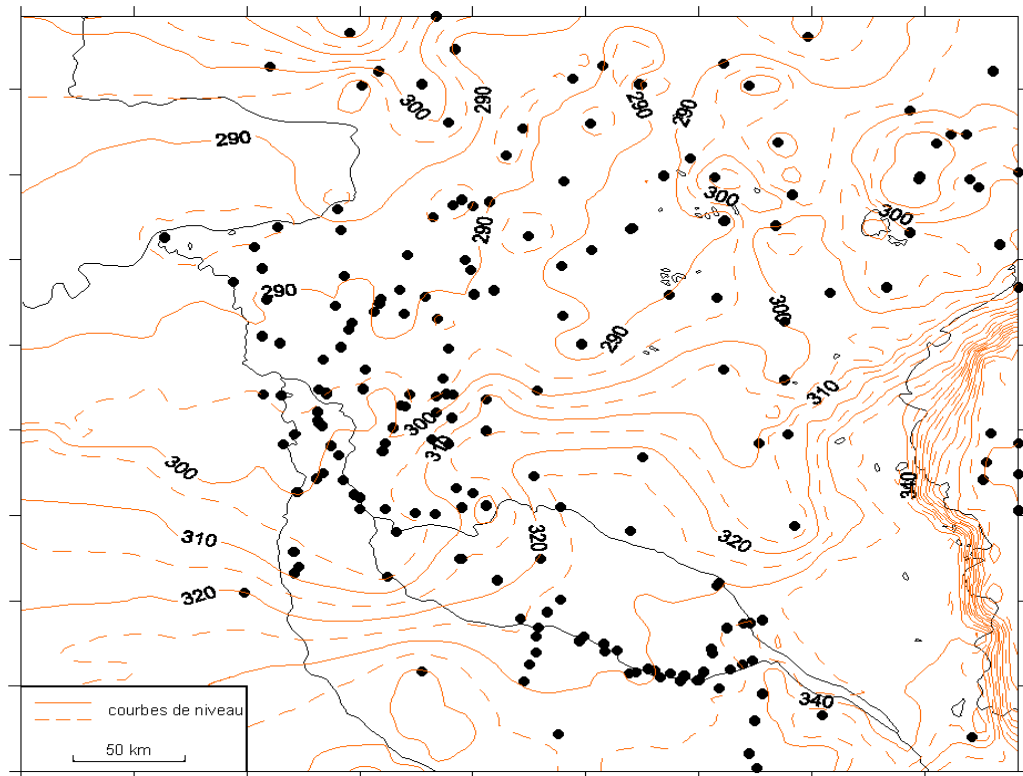


Figure (III.1) : carte topographique issue d'une interpolation par krigeage de points cotés (ronds noirs).

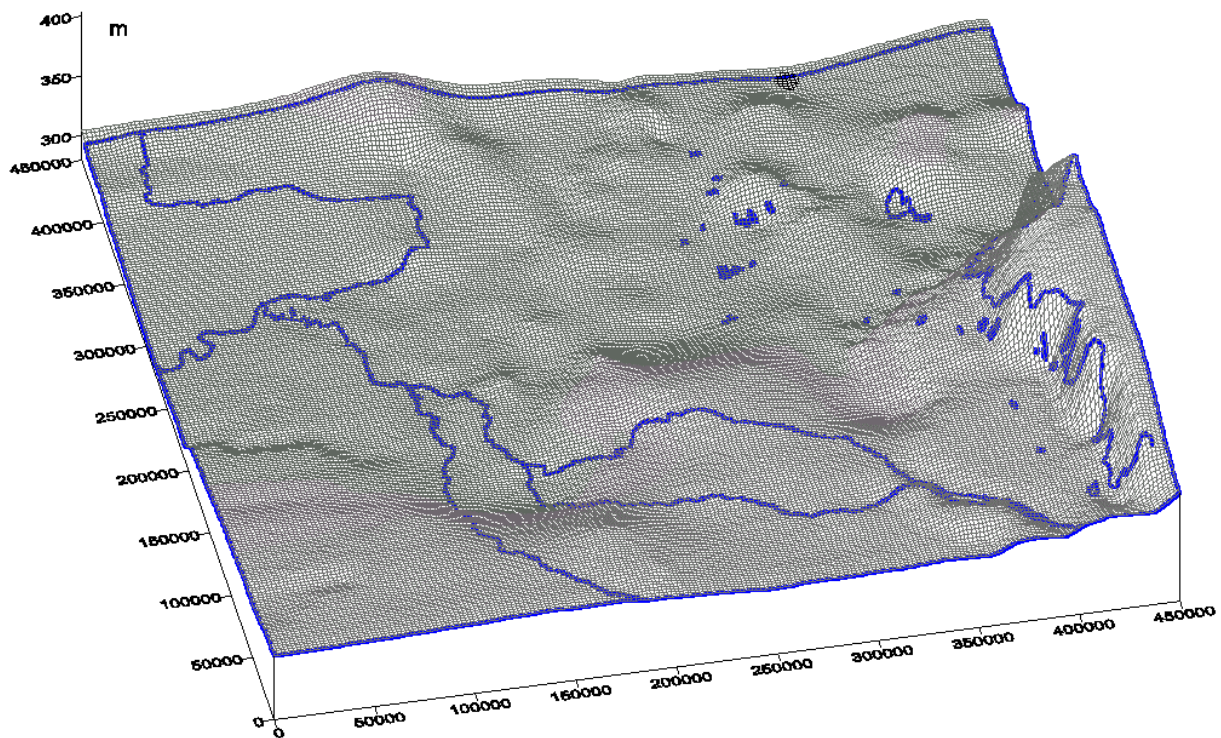


Figure (III.2) : Carte topographique 3D issue d'une interpolation par krigeage de points cotés.

III.3. Carte piézométrique de l'aquifère quaternaire

Plusieurs cartes synthétiques de la nappe phréatique mentionnant la piézométrie en altitude relative ou absolue ont été dressées. Pour réaliser le calage du modèle en état permanent, nous devons comparer les niveaux calculés aux niveaux observés à un instant donné. Naturellement, pour une meilleure représentativité, les zones où la piézométrie est bien renseignée auront plus d'importance que les zones interpolées.

III.3.1. Stabilité de la nappe

La première condition pour représenter un état piézométrique permanent, est de disposer de mesures synchrones, afin de s'affranchir des erreurs induites par l'évolution temporelle et spatiale du niveau statique et de sélectionner une piézométrie stable pendant une durée suffisante, fonction de la dynamique de l'aquifère.

Bien sûr, du fait de l'absence d'un réseau adapté à la surveillance de la nappe, nous ne possédons pas une information suffisante pour satisfaire une bonne répartition sur toute la zone d'étude des points de mesure, en concordance avec le maintien d'une unité temporelle.

Ainsi, nous avons voulu montrer si les fluctuations des niveaux de la nappe, mises en évidence par

Schneider (1968) et confirmées par l'ORSTOM (**Chouret et al. 1977**), avaient un impact réel sur nos mesures interannuelles, ou bien si, au contraire, leurs amplitudes pouvaient s'inscrire dans l'intervalle de nos incertitudes piézométriques.

III.3.2. Sélection des points d'observation pour la carte de référence

Nous nous sommes astreints à choisir l'année comportant la meilleure répartition géographique des points d'observation que nous avons ensuite complétés, dans les zones de faible densité de mesures, par des points issus d'autres campagnes.

Même si la carte obtenue n'est pas aussi détaillée que les cartes déjà existantes, nous savons où se situent les approximations et comment ont été obtenus les résultats.

III.3.3. Hydrochimie de la nappe quaternaire

On dispose de vingt-huit analyses d'eau de la nappe quaternaire, bien réparties sur le terrain étudié, effectuées au laboratoire d'hydrochimie de l'ANRH. L'étude hydro chimique de ces eaux s'est basée sur :

- * Les mesures des paramètres physico-chimiques notamment la conductivité électrique, la dureté et le potentiel hydrogène (pH).
- * Les analyses chimiques à base de la titrimétrie au laboratoire.
- * L'interprétation des résultats des analyses pour les échantillons prélevés au niveau des ouvrages captant cet horizon aquifère.

III.4. Bilan hydrique

III.4.1. Description de la zone d'étude

La région de M'Sila se trouve piégée dans un système hydrographique endoréique appartenant au grand bassin Algérois-Hodna. La région est caractérisée par un climat aride à semi-aride, avec des précipitations moyennes annuelles de l'ordre de 215 mm et une température moyenne annuelle de 19°C. L'évapotranspiration réelle moyenne annuelle est de l'ordre de 197 mm soit 92 % des précipitations. Le déficit agricole annuel est de l'ordre de 728 mm pour la station de M'Sila qui se trouve à l'intérieur du bassin (Amroune 2008). Actuellement, les principales formations aquifères sont les niveaux appartenant au Mio-Plio-Quaternaire formant le cœur de la plaine de M'Sila. Cet aquifère est captif, constitué essentiellement des sables, graviers, galets et des conglomérats et présent dans l'ensemble de la cuvette (IFES 2006). Ces formations composent deux niveaux aquifères séparées par un niveau à dominance argilo-marneuse. Le substratum de ces formations est formé par des marnes gypseuses du Miocène, avec par endroit des niveaux plus anciens (Crétacé supérieur et Crétacé inférieur) remontés au moyen de failles. Les marnes et les argiles plongent globalement du nord au sud, en profondeur sous le Chott (Kieken 1970). Durant les trois campagnes piézométriques qui ont été effectuées durant l'année 2012 (Juin, septembre et décembre), la nappe a gardée la même structure (Amroune 2008). Cet état est caractérisé par la présence d'une dépression piézométrique au centre de la plaine où l'activité agricole est intense. Cet aquifère est caractérisé par une transmissivité qui varie entre $8 \cdot 10^{-5}$ et $2 \cdot 10^{-2}$ $m^2 \cdot s^{-1}$.

Un coefficient d'emmagasinement qui varie entre 10^{-5} à 10^{-4} caractérise cette nappe captive (Benabderrahmane 1988).

III.4.2. L'infiltration

La réalimentation des aquifères ou infiltration résulte naturellement d'un processus hydrologique par lequel les eaux de surface percolent à travers le sol et s'accumulent sur le premier horizon imperméable rencontré (banc d'argile ou de marne) ; elle peut aussi être assurée artificiellement par des puits filtrants. Ce processus s'amorce généralement à partir de la zone vadose, sous la pédosphère où les racines des végétaux captent encore l'essentiel de l'eau interstitielle. La réalimentation est caractérisée par le débit de filtration alimentant le toit de l'aquifère.

