

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE

N° :



DOMAINE: SCIENCE ET TECHNIQUE

FILIERE : HYDRAULIQUE

OPTION : HYDRAULIQUE URBAINE

Mémoire présenté pour l'obtention

Du diplôme de Master en Hydraulique Urbaine

Par : Abid NourEddine

Nouri issam

Intitulé du mémoire :

**Application de MODFLOW et du système
d'information géographique SIG à la simulation des
écoulements souterrains dans la plaine nord de Hodna**

Dirigé par : Mr : Ahmed Ferhat

Soutenu devant le jury composé de :

MR.	Universities Mohamed Boudiaf M'sila	President
MR.	Universities Mohamed Boudiaf M'sila	Examineur
MR.	Universities Mohamed Boudiaf M'sila	Examineur
MR.	Universities Mohamed Boudiaf M'sila	promoteur

Année universities: 2019 /2020

REMERCIEMENTS

On tient à remercier tous d'abord le dieu tous puissant

*De nous avoir donné du courage pour Réaliser ce travail et de nous avoir
toujours guidés.*

*En suite nos plus profonds remerciements On les doit a nos parents qui
nous Ont soutenues tous le long de notre cursus Ainsi que nos frères et
sœurs qui ont tous Contribué de près ou de loin à notre réussite.*

*Puis un grand merci aussi a nos enseignants Du département
d'hydraulique qui on partagé Leurs savoir avec nous tout au long de Ces
cinq années que nous avons passées avec eux En particulier à Mr farhati
Ahmed Qui nous ont été d'une grande aide durant La réalisation de ce
présent travail On n'oublis surtout pas tous nos amis avec
Quels nous avons partagés toutes ces cinq Années d'étude universitaire.*

DÉDICACES

À la lumière des yeux et des ailes de ma mère, elle ne cesse de me chérir et de me soutenir Pendant toutes mes années d'école. Je dis merci mon Dieu Te gardé.

À mes frères

À mes collègues

Tous mes amis.

DEDICACE

Je dédie ce travail :

Dédicaces

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.*

REMERCIEMENTS

Dédicaces

Liste des abréviations

Introduction générale.....	1
<u>Chapitre I</u> <u>Présentation du nord plaine du Hodna</u>	
Introduction	3
I.1.Situation géographique de la région d'étude	3
I.2. Paramètres physiques et géomorphologiques du bassin versant du nord plaine du Hodna	5
I.2.2. Les paramètres de forme	5
I.2.2.1. Indice de compacité de Gravelius (K_c).....	5
I.2.2.2. Le rectangle équivalent	5
I.3. Relief	6
I.4. Géologie	6
I.5.Cadre Stratigraphique	7
Trias:.....	7
Jurassique:	7
Crétacé:.....	8
Oligocène:	8
Miocène:	8
Quaternaire :	9
I.6.Ressources hydriques.....	9
I.6.1.Oueds	9
I.6.2.Nappes.....	9
I.6.3.Barrages	10
I.6.4.Pédologie.....	11
I.7. La végétation.....	11
I.8. Caractéristiques climatiques du nord plain du Hodna	12
I.8.1.Temperature	12
I.8.2.Précipitation	13
I.8.3.Evapotranspiration	13
I.8.4. Humidité relative.....	14

I.8.5. Vent.....	14
I.9. Objectifs du mémoire.....	15
Conclusion.....	15

Chapitre II: Modélisation des écoulements

Introduction	17
II - 1 Notions de base	17
II .1.1 Volume Elémentaire Représentatif (VER)	17
II .1.2 Définitions	18
II .1.3 Notion de charge hydraulique.....	19
II .2. Ecoulement en milieu poreux	20
II .2.1. Equation de conservation de masse	20
II .2.2. Equation de conservation de la quantité de mouvement – Loi de Darcy	21
II - 2.3 Critiques et limitations de la loi de Darcy	22
II .2. Classification des model hydrogéologiques	22
Conclusion.....	25

Chapitre III : Présentation du SIG et Construction d'une base de données à l'aide d'un SIG

Introduction	26
III.1. Pourquoi la géographie	26
III. 2. Géomatique.....	26
III.2.1. L'information géographique.....	27
III.2.1.1. Définition.....	27
III.2.1.2. Les composants de l'information géographique.....	27
III.2.2. La représentation de l'information géographique	28
III.2.2.1. Classification des informations géographiques	28
III .2.3. Caractéristiques de l'information géographique	28
III .2.4. Historique du S.I.G.....	28
III.2.5. Les composantes d'un SIG.....	29
III.2.6. Les fonctionnalités du S.I.G	30
III.2.7. Le rôle des SIG.....	31
III.2.8. Domaines d'application.....	31
III.3. Modèle numérique de terrain (MNT) :.....	32
III.3.1. Caractéristiques des MNT :.....	32
III.3.2. Acquisition et génération des MNT	32

III.3.3. Formats des MNT.....	33
III.3.4. Application du MNT dans la foresterie.....	34
III.4. Présentation de logiciel de S.I.G (ArcGis10.0).....	34
III.4.1- Présentation d’Arc GIS 10.0	34
III.4.2. Présentation d’Arc GIS Desktop	35
III.4.3.Organisation et structure des données	36
III.4.4. L'information géographique	36
III.4.5.Unitécartographiques	36
III.4.5.1. Point:.....	36
III.4.5.2.Ligne ou segment.....	36
III.4.5.3.Le polygone ou surface ou zone	36
III.4.5.4.Modes de représentation	36
III.4.5.5 Géo référencement.....	38
III.4.6. La gestion des réseaux assistée du logiciel Arc Map	38
Conclusion.....	38

Chapitre IV Modélisation et simulation numérique par Modflow

Introduction	39
IV .1. Définition	39
IV.2. Objectif de la modélisation	39
IV.3. Modèle mathématique	39
IV.3.1. Écoulement de surface	40
IV.3.2. Écoulement souterrain.....	40
IV.4. Présentation du logiciel MODFLOW	41
IV.5. Discrétisation du modèle.....	42
IV.5.1. Fonctionnement du logiciel.....	42
IV.6. Discrétisation dans le temps.....	44
IV.7. Présentation des fonctions du logiciel Modflow	44
IV.7.1. Fonction de recharge	44
IV.7.2. Charge initiale	44
IV.8. Modèle transitoire et stationnaire.....	44
IV.9. Modèle conceptuel	45
IV.9.1. Le maillage.....	45
IV.9.2. Introduction des propriétés du matériau utilisé.....	45

IV.9.3. Introduction des forages et pompage	46
IV.9.4. Introduction des conditions initiales et conditions aux limites	47
IV.9.4.1. Conditions aux limites	47
IV.9.4.2. Conditions initiales	48
IV.9.5. La recharge	48
IV.9.6. Simulation en régime permanent	49
IV.9.6.1. Cartes piézométriques restituées	50
IV.9.6.2. Calage	50
IV.10. Résultats de la modélisation	50
IV.10.1. Préparation du modèle	50
IV.10.2. Travailler sur un modèle	53
IV.10.3. Simulations et modélisation :	60
Conclusion	65
Conclusion générale	66
Références	
Annex	
Résumé	

Liste des Tableaux

Tableau (I.1): Caractéristique topographique de bassin versant.	6
Tableau I.2. Les coordonnées du barrage de Soubella et du barrage El k'sob.....	10
Tableau(I.3) : Moyennes mensuelles de température moyenne de la commune de M'Sila, 2018.	12
Tableau(I.4) : Précipitations moyennes mensuelles et annuelle (mm) de la commune de M'Sila, 2006-2016.	13
Tableau(I .5): Moyenne mensuelle et annuelle de l'évapotranspiration en (mm).....	14
Tableau(I.6): Humidité moyenne en (%) de la zone étudiée	14
Tableau (I.7): Moyenne mensuelle et annuelles de vitesse du vent en m/s de la zone d'étude.....	15
Tableau(II.1):Sélection de critères de classification des modèles hydrogéologiques.....	23
Tableau(II.2):Exemple de classification des modèles hydrogéologiques utilisé dans SALTRANS.	24

Liste des figures

Figure I.1. Situation géographique de la région d'étude (Arc GIS 10,0).....	4
Figure I.2 :Carte géologique de la zone d'étude (1975).....	7
Figure I.3: Réseau Hydrographique de Bassin du Hodna.....	10
Figure I.4: La pédologie de la région de Hodna (F.A.O, 1975).....	11
Figure I.5: Températures moyennes mensuelles de la station de M'sila (2006 -2018).....	13
Figure I.6: Précipitations moyennes mensuelles et annuelle (mm).....	13
Figure I.7: Moyenne mensuelle et annuelle de l'évapotranspiration en (mm).....	14
Figure I.8: Humidité moyenne mensuelle en (%) de la station de M'sila (2006 -2016).....	15
Figure I.9: Variation de la vitesse moyenne mensuelle de la région de M'Sila (2006 -2018).....	15
Figure II.1: Représentation d'un milieu poreux.....	18
Figure III.1. La géomatique.....	27
Figure III.2: Les composants d'un SIG.....	29
Figure III.3: Les fonctionnalités du SIG.....	31
Figure III.4: levés de terrain en points régulièrement répartis sur la surface à modéliser.....	33
Figure III.5: Etapes de production d'un MNT.....	33
Figure III.6: Représentation des différents formats de MNT.....	34
Figure III.17: Présentation d'Arc GIS 10.0 (Source: http://www.esribelux.com/index2FR.asp).....	34
Figure III.7: L'interface de l'ArcMap.....	35
Figure III.8: Exemple des données vectorielles.....	37
Figure III.9: Exemple des données rasters.....	37
Figure IV.1: Discrétisation spatiale d'un aquifère.....	42
Figure IV.1a: Cellule (i, j, k) et les indices pour les six cellules adjacentes.....	42
Figure IV.1b: Écoulement dans la cellule (i, j, k) provenant de la cellule (i,j-1, k).....	42
Figure IV. 2: Construction de la géométrie et du maillage.....	45
Figure VI-3: position des forages.....	46
Figure IV. 4: piézomètres.....	46
Figure IV-5 : Carte piézométrique simulée au régime permanent.....	47
Figure IV-6 : Carte piézométrique en nappe profondeur simulée régime permanent.....	48
Figure IV. 7: Zones de recharge.....	49
Figure IV.8: Carte piézométrique.....	50
Figure IV .9 : Créer un nouveau projet.....	51

Figure IV.10 : fixés les unités et les paramètres de modèle.....	51
Figure IV .11 : fixés le temps de modèle	52
Figure IV .13 : Construction de la géométrie et du maillage.....	52
Figure IV .14 : Grille modèle de plaine nord du Hodna	53
Figure IV .15 : raffinage de Grille	53
Fig. (b): Coupe transversale (colonne).....	54
Fig. (a): Coupe transversale (rangée).....	54
Figure IV .16 : Importer la hauteur (import elevation).....	55
Figure IV .17 : Table de coordonnées.....	55
Figure IV .18 : Système de coordonnées et unités	56
Figure IV .19 : La position du point de coordonnées.....	56
Figure IV .20 : Conductivité	57
Figure IV .21 : Espace en magasinement (storage)	57
Figure IV .22 : importé des données des forages	58
Figure IV .23 : position des forages.....	58
Figure IV. 24 : Zones de recharge.....	59
Figure IV. 25: Constant-Head.....	59
Figure IV.26: Particles zone de recharge	60
Figure IV.27: Solver	61
Figure IV. 28: Rewetting	61
Figure IV. 29: Solution méthode.....	62
Figure IV. 30: Calendrier de distribution du temps	63
Figure IV. 31: Exécution de la simulation	63
Figure IV. 32: résultat de Run.....	64
Figure IV.33: Carte des écoulements hydrogéologiques des aquifères superficiel et profond.....	64
Figure IV.34: Coupe transversale des flux hydrogéologiques dans l'aquifère.....	65
Figure IV .35 : Représentations des résultats par des courbes Equipotentielles et des vectrices vitesses	65

Liste des abréviations

GIS : Géographique Information System

MNT: Modèle Numérique de Terrain

GPS : Global Positionnant System

MNT: Modèle Numérique de Terrain

UTM: Uiversal Transverse Mercator

FAO:Food and Agriculture Organisation

AD:Advection-Dispersion model

EF:Equation Formulation in terms

S/U: Saturated/Unsaturated

NC:Number of Components

MC:Multicomponent

NF:Non-Fickian dispersion

CV:Consistent Velocity approximation

HT:Heat Transport

DIM:Dimensions

SD:Spatial Discretisation

FE:Finite Element

FD:Finite Difference

FV:Finite Volume

AE:Analytical Element

Introduction générale

Introduction générale :

La plaine de Hodna Nord, centre économique de M'sila, est confrontée à une pénurie de ressources en eau et à la pollution de l'eau, les eaux souterraines étant la principale ressource en eau à usage industriel, agricole et domestique. Il est nécessaire d'évaluer les ressources en eau souterraine de la plaine de Hodna en tant que système aquifère complet.

Aujourd'hui, la technique de modélisation numérique est devenue une méthode importante pour la recherche sur les eaux souterraines. De nombreux logiciels de modélisation numérique visuelle des eaux souterraines basés sur différentes méthodes ont été développés et largement utilisés, tels que le flux tridimensionnel modulaire visuel (Visual MODFLOW), un logiciel de géostatistique 2D et 3D, d'analyse d'incertitude et de visualisation, et le traitement de MODFLOW, en raison de ses méthodes simples, de sa structure modulaire et de son progiciel distinct pour résoudre des problèmes hydrogéologiques particuliers. Par exemple, les logiciels populaires de GMS, Visual MODFLOW et PMWIN ont tous été développés à partir du programme MODFLOW, Grâce à la technique SIG, ils ont fourni une bonne interface de visualisation pour l'utilisateur et ont joué un rôle important dans l'évaluation et la gestion de l'eau souterraine. Désormais de nombreux modèles bidimensionnels ou tridimensionnels de la quantité et de la qualité de l'écoulement des eaux souterraines ont été construits avec succès pour résoudre de nombreux problèmes d'écoulement des eaux souterrain.

Notre présent travail donc a pour objectif d'améliorer les connaissances dans le domaine des écoulements souterrains essentiellement les écoulements en présence de puits et de traiter quelque cas d'écoulement dans un milieu poreux en utilisant analytique et la simulation numérique.

Ce rapport est organisé comme suit :

- ✚ **Le premier chapitre** Etude de milieu : elle porte sur la présentation du site d'étude, sa géologie, son climat
- ✚ **Le deuxième chapitre** les quelques notions de base qui interviennent dans la description des écoulements en milieux poreux seront présentées.
- ✚ **Le troisième chapitre** représente les définitions fonctionnelles et les principes des systèmes d'information géographique, en particulier Arc GIS (programme SIG développé par ESRI: Environmental Systems Research Institute: Redlands, Californie, USA), utilisé dans ce travail.
- ✚ **le quatrième chapitre** traite de la modélisation numérique 3D et de la simulation numérique du problème d'écoulement des eaux souterraines

Introduction générale

réalisées à l'aide du programme Modflow qui permet non seulement de valider le modèle conceptuel établi mais aussi de tester la sensibilité des niveaux d'eau aux changements climatiques, à l'augmentation des prélèvements et à la réponse à différents scénarios de recharge artificielle. Nous avons également recueilli les résultats de l'étude principale: analytique et numérique, que nous avons atteint au cours de ce travail.

Enfin, nous achevons ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I
Présentation du nord plaine du Hodna

Chapitre I: Présentation du bassin versant du nord plaine du Hodna

Chapitre I: Présentation du bassin versant du nord plaine du Hodna

Introduction :

L'eau étant nécessaire au développement de toutes les formes de vie, animales ou végétales, pour cette raison qu'il faut veiller à la préservation de cette ressource vitale des points de vue qualitatifs et quantitatifs.

L'objectif principal de ce chapitre est d'accéder à une connaissance générale des principales caractéristiques du bassin versant nord plaine de Hodna.

Ce chapitre est consacré à la description géographique, réseaux hydrographiques, conditions climatiques et caractéristiques hydrauliques du bassin versant nord plaine de Hodna.

I.1.Situation géographique de la région d'étude

La zone d'étude est localisée dans la wilaya de M'Sila il comprend plusieurs municipalités. Celle dernière est à 248Km au Sud Est d'Algérie, La région qui a fait objet pour notre étude est celle du nord plaine de Hodna. couvre une superficie de 252Km²,et limitée au Nord par les wilayas de Sétif(Boutaleb, OuladTaban), BBA , à l'Est Batna(Barika) , à l'Ouest de Hammam Dila, au Sud- Est la commune de Metkaouk, au Sud et au Sud Ouest de chatt al-Hodna.

Les coordonnées géographiques sont :

- ❖ Longitude: 39°39'19.961"N.
- ❖ Latitude : 5°16'47.233"E

Chapitre I: Présentation du bassin versant du nord plaine du Hodna

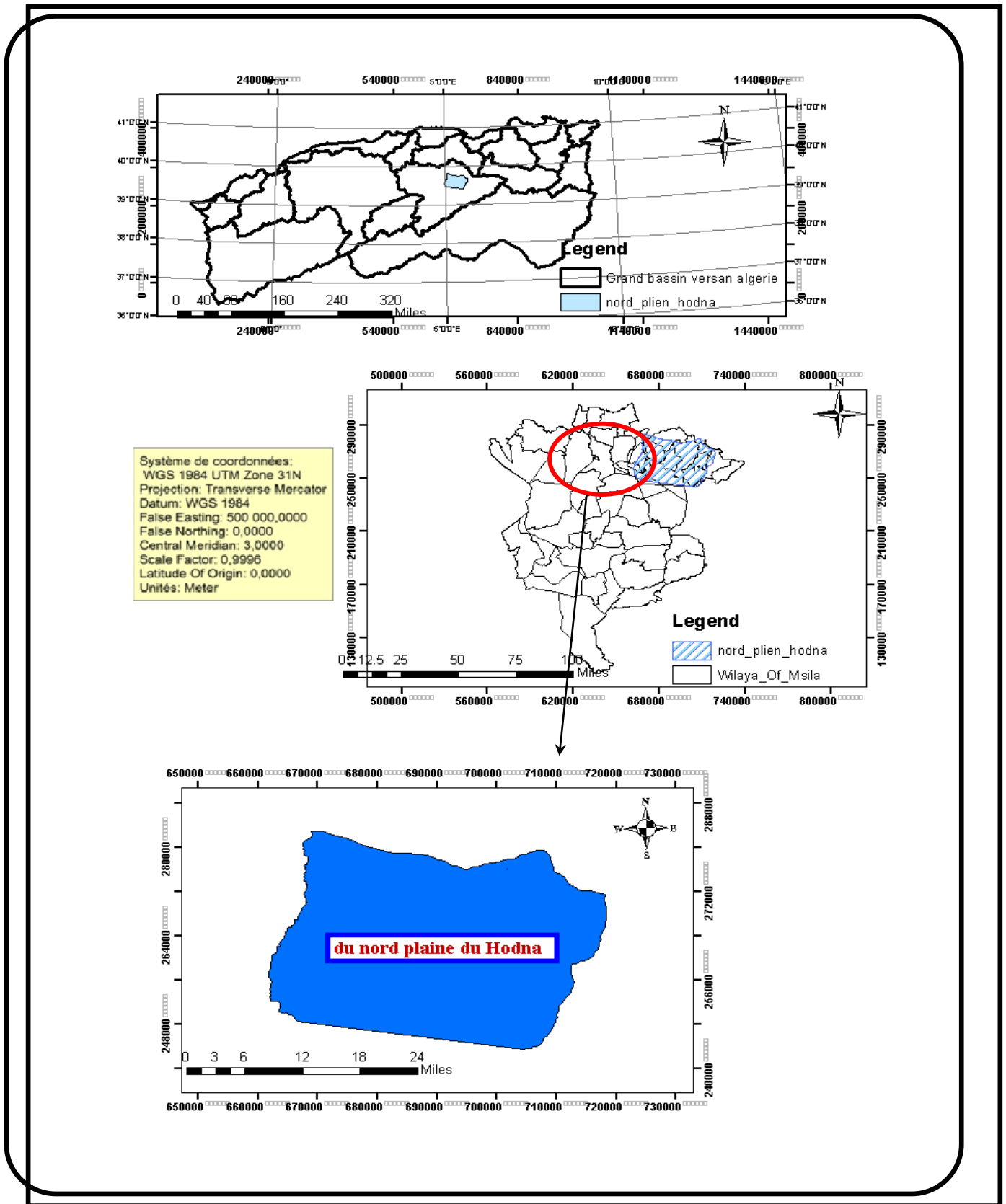


Figure I.1. Situation géographique de la région d'étude (Arc GIS 10,0).