Les nappes aquifères sont naturellement réalimentées par les précipitations et fonte des neiges et, à un moindre degré, par les écoulements de surface (rivières et lacs) ; mais cette réalimentation peut être affectée par les activités anthropiques comme l'imperméabilisation des sols, les défrichements ou l'exploitation forestière : elles s'accompagnent de la destruction de la couche humique, ce qui réduit l'infiltration, favorise le ruissellement et ralentit la recharge des nappes. L'exploitation des aquifères, particulièrement pour l'irrigation, peut aussi abaisser le niveau des nappes. La réalimentation des nappes est importante pour gestion durable de la ressource en eau, puisqu'à long terme le débit soustrait à un aquifère va cesser de compenser les pompages.

L'infiltration contribue aussi à faire migrer les nitrates et autres sels qui finissent par saturer la pédosphère, vers les couches de sol plus profondes, voire dans les aquifères. Les racines des arbres piègent l'eau et en renvoient une partie vers l'aquifère, au détriment du ruissellement¹.

Les crues augmentent temporairement la perméabilité du lit majeur en chassant les silts vers l'aval, et contribuent ainsi à faciliter la réalimentation de l'aquifère.

III.4.3.L'irrigation

La recharge de la nappe d'Avignon est assurée, pour une grande partie, par l'irrigation gravitaire (canaux alimentés par la Durance) avec des volumes dérivés très supérieurs aux besoins des plantes. Les agriculteurs sont donc loin d'être les seuls bénéficiaires du système d'irrigation. La quantification et la localisation de cette recharge sont indispensables pour évaluer l'impact de la diminution des surfaces agricoles et d'une gestion des ressources en eau adaptée aux éventuels changements climatiques. Nous présentons ici les résultats préliminaires de cette étude (bilan irrigations, déprise agricole, hydrodynamisme de la nappe et traçage isotopique) qui devrait déboucher sur un modèle permettant de simuler cette évolution

III.4.4.Estimation de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration, combinaison de la transpiration de la végétation et de l'évaporation du sol, est la quantité d'énergie cédée à l'atmosphère par le continuum sol-plante sous forme de vaporisation de l'eau liquide contenue dans le sol ou la plante. D'une manière générale, l'évapotranspiration d'une surface peut être reliée à la température de cette surface par l'intermédiaire du bilan d'énergie

III.4.5. Prélèvements anthropiques (domestiques et pastoraux)

La région est en constante croissance démographique ce qui implique une augmentation des besoins en eau. Il faut également tenir compte de la croissance du cheptel, impossible à recenser.

***Chapitre IV : Modélisation et
simulation numérique par
Modflow***

Chapitre IV : Modélisation et simulation numérique par Modflow

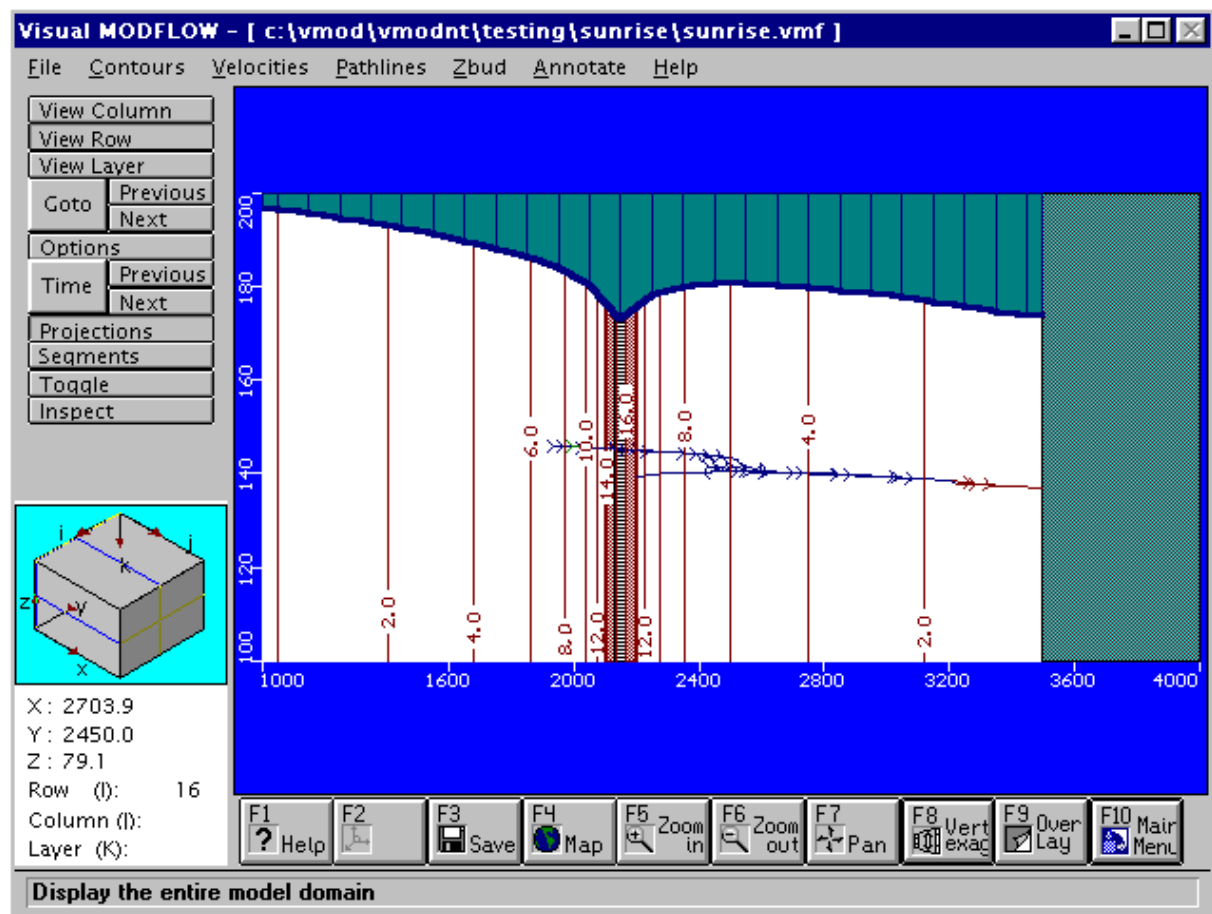
IV.1. Objectif de la modélisation

On peut définir un modèle comme une représentation simplifiée de la réalité, en vue de simuler la réponse d'un système à une série de sollicitations. Cette représentation, doit cependant être la plus conforme possible, du point de vue des mécanismes et processus simulés. Les objectifs habituels d'une modélisation peuvent être [Bear, 1993]

- De réaliser des prédictions sur le comportement du système considéré, en réponse à des sollicitations;
- D'obtenir les informations nécessaires, afin de respecter certaines recommandations ou législations;
- D'obtenir une meilleure compréhension du système, d'un point de vue hydrogéologique, chimique ou même géologique;
- De fournir l'information nécessaire, afin de définir le réseau de mesures à installer; de fournir des informations, pouvant aider à organiser de nouveaux tests in situ (pompages, traçages ...).

IV.2. Présentation du programme de modélisation

Le code *Modflow* (version 3.0) est un modèle numérique à trois dimensions. Il décrit les écoulements souterrains en milieu poreux anisotrope et hétérogène, en conditions de flux stationnaires ou transitoires, Le logiciel utilisé pour la modélisation est le Visual MODFLOW (3.0), le plus complet, le plus facile à utiliser pour les applications pratiques dans l'écoulement des eaux souterraines et qui décrivent le transfert hydrique dans un milieu poreux saturé.



IV.3. Présentation des fonctions du logiciel Modflow

Le logiciel *Modflow* utilise un certain nombre de fonctions, pour prendre en compte des conditions aux limites du modèle. Nous présentons celles que nous utiliserons dans notre modèle de simulation :

IV.3.1. Fonction de recharge

La recharge est le résultat des précipitations percolant à travers la première couche. Elle dépend des précipitations, de l'évapotranspiration, de la pente, de la durée et de l'intensité des pluies. Elle a cependant un rôle majeur sur les résultats du modèle. Le module recharge permet de simuler la recharge distribuée superficiellement sur le modèle et peut également être utilisé pour une autre source comme une recharge artificielle (irrigation) ou naturelle mais ne provenant pas des précipitations (infiltration d'une mare).

IV.3.2. Fonction rivière (River)

Cette fonction simule l'interaction entre les eaux souterraines et les eaux de surface (rivières, lacs, marais, etc.) par l'intermédiaire d'un niveau d'infiltration séparant la rivière du système souterrain [McDonald et al, 1988]. Le code *Modflow* calcule la conductance

C_{riv} ($m^2.s^{-1}$) de la rivière c'est-à-dire la capacité du niveau d'infiltration à transmettre les écoulements entre la rivière et la nappe. Le débit transitant à travers ce niveau d'infiltration dépend de sa conductance et de la différence de charge hydraulique entre le niveau de la rivière et la nappe. *Modflow* pose l'hypothèse que l'interaction entre les eaux souterraines et les eaux de surface est indépendante de la localisation de la rivière dans la cellule.