I.2. Paramètres physiques et géomorphologiques du bassin versant du nord plaine du Hodna

La morphométrie du bassin fait partie des facteurs permanents, leur variation influe sur les modalités des écoulements superficiels et leur analyse permettra une meilleure compréhension des causes de variation des régimes hydrogéologiques.

I.2.1. Paramètres géométriques

Le bassin versant de nord plaine de Hodna couvre une superficie de 1611.58 km² et sa circonférence est de 174.322 km.

I.2.2. Les paramètres de forme

I.2.2.1. Indice de compacité de Gravelius (K_G)

La forme allongée ou ramassée d'un bassin versant est caractérisée par cet indice, il est exprimé par la formule suivante:

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}} \quad (1)$$

Avec:

- **P** : périmètre du bassin (Km)
- **S**: Surface du bassin versant,

Plus le K_G sera proche de 1, plus le bassin aura une forme ramassé et plus le temps de concentration sera court.

Si K_G est proche de 1 le BV est de forme circulaire

Si K_G ≥ 1 le BV est de forme allongée.

Si K_G = 1,12 le bassin versant est carré.

I.2.2.2. Le rectangle équivalent:

Afin de faciliter la comparaison entre les bassins versants, les hydrologues ont introduit la notion du rectangle équivalent. C'est une pure transformation géométrique du bassin versant, il est modélisé par un bassin de forme rectangulaire qu'on appelle rectangle équivalent, tels qu'il a les mêmes caractéristiques géométriques : la même superficie, le même périmètre, le même indice de forme et les mêmes caractéristiques climatiques. Les courbes de niveau dans le bassin modèle sont parallèles.

Si (L et l représentent respectivement la longueur et la largeur du rectangle équivalent).

Alors le:

périmètre du rectangle équivalent vaut : $P = 2(l + L)$.(2)

- La surface du rectangle équivalent vaut : $S = L \times l$ (3)

- La longueur du rectangle équivalent :

$$L = \frac{K_G \sqrt{S}}{1.128} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_G} \right)^2} \right) \quad (4)$$

- La largeur du rectangle équivalent :

$$l = \frac{K_G \sqrt{S}}{1.128} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_G} \right)^2} \right) \quad (5)$$

Avec:

- **L** : La longueur du rectangle équivalent
- **l** : La largeur du rectangle équivalent
- **S** : La superficie du bassin versant
- **K** : Le coefficient de compacité ou de Gravelius.

Les résultats d'une telle application sont donnés dans le tableau (I.1)

Tableau I.1: Caractéristique topographique de bassin versant.

Paramètre	A (km ²)	P (km)	K _G	L (km)	l (km)
Valeurs	1611.583	174322	1.216	59.421	27.125

I.3. Relief

Le relief joue un rôle indéniable sur le comportement hydrologique d'un bassin versant, il détermine en grande partie l'aptitude des terrains au ruissellement, l'infiltration et la vaporisation. Le relief est l'ensemble des irrégularités du sol qui se mesurent par rapport au niveau de la mer. Ces reliefs forment une barrière naturelle qui joue un rôle climatique et hydrologique important. Le bassin du Hodna est divisé en quatre unités géomorphologiques : La région montagneuse, la plaine du Hodna, le Chott Sebkhah et la région du R'mel. d'une altitude variable de 1400 à 1800 m qui relie l'atlas tellien à l'atlas saharien, le Chott Sebkhah occupe une superficie de 100 km². S'étend de Boussaâda à M'doukal, la région du R'mel présente un paysage de dunes et de steppes sableuses. [5]

I.4. Géologie

Les terrains formant les monts du nord plaine du Hodna sont secondaires, surtout crétacés, la formation mio-plio-quaternaire, dans cette région. Elles sont caractérisées par l'alternance de séries marines essentiellement marneuses et marno-calcaires avec des séries continentales, souvent alternées par des niveaux encroûtants et de formations salifères. Le

chott El Hodna est un pays agetransito-accumulatif de dépôts argileux récents qui bordent la sebkha, il renferme des dépôts alluvionnaires du Quaternaire. Le cadre montagneux est constitué principalement par des formations crétacées comprenant une sédimentation calcaro-marneuse qui a fait l'objet d'une érosion profonde. Les formations tertiaires essentiellement argilo-gréseuses forment le substratum des formations quaternaires. La présence de gypse et de sel dans beaucoup d'argiles est d'une extrême importance dans la mesure où elle est à l'origine de la formation des encroûtements gypseux au Quaternaire. Elle explique également la grande extension des alluvions salées ainsi que la nature des eaux profondes ou de surface et par conséquent, les difficultés de l'agriculture irriguée qui utilise le plus souvent des eaux et des sols plus ou moins salés. Le sel du Chott El-Hodna a une origine géologique, le Trias riche en sels compose les roches de montagnes qui entourent la région, qui en étant endoréique rassemble la totalité des sels dissous par les eaux des précipitations. [2]

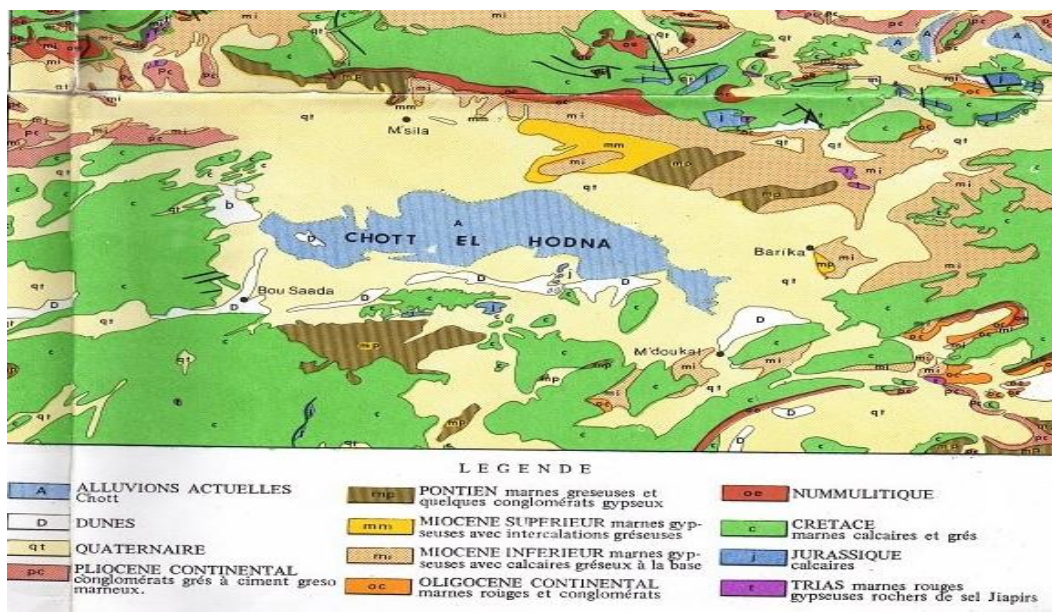


Figure I.2: Carte géologique de la zone d'étude (1975).

I.5.Cadre Stratigraphique

Le bassin versant de nord de plaine du Hodna est caractérisé par des terrains d'âge du crétacé et du miocène. Les formations lithologiques rencontrées dans le bassin:

Trias:

Les argiles triasiques à gypse constituent l'unité lithologique la plus ancienne. Les couches Triasiques apparaissent sous forme de petits affleurements occupant une position structurale anormale relevant essentiellement du diapirisme. Ils se présentent sous forme de masses d'argilites bariolées, de brèches dolomitiques et d'amas gypsifères.

Jurassique:

Le jurassique n'affleure à la faveur d'accidents majeurs que dans la partie centrale et orientale des monts du Hodna, alors que le crétacé représenté par une barre calcaro-dolomitique. Elle est surmontée par une alternance de calcaire à rudistes, de grés balance, des calcaires à huîtres et des marnes rouges. On note un faciès calcaro-marneux surmonté par marnes lumachelliques à

nombreuses inter stratification de calcaires argileux. Quant au maestrichtien, transgressif, il débute par des calcaires et se poursuit par alternance de calcaire et de marnes (200 mètres).

Crétacé:

- ❖ Crétacé inférieur : le Crétacé inférieur a été défini sur le versant Nord de Soubella et aussi au niveau du dj. Afghan. La série débute par des calcaires compacts à huîtres sur une épaisseur de 40 m, intercalés de minces lits marneux. Au-dessus, viennent des calcaires argileux phosphatés riches en Lamellibranches et Echinodermes, surmontés par des calcaires grossiers à ammonites et des marnes.
- ❖ Crétacé supérieur : le Crétacé supérieur constitue la majeure partie des petits reliefs très découpés qui environnent au Nord et à l'Ouest le djebel Soubella. Il se subdivise en plusieurs ensembles:
 - A sa base, il présente une formation marneuse avec quelques passées de calcaires jaunâtres et de Lumachelles vers les sommets.
 - Après, Epaisses séries conglomératiques de couleur rouge.
 - Au-dessus, viennent des séries marneuses ou calcaires du Campanien supérieur et du Maestrichtien.
 - La microfaune est représentée par les Laffitte nés à la base et des Orbitoides au sommet.

Ces couches supérieures sont attribuées au Maestrichtien.[3]

Oligocène:

Il a été défini dans la région de Ras Isly. Des conglomérats grossiers rougeâtres se déposent sur les derniers bancs de l'affleurement Maestrichtien. Au-dessus, viennent des alternances de marnes rouges avec des calcaires pisolithiques ferrugineux, suivis par des poudingues dont les éléments sont de dimensions variables. Une alternance de poudingues et de grés surmonte cette série.

Miocène:

Le versant Sud de Bou-Taleb présente une puissante série Miocène subdivisée de la base vers le haut en trois grands ensembles :

- Une série marine qui présente à la base des calcaires à Algues et calcaires à Pectinides et qui surmonte une puissante assise marna-gypseuse.
- Alternance de dépôts détritiques et de marnes.

Une série continentale formée par de puissantes formations (250-300 m) essentiellement continentaleet détritiques : poudingues, grés, plus ou moins grossiers et argile. [3]

Quaternaire :

- **Quaternaire ancien:**Ce niveau comporte des conglomérats à gros blocs, des horizons à galets et feuillets d'encroustement calcaire rouge-orange.
- **Quaternaire moyen:**Est représenté par des gros bancs de calcaire et de galets emballés dans une matrice de croute calcaire gréseuse, des conglomérats et des argiles à débris prismatique.
- **Quaternaire récent:**il est constitué par des limons de couleur grise avec des cristaux de gypse. Par contre dans les dunes on trouve des sables fins, des argiles et du gypse. [3]

I.6.Ressources hydriques

Le territoire de la wilaya de M'sila est un immense bassin versant qui reçoit le flux pluvial grâce aux différents oueds qui sont alimentés à partir des bassins versants de la wilaya et ceux des wilayas limitrophes particulièrement au Nord Bouira et Bordj Bou Arreridj. Selon la d.s.a. (2008). Les capacités hydriques sont estimées à 540 millions de m³ dont 320 millions de m³ en eaux superficielles (soit 59,25% de la capacité totale), et 220 millions de m³ en eaux souterraines (soit 40,74%). [1]

I.6.1. Oueds

Le réseau hydrographique est constitué de nombreux oueds, dont les plus importants sont : Oued El Laham, Oued El K'sob, Oued M'sila, dont la plupart se jettent au chott El Hodna

I.6.2. Nappes

La wilaya possède des potentialités importantes en eaux souterraines. La structure hydrogéologique du Hodna renferme beaucoup de formations aquifères réparties sur plusieurs niveaux depuis le jurassique jusqu'au quaternaire.

Deux types de nappes sont connus à travers le territoire de la wilaya :

- Nappe phréatique : peu exploitée car ces eaux sont très chargées et saumâtres.
- Nappes profondes : dont les plus importantes, la captive du Hodna (133 millions m³/an) et d'Ain Irrich (8million m³ /an).

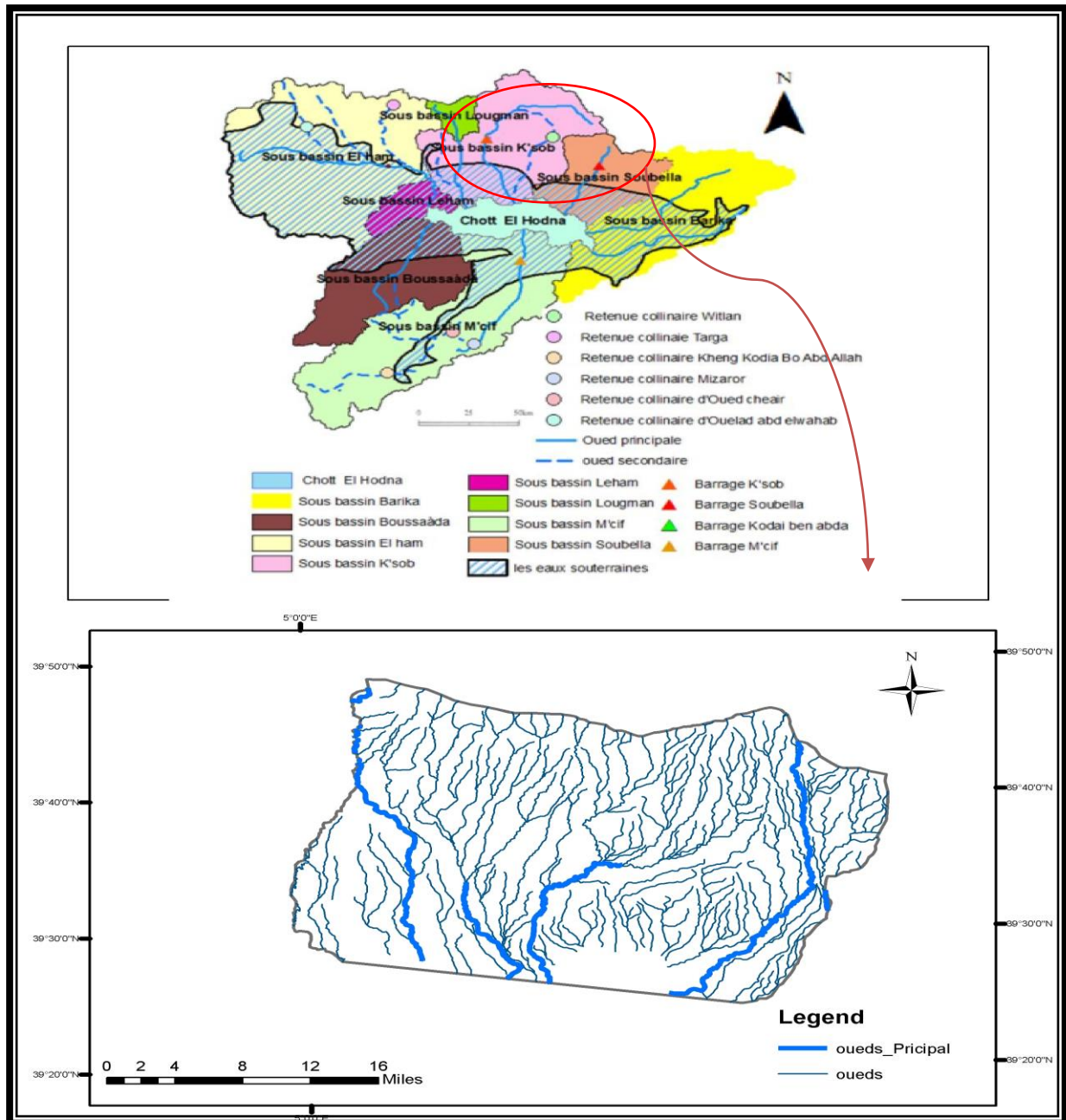


Figure I.3: Réseau Hydrographique de Bassin du Hodna.

I.6.3. Barrages

Il y a deux barrages dans la zone d'étude, dont les plus importants sont le barrage de Soubella et le barrage de lak'sob, et il y a de petits barrages, Les deux barrages sont situés à coordonnées suivantes voir tableau I.2.

Tableau I.2. Les coordonnées du barrage de Soubella et du barrage El k'sob

Les coordonnées géographiques			
	Latitude	Longitude	Altitude
du barrage de Soubella	35°42'01''	05° 08' 58''.	725 m
du barrage El k'sob	35°58' 5''	4°42' 33''	1070 m

I.6.4. Pédologie

Science dont l'objet est l'étude de la genèse, de la structure et de l'évolution des sols. Elle fut la première à prendre conscience de l'influence physico-chimique majeure qu'exercent les facteurs climatiques et la végétation sur le substrat rocheux .