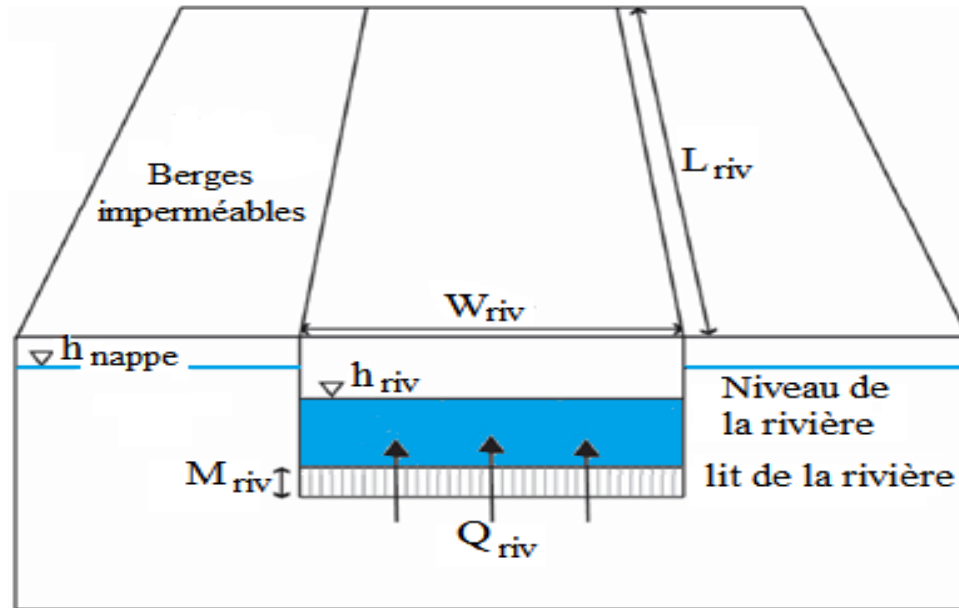


Figure (IV-1): Schéma de la condition-limite « Rivière » [McDonald et al, 1988].

$$C_{riv} = \frac{(K_{riv} \times L_{riv} \times W_{riv})}{M_{riv}}$$

Avec :

- C_{riv} est la conductance de la rivière en $m^2.s^{-1}$.
- K_{riv} est la perméabilité des sédiments du lit de la rivière en $m.s^{-1}$.
- L_{riv} est la longueur de la section du cours d'eau dans la cellule en m.
- W_{riv} est la largeur du cours d'eau.
- M_{riv} est l'épaisseur du lit de la rivière en m.

$$Q_{riv} = C_{riv} \times (h_{nappe} - h_{riv})$$

Avec :

- Q_{riv} est le flux passant à travers le niveau d'infiltration en $m^3.s^{-1}$.
- h_{nappe} est le niveau de la nappe.
- h_{riv} est le niveau d'eau dans la rivière.

IV.3.3. Charge initiale

Pour faire tourner le modèle, *Modflow* requiert des conditions initiales de charge hydraulique. La définition des charges initiales n'a pas le même sens si l'on se trouve en régime permanent ou en régime transitoire. Pour une solution en régime permanent, le modèle nécessite une bonne approximation des charges hydrauliques initiales. Pour une solution en transitoire, *Modflow* permet l'importation de résultats de simulation en régime permanent comme charges initiales en régime transitoire.

L'incertitude sur les conditions initiales peut conduire à une impossibilité de calibrer le modèle dans les premiers pas de temps de la simulation et peut empêcher la convergence de la solution du modèle ou encore conduire à un assèchement inutile des cellules.

IV.4. Le modèle

IV.4.1. Description du modèle

La modélisation de l'écoulement de l'eau souterraine est réalisée à l'aide du modèle mathématique MODFLOW (McDonald et Harbaugh, 1988). Ce logiciel utilise la méthode de calcul des différences finies, pour des systèmes aquifères tridimensionnels. Les applications de ce modèle reliées au projet sont:

(1) de calculer la position de la surface libre de la nappe d'eau souterraine pour différentes périodes correspondant à différentes conditions de recharge appliquée dans le temps,

Et (2) de calculer la vitesse et les directions d'écoulement souterrain et d'évaluer les débits d'entrée (recharge) et de sorties (écoulement aux brèches et infiltration à la nappe) pour ces mêmes périodes.

Plusieurs paramètres d'entrée sont nécessaires au modèle. Les premiers paramètres requièrent une connaissance approfondie de la physique du terrain. Ceux-ci comprennent les élévations des différents constituants compris dans le système, les élévations de la surface libre de la nappe d'eau dans ces domaines et la localisation des discontinuités, telles les brèches et rivières. Les autres paramètres sont reliés aux caractéristiques physiques des domaines telles que la porosité efficace et la conductivité hydraulique telles que décrites par de Marsily

(1981). Pour tous ces paramètres, le modèle accepte soit une seule valeur représentant de façon homogène chacun des domaines, soit un champ de valeurs pour chaque domaine. Enfin, les conditions météorologiques doivent être connues afin d'évaluer la recharge pour chaque période pour laquelle on veut obtenir les hauteurs d'eau de la nappe. Pour pouvoir utiliser le modèle on doit d'abord définir le système: le nombre de couches, les dimensions des cellules ainsi que les modules utilisés. Le modèle est facile d'utilisation et les questions sont posées clairement.

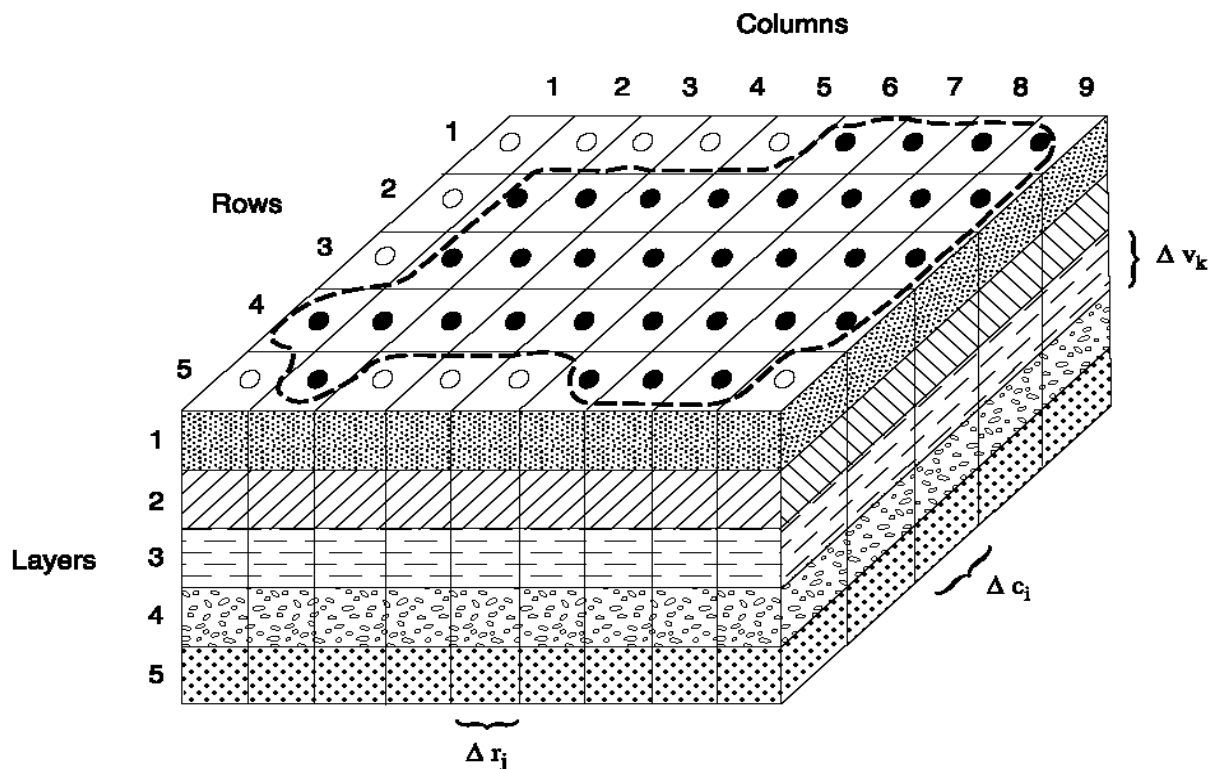


Figure (IV-2): Discretisation spatiale d'un aquifère

Avec :

- Limite de l'aquifère.
- Cellules inactives.
- Cellules actives.

IV.4.2. Conditions aux limites du modèle

IV.4.2.1. Maillage

Le fond de carte servant de référence pour le modèle est obtenu par numérisation de la carte géologique au 1/1000 000^e de 1966-1968 (CBLT/PNUD/UNESCO). Pour la discrétisation spatiale, nous avons placé, sur les 190 000 km² de la zone, un maillage carré uniforme de 11 km

de côté (1600 mailles). Notre étude ne nécessite pas une précision importante sur les résultats des calculs. Nous considérons donc les caractéristiques hydrodynamiques (par exemple perméabilité, piézométrie) comme constants sur chaque maille.

IV.4.2.2. Limites géologiques

Les limites géologiques de la nappe sont constituées latéralement par les affleurements de roches cristallines pouvant être considérées comme imperméables par comparaison avec les roches sédimentaires adjacentes.

IV.4.2.3. Le mur

L'aquifère quaternaire repose sur les argiles pliocènes imperméables, le mur représente une limite à flux nul, sans échange par drainance avec un niveau aquifère plus profond. L'aquifère est par conséquent modélisé en système monocouche. La morphologie de cette surface a été interpolée afin d'obtenir une altitude pour chaque maille du modèle.

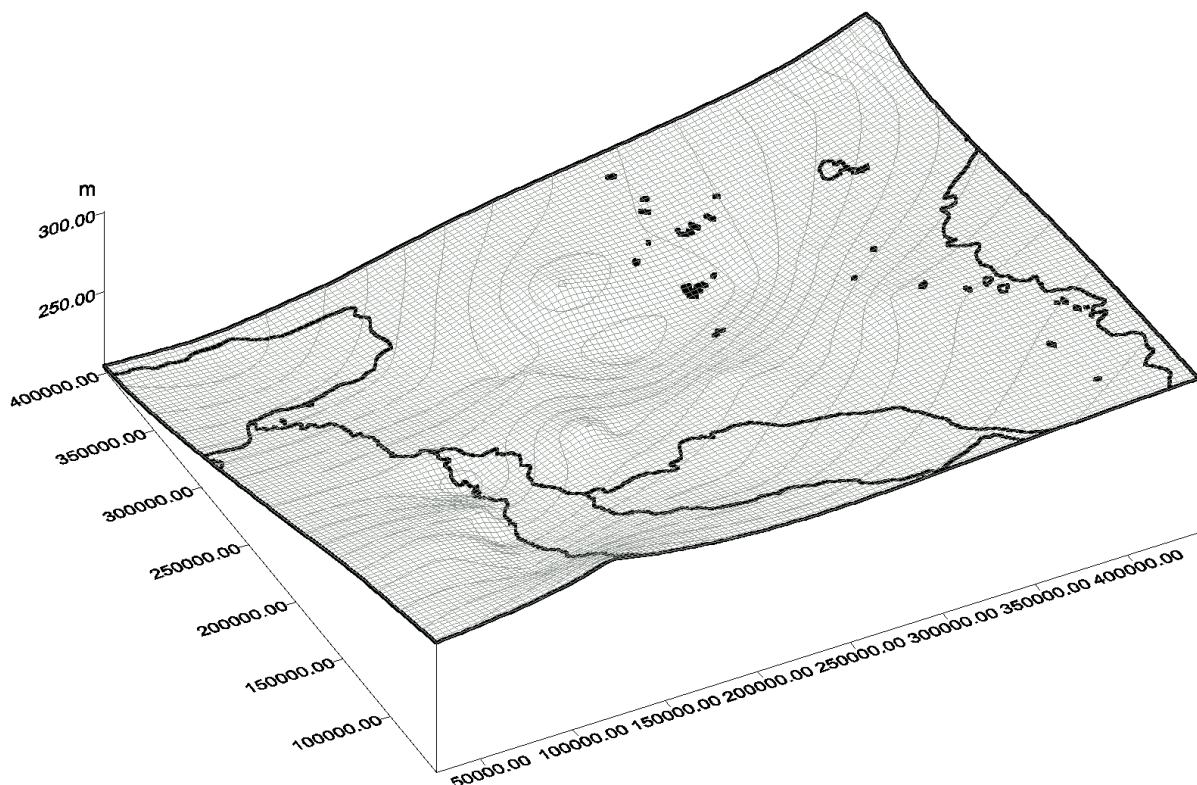


Figure (IV-3): carte 3D, interpolée par krigeage, du mur des sables du Pléistocène Inférieur.