Les sols de Hodna sont de 06 types :

1. Sols minéraux bruts d'apport alluvial
2. Sols peu évolués
3. Sols calcimagnésiques
4. Sols halomorphes
5. Sols hydro morphes
6. Sols Isomorphes

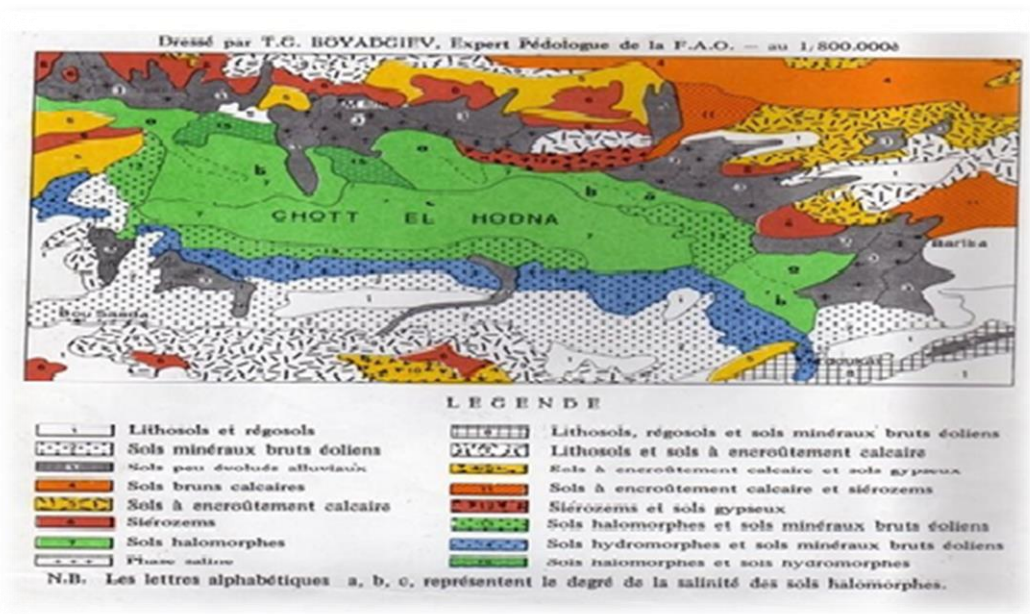


Figure I.4: La pédologie de la région de Hodna (F.A.O, 1975)

I.7. La végétation

La végétation naturelle du Nord de plaine du Hodna est caractérisée par une couverture basse et clairsemée, plus ou moins dégradée, composée de petits plants en touffes plus ou moins dispersées d'inégale valeur tant par la composition floristique que par la densité.

Les faciès les plus dominants sont principalement des faciès à : *Stipa tenacissima*, *Artémision herba alba*, ainsi que des steppes à plante spasmophiles, elles sont généralement des steppes à *Aristide pingens* ou *Aristide compétais* voire même de *Thymie le micropyle*.

Les formations à Alfa (*Stipa tenacissima*), on les retrouve en effet dans les bioclimats semi arides à hiver frais et froid, et dans l'étage aride supérieur à hiver froid, ces steppes colonisent tous les substrats géologiques de 400 à 1 800 m d'altitude.

Les formations à armoise blanche (*Atomisai herba alba*) et sont situées dans les étages arides supérieur et moyen à hiver frais et froid avec des précipitations variant de 100 à 300 mm. ce type de steppe s'étale sur les zones d'épandage dans les dépressions.

I.8. Caractéristiques climatiques du nord plain du Hodna

Dans les zones arides les facteurs climatiques, jouent un rôle prépondérant dans la disponibilité des ressources.

La caractérisation du climat de zone étudiée est basée sur des données issues de la station météorologique plaine du Hodna, cette dernière est localisée au Nord de plaine du Hodna.

Dans cette partie d'étude nous avons mis le point sur les paramètres suivants :

- La temperature;
- Les precipitations;
- L'évapotranspirationréelle.
- L'humidité.
- Le vent.

I.8.1. Temperature

Signale que la température représente un facteur limitant de toute première importance car elle contrôle l'ensemble des phénomènes métaboliques et conditionne de ce fait la répartition de la totalité des espèces et des communautés d'êtres vivants dans la biosphère. En milieu sec, la température devient un facteur aggravant car, elle augmente la vitesse de l'évapotranspiration.

Tableau I.3 : Moyennes mensuelles de température moyenne de la commune de M'Sila, 2018.

Mois/Paramètre	sept	Oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout
<i>T moy C°</i>	26.33	20.84	14.33	9.40	8.71	9.85	13.45	18.12	23.07	28.42	32.3	32.0
<i>T moy max C°</i>	38.26	33.64	24.65	19.58	19.79	21.68	27.72	32.16	36.8	40.91	43.7	43.08
<i>T moy min C°</i>	11.93	6.8	2.90	-0.24	-1.17	-1.38	0.48	3.79	7	12.41	15.85	16.42

Source: Station météorologique de M'Sila, 2018

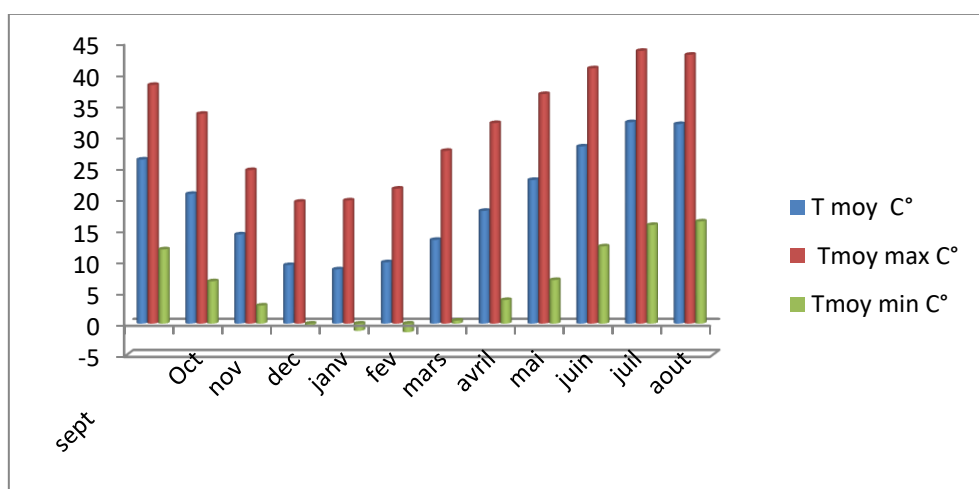


Figure I.5: Températures moyennes mensuelles de la station de M'sila (2006 -2018)

I.8.2.Précipitation

Explique quela précipitation est un facteur écologique d'importance fondamentale pour le fonctionnement et la répartition des écosystèmes terrestres.

Tableau I.4: Précipitations moyennes mensuelles et annuelle (mm) de la commune de M'Sila, 2006-2016.

Mois/Paramètre	sept	Oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout
P(mm)	4.33	9.41	6.66	4.83	10.33	4.25	5.58	7.41	8.75	2.66	2.41	2.16

Source: Station météorologique de M'Sila 2017

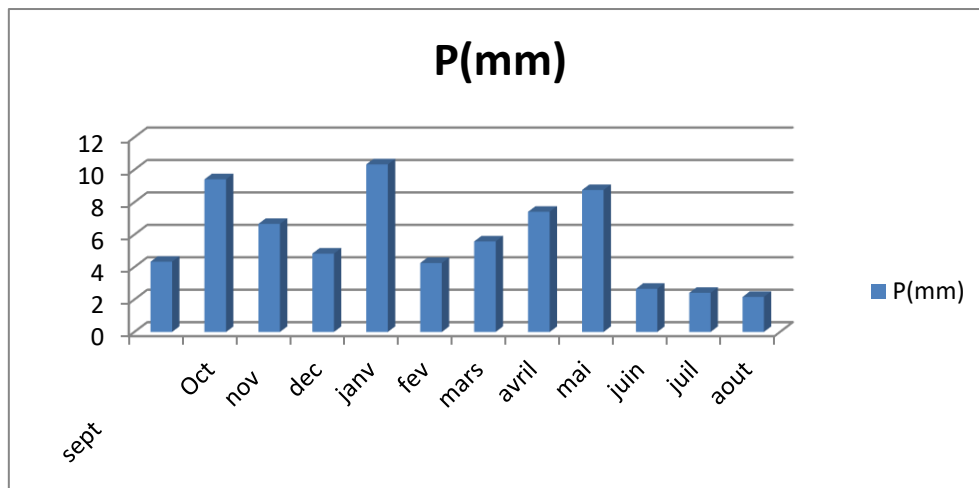


Figure I.6: Précipitations moyennes mensuelles et annuelle (mm)

I.8.3.Evapotranspiration

L'évapotranspiration est définie comme étant la valeur maximale possible de l'évaporation dans des conditions climatiques données. Elle résulte de deux phénomènes l'un physique: l'évaporation, l'autre biologique: la transpiration.

Tableau I .5: Moyenne mensuelle et annuelle de l'évapotranspiration en (mm)

Mois/Paramètre	sept	Oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout
ETP(mm)	24.9	11.28	3.32	0.75	0.62	0.91	2.70	7.93	18.53	36.85	56.89	51.78

Source: Station météorologique de M'Sila (2018).

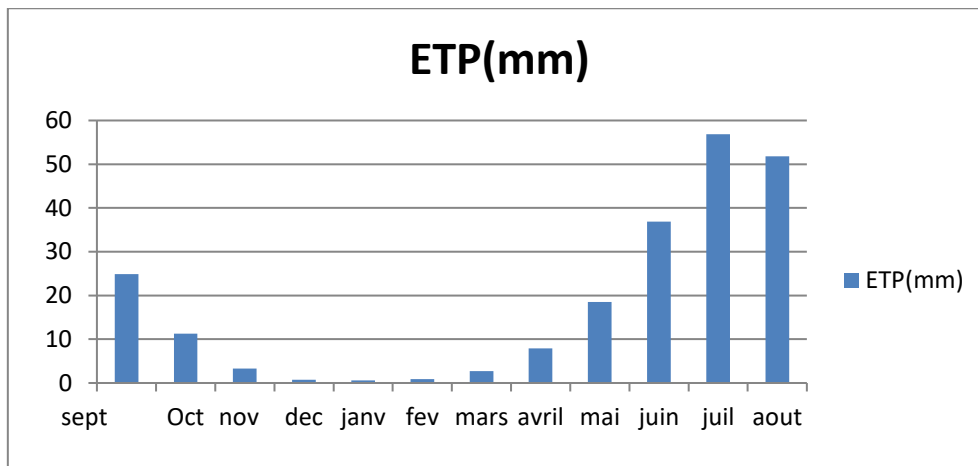


Figure I.7: Moyenne mensuelle et annuelle de l'évapotranspiration en (mm)

I.8.4. Humidité relative

est le rapport entre la teneur en vapeur d'eau de l'air et la masse théorique de vapeur d'eau que peut renfermer l'atmosphère à saturation compte tenu de la température et de la pression barométrique existante.

Tableau I.6: Humidité moyenne en (%) de la zone étudiée

Mois	sept	Oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	Aout
Humidité (%)	49.45	58.27	70.45	75.82	74.73	69.64	62.55	57.18	47.09	39.09	31.45	35.09

Source: Station météorologique de M'Sila, 2018.

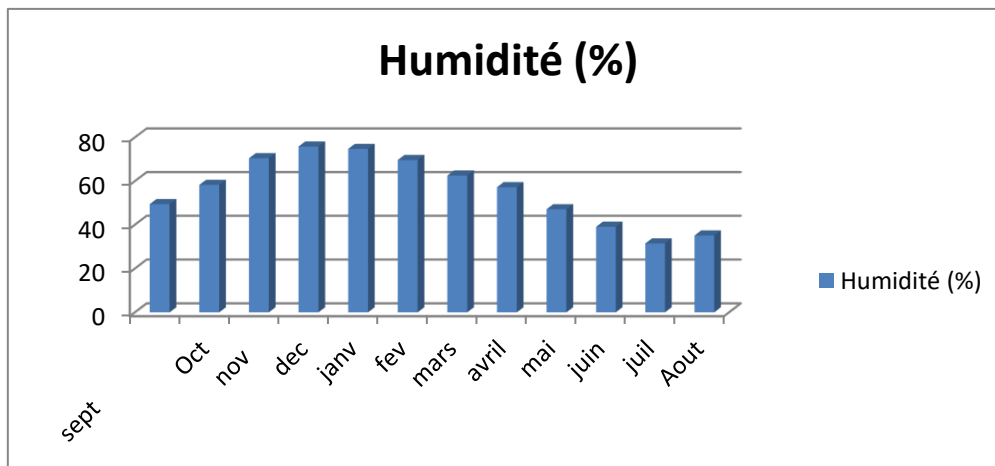


Figure I.8: Humidité moyenne mensuelle en (%) de la station de M'sila (2006 -2016)

A travers les données du tableau 12, on remarque que l'humidité relative varie entre 31.06% au mois de Juillet et 75.82 % au mois de Décembre

I.8.5. Vent

Il constitue en certains biotopes un facteur écologique limitant. Sous l'influence de vents violents, la végétation est limitée dans son développement.

Tableau I.7: Moyenne mensuelle et annuelles de vitesse du vent en m/s de la zone d'étude

Mois/Paramètre	sept	Oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout
Vitesse du vent(m /s)	3.73	3.58	3.91	3.61	3.38	4.61	5.02	4.70	4.76	4.55	3.91	3.84

Source: Station météorologique de M'Sila (2018).

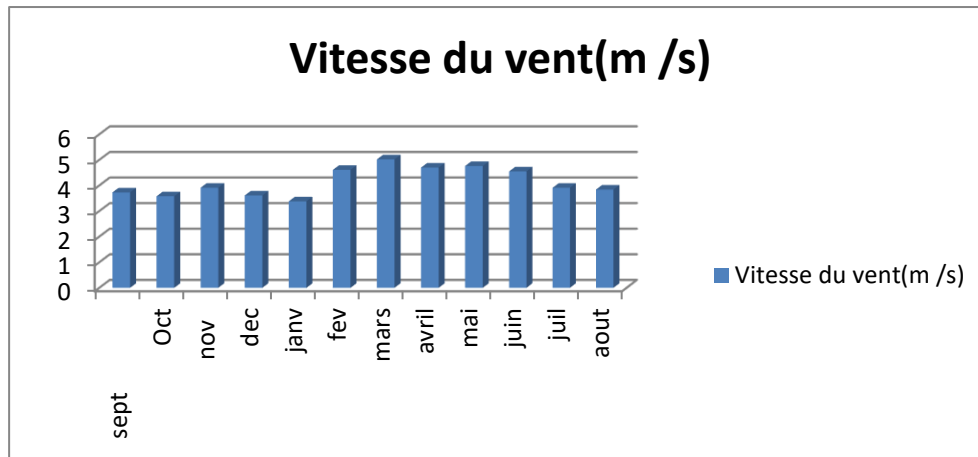


Figure I.9: Variation de la vitesse moyenne mensuelle de la région de M'Sila (2006 -2018)

La vitesse du vent varie entre 4 m/s et 5 m/s, et sa moyenne annuelle est égale de 4.41 m/s durant la période de 10 ans.

I.9.Objectifs du mémoire

Le but de l'étude était d'appliquer une approche commune de modélisation des eaux souterraines à un ensemble de données de l'aquifère dans notre plaine du bassin nord en reliant la matrice SIG au modèle d'eau souterraine MODFLOW et en évaluant les résultats obtenus. Les objectifs de l'exercice de modélisation étaient:

1. Évaluer la performance des unités MODFLOW décrivant l'interaction entre les aquifères pour déterminer Accra pour différentes dynamiques d'infiltration.
2. Relier le modèle des eaux souterraines au système d'information géographique et à la base de données.

Conclusion

Le climat de plaine nord du Hodna est un climat de type continental. il est caractérisé par un été sec, très chaud et un hiver très froid, qui est classé dans l'étage bioclimatique aride à hiver froide .

Le sol de cette région steppique est un sol alluvial peu évoluée affecté par des sels, a une géologie des terrains sédimentaires caractérisés par des formations quaternaires, qui contient réseau hydrographie très dense à écoulement Perrin.

La végétation de cette zone est d'une structure dégradée, caractérisée par une couverture basse etclairsemée

Chapitre II:

Modélisation des écoulements

Chapitre II: Modélisation des écoulements

Introduction :

Une formation hydrogéologique perméable permet l'écoulement significatif d'une nappe d'eau souterraine et le captage de quantité d'eau appréciable, elle est alimentée par l'infiltration efficace (la quantité d'eau qui parvient à la surface de la nappe). L'aquifère est un système hydrologique, hydrodynamique. Il est donc identifié par une caractéristique de réservoir qui est un domaine d'espace fini, décrit par ces conditions au limites et ses dimensions ou configurations, la première fonction est l'emmagasinement souterrain réglant le stockage et la libération de l'eau gravitaire. Le réservoir est identifié par les caractéristiques et la genèse de ses vides, pores et fissures, qui permettent de distinguer le milieu poreux et le milieu fissuré ; ou l'eau souterraine constitue un milieu continu dans le réservoir dont seule une fraction, l'eau gravitaire, est mobile dans l'aquifère ceci est due a la formation hydrogéologique perméable.

La deuxième fonction est la fonction conduite du réservoir elle permet le transport de quantité d'eau et la transmission d'influences. Elle est imposée par la structure de l'aquifère les paramètres géométriques et hydrodynamiques. L'écoulement de l'eau souterraine est déterminé par trois groupes de paramètres hydrodynamiques : Coefficient de perméabilité, gradient et charge hydraulique, débit d'une nappe et vitesse de l'écoulement des eaux souterraines.

II - 1 Notions de base

Dans les paragraphes suivants les quelques notions de base qui interviennent dans la description des écoulements en milieux poreux seront présentées.

II .1.1 Volume Élémentaire Représentatif (VER)

Un volume élémentaire représentatif est un volume pour lequel les propriétés caractéristiques moyennes (comme la porosité, la perméabilité dans le cas d'un milieu poreux) peuvent être déduites.

En réalité un milieu poreux est constitué de grains solides et vides pour lesquelles il n'est pas possible d'attribuer des notions comme la porosité et la perméabilité qu'à partir d'une échelle supérieure de plusieurs ordres de grandeur à l'échelle des pores. Le choix du VER doit donc répondre aux critères suivants [4] :

- Le VER doit contenir un grand nombre de pores afin d'avoir une moyenne globale significative.
- Le VER doit être suffisamment petit pour que les variations des propriétés d'un domaine au domaine voisin puissent être approchées par des fonctions continues pour pouvoir introduire l'analyse infinitésimale, sans introduire d'erreur décelable par les instruments de mesure à l'échelle macroscopique.

D'après les critères ci-dessus, un VER dépend non seulement de la structure du milieu poreux, mais aussi des phénomènes physiques étudiés. Un VER doit être assez grand pour représenter la structure du milieu poreux, mais aussi petit pour que les variations des propriétés, parfois non linéaires (teneur en eau), soient continues. Une telle définition appliquée à l'hydrogéologie, est sûrement subjective car l'hétérogénéité existe à toutes les échelles d'un milieu poreux naturel, et plusieurs hypothèses de modélisation existent pour chaque problème.

II .1.2 Définitions

- ❖ Porosité ϕ : rapport du volume des vides au volume total V_t du sol

$$\phi = \frac{V_{vide}}{V_t} \text{ (II .1)}$$

- ❖ Teneur en eau volumique θ (m^3/m^3) : rapport du volume de l'eau V_{eau} contenue dans les pores (ou vides) du sol, au volume total V_t du sol considéré :

$$0 < \theta = \frac{V_{eau}}{V_t} < 1 \text{ (II .2)}$$

- ❖ Saturation S : rapport du volume d'eau au volume des vides dans le sol :

$$S = \theta / \phi \text{ (II .3)}$$

La conductivité à saturation peut s'exprimer sous la forme d'un produit de deux facteurs, l'un dépendant des caractéristiques du fluide (l'eau), l'autre dépendant uniquement des caractéristiques de la phase solide et traduisant la facilité avec laquelle le sol se laisse traverser par les fluides, appelée perméabilité intrinsèque k (m^2) :

$$K_s = \frac{\rho g}{\mu} k = \frac{g}{v} k \text{ (II .4)}$$

Où

v et μ sont respectivement les viscosités cinématique (m^2/s) et dynamique ($kg/m/s$) de l'eau.

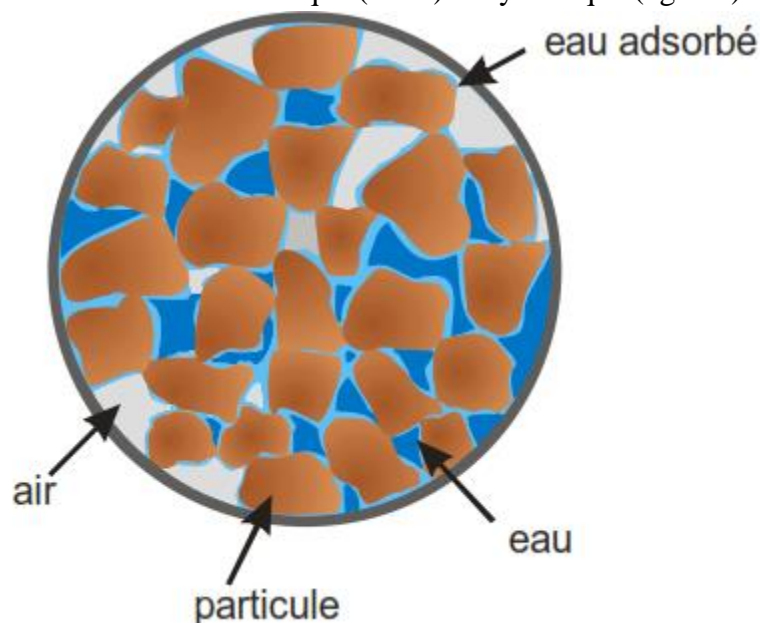


Figure II.1: Représentation d'un milieu poreux

II .1.3 Notion de charge hydraulique

En hydrogéologie il est plus commun de remplacer la pression par la charge hydraulique équivalente. Bien que plus appropriée pour la modélisation de l'écoulement de l'eau dans des systèmes à densité constante, elle est appliquée aussi aux systèmes à densité variable et les systèmes multiphasiques.

La charge hydraulique totale H est donnée par la somme du potentiel de pression relatif à la pression de l'air h et du potentiel gravitaire

$$H=h+g_B X \text{ (II .5)}$$

où :

$g_B = -g/ |g|$, « g » étant le vecteur gravité ($|g| \approx 9.81 \text{ m.s}^{-2}$).

- ✓ **X**: est le vecteur des coordonnées du point (à l'échelle du VER) dans le repère (Ox, Oy, Oz).
- ✓ **H**: est le potentiel de pression capillaire [L].

Le potentiel de pression « h » mesure la différence, exprimée en mètres d'eau, entre la pression de la phase liquide (l'eau) et celle de la phase gazeuse (l'air):

$$-\infty < h = \frac{P_{eau} - P_{air}}{\rho g} < +\infty \quad \text{(II .6)}$$

- En zone saturée, « h » représente la pression hydrostatique exercée en un point du sol par la colonne d'eau qui le surmonte. Comme le système est envahi d'eau, la pression de l'eau est plus forte que la pression de l'air ($h > 0$).
- En zone non saturée, « h » représente l'intensité des forces de capillarité et d'adsorption qui attirent et lient la phase liquide à la phase solide ($h < 0$). Dans le cas d'effets strictement capillaires, elle est directement reliée au rayon de courbure des ménisques (interfaces eau / air formés dans les capillaires du sol) par la loi de Jurin (II .7).

$$h = \frac{-2\sigma \cos \varphi}{\rho g r} = \frac{-A}{r} \text{ (II .7)}$$

Où

- ❖ σ : Tension superficielle de l'eau, inversement proportionnelle à la température ($\sigma \approx 0.0725 \text{ Nm}^{-2}$ à 20 C).
- ❖ φ : Angle de contact entre l'interface eau / air et la paroi du capillaire, supposé nul dans les sols (en supposant une mouillabilité parfaite de la phase solide vis à vis de l'eau) .
- ❖ ρ : Masse volumique de l'eau (en négligeant celle de l'air).
- ❖ r : Rayon du pore assimilé à un tube capillaire, égal au rayon du ménisque si $\varphi = 0$

En résumé, en zone non saturée, l'eau est en sous pression par rapport à la pression atmosphérique ($h < 0$). Une pression très fortement négative $h \rightarrow -\infty$ (ou forte suction) signifie une prédominance des forces d'adsorption face aux forces de capillarité, les rayons de courbures des interfaces eau / air étant petits. Une pression faiblement négative (faible suction) ou proche de zéro

(pression proche de la pression atmosphérique) signifie au contraire que les rayons des interfaces eau/air sont grands, et/ou que les pores sont presque saturés.

A l'échelle macroscopique (supérieure au VER), l'interface entre la zone saturée et la zone non saturée est définie, en terme de pression, par $h = 0$, c'est-à-dire, $p = p_{ATM}$ l'iso-surface $h(x,y,z,t) = 0$ représente, lorsqu'elle existe, une surface libre interne au milieu poreux (cas d'un domaine poreux « partiellement saturé »).

II .2. Ecoulement en milieu poreux

L'équation générale des écoulements en milieux poreux variablement saturés (présence de zones saturées et non saturées en eau) à densité variable, écrite dans un système de coordonnées cartésiennes (x, y, z) à l'échelle macroscopique, est déduite du principe de conservation de masse et de la loi de Darcy.

II .2.1. Equation de conservation de masse

On considère un volume élémentaire de contrôle de milieux poreux centré dans des coordonnées cartésiennes. On considère l'axe z vertical et dirigé vers le haut. A un certain instant 't' la masse d'eau dans le volume de contrôle est donnée par :

$$Mass = \rho \theta \Delta x \Delta y \Delta z \tag{II .8}$$

Avec θ la teneur en eau effective du milieu poreux en volume d'eau par volume de milieu poreux [L^3/L^3], ρ la densité de l'eau en [M^3/L].

Le principe de conservation de masse postule ou implique que la variation de masse stockée dans le milieu poreux est égale à la différence du flux entrant moins le flux sortant et le terme Source :

$$\frac{\partial Mass}{\partial t} = \text{Flux entrant} - \text{flux sortant} + \text{terme source} \tag{II .9}$$

Le signe du terme source est considéré par convention. En général le terme source S est considéré comme positif pour un apport d'eau et négatif pour une extraction d'eau.

En développant le flux en série de Taylor jusqu'au premier ordre dans le second terme de l'équation (II .8) on obtient :

$$-\nabla \cdot (\rho q) \Delta x \Delta y \Delta z + \rho_s Q_s \Delta x \Delta y \Delta z \tag{II .10}$$

Pour dériver le terme de droite de l'équation (II .9) on considère la matrice solide comme rigide et immobile mais faiblement déformable dans la direction verticale, z. On considère aussi que la densité varie en fonction de la pression et de la concentration en soluté.

On néglige la variation de la densité en fonction de la température. Ainsi on obtient :

$$\frac{\partial Mass}{\partial t} = \rho \left[\theta \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\theta}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\theta}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\theta}{\Delta z} \frac{\partial \Delta z}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} \right] \Delta x \Delta y \Delta z \tag{II .11}$$

Où

- ❖ P: la pression de l'eau en [F/L2]
- ❖ C: est la fraction massique du soluté.
- ❖ α : le coefficient de compressibilité élastique du milieu poreux en [L^2/F].

❖ β : le coefficient de compressibilité élastique de l'eau [L²/F].[5]

$$\alpha = \frac{1}{\Delta z} \frac{\partial \Delta z}{\partial P} \text{ et } \beta = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial P} \text{ (II .12) et (II .13)}$$

En remplaçant (II .12) et (II .13) dans (II .11) on obtient :

$$\frac{\partial \text{Mass}}{\partial t} = \rho [\theta (\alpha + \beta) \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\theta}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial \theta}{\partial t}] \Delta x \Delta y \Delta z \text{ (II .14)}$$

Enfin en regroupant le terme de droite et de gauche, on obtient l'équation de conservation de masse :

$$\rho \left[\theta (\alpha + \beta) \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\theta}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial \theta}{\partial t} \right] = - \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\rho \mathbf{q}) + \frac{\rho_s}{\rho} Q_s \text{ (II .15)}$$

En introduisant la notion de charge hydraulique l'équation (II .15) devient :

$$\frac{\partial}{\partial t} [\mathbf{M}(\mathbf{h}, \mathbf{x}) + \mathbf{Cm} + \theta(\mathbf{h}, \mathbf{x})] = - \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\rho \mathbf{q}) + Q_s \text{ (II .16)}$$

Où :

M: est le terme de stockage élastique (m³/m³) qui traduit la compressibilité de l'eau et de la matrice solide. Il peut être négligé dans les zones insaturées (M = 0 si h < 0), et proportionnel à la pression dans les zones saturées (M = S_s h si h > 0), où S_s est la storativité spécifique, en m⁻¹).

Dans la pratique de la modélisation hydrologique, M = 0, excepté dans un milieu totalement saturé (cas des nappes confinées). Il peut cependant ne pas être négligeable dans les milieux argileux.

Cm = $\frac{\theta}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial C} C$: est le terme qui exprime la variation de la densité en fonction de la fraction massique du soluté. C=0 dans le cas où la modélisation ne fait pas intervenir un transport de soluté à forte concentration.

II .2.2. Equation de conservation de la quantité de mouvement – Loi de Darcy

La loi de comportement à l'échelle macroscopique des écoulements en milieux poreux est la loi de Darcy (1856). Cette loi initialement obtenue sur des expériences 1D dans des colonnes formées de sable, homogènes et isotrope, est généralisée aux écoulements saturés et non saturés en milieux hétérogènes et anisotropes. Elle exprime la densité de flux \mathbf{q} (m/s ou m³ /m²/s) à travers le milieu poreux, comme étant proportionnelle au gradient de charge hydraulique H (m). Cette densité \mathbf{q} est aussi appelée vitesse de filtration. Elle est liée à la vitesse réelle \mathbf{u} des écoulements par $\mathbf{q} = \theta \mathbf{u}$, où θ est la teneur en eau effective du milieu poreux.

La loi de Darcy généralisée non saturée s'écrit :

$$\mathbf{q} = \mathbf{K}(\mathbf{h}, \mathbf{x}) \nabla H \text{ (II .17)}$$

où :

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & & \\ & K_{yy} & \\ & & K_{zz} \end{bmatrix}$$

est le tenseur des conductivités hydrauliques (m/s) dans le repère principal d'anisotropie (Ox,Oy,Oz)

H=h+g_Bx Est la charge hydraulique totale (m).

θ: Est la teneur en eau volumique effective (m³/m³).

Les équations de Darcy peuvent être obtenues à partir des équations de Navier-Stokes à partir de plusieurs prises de moyennes et approximations (qui ne seront pas examinées en détail ici).

II - 2.3 Critiques et limitations de la loi de Darcy

Pour que la loi de Darcy soit valide, il faut que l'écoulement soit laminaire, ce qui est généralement le cas dans les milieux poreux. La vérification de cette condition se fait à l'aide du nombre de Reynolds, Re. En mécanique des fluides, Re mesure l'importance des forces d'inertie par rapport aux forces de viscosité. Il est donné par :

$$Re = \frac{qD}{\nu} \text{ (II .18)}$$

Avec

- ❖ **q**: la vitesse [L/T]
- ❖ **ν**: la viscosité cinématique (μ/ρ)
- ❖ **D**: la longueur représentatif de l'écoulement [L]

Pour les écoulements en milieux poreux, q est considéré comme la densité de flux, et D est égale au diamètre effectif des grains d₁₀ (la taille du filtre à travers duquel 10% en masse des grains passe).

Afin que la loi de Darcy soit applicable il faut que Re ≤ 1. [7] montre plusieurs études selon lesquelles l'écoulement est transitoire entre des valeurs de Reynolds comprises entre 1 et 12. A titre indicatif pour un sable de diamètre moyen de 0.5 mm la vitesse d'écoulement limite pour l'eau à température ambiante est de 0.2 cm/s. Cette valeur peut être dépassée dans le cas d'écoulement en milieux fracturés ou karstiques. Dans ce cas une loi de perte de charge quadratique (Darcy-Horkheimer)

II .2. Classification des model hydrogéologiques

Il est difficile d'établir une classification unique des modèles hydrogéologiques. Les critères sont multiples et les combinaisons entre les options de chaque critère sont nombreuses. Ensuite une classification doit répondre à des objectifs prédéfinis dans le cahier de charge du projet de recherche ou d'ingénierie. Dans le Tableau(II.1) on présente une sélection de critères de classifications utilisées dans les projets de modélisation des écoulements censitaires et des projets de couplage surface/souterrain. LeTableau(II.2) est un exemple de tableau de classification. Ce tableau est celui du projet de recherche SALTRANS. Dans l'Annexe A on présente une sélection de codes

numériques adaptés à la modélisation à densité variable (FEFLOW, SUTRA, etc.) et des modèles adaptés aux écoulements couplés surface/souterrain (Mod HMS, MARTHE).

Tableau II.1: Sélection de critères de classification des modèles hydrogéologiques.

Critères	OPTIONS			
Equations D'écoulement	Saturé		Non-saturé	
Formulation	Charge capillaire: h		Pression : h	
Direct/Inverse	Simulation directe		Problème inverse, optimisation	
Dimension	Profil vertical 1D	Section verticale 2D	2D plan	3D
Hétérogénéité	Quasi-analytique homogène		Hétérogène	
Couplage Surfaccique	Couplage fort		Couplage faible	
Couplage Densitaire	Advection - diffusion		Interface abrupt	
Discretisation Spatiale	Eléments finis	Différences finies	Volumes finis	Eléments analytiques
Transfert De Chaleur	Isotherme		Equations de Fourier couplées	
Composantes chimiques	Pas de composante	Une composante		Multi-composante
Solveurs	Direct		Itératif	

- AD – Advection-Dispersion model
- EF – Equation Formulation in terms of h = head, p = pressure
- S/U – Saturated/Unsaturated
- NC – Number of Components, MC = Multicomponent
- NF – Non-Fickian dispersion
- CV – Consistent Velocity approximation

- HT – Heat Transport
- DIM – Dimensions
- SD – Spatial Discretisation, FE = Finite Element, FD = Finite Difference, FV = Finite Volume, AE = Analytical Element

Tableau II.2: Exemple de classification des modèles hydrogéologiques utilisé dans SALTRANS.

Code	AD	EF	S/U	NC	NF	CV	HT	DIM	SD
CODEBRIGHT	*	P	S/U	3C				2/3	FE
d3f	*	P	S/U	1C		*		2/3	FV
FEFLOW	*	h	S/U	1C		(*)	*	2/3	FE
HYDRUS-2D	*	h	S/U	MC	*		*	2	FE
MOCDENSE	*	P	S	2C				2	AE
MOCDENS3D	*	h	S	1C				2/3	AE
PSE2D	*	P	S	1C				2	AE
RETRASO	*	P	S/U	MC			*	2	FE
ROCKFLOW	*	P	S/U	1C			*	2/3	FE
SALTFLOW	*	h	S	1C				2/3	FE
SEAWAT	*	h	S	MC				2/3	FD/AE
SUTRA/SUTRA3D	*	h/P	S/U	1C		*	*	2/3	FE
TRANSDENSE	*	h	S/U	1C		*		2/3	FE

Conclusion

Les milieux poreux sont principalement leurs connaissances est une nécessité pour toute étude dans le domaine, les études appliquées aux écoulements en milieux poreux de Darcy et des hypothèses faites par Dupuit.

Les méthodes de résolution des problèmes d'écoulement avec le développement des ordinateurs les milieux poreux sont principalement caractérisés par la perméabilité et la porosité du sol une nécessité pour toute étude dans le domaine.

La perméabilité et la porosité du sol, écoulements en milieux poreux se reposent principalement sur de Darcy et des hypothèses faites par Dupuit.

Les méthodes de résolution des problèmes d'écoulement dans les sols ont sensiblement évolué avec le développement des ordinateurs et des méthodes d'analyse numérique principalement sur la loi les sols ont sensiblement évolués et des méthodes d'analyse numérique.

Chapitre III:

Présentation du SIG et Construction d'une base de données à l'aide d'un SIG.

Chapitre III :**Présentation du SIG et Construction d'une base de données à l'aide d'un SIG****Introduction**

À la fin des années 70, de nouvelles techniques d'interprétation des données se sont développées en: hydrographie, topographie et télédétection, et avec la montée de l'information, le besoin s'est fait sentir de numériser et de gérer l'information géographique en L'espace est un ordinateur qui permet de différentes sources de collecter, organiser, gérer, analyser, intégrer, développer et présenter des informations géographiquement, et contribuer notamment à la gestion des systèmes d'information géographique Une technologie moderne et innovante qui a permis de cartographier et de suivre les phénomènes Changement rapide de surface ou de surface.[12]

Ainsi est né le SIG. L'information géographique désigne toute information produite par un point ou un groupe de points de référence spatiale à la surface de la Terre. Il concerne tous les gestionnaires d'espace (hydrologues, écologistes, ingénieurs agronomes, urbanistes, aménageurs, etc.).