IV.4.2.4. Le toit

A l'échelle de la zone, la nappe phréatique est considérée comme libre, les lentilles silteuses susceptibles de la mettre en charge sont généralement d'extension restreinte. Par conséquent, la limite du toit de l'aquifère correspond à la surface du sol et n'a pas d'importance dans le modèle du moins tant que la piézométrie modélisée n'atteint pas la surface du sol. Puisque nous avons interpolé la topographie afin d'obtenir des hauteurs piézométriques absolues, nous avons attribué à chaque maille du modèle une hauteur de toit conforme à la réalité.

IV.4.2.5. Conditions de flux

Cette limite représente une condition de flux nul pour l'aquifère phréatique. Elle est représentée sous forme de cellules inactives qui n'interviennent pas dans les calculs.

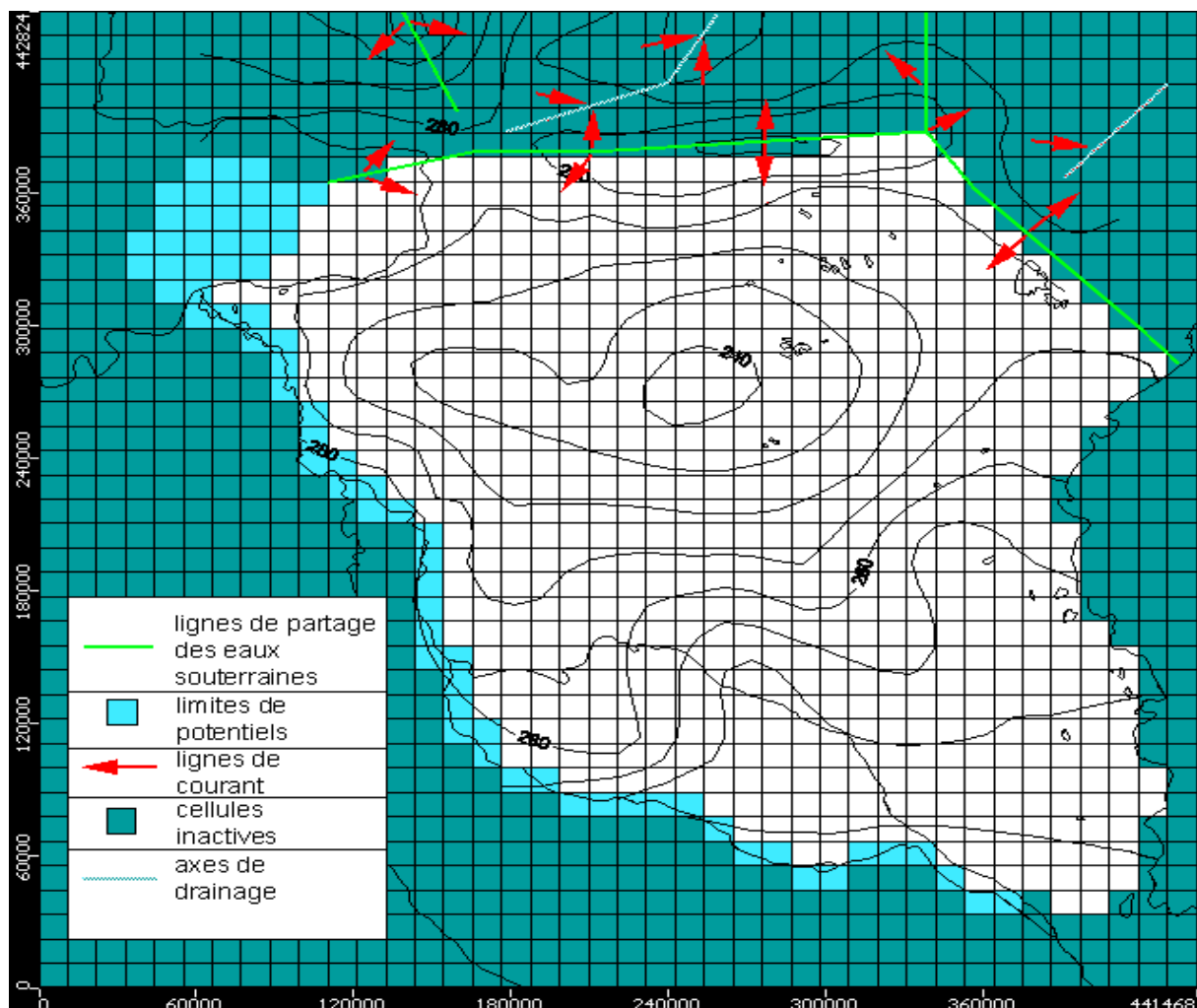


Figure (IV-4) : maillage du model, avec la représentation des lignes de flux nul (lignes de partage des eaux), des limites de potentiel et des limites géologiques.

IV.4.2.6. Conditions de flux internes

Dans le modèle, les conditions de flux internes seront exprimées en terme de recharge nette (bilan infiltration – évaporation) positive ou négative.

Nous avons montré que les zones de recharge préférentielles ne sont pas connues avec exactitude et qu'à l'heure actuelle, leur contribution dans le bilan hydrodynamique relève de l'énigme.

IV.4.2.7. Conditions de potentiel

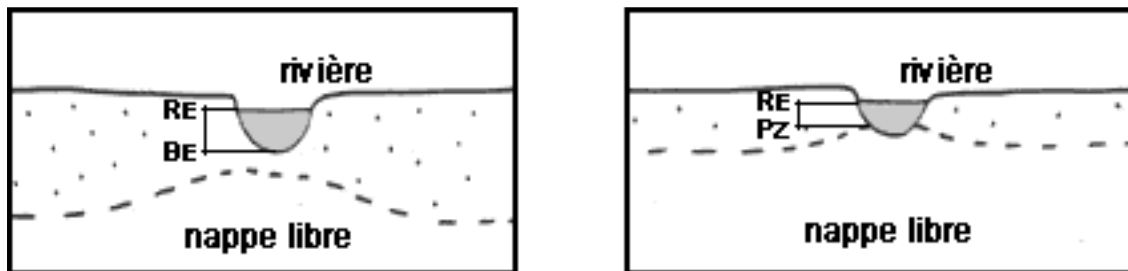


Figure (IV-5) : calcul des conditions de potentiels selon MODFLOW.

$$Q = C . (RE - BE) \qquad Q = C . (RE - PZ)$$

Avec :

C : conductance du milieu m³/jour

RE : niveau de la rivière m

BE : niveau du fond de la rivière m

PZ : niveau statique m

Le débit échangé est contrôlé indirectement en fixant la valeur de la conductance. Celle-ci est approchée de façon empirique selon la relation :

$$C = \frac{(KZ * S)}{e}$$

Avec :

K_z : perméabilité verticale e : épaisseur colmatée

S : surface de contact par maille

L'estimation de ces trois variables est extrêmement subjective. De ce fait, le but n'est pas d'obtenir uniquement des valeurs, mais plutôt de restituer une gamme de variations cautionnée par une réalité physique justifiable et observable sur le terrain.

IV.4.2.8. Contraintes initiales

✓ *Emmagasinement :*

En régime permanent ce paramètre n'intervient pas ; par conséquent sa valeur exacte importe peu.

✓ *Perméabilité :*

La plupart des essais de pompage ne sollicitent qu'une partie de l'aquifère ce qui empêche d'en déduire une valeur de la transmissivité moyenne de toutes les couches traversées. Les transmissivités connues ne sont donc qu'apparentes et uniquement représentatives des couches supérieures de l'aquifère.

✓ *Recharge :*

Nous n'avons aucune donnée en ce qui concerne les flux susceptibles d'être transférés vers la nappe.

En ce qui concerne les flux sortants, la formule de Coudrain-Ribstein (1997) nous assure une limite supérieure pour l'exfiltration en fonction de la position de la surface de la nappe sous le sol, mais ceci ne concerne que l'évaporation et pas la transpiration par les plantes.

IV.5. Résultats de la modélisation

IV.5.1. Simulation en régime permanent

Après avoir introduit toutes les données nécessaires dans le modèle. Une phase de simulation en régime permanent a été réalisée à partir des données (prélèvements, recharge, Bcharges initiales et les points d'observation). Cette première étape de modélisation a plusieurs objectifs:

- ✓ S'assurer du bon fonctionnement du modèle après les modifications apportées à la géométrie sur la zone d'étude.
- ✓ Retranscrire au mieux le comportement de la nappe;
- ✓ Ajuster les paramètres hydrodynamiques.

Du fait de l'exploitation importante de la nappe, il n'est pas possible de considérer l'existence d'un régime permanent au sein du complexe aquifère. Le régime permanent correspondrait à l'état initial du système avant tout soutirage pour lequel les données sont trop fragmentaires.

Bien que la comparaison d'un régime pseudo-stabilisé (modélisation) et d'un régime non stationnaire (valeurs observées) reste sommaire, cette étape permet une première évaluation du modèle avant le passage au régime transitoire.

Après avoir tourné le modèle en régime permanent.

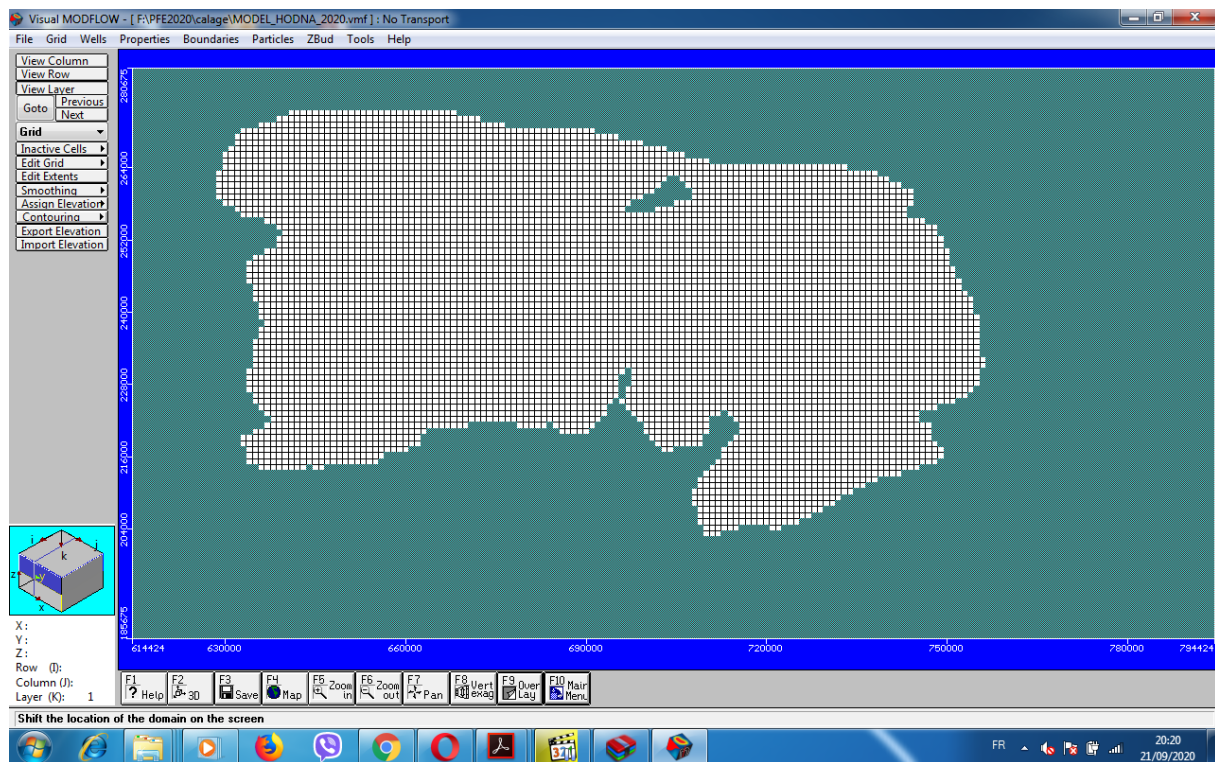


Figure (IV-6) : Grid d'un modèle de bassin versant Hodna par Modflow.

IV.5.2. Les puits de pompage et les forages d'observations

Ne disposant que des chroniques annuelles pour les prélèvements en forage, un pas de discrétisation annuel a été retenu. Il sera donc impossible de restituer les phénomènes pour des périodes inférieures à l'année.

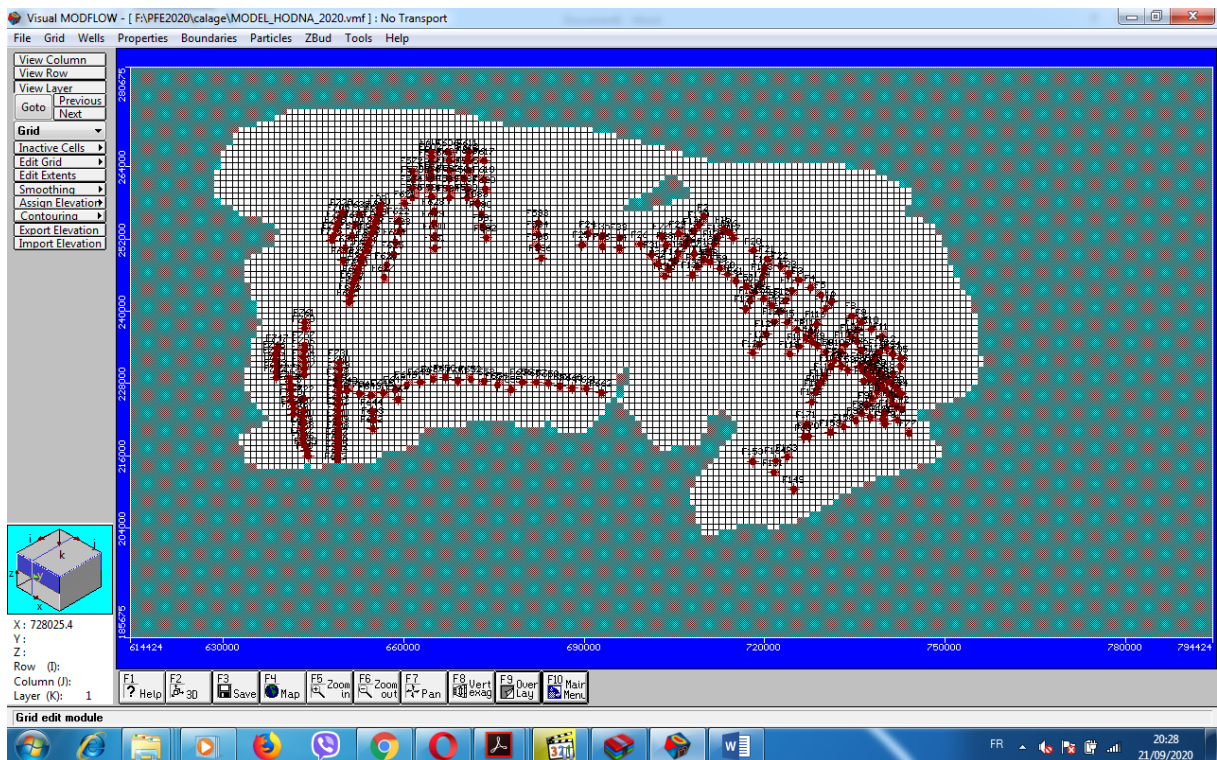


Figure (IV-7): représentation des puits dans le bassin versant HODNA.

IV.5. 3.Le fond de la nappe

Le substratum ou le fond des alluvions, repose plus souvent sur la marne bleu imperméable. Cette limite a été reconnue par les sondages mécaniques et très souvent identifiée par les sondages électriques.

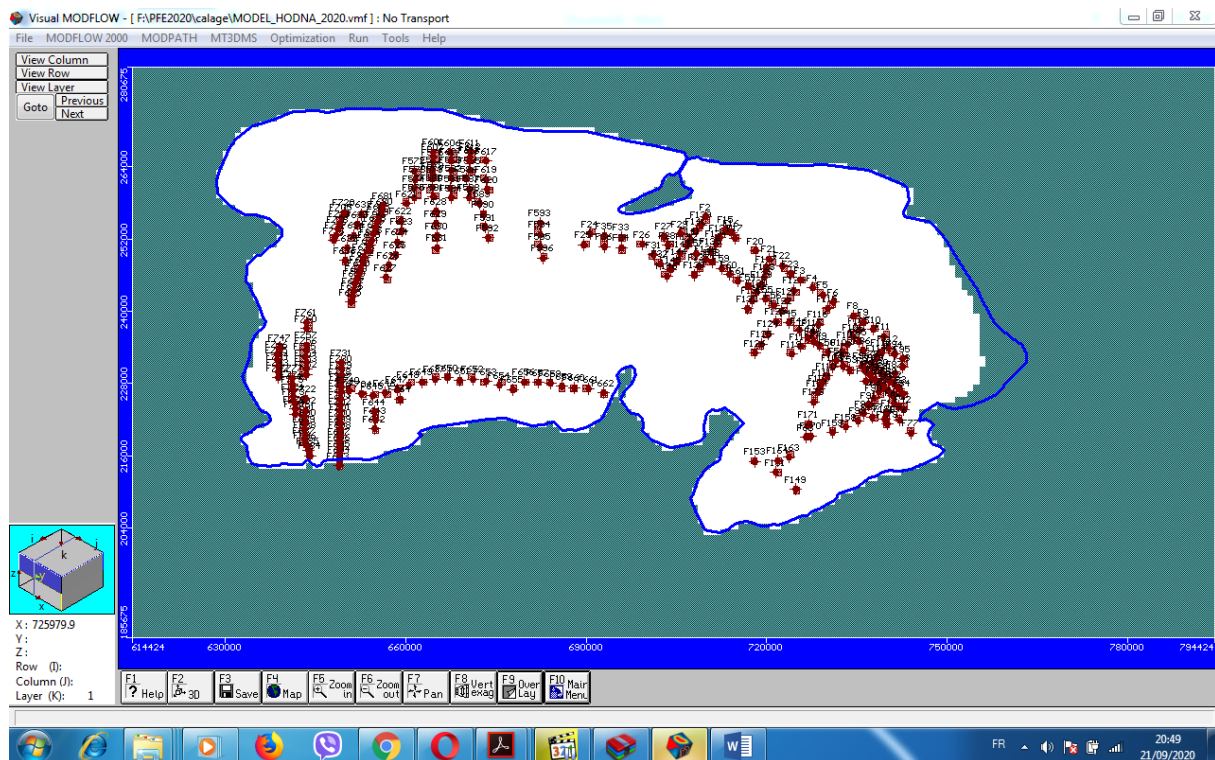


Figure (IV-8) : la nappe-profonde de bassin versant HODNA par Modflow.