La demande de données spatiales a augmenté ces dernières années car on sait maintenant qu'il est nécessaire de connaître la distribution spatiale de la réponse hydrologique IA pour bien comprendre les processus de base de la génération de flux).[12]

III.1. Pourquoi la géographie

La géographie, en raison de son ancienneté et donc de son long rapport à la présence des hommes dans le territoire, est porteuse d'une part de la logique du monde (car une part de la logique du monde est inscrite dans la logique de nos discours géographiques sur le monde), elle est aussi porteuse d'un renouvellement de l'ontologie et donc d'une meilleure définition de la place de l'homme dans le monde (car une part de la sagesse des hommes compose ce qu'il est légitime de désigner comme contrat géographique).[8]

III. 2. Géomatique

C'est un terme récent, dans lequel une étymologie simpliste permet de retrouver la géographie et l'informatique, mais comme une vaste communauté scientifique et industrielle s'en est emparée d'une manière un peu désordonnée, je vais m'efforcer d'en proposer une définition. Je dirais que la géomatique est un ensemble de techniques géographiques, souvent anciennes et développées séparément, mais auxquelles une mise en œuvre numérique permet désormais de cohabiter dans un même environnement informatisé.

La géomatique désigne l'ensemble des utilisations techniques de l'informatique en géographie : les outils et méthodes d'observation et de représentation des données géographique, ainsi que la transformation de ces mesures en informations utiles à la société. [9]



Figure III.1. La géomatique.

III.2.1. L'information géographique

III.2.1.1. Définition

Il existe de nombreuses définitions du SIG, parmi lesquelles nous pouvons nous référer aux suivantes:

Un SIG est un système informatisé de matériaux.

- Les aspects qualitatifs déterminent les bases des capacités du système d'information La quantité d'informations est déterminée par trois critères. Ils peuvent être facilement formalisés dans l'entrepôt 3D ci-dessous. Une fois ces critères établis, il reste à établir une chaîne de collecte, de traitement et de représentation
- Le SIG offre une vitesse plus rapide et fournit en permanence des outils innovants pour l'étude et l'interprétation, qui sont la représentation, l'analyse et la compréhension de tous les éléments sur le terrain ainsi que de tous les événements qui s'y produisent. [11]

Le SIG offre toutes les capacités des bases de données (telles que les requêtes et analyses statistiques) grâce à une visualisation unique et une analyse géographique des cartes. Les principaux défis auxquels nous sommes confrontés aujourd'hui (bassin versant, réseau hydrographique, etc.) sont tous étroitement liés à la géographie .

En outre, les informations géographiques se réfèrent à un objet à la surface de la Terre qui est Il a de nombreuses fonctionnalités. Situé à l'aide d'un système de référence dans l'espace; Par emplacement relatif, nous pouvons comparer cet objet avec d'autres objets.[11]

III.2.1.2. Les composants de l'information géographique

L'information géographique a une double composante [8]:

- **Une composante graphique :**
 - description de la forme de l'objet géographique.
 - et sa localisation dans un référentiel cartographique.
- **Une composante attributaire :**
 - caractéristiques décrivant l'objet (description géométriques, caractéristiques thématiques).

III.2.2. La représentation de l'information géographique**III.2.2.1. Classification des informations géographiques**

Toute tentative de classification des informations nous conduit à une représentation dans un système quadripolaire comprenant :

- Les informations dites « topographiques », comme les cartes de base, les plans cadastraux ...etc.
- Les informations dites « thématiques » comme les plans de secteur, les plans d'aménagement, les cartes pédologiques, géologiques ...etc.
- Les informations dites « modèles numériques » comme les modèles numériques de terrain (MNT).
- Les informations dites « images » comme les ortho-photos numériques, les données satellitaires fournies par « Landsat » ou « Spot » par exemple.

Dans un environnement informatique graphique, l'unité formelle de ces quatre pôles prend un format bipolaire dite la « Dualité Raster - Vecteur ».

- Le domaine vectoriel recouvre les informations « topographique », « thématique » et « modèles numériques ».
- Le domaine Raster (image numérique) recouvre les informations « topographiques », « thématiques » et « image ». Il comprend à la fois des données à traiter qualitativement (photos, pour certaines applications) et quantitativement (images classées, cartes thématiques). [8]

III .2.3. Caractéristiques de l'information géographique

L'individu statique en géographie peut être :

- Une unité spatiale provenant du découpage d'un espace continu. Ce découpage spatial peut être administratif, politique ou correspondre à une réalité physique (vallée, plaine, etc.).
- Une entité ou un objet dans l'espace : cela peut être un ménage, une entreprise ou une exploitation agricole ou, à une autre échelle géographique, l'îlot, le quartier, la ville, ...etc.
- Un flux ou un échange entre deux lieux géographiques. Ce flux peut être un flux migratoire, des flux de marchandises, d'informations, etc. Géométriquement, cette information peut être
 1. **Ponctuelle** : un sujet ou un objet localisé dans l'espace.
 2. **Linéaire** : un flux, un réseau entre deux ou plusieurs points. [10]

III .2.4. Historique du S.I.G

La première application souvent citée de l'analyse spatiale en épidémiologie est l'étude menée avec succès par le docteur John Snow pendant l'épidémie de choléra dans le quartier de Soho à Londres en 1854 : ayant représenté sur un plan la localisation des malades et l'endroit où ils puisaient leur eau, il détermina que c'était l'eau d'un certain puits qui était le foyer de contamination.

Dans les années 1960, les cartes de l'Afrique de l'est trop nombreuses pour permettre de localiser, Les meilleurs endroits pour créer de nouvelles implantations forestières font naître l'idée d'utiliser l'informatique pour traiter les données géographiques.

L'usage accru de ces techniques et méthodes dans la science et l'aménagement du territoire et pour le suivi, la gestion et la protection de la biodiversité a été permis par l'avancée de

l'informatique, et encouragé par la prise de conscience environnementale. Cette évolution des applications a permis de nouvelles approches scientifiques interdisciplinaires et collaboratives depuis Les années 1970.

Maguire et ai. (1991) distinguent trois périodes principales dans l'évolution des SIG :

- fin des années 1950 – milieu des années 1970 : début de l'informatique, premières cartographies automatiques.
- milieu des années 1970 – début des années 1980 : diffusion des outils de cartographie automatique et SIG dans Les organismes d'État (armée, cadastre, services topographiques, ...).
- depuis Les années 1980 : croissance du marché des Logiciels, développements des applications sur PC, mise en réseau (bases de données distribuées, depuis Les années 1990, des applications sur Internet) et une banalisation de l'usage de l'information géographique (cartographie sur Internet, calcul d'itinéraires routiers, utilisation d'outils embarqués liés au GPS...), apparition de «Logiciels Libres », etc. [12]

III.2.5. Les composantes d'un SIG

Un Système d'Information Géographique est constitué de cinq composants majeurs tels que présentés par Figure III.2 [8]:



Figure III.2: Les composants d'un SIG

Matériel : Le traitement des données à l'aide des logiciels ne peut se faire sans un ordinateur. Pour cela, les SIG fonctionnent aujourd'hui sur une très large gamme d'ordinateurs.

Logiciels : Les logiciels de SIG offrent les outils et les fonctions pour l'exécution des 05 fonctionnalités des SIG : (Acquisition, Archivage, Analyse, Affichage, Accès).

Les principaux composants d'un logiciel SIG sont :

- Outils de saisie et de manipulation des informations géographiques.
- Système de Gestion de Base de Données.
- Outils géographiques de requête, d'analyse et de visualisation.
- Interface graphique utilisateur pour une utilisation facile.

Données : Les données sont la composante la plus importante des SIG (données graphiques spatiales, données alphanumériques...). Les données géographiques peuvent être, soit importées à partir de fichier, soit saisies manuellement par l'opérateur.

Le savoir-faire : Tous les éléments décrits précédemment ne peuvent prendre visons une connaissance technique de ces derniers. Un SIG fait appel à de divers savoir-faire, donc à des divers métiers qui peuvent être effectués par une ou plusieurs personnes. On retiendra notamment la nécessité d'avoir des compétences en analyse des données et des processus, en traitement statistique, en sémiologie cartographique et en traitement graphique.

Les utilisateurs : Les SIG s'adressent à une très grande communauté d'utilisateurs depuis ceux qui l'ont créé et le maintiennent jusqu'aux utilisateurs ordinaires.

III.2.6. Les fonctionnalités du S.I.G

Un SIG répond à 5 fonctionnalités (les 5 A)

- Abstraction : modélisation de l'information.
- Acquisition : récupérer l'information existante, alimenter le système en données.
- Archivage : stocker les données de façon à les retrouver et les interroger facilement.
- Analyse : réponses aux requêtes, cœur même du SIG.
- Affichage : restitution graphique.

En d'autres termes, un SIG est un environnement informatisé d'analyse d'une information spatiale numérisée. [9]

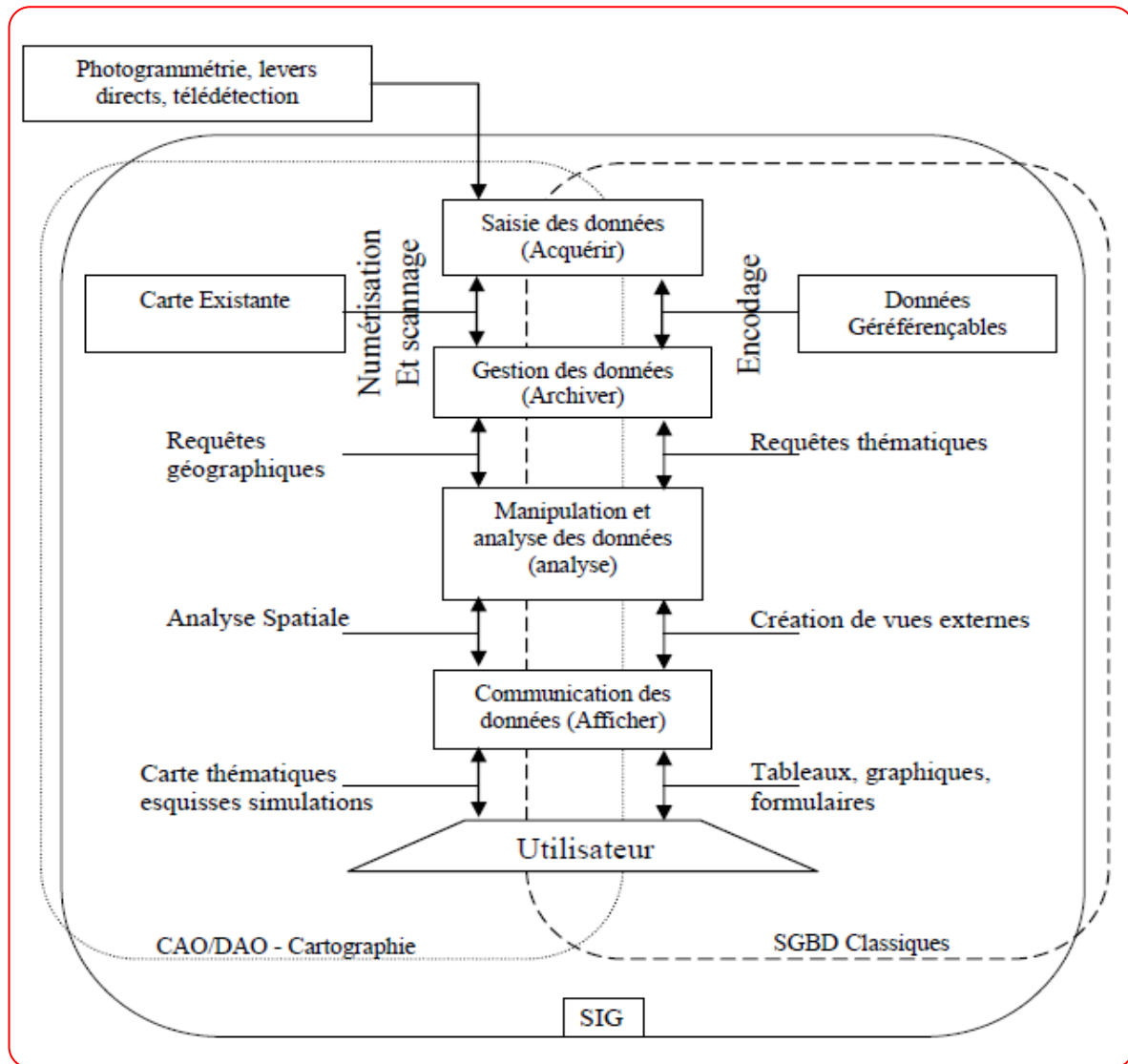


Figure III.3: Les fonctionnalités du SIG.

III.2.7. Le rôle des SIG

- Le SIG est capable de gérer aussi bien le graphique que les attributs
- Le SIG peut intégrer des informations de toutes provenance (cartes, terrain, photos...)
- Le SIG est capable de gérer ces informations pour permettre leur accès et leur mise à jour
- Le SIG permet de produire des informations (à jour)
- Le SIG est donc capable de saisir, représenter, interroger, mettre à jour toute forme d'information positionnée géographiquement. [10]

III.2.8. Domaines d'application

Les domaines d'application des SIG sont aussi nombreux que variés. Citons Cependant :

- Biologie (études du déplacement des populations animales).
- Tourisme (gestion des infrastructures, itinéraires touristiques).
- Marketing (localisation des clients, analyse du site).
- Planification urbaine (cadastre, voirie, réseaux assainissement).
- Protection civile (gestion et prévention des catastrophes).
- Transport (planification des transports urbains, optimisation d'itinéraires). Hydrologie.
- Forêt (cartographie pour aménagement, gestion des coupes et sylviculture).

- écologie (cartographie, aléas, amiante environnemental, prospection minière).
- Télécoms (implantation d'antennes pour les téléphones mobiles).[10]

III.3. Modèle numérique de terrain (MNT) :

Pour établir la cartographie numérique du massif de Tircine, on doit intégrer les données contenant l'information de relief (Altitude), aussi appelées Modèle Numérique de Terrain (MNT) «Représentation de valeurs d'altitudes continues sur une surface topographique à l'aide d'un tableau dévaluer Z référencées par rapport à un (datum) commun ; il est généralement utilisé pour représenter le relief d'un terrain » .[10]

III.3.1. Caractéristiques des MNT :

Il existe différentes dénominations pour le terme générique de MNT suivant la technique de production utilisée pour l'obtenir. Dans le domaine terrestre, certains ne modélisent que le sol (modèle numérique de terrain), tandis que d'autres comprennent également le sursol, comme la végétation ou le bâti (modèle numérique de surface, ou modèle numérique d'élévation,..). Ces derniers s'obtiennent généralement par des jeux de données brutes acquises grâce à des techniques telles que le Lidar, la photogrammétrie, ou le radar grammétrie. Les MNT constituent le plus souvent un dérivé de ces modèles, « filtré » de tous les éléments constitutifs de la couverture topographique pour ne garder que le sol nu. Le terme « couverture topographique » désigne tous les éléments situés au-dessus de la surface terrestre continentale : bâtis et végétation haute comme les forêts. [10]

III.3.2. Acquisition et génération des MNT :

L'acquisition de MNT peut se faire par des capteurs de mesure de signal embarqués sur plusieurs types de vecteurs (avions, bateaux), ou avec des levés de terrain. Ils sont également générés à partir découples d'images (satellites ou aériennes), ou encore des digitalisations de cartes. Ces différents modes d'acquisition entraînent par la suite un des traitements qui leur sont spécifiques. Ces traitements peuvent comprendre : le calcul du relief à l'aide d'un couple d'images stéréoscopiques (dans le cas de photos aériennes), une étape de traitement du signal (pour des acquisitions laser par exemple) ou une phase d'interpolation (lors de levés de terrain). Cette dernière permet d'obtenir une représentation continue à l'aide d'un nombre fini de points.[10]

Plusieurs vecteurs sont à l'origine des données qui vont permettre leur génération. Les satellites avec leurs capteurs radar ou optiques vont tout d'abord fournir l'imagerie grâce à laquelle on obtient l'information d'altitude via des traitements appropriés (figure 3et 4). Ensuite, il existe également les systèmes embarqués sur des avions (laser, radar, ou photographie aérienne). Ceux-ci produisent soit une information d'altitude via des processus automatiques (laser) soit à nouveau des images qui sont retraitées par la suite. Enfin, il y a également les levés de terrain acquis sous forme de points régulièrement répartis sur la surface à modéliser.[10]

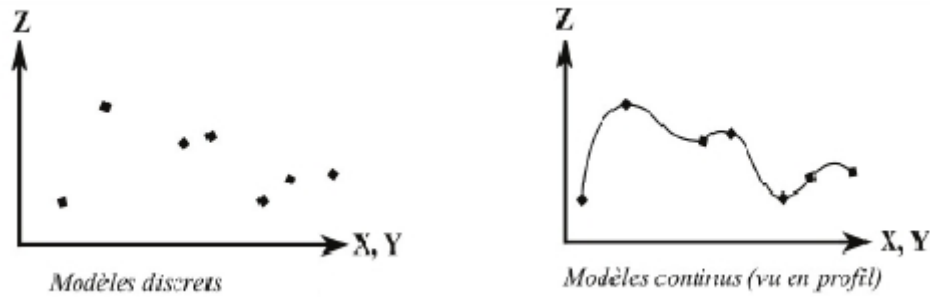


Figure III.4: levés de terrain en points régulièrement répartis sur la surface à modéliser.

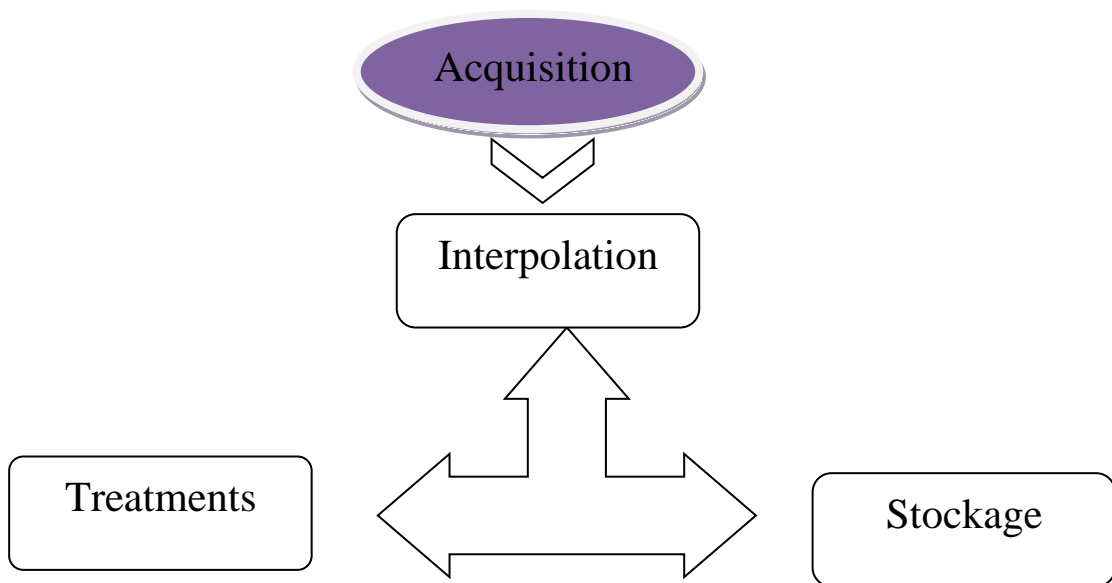


Figure III.5: Etapes de production d'un MNT

Chacune de ces techniques présentes des avantages mais également des limites. Les mesures de terrain sont très précises mais nécessitent un algorithme d'interpolation afin de générer un modèle continu, ce qui ajoute des approximations et des artéfacts d'interpolation.