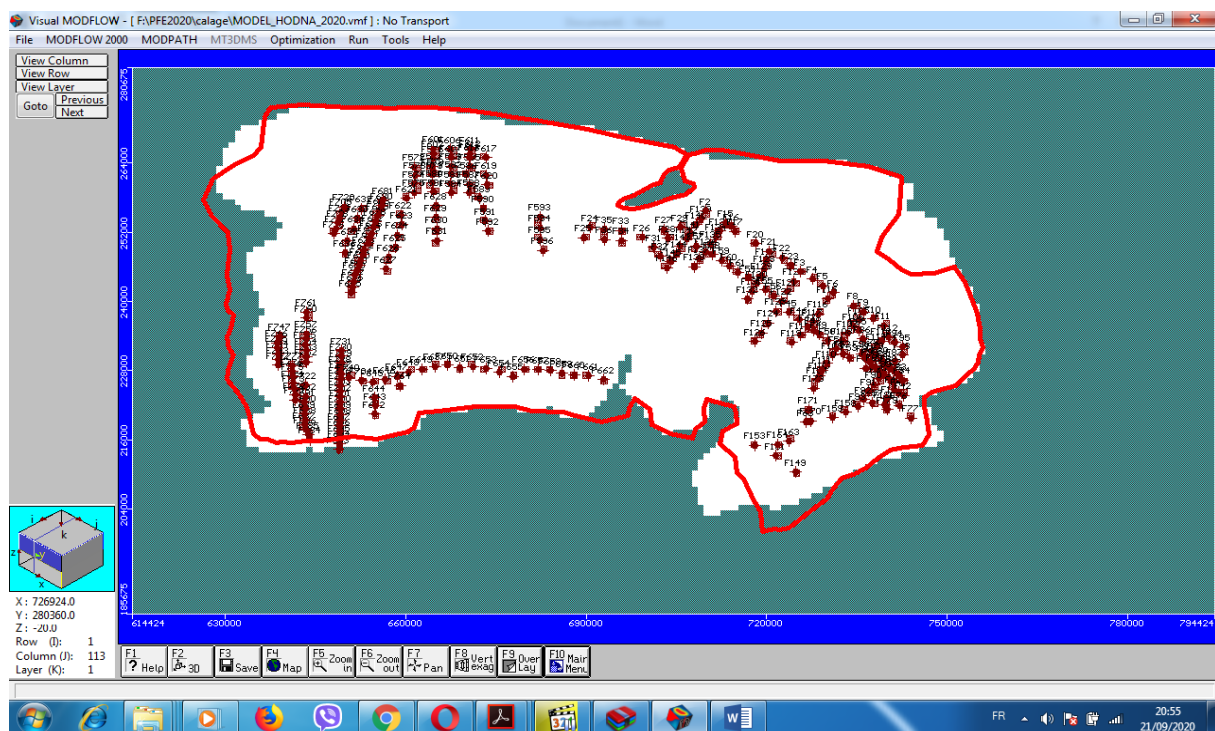
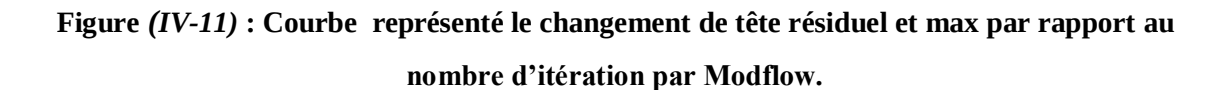
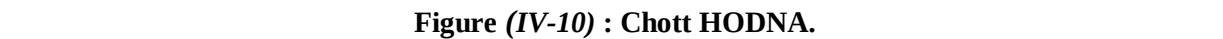


Figure (IV-9) : la nappe-phréatique de bassin versant HODNA par Modflow.



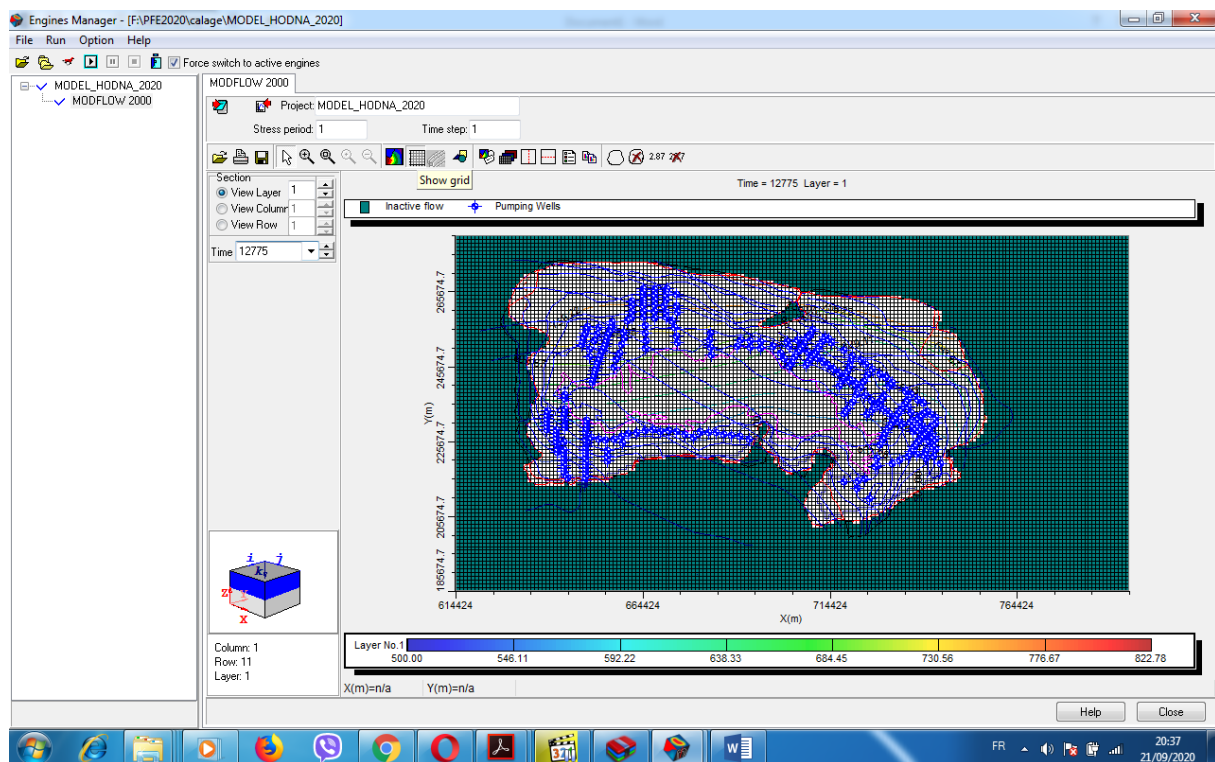


Figure (IV-12):Show Grid modflow 2000.

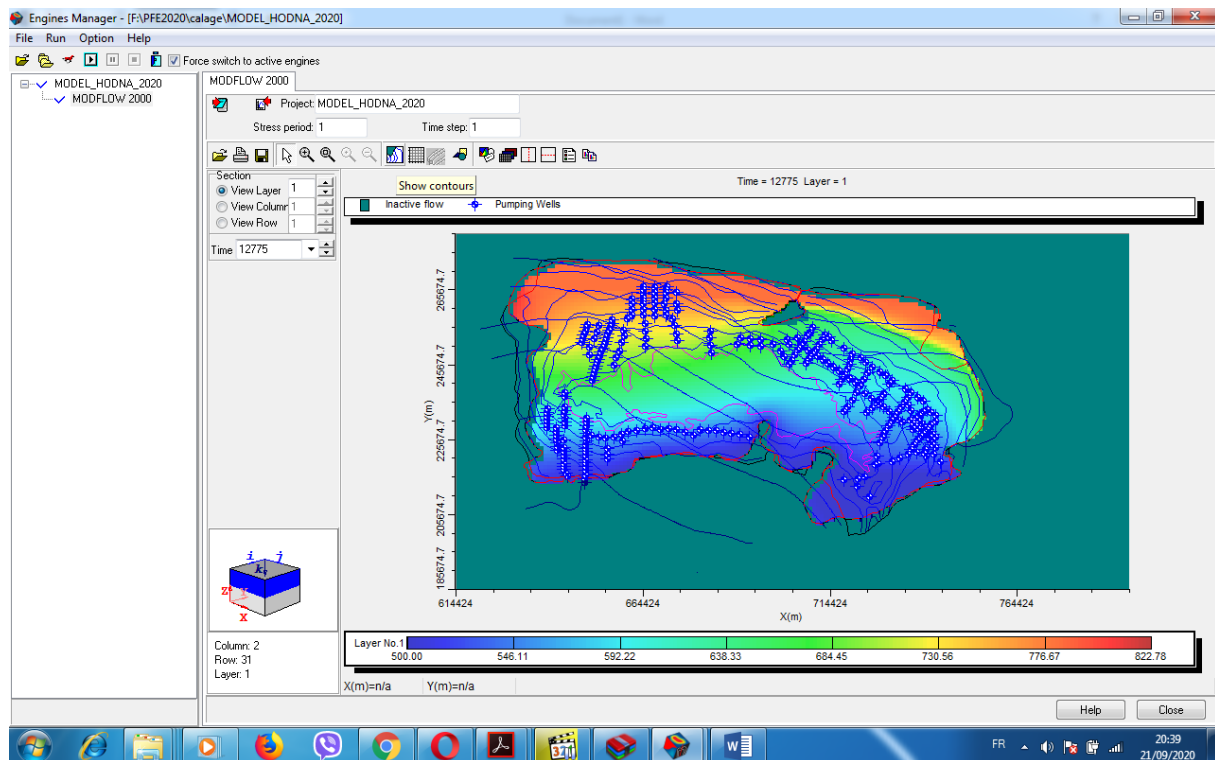


Figure (IV-13): Show contours modflow 2000.