III.3.3. Formats des MNT :

Une fois l'acquisition effectuée et les traitements appliqués afin d'extraire l'information de relief, les modèles numériques doivent être stockés dans un format facilement réutilisable par la suite au sein d'un SIG. Les formats de MNT les plus couramment employés sont : nuage ou grille de points, courbes de niveau, profils, (Triangular Irregular Network), et grille régulière ou non

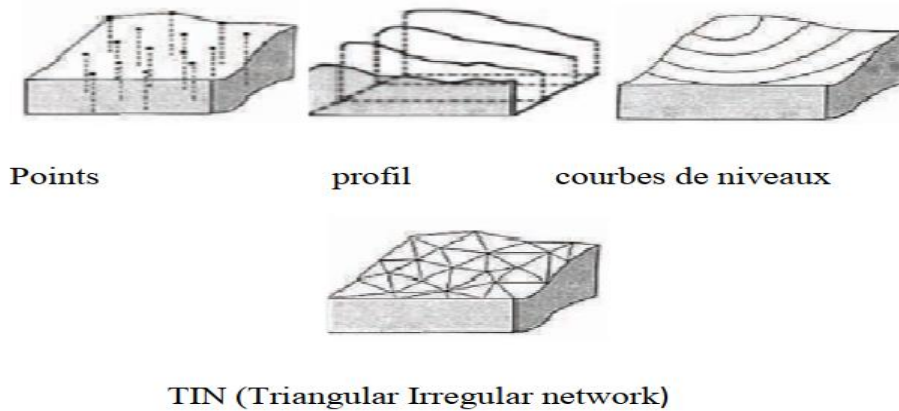


Figure III.6: Représentation des différents formats de MNT.

III.3.4. Application du MNT dans la foresterie :

Les ingénieurs forestiers utilisent les MNT pour différentes études. Ils peuvent étudier la pente du relief, l'exposition, le réseau hydrographique, déterminer le champ de visibilité du poste de vigie, directions d'écoulement des eaux, risque d'érosion et les altitudes. [10]

III.4. Présentation de logiciel de S.I.G (ArcGis10.0)

III.4.1- Présentation d'ArcGIS 10.0

ArcGIS10.0 est un logiciel de la firme ESRI, leader mondial des SIG. La figure donne un aperçu de l'organisation de l'ensemble des produits ESRI. En rouge, sont entourées les composantes que nous utilisons au cours de ce projet. La version la plus simple du logiciel Arc GIS desktop, Arc View, comprenant les applications Arc Catalog, Arc Map et Arc Toolbox ainsi que l'extension Spatial Analyste. [11]

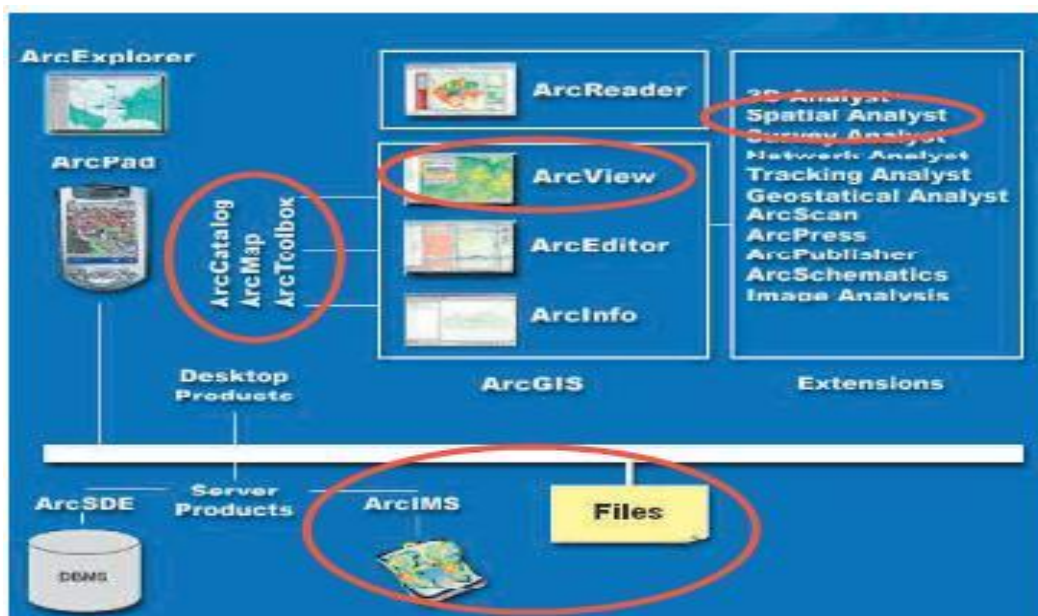


Figure III.17: Présentation d'Arc GIS 10.0 (Source: <http://www.esribelux.com/index2FR.asp>)

III.4.2. Présentation d’Arc GIS Desktop

Arc GIS Desktop (littéralement Arc GIS de bureau) comprend une suite d’applications intégrées les unes aux autres :

- A. **Arc Catalog** : il facilite l’organisation et la gestion de toutes les données SIG (cartes, jeux de données, modèles...).
- B. **Arc Map** : c’est l’application centrale d’Arc GIS Desktop. Elle se subdivise en deux interfaces : visualisation et traitement (analyse, édition...) des données géographiques dans la fenêtre data view et mise en page de cartes dans la fenêtre layoutview.
- C. **Arc Globe**: il est similaire à Arc Map ; mais il permet une visualisation 3D des données sur lesquelles vous travaillez.
- D. **Arc Toolbox**: littéralement, la « boîte à outils » d’Arc GIS, regroupe l’ensemble des outils de géo traitement utiles pour réaliser des opérations sur les données géographiques. Elle est disponible à partir des trois applications présentées ci-dessus. Un langage de programmation visuel et facile d’utilisation, pour automatiser une suite de géo traitement. En utilisant conjointement ces applications et ces interfaces, Arc GIS permet d’effectuer toutes sortes de tâches SIG, y compris la cartographie, l’analyse géographique, l’édition de données (création, mise à jour...), la gestion des données, la visualisation et Le géo traitement.

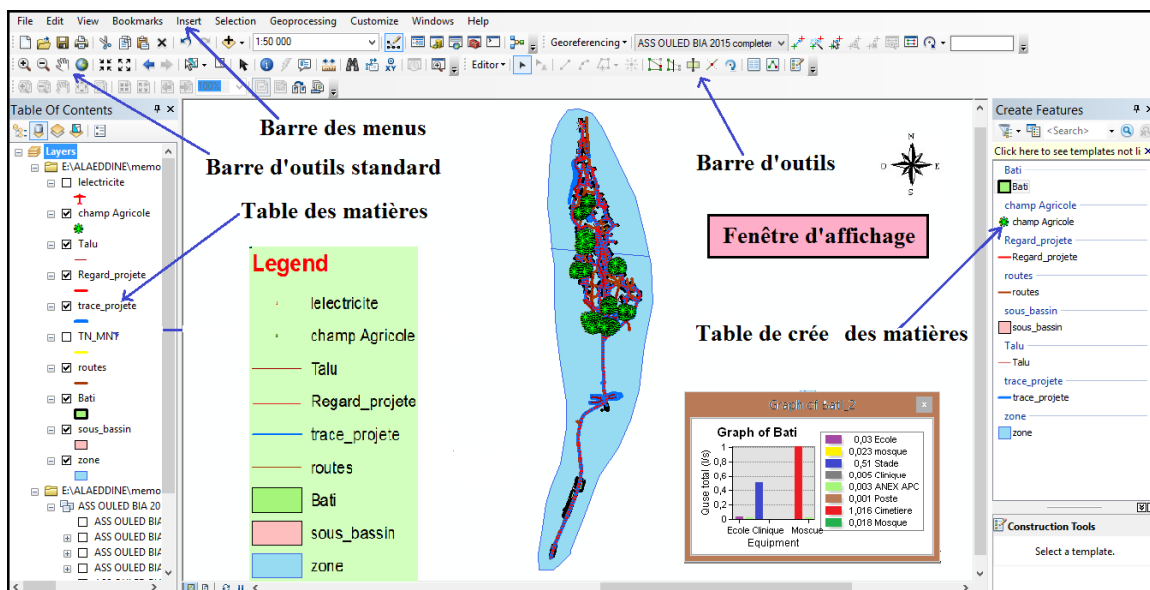


Figure III.7: L’interface de l’ArcMap

Il est disponible à trois niveaux fonctionnels, du plus simple au plus perfectionné :

- a) **Arc View** : est un outil SIG complet dédié à l’utilisation des données, la cartographie et l’analyse.
- b) **Arc Editor** : permet la création et la mise à jour avancées de données géographiques.
- c) **Arc Info** : est un outil SIG bureautique professionnel et complet, qui propose des fonctions SIG complètes et de nombreux outils de géo traitement. [12]

III.4.3. Organisation et structure des données

- Un SIG organise les informations géographiques sous forme de couche (thèmes, calques, plans...).
- Chaque couche représente un ensemble de données similaires.

III.4.4. L'information géographique

L'information géographique est la représentation d'un objet ou d'un phénomène réel ou imaginaire, présent, passé ou futur, localisé dans l'espace à un moment donné et quelles qu'en soient la dimension et l'échelle de représentation.

Géographique une double composante :

1. Une composante graphique :

- description de la forme de l'objet.
- localisation de l'objet (X, Y).

2. Une composante attributaire :

- A chaque entité spatiale correspond des informations attributaires organisées dans une table. [11]

III.4.5. Unités cartographiques**III.4.5.1. Point :**

Le point est un élément sans dimension. Sa localisation est donnée par ses coordonnées. Ce concept est référencé à des étiquettes (constituant la légende) qui permettent sa compréhension. [9]

III.4.5.2. Ligne ou segment :

Les lignes représentent les formes des objets géographiques trop étroits pour être décrits par des surfaces (ex : rue ou rivières) ou des objets linéaires qui ont une longueur mais pas de surface comme les courbes de niveau. [9]

III.4.5.3. Le polygone ou surface ou zone :

La surface ou zone est l'espace limité par une ligne fermée. Du point de vue cartographique, c'est un élément à deux dimensions. La localisation d'une surface s'exprime par les coordonnées de son centre de gravité, d'une référence interne ou des sommets du polygone qui forme ses limites. [9]

III.4.5.4. Modes de représentation :

Il s'agit ici du mode de représentation des données ci-dessus. Deux modes de représentations sont possibles : il s'agit des modes vectoriel et matriciel.

III.4.5.4.1 Vectoriel :

Les objets sont représentés par des objets mathématiques élémentaires. Ce sont les points, les lignes et les polygones. Les SIG travaillent de façon privilégiée en mode vecteur. Ce mode ne repose pas sur la décomposition de l'image en cellules élémentaires, mais sur la décomposition de son contenu en traits caractéristiques et éléments principaux. [9]

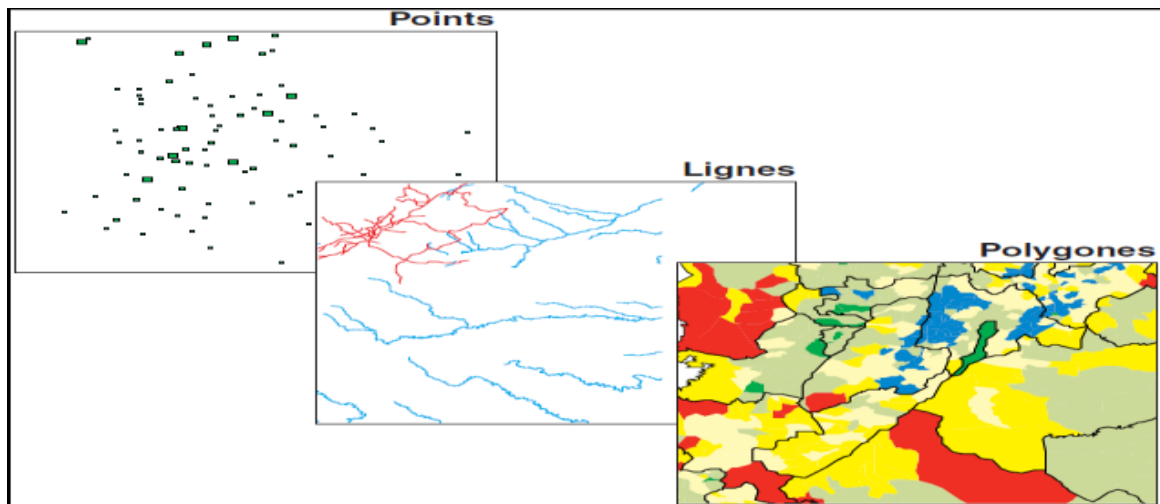


Figure III.8: Exemple des données vectorielles

III.4.5.4.2 Matriciel :

Il s'agit d'une image, d'un plan ou d'une photo numérisés et affichés dans le SIG en tant qu'image. Le mode matriciel est appelé ainsi parce que l'on découpe l'image à l'aide de grilles régulières ou encore matrice. Construite sur une partition régulière, souvent en carrés dits pixels, l'image est rendue par la vision globale des surfaces élémentaires juxtaposées, comme un écran d'ordinateur ou de télévision. Le mode raster est par exemple celui des informations reçues des satellites ou des caméras numériques. C'est aussi le cas de données obtenues par numérisation.

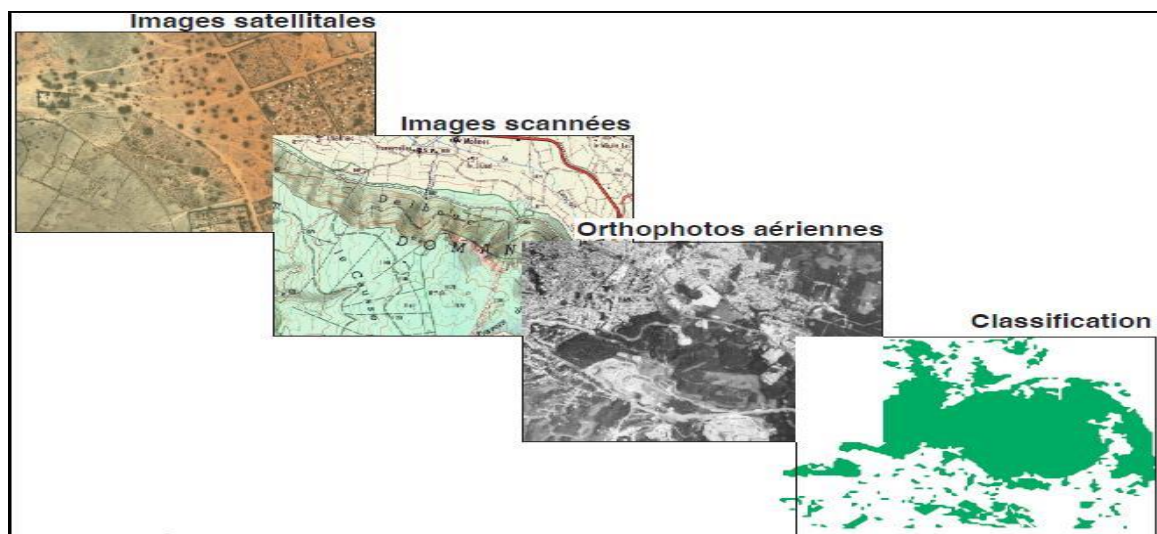


Figure III.9: Exemple des données rasters

Un système de coordonnées terrestres (sphérique ou projectif) permet de référencer les objets dans l'espace et de positionner l'ensemble des objets les uns par rapport aux autres. Les objets sont généralement organisés en couches, chaque couche rassemblant l'ensemble des objets homogènes (bâti, rivières, voirie, parcelles, etc.). [9]

III.4.5.5 Géo référencement:

Le géo référencement est utile pour positionner correctement dans l'espace, un fichier de type raster, non géo référencé, par exemple une carte papier ou une image aérienne.

- Pour notre projet le système de coordonnées utilisé est WGS_1984_UTM_Zone_31N. [9]

III.4.6. La gestion des réseaux assistée du logiciel Arc Map

Afin d'effectuer une gestion assistée par le SIG, des documents « mxd » ont été élaborés. Ce type de fichier constitue avec le « mxt » les deux formats utilisés par Arc Map :

- **Le mxd** : permet la configuration d'un document en choisissant les couches d'informations nécessaires à une thématique et les conditions de leur représentation (mode d'affichage, échelles d'affichage de la couche,...).
- **Le mxt** : est le fichier de mise en page des informations. Il permet la configuration des informations afin que celles-ci soient éditées. Voyons dès à présent les travaux réalisés pour permettre la gestion des réseaux par les documents « mxd ». [12]

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les généralités sur les SIG qui confirme que le système d'information géographique est une science, construite sur la connaissance pluridisciplinaires (la géographie, la cartographie, l'informatique, les mathématiques, le traitement d'image etc.) et elle inclue plusieurs technologies, elle fait appel à des composantes ; matériels, logiciels, données, moyens humains, afin de pouvoir traiter les données (acquise de différents manières), et extraire des informations.

Les systèmes d'information géographique sont des outils d'aide à la décision extrêmement puissants. Dans cette partie, nous avons présenté certains des outils et logiciels actuels utilisés par les professionnels du domaine des SIG, en particulier Arc Gis et l'un des meilleurs outils puissants en termes de fonctionnalités et de durabilité.

Chapitre IV

Modélisation et simulation numérique par Modflow

**ChapitreIV
Modélisation et simulation numérique par Modflow**

Introduction :

En vue de réaliser les objectifs énoncés aux chapitres précédents, il avait été initialementProposé de combiner les résultats de simulations numériques à des données ce chapitre présente tout d'abord le logiciel utilisé (MODFLOW) avant d'expliquer brièvement les travaux de simulation des différents cas qu'on a pu réaliser

IV .1. Définition

MODFLOW est un programme de modélisation des eaux souterraines. Il peut être regroupé et amélioré en fonction des applications pratiques. En raison de sa structure et de son format de données fixes, MODFLOW peut être intégré à la technologie des Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour la gestion des ressources en eau.

IV.2. Objectif de la modélisation

La modélisation numérique est au cœur des sciences appliquées et joue un rôle fondamental dans presque toutes les disciplines des sciences et du génie. La modélisation ou simulation numérique, consiste à représenter un phénomène physique par un modèle mathématique sous forme de très grands systèmes d'équations (de l'ordre du million) qui sont résolues à l'aide de l'ordinateur. [14].

Les modèles numériques 3D sont largement utilisés en hydrogéologie [15]. Ils permettent de comprendre et de caractériser les écoulements souterrains, les transports de solutés, ou encore les bilans hydrologiques des systèmes souterrains [16]. Souvent utilisés comme outil de prédiction de l'évolution d'un système, ils sont également utiles pour identifier les paramètres prédominants d'un hydro- système et améliorer la caractérisation du fonctionnement du système, de sa sensibilité ou de sa vulnérabilité.

IV.3. Modèle mathématique

Le système de l'échange entre les eaux de surface et les eaux souterraines peut être un groupe de puits profonds, des étangs rectangulaires ou simplement de l'écoulement extérieur après des lâchers de barrages, ou une combinaison de deux types de recharge en même temps. Le type et l'emplacement des ouvrages de recharge dépendent des propriétés hydrauliques du site aquifère

IV.3.1. Écoulement de surface

Les écoulements de surface sont régis par les équations de Saint-Venant

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial X} = \mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_n \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/S)}{\partial X} + \mathbf{gS} \frac{\partial h}{\partial X} = \mathbf{g} \cdot \mathbf{S} \cdot (\mathbf{i} - \mathbf{j}) \end{array} \right. \quad \text{IV.1}$$

Les inconnues de ce système sont le débit $Q(x, t)$ et la surface mouillée $S(x, t)$.

Avec :

Q : Le débit (m^3/s) ;

S : La surface mouillée (m^2) ;

h : La hauteur de l'eau dans la section (m) ;

i : La pente du lit de la rivière ;

$J = Q^2 \cdot n^2 / (S^2 \cdot R^{4/3})$: La pente de la surface libre de l'eau dans la rivière

IV.3.2. Écoulement souterrain

L'écoulement dans un milieu poreux saturé est régi par l'équation de la diffusivité, obtenue à partir de la combinaison de l'équation de la continuité (principe de la conservation de la masse) et de la loi expérimentale de Darcy. Dans l'analyse les puits de recharge sont considérés comme sources. L'équation de diffusivité est exprimée par l'équation suivante :

Avec:

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = W + S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{IV.2}$$

- ☒ K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} : sont les conductivités hydrauliques (m/s)
- ☒ **h** : est la charge hydraulique (m) .
- ☒ **W**: est le terme source ou la perte par volume unitaire (l/s).
- ☒ **S_s**: est le coefficient spécifique d'emménagement (l/s).
- ☒ **t**: est le temps (s).

IV.4. Présentation du logiciel MODFLOW

MODFLOW (Three-Dimensional Ground-Water Flow model) est un modèle numérique à trois dimensions basé sur la méthode des différences finies, est utilisé pour simuler les écoulements tridimensionnels des eaux souterraines. MODFLOW a été développé par l'U.S. Geological Survey. Ce code a été rendu public en 1984. Il est devenu standard dans la modélisation des écoulements souterrains. Il a été appliqué à de nombreux systèmes hydrogéologiques : des aquifères poreux, des aquifères karstiques, des nappes alluviales, ou des aquifères complexes multicouches ; dans le cadre de problématiques variées: les échanges nappe-rivière, l'influence du climat sur les hydro systèmes, les problèmes de transferts de polluants et de contamination des aquifères ou encore l'impact de pompage sur les écoulements souterrains [14]. Le code Modflow 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, pour des aquifères libres, captifs ou mixtes selon l'équation de diffusivité (IV.3) [16]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = W + S_s \frac{\partial h}{\partial t} \text{IV.3}$$

Où :

- ☒ K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} : sont les conductivités hydrauliques le long des axes, x, y et z en (m/s).
- ☒ h : est la charge hydraulique en (m) .
- ☒ W : est le terme source ou perte par unité de volume en (l/s) .
- ☒ S_s : est le coefficient d'emménagement spécifique (l/s). En nappe libre, en intégrant cette équation sur la verticale, le coefficient d'emménagement S est remplacé par la porosité de drainage
- ☒ t : est le temps en (s)

La conductivité hydraulique, le coefficient d'emménagement spécifique et la porosité de drainage constituent les paramètres de base du modèle, étant des fonctions de l'espace :

$S_s = S_s(x, y, z), K_{xx} = K_{xx}(x, y, z)$ etc. Le terme W peut être une fonction de l'espace et du temps $W(x, y, z, t)$.

Les méthodes numériques sont alors utilisées pour obtenir une solution numérique approximée. Le code Modflow résout l'équation de diffusivité en utilisant l'approximation des différences finies. Pour ce faire, le modèle est discrétisé dans un système cartésien selon un maillage rectangulaire aux nœuds duquel l'équation est résolue. Basée sur le principe de continuité des flux où les flux entrants et sortants de la cellule doivent être égaux à la variation de stockage de la cellule, la solution de l'équation de diffusivité doit satisfaire les conditions aux limites du modèle et les conditions initiales.

IV.5. Discrétisation du modèle

Le modèle est replacé dans un environnement fini à trois dimensions et discrétisé dans le temps et dans l'espace. Le maillage est rectangulaire dans le plan horizontal voire Figure (III-1). Dans le plan vertical, le modèle est discrétisé en niveaux correspondant généralement aux différentes couches aquifères. Les nœuds de la grille sont centrés sur les cellules dans lesquelles les propriétés du milieu sont considérées homogènes. L'équation de diffusivité est résolue aux nœuds de la grille par itérations successives jusqu'à ce que les changements de charge hydraulique convergent.

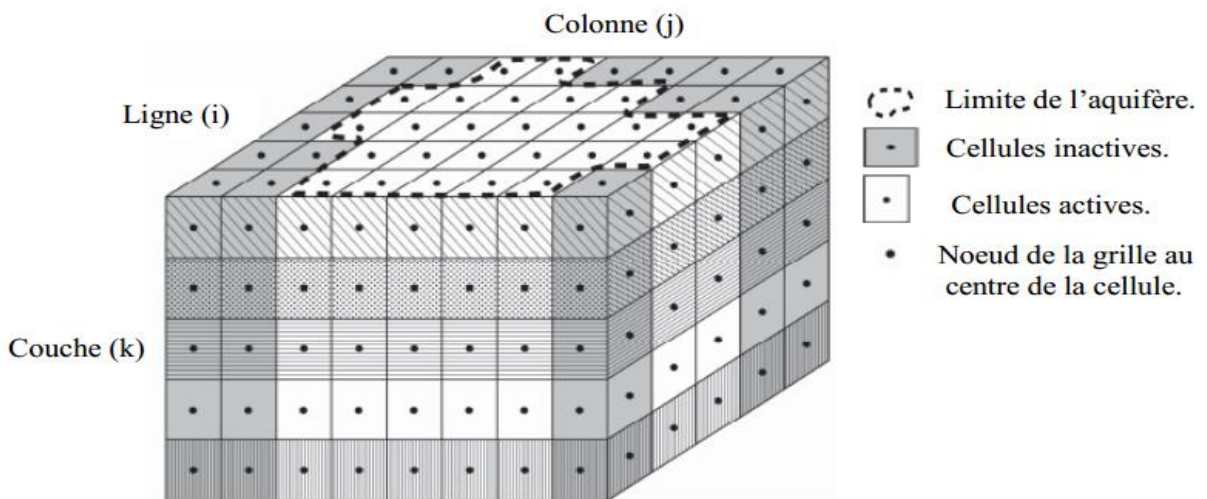


Figure IV.1: Discrétisation spatiale d'un aquifère

IV.5.1. Fonctionnement du logiciel

Si on prend une cellule i, j, k entouré par six autres cellules telle que le montre la figure (IV.1).

L'équation de Darcy décrit le débit entrant dans la cellule (i, j, k) provenant de $(i, j-1, k)$ est donné par:

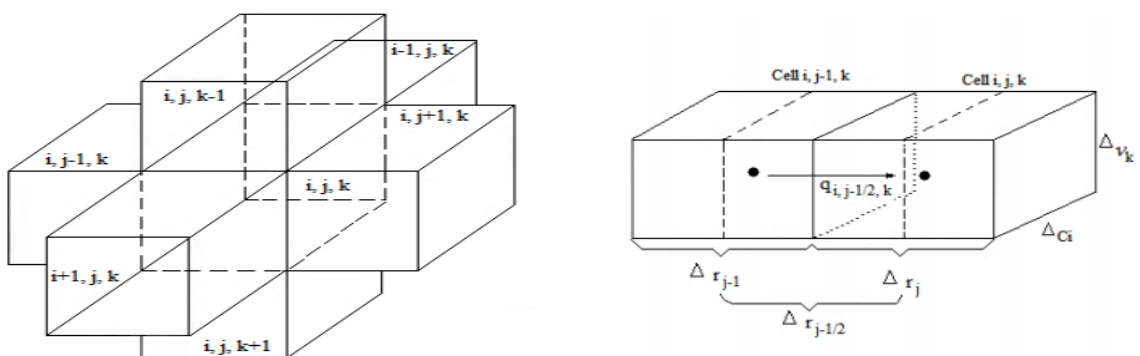


Figure IV.1a: Cellule (i, j, k) et les indices pour les six cellules adjacentes.

Figure IV.1b: Écoulement dans la cellule (i, j, k) provenant de la cellule $(i, j-1, k)$

$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} + \Delta V_k \frac{(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j-1/2}} \text{IV.4}$$

Ou:

- $h_{i,j-1,k}$: Sont les charges dans les centres des cellules (i,j,k) et (i,j-1,k);
- $q_{i,j-1/2,k}$: Est le débit à travers la face commune des cellules (i,j,k) et (i,j-1,k) [m³/s].
- $KR_{i,j-1/2,k}$: Est la conductivité hydraulique entre les centres des cellules (i,j,k) et (i,j-1,k) [m/s].
- $\Delta C_i \cdot \Delta V$: Est la surface de la cellule, perpendiculaire sur la direction de l'écoulement
- $\Delta r_{j-1/2}$: Est la distance entre les noyaux des cellules (i,j,k) et (i,j-1,k) [m].

L'équation (III-3), permet de calculer de la même façon les débits entrant par les autres faces provenant des cinq autres cellules adjacentes.

MODFLOW définit la conductance (III-5), comme étant le produit de la conductivité hydraulique et de la surface de la section d'écoulement, divisé par la distance entre les noyaux

$$CR_{i,j-1/2,k} = \frac{KR_{i,j-1/2,k} \times \Delta C_i \times \Delta V_k}{\Delta r_{i,j-1/2}} \text{ [m}^2\text{/s]} \quad \text{(IV.5)}$$

L'équation de continuité peut être écrite à deux moments de temps t_m et t_{m-1} comme donnée par l'équation suivante (IV-6):

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-\frac{1}{2},k} (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+\frac{1}{2},k} (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i-\frac{1}{2},j,k} (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + \\ & CC_{i+\frac{1}{2},j,k} (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k-1/2} (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i,j,k+1/2} (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) + P_{i,j,k} h_{i,j,k} + \\ & Q_{i,j,k} = SS_{i,j,k} (\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \quad \text{(IV.6)} \end{aligned}$$

Où :

- **CR**, **CC** et **CV** : Représentent les conductances (m²/s).
- **P** : Est la somme des sources dépendantes de la charge (m²/s).
- **Q**: est la somme des sources indépendantes de la charge (m³/s).
- **h** : Est la charge (m) .
- **SS** : Est le coefficient d'emménagement spécifique (l/m).

En écrivant l'équation (IV-6) par cellule, nous arrivons à un système avec « n » équations et « n » inconnues.

La méthode utilisée par le modèle, pour la résolution des systèmes d'équations produits, est une méthode itérative, elle résout le système d'équations matriciel avec une matrice symétrique. [13]

IV.6. Discrétisation dans le temps

La sélection du pas de temps est une étape critique dans l'élaboration du modèle car la discrétisation temporelle influence fortement les résultats du calcul. Dans MODFLOW, en régime transitoire, le temps est subdivisé en un ensemble de périodes de contraintes (Stress période) de durée choisie pendant lesquelles les conditions sont considérées comme constantes. Le régime transitoire correspondant à une succession d'états pseudo permanents. L'utilisation de ces différentes périodes va permettre de modifier certains paramètres au cours de la modélisation (Prélèvements, Recharge...). Idéalement, l'utilisation de pas de temps court est recommandée. Un découpage de la durée de la simulation selon les variations saisonnières, représentant les périodes de hautes eaux et de basses eaux, correspond à la solution la plus satisfaisante pour rendre compte des différents états des nappes.[13]

IV.7. 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.7.1. 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.7.2. 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.8. Modèle transitoire et stationnaire

Modflow permet de simuler les écoulements souterrains dans des conditions stationnaires ou transitoires.

Le régime permanent représente une tranche de temps où les caractéristiques du modèle sont stationnaires. Lorsque l'on fait tourner le modèle, ce n'est pas pour une période donnée mais pour des conditions données. Le modèle calcule un état d'équilibre du système. Ce mode est généralement utilisé pour la phase de calibration pour obtenir un jeu de paramètres optimisés.

Le régime transitoire utilise, généralement, les paramètres optimisés pour simuler des situations évoluant au cours du temps. On peut affiner le modèle mais en régime transitoire on définit généralement les paramètres temporels du système comme les coefficients de stockage des aquifères.

IV.9. Modèle conceptuel

Pour développer le modèle, les étapes suivantes doivent être suivies:

IV.9.1. Le maillage

Un maillage est la discrétisation spatiale d'une géométrie d'un domaine par des éléments est de procéder à une simplification d'un système par un modèle dans le but d'une simulation de calcul ou de représentation graphique.

La zone à modéliser est d'abord extraite et « découpée » à partir d'un MNT dans un logiciel SIG. La taille des cellules doit être suffisamment réduite pour représenter la variabilité spatiale des paramètres qui y sont liés. En revanche, un maillage trop serré augmente erreurs numériques. Les données disponibles, les conditions aux limites, Numériquement, le maillage est converti en une matrice de calcul où chaque nœud (ou point) représente une cellule de sol .

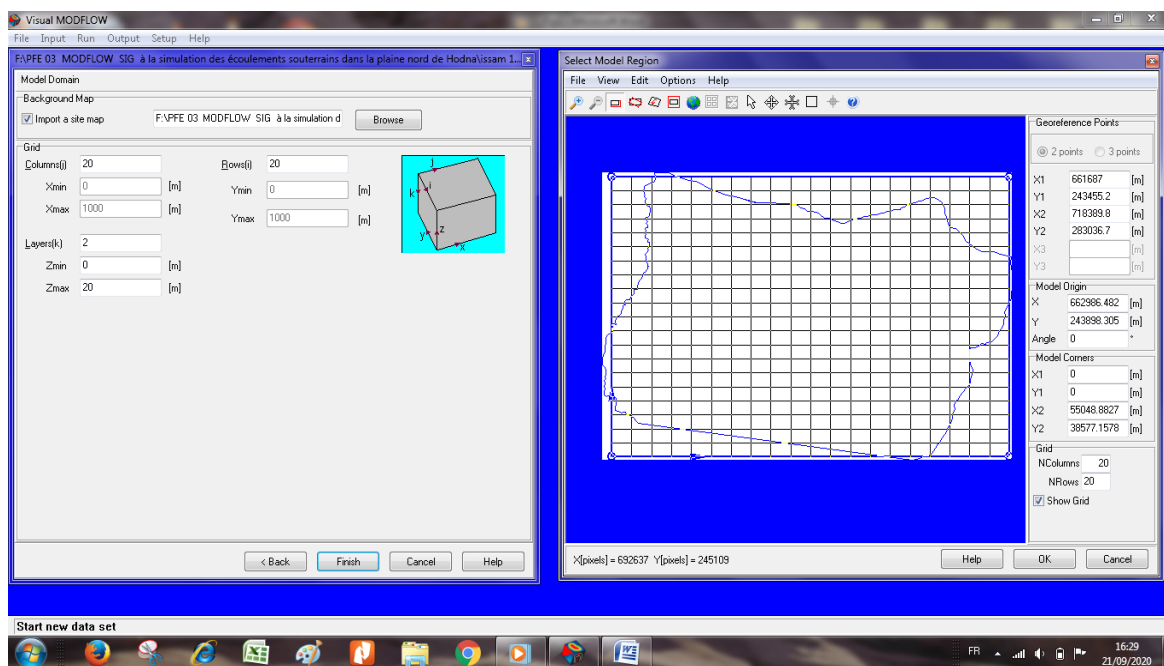


Figure IV. 2: Construction de la géométrie et du maillage

IV.9.2. Introduction des propriétés du matériau utilisé

Modflow exige avant d'exécuter la simulation d'introduire quelques paramètres qui sont la perméabilité, coefficient d'emmagasinement et la porosité. Dans Modflow, les caractéristiques de chaque cellule sont considérées homogènes. Les propriétés hydrauliques à l'échelle de la cellule sont souvent approximées par des valeurs moyennes [14].