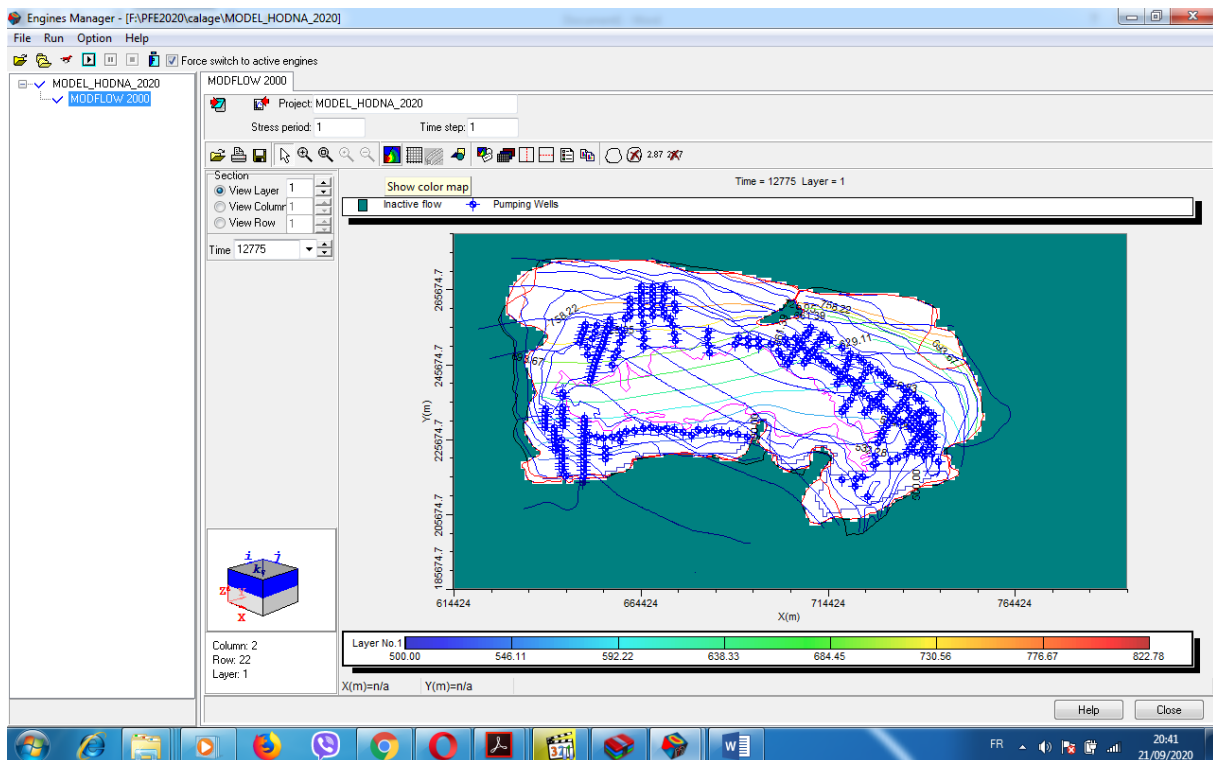


Figure (IV-14): Show color Map modflow 2000.

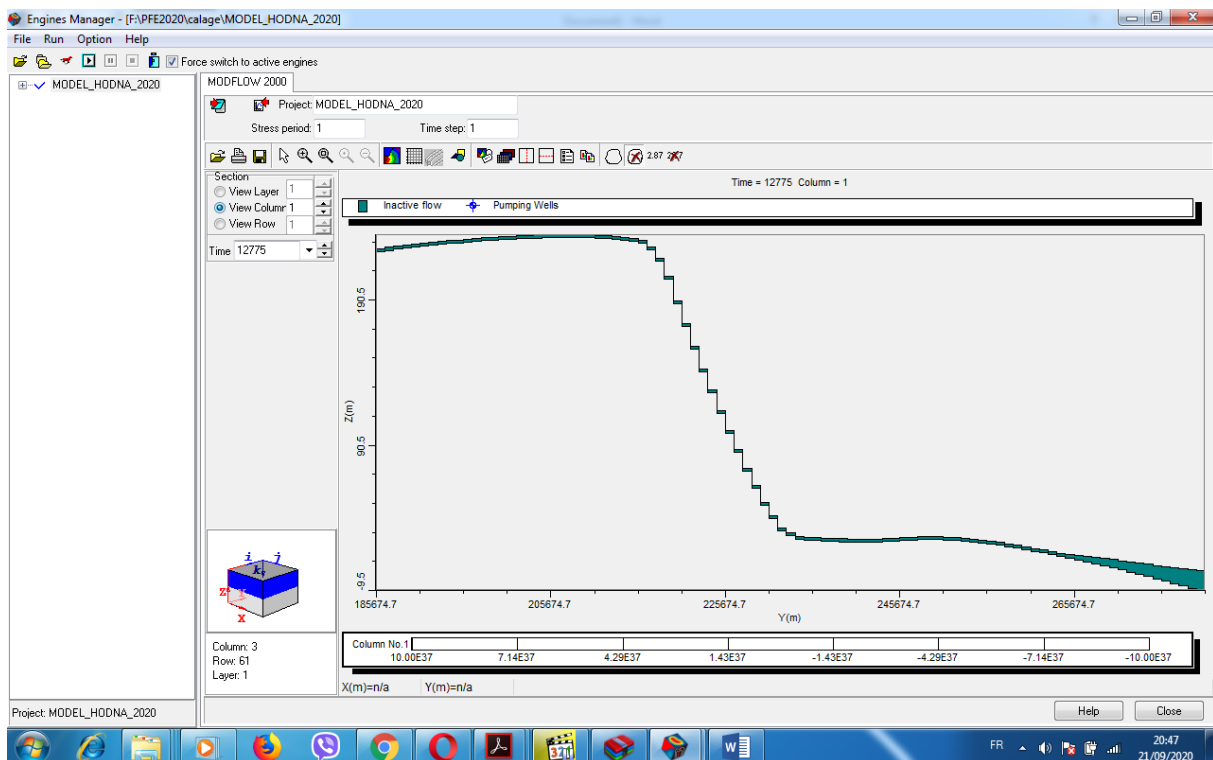
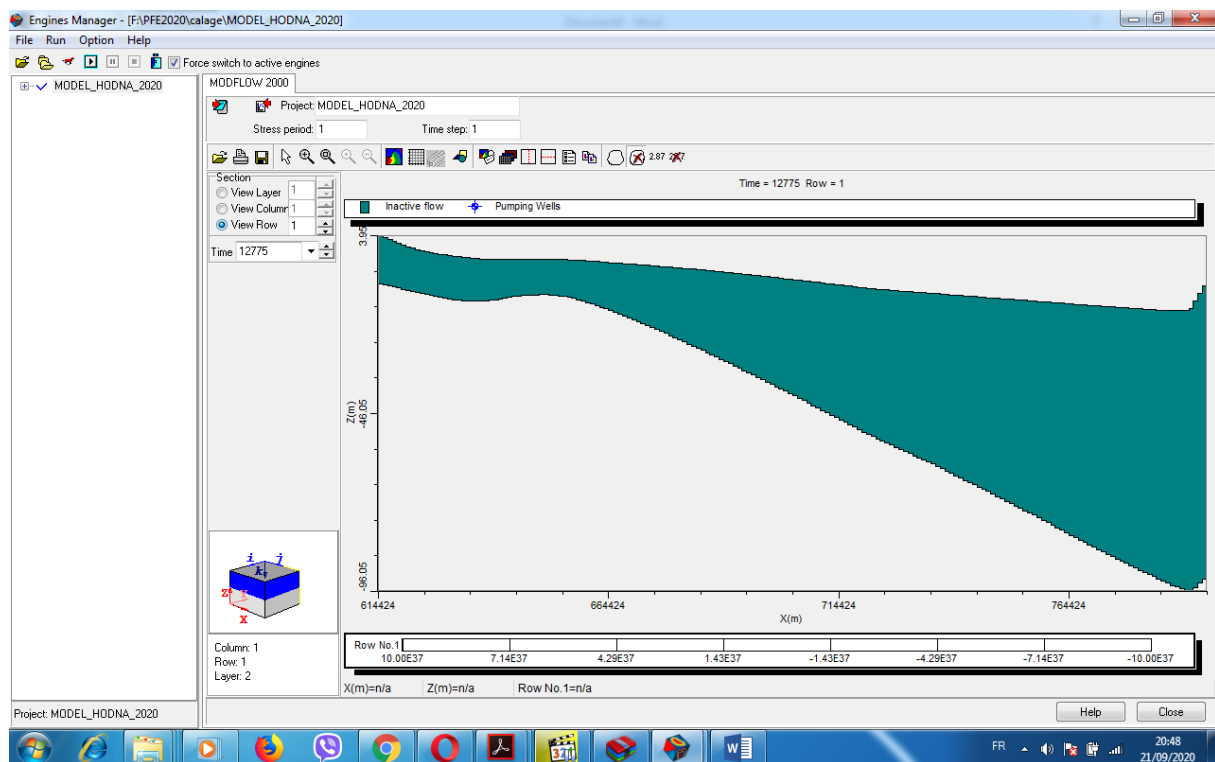


Figure (IV-15):représenté un colonne de modele par Modflow.



Figure(IV-16) : représenté un ligne de modele par Modflow.

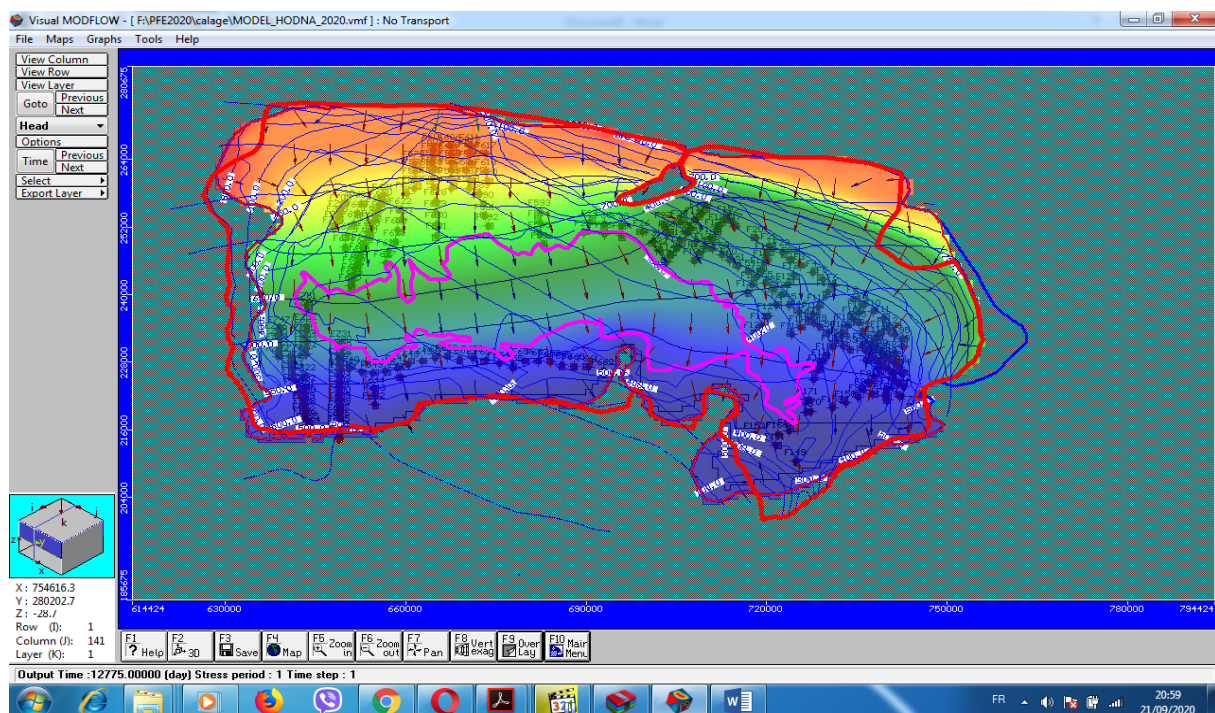


Figure (IV-17): Bassin versant hodna par modflow.

IV.5.4. Conclusion sur la sensibilité du modèle

Il est évident que le comportement du modèle est en adéquation avec la qualité de nos données.

L'étude de la sensibilité montre clairement que pour aboutir à un résultat unique, il nous faut impérativement diminuer les incertitudes et donc, dans le même temps, les intervalles de variation des valeurs mesurables sur le terrain.

Un travail sans « garde-fou » revient, lors de la modélisation, à caler tous les paramètres simultanément. Ce cas de figure nous met en difficulté pour la validation d'un schéma de fonctionnement particulier. Notre zone d'étude est caractérisée par une extrême variabilité des paramètres de terrain qui représente un obstacle à la régionalisation des spécificités locales. Des études plus poussées pourraient permettre de mieux cerner les variables d'entrée et de proposer une gamme moins étendue de combinaisons possibles à l'aboutissement d'un résultat lors de la modélisation.

Conclusion Générale

Les changements climatiques observés ces dernières années ont affecté sérieusement sur les ressources en eau aussi bien en quantité qu'en qualité, son état risque de se détériorer si des mesures fermes ne soient pas prises à temps.

La recharge naturelle est directement liée aux précipitations et aux ruissellements des eaux superficielles engendrées par les pluies orageuses.

Pour profiter de ce volume considérable des eaux de surface, nous avons essayé de simuler la recharge artificielle de la nappe de HODNA par différents procédés : injection, ruissèlement et lâchers.

Une modélisation est accomplie sur l'ensemble de la nappe, via le logiciel *Visual Modflow* (3.0), afin de tester le schéma de fonctionnement obtenu à travers l'analyse de données, et de quantifier le sens et l'intensité des échanges des nappes.

Bien que le calage effectué en régime permanent, a pourtant conduit quelquefois à utiliser des conductivités hydrauliques, plus importantes que celles mesurées, à une échelle très locale sur les sites. Les simulations effectuées en régime transitoire, permettent de bien se rendre compte de la dynamique des nappes face à l'accroissement des débits prélevés aux différents forages. La recharge artificielle des nappes constitue le meilleur moyen de stocker l'eau, elle permet aussi d'éviter des pertes considérables par le phénomène d'évaporation et par envasement et d'avoir une eau de meilleure qualité.

Enfin, les résultats obtenus à l'issue de la simulation des écoulements par ce modèle, pourraient constituer, la base d'une réflexion pour poursuivre nos investigations, dans le cadre de nos recherches.

Bibliographie

- ✓ [Ambroise. B, 1998]: La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant. Processus, facteurs, modèles. Edition H.G.A. Bucarest.
- ✓ [Barone, V. C, 2000]: Modeling the impacts of land use activities on the subsurface flow regime of the upper Roanoke river watershed, Master of Science in Biological Systems Engineering, pp. 184, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- ✓ [Bear. J, 1972]: Dynamics of fluids in porous media. Academic Press, New York and London.
- ✓ [Bear. J, 1979]: Hydraulics of groundwater, McGraw Hill series in water resources and environmental engineering, 567 pages.
- ✓ [Besnard. K, 2003]: Modélisation du transport réactif dans les milieux poreux hétérogènes. Application aux processus d'adsorption cinétique non linéaire. Thèse de doctorat Université de Rennes1, France. 251 pages.
- ✓ [Bradley. C, 1996]: Transient modelling of water-table variation in a floodplain wetland, Narborough Bog, Leicestershire, *J. Hydrol.*, 185, 87-114.
- ✓ [Bradley. C, 2002]: Simulation of the annual water table dynamics of a floodplain wetland, Narborough Bog, UK, *Journal of Hydrology*, 261(1-4), 150-172.
- ✓ [Castany. G, 1982] : hydrogéologie « principes et méthodes, Ed Dunond, Paris. P129-150.
- ✓ [Chapuis. R, Crespo. P., Chenaf. D et Aubertin. M, 1993]: Evaluation of a groundwater f.e.m software for steady and unsteady state conditions, 46th Canadian Geotechnical Conference, Saskatoon, 61 -70.
- ✓ [Crespo. R, 1994]: Modélisation par éléments finis des écoulements à travers les ouvrages de retenue et de confinement de résidus miniers, Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal.
- ✓ [François R, 2002] : Master professionnel. DESS cours d'hydrogéologie Edition 2002. France.
- ✓ [Gilli. E, Mangan. C, Mudry. J, 2008] : Hydrogéologie (Objets, méthodes et applications), 2^{ème} édition, Paris. 199 p.
- ✓ [Hillel. D, 1998]: Environmental Soil Physics. Academic Press. Page 707-756

- ✓ **[Kadri et Al. 2005]** : Modélisation numérique en éléments finis de la recharge artificielle d'une nappe souterraine. Premier séminaire national sur la mobilisation et l'exploitation en eau. Batna 12-13 décembre 2005.
- ✓ **[Kadri et Al. 2006]** : Simulation numérique de la recharge artificielle d'une nappe souterraine. Colloque international sur la protection et la préservation des ressources en eau – C.P.P.R.E 2006. Blida 18-19 février 2006.
- ✓ **[Lagha-Bouزيد. S, 2000]**: La recharge artificielle des nappes d'eau souterraines : Alternative en Algérie (CMEE 2000) Institut de génie Civil, Département d'hydraulique, Université des sciences et de la technologie Houari- Boumediène USTHB Alger.
- ✓ **[Lefebvre. R, 2006]**: Écoulements multiphase en milieu poreux et les aquifères.
- ✓ **[Louis. J, 1980]**: Hydraulique générale et appliquée, Edition 1980.
- ✓ **[Mansell, R. S., Bloom. S. A. et Sun. G, 2000]**: A model for wetland hydrology: description and validation, *Soil Science*, **165**(5), 384-397.
- ✓ **[Meriano, M., and N. Eyles, 2003]**: Groundwater flow through Pleistocene glacial deposits in the rapidly urbanizing Rouge River-Highland Creek watershed, City of Scarborough, southern Ontario, Canada, *Hydrogeology journal*, 11(2), 288-303.
- ✓ **[Mousavi. SF et Rezai. V, 1999]**: Evaluation of scraping treatments to restore initial infiltration capacity of three artificial recharge projects in central Iran, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Iran, *Hydrogeology Journal* (1999) 7: 490–500 .
- ✓ **[Nasri. S, Grunberger. O, Monteroi. JP et Albergel. J, 2001]** : Recharge artificielle de nappes phréatique par les lacs collinaires. Exemple de l'oued El Gouazine (Ousseltia-Kairouan Tunisie), Séminaire international sur les petits barrages dans le monde méditerranéen Tunis du 28 au 31 mai 2001.
- ✓ **[Remini. B, 2005]**: La problématique de l'eau en Algérie. Edition Office des Publications Universitaires. p122.
- ✓ **[McDonald. M, 1988]**: A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model, Open-File Report 83-875, pp.588, US Geological Survey Techniques
- ✓ of Water-Resources Investigations, Washington.
- ✓ **[Saïd. B et Lhoussaine. B, 2006]**: Étude de faisabilité de la recharge artificielle des formations calcaires en zone semi-aride. Cas de l'oued Tagmoute, (Anti-Atlas occidental, Maroc) -Actes du 8ème colloque d'hydrogéologie en pays calcaire, Neuchâtel, Suisse - ISBN 2-84867-143-2- Presses universitaires de Franche-Comté,

Université de Franche-Comté, Édition en ligne, N. Goldscheider, J. Mudry, L. Savoy et F. Zwahlen, éditeurs – 268 pages.

- ✓ **[Seghir. K, 2008]:** La recharge artificielle des nappes d'eau souterraine dans les régions semi arides. Cas de la nappe alluviale Ain Chabro-Hammamet (Nord-est de l'Algérie). 4^{ème} conférence internationale sur : les ressources en eau dans le bassin méditerranéen WATMED 4 Alger du 22 au 24 Mars 2008.10 pages.
- ✓ **[Wanakule. N, 1995]:** A Lumped parameter model for the Edwards aquifer.
- ✓ **[Weng, P., Giraud. F, Fleury. P et Chevallier. C, 2003]:** Characterising and modelling groundwater discharge in an agricultural wetland on the French Atlantic coast, Hydrology and Earth System Sciences, 7(1), 33-42.
- ✓ **Belagoune, F., 2012,** Etude et modélisation des crues des cours d'eaux en milieu semi aride (cas des grands bassins versants 05, 06 et 07), Thèse de magister en hydraulique, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 157 p.
- ✓ **Bouteldja, N., 2005,** Contribution à la modélisation de l'érosion hydrique dans le bassin versant du Hodna sous bassins versants du Ksob et de Soubella (Algérie), Thèse de doctorat en Géographie, Université de la Provence Aix-Marseille. 180 p.

- ✓ **Seddi, A., 2012,** L'étude des apports liquides et solides du grand bassin versant du Hodna, Impact sur l'environnement, mémoire de Master 2, Université Mohamed Boudiaf, pp 3 - 12.
- ✓ **Zorrig, Z., 2007,** Etude et hydrologie descriptive du bassin du Hodna, mémoire de l'ingénierie, Université Mohamed Boudiaf, pp. 2 – 17.
- ✓ **Schneider J.L., 1968.** Fluctuations des nappes au Kanem, Chari Baguirmi, Batha. Programme 1964-1966. Rapport BRGM inéd. N°68 YAO 006 LAM.
- ✓ **Chouret A., Fontes J.-Ch. et Mathieu P., 1977.** La nappe phréatique à la périphérie du lac Tchad.Convention ORSTOM/FAC n°11/M/77/M, 67 p.