IV.9.3. Introduction des forages et pompage

Dans le modèle, cinq puits sont utilisés pour étudier le mouvement des eaux souterraines et sa direction d'écoulement dans le substrat. Des manomètres sont également insérés le long de la surface du niveau d'eau pour surveiller le niveau d'eau dans différentes zones de la nappe phréatique

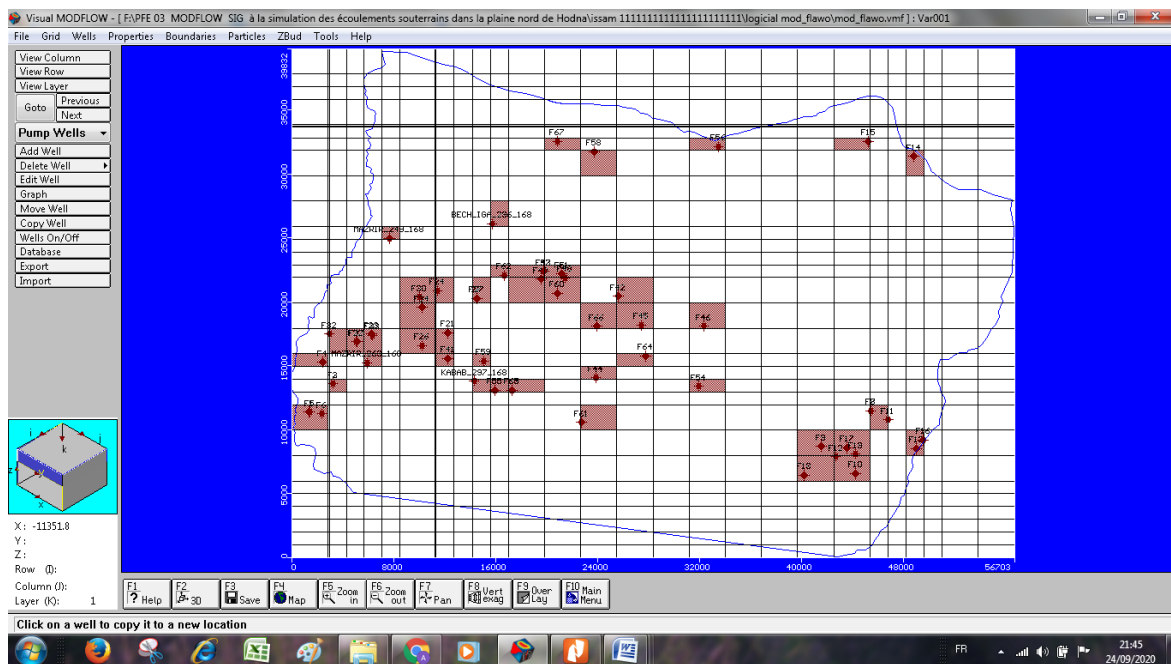


Figure VI-3: position des forages

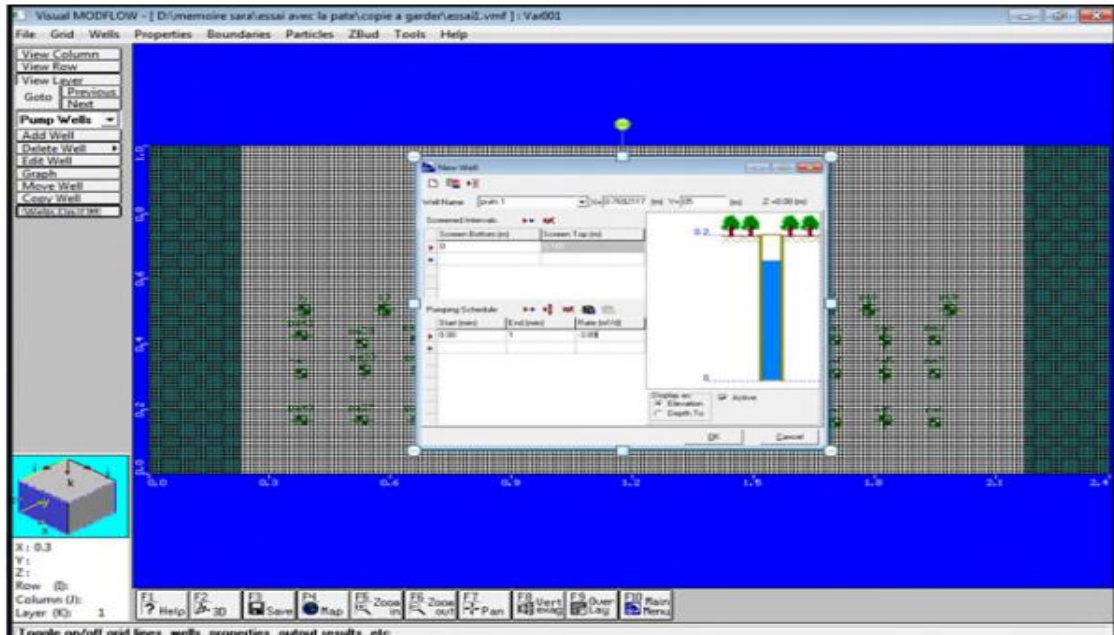


Figure IV. 4: piézomètres

IV.9.4. Introduction des conditions initiales et conditions aux limites

Les limites du modèle peuvent être physiques ou hydrauliques. Les limites physiques sont facilement identifiables. Elles correspondent à de grands ensembles d'eau de surface comme une mer ou un lac ; il peut s'agir également de structures imperméables comme une faille, un substratum imperméable affleurant ou un corps argileux. Les limites hydrauliques peuvent être invisibles. Elles correspondent souvent à des lignes de partage des eaux ou des lignes de flux.

D'une manière générale, les frontières d'un modèle hydrogéologique doivent être telles que les conditions aux limites qui y sont imposées n'influencent pas ou peu les résultats

IV.9.4.1. Conditions aux limites

Les limites du modèle peuvent être physiques ou hydrauliques. Les limites physiques peuvent être facilement identifiées. Correspondent à de grandes masses d'eau de surface comme la mer ou le lac; Ils peuvent également être des structures imperméables Tout comme l'inconvénient, le substrat rocheux est imperméable à l'écoulement ou à un corps d'argile. Les limites hydrauliques peuvent ne pas être visibles. Souvent, ils correspondent à des lignes de partage des eaux ou à des lignes d'écoulement.

En général, les limites du modèle hydrogéologique doivent être telles que les conditions aux limites qui lui sont imposées ont peu ou pas d'influence sur les résultats. Ainsi, les frontières choisies pour le modèle nord plaine de Hodna correspondent aux vraies frontières physiques du champ étudié. Toutes les cellules réseau qui dépassent ces limites ont été désactivées.

- ✚ **La limite nord:** Cette frontière est constituée d'une chaîne de montagnes (Atlas al-Tali). Zéro charge. Cette limitation concerne les réseaux.
- ✚ **La limite ouest et est:** les affleurements adjacents à la fois à la rive droite et à ceux de la rive gauche de la nappe phréatique nord plaine de Hodna sont considérés comme la limite du débit nul. Il est pratiquement perméable à des formations géologiques complexes.
- ✚ **limite sud:** la côte du Hodna est considérée comme la limite de débit nul.

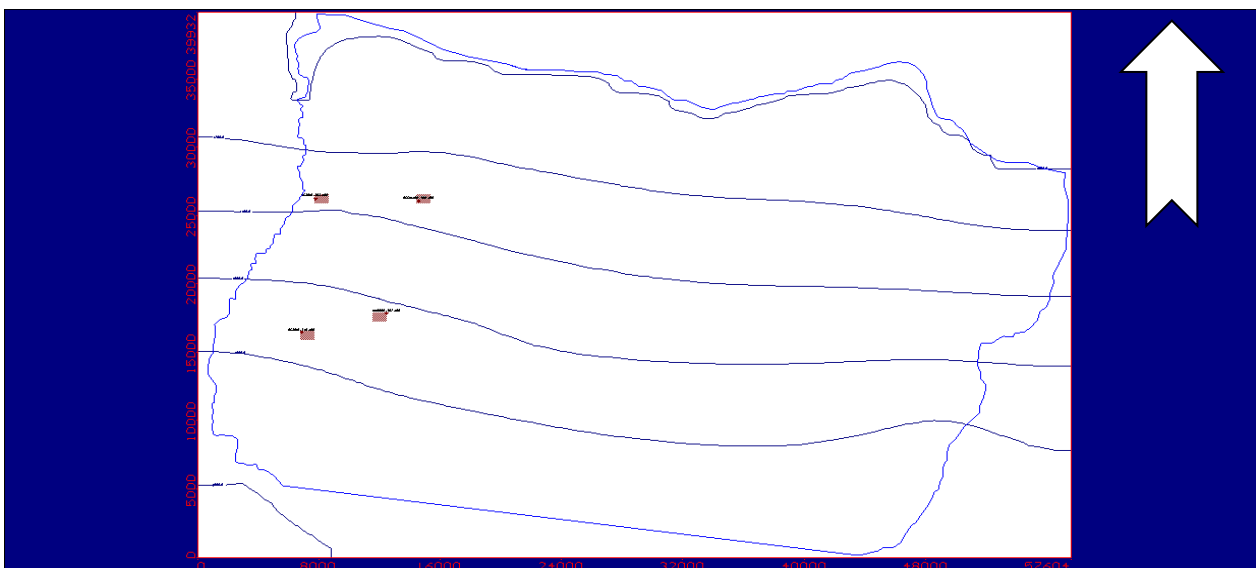


Figure IV-5 :Carte piézométrique simulée au régime permanent.

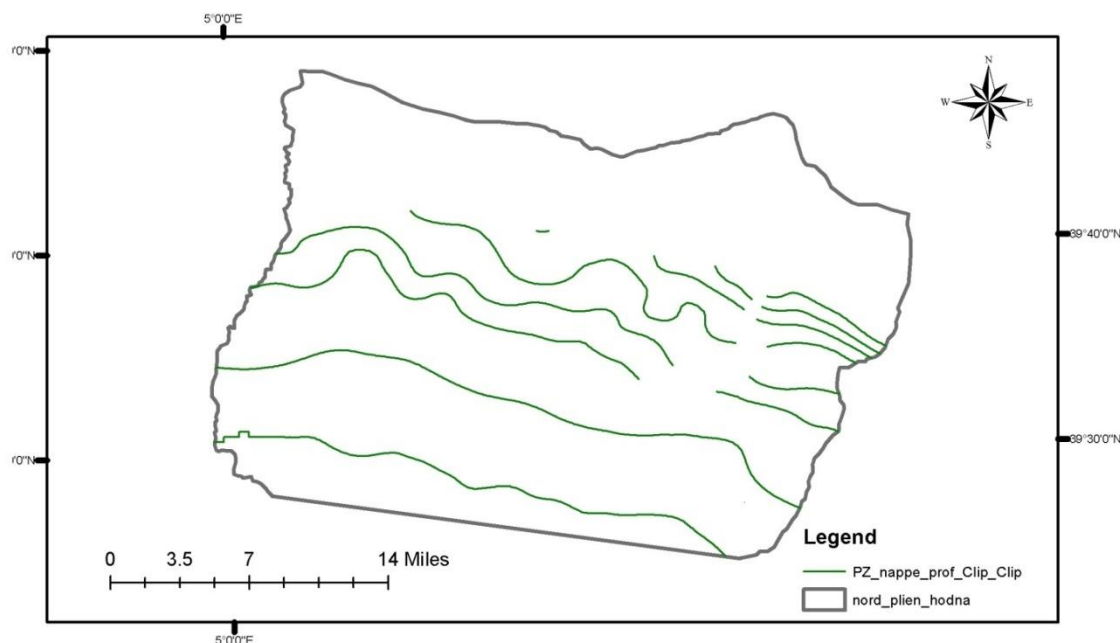


Figure IV-6 :Carte piézométrique en nappe profondeur simulée régime permanent.

IV.9.4.2. Conditions initiales

Pour faire tourner le modèle, MODFLOW requiert des conditions initiales de charge hydraulique. En cas de régime permanent le modèle nécessite une bonne approximation des charges hydrauliques initiales par contre pour un régime transitoire MODFLOW permet l'importation de résultats de simulation en régime permanent comme charges initiales en régime transitoires [14]

IV.9.5. La recharge

La recharge fait partie du terme puits/source de l'équation générale de l'écoulement. Il permet d'intégrer l'apport théorique des précipitations dans la modélisation. La détermination de la recharge s'appuie sur les chroniques de pluviométrie et d'évapotranspiration développée au chapitre (I) au pas de temps mensuel. Les pluies efficaces ont été calculées en réalisant un bilan entre précipitation et évapotranspiration. Les valeurs de pluie efficace ont servi de base pour l'application des valeurs de recharge sur les zones d'affleurement identifiées comme des aires potentielles d'alimentation et de mise en charge.

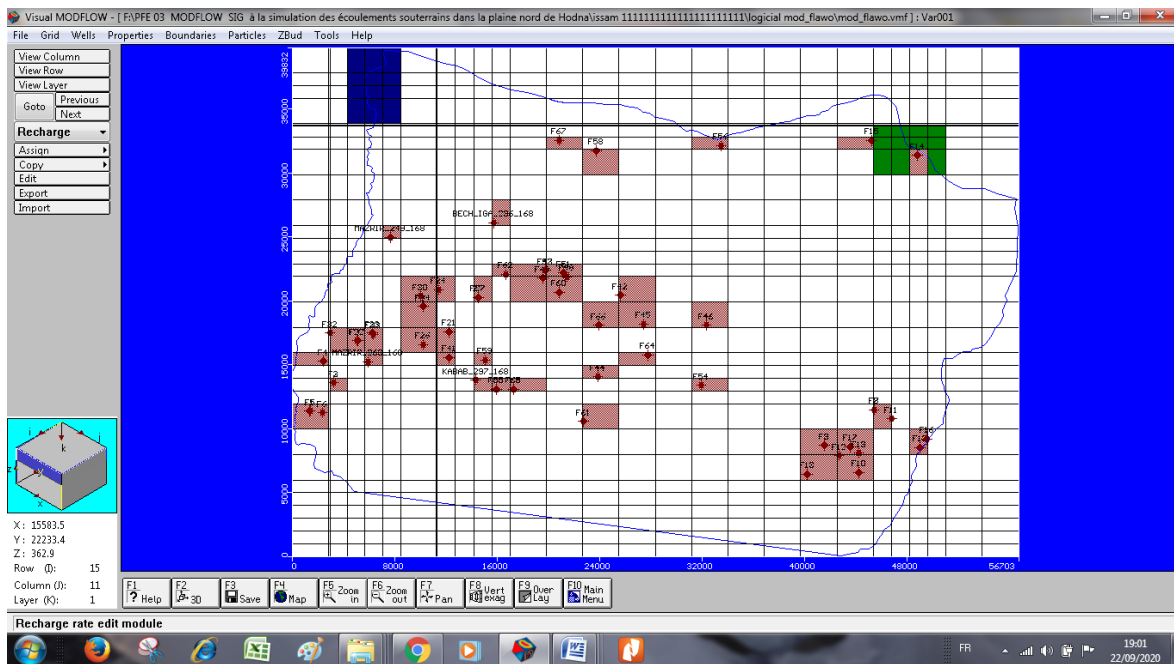


Figure IV. 7: Zones de recharge

IV.9.6. Simulation en régime permanent

Après avoir entré toutes les données nécessaires dans le formulaire. Étape de la simulation en régime permanent a été réalisée à partir des données (échantillons, recharge, Frais initiaux et points de contrôle) ces dernières années, la plus grande période au cours de laquelle beaucoup d'informations étaient disponibles. Cette première étape de modélisation comporte plusieurs objectifs:

- ✚ Assurer le bon fonctionnement du modèle après les ajustements apportés à la géométrie dans la zone d'étude.
- ✚ Copiez le plus possible le comportement de la nappe phréatique;
- ✚ Ajustez les paramètres hydrodynamiques.

En raison de la grande exploitation de l'aquifère nord plaine de Hodna, cela n'a pas pu être fait. Considérons un système permanent au sein du complexe aquifère. le système correspondra toujours à l'état initial du système avant tout retrait de données. C'est très fragmenté.

Bien qu'une comparaison entre un système semi-stable (modélisation) et non constante restante (valeurs observées) Résumé, cette étape permet une première évaluation de formulaire avant de passer au système de transition.

Après avoir tourné le modèle dans un état stable, des cartes de manomètre sont obtenues. Montré en chiffres. La carte piézométrique obtenue par Modflow est similaire à la carte de base mesurée sur Terre. Le débit est généralement vers le sud et l'eau provient de la région montagneuse (La chaîne Atlas Al-Tali), et il se réunit en direction de la région de Shatt el-Hodna.

IV.9.6.1. Cartes piézométriques restituées

La piézométrie simulée est présentée ci-après, en comparaison avec la carte piézométrique établie à partir des données d'observation.

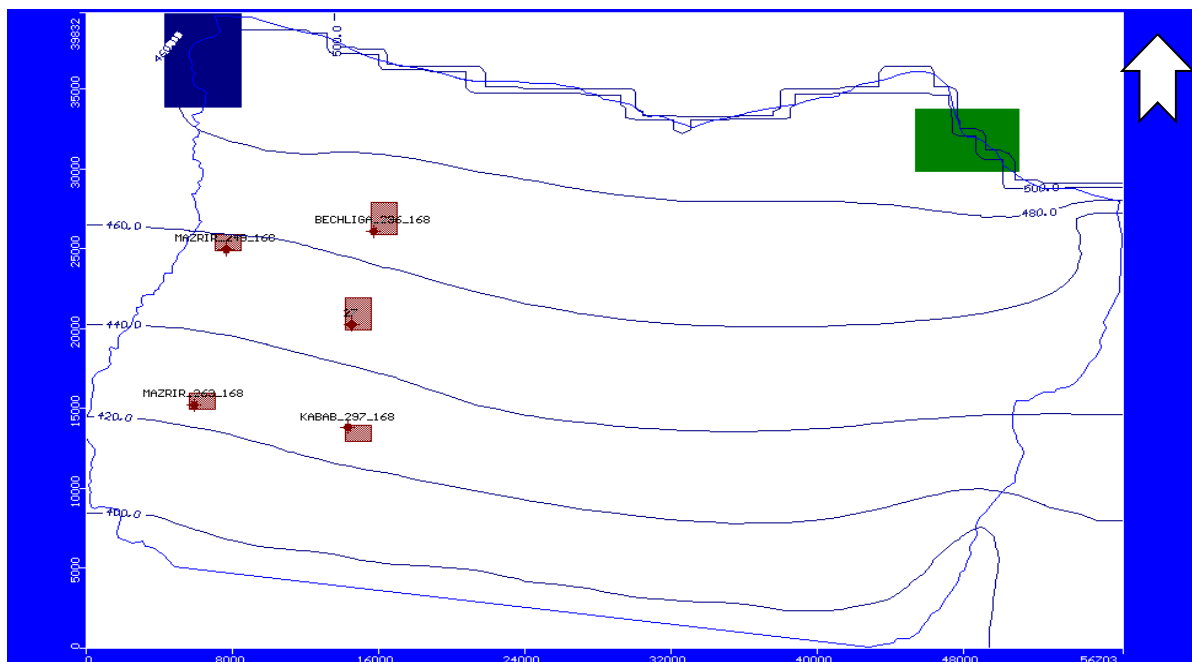


Figure IV.8: Carte piézométrique

IV.9.6.2. Calage

Cette étape est réalisée en ajustant les paramètres du modèle un à un afin d'aboutir à la meilleure correspondance entre les données observées et les données simulées. Dans cette présente étude, le paramètre que l'on peut utiliser dans cette étape est la perméabilité du sol.

IV.10. Résultats de la modélisation

IV.10.1. Préparation du modèle

Le formulaire nécessite une base de données étendue. La plupart des paramètres du modèle doivent être spécifiés pour chaque réseau de modèles. Lors de la création du modèle, créez un modèle d'eau souterraine en choisissant Nouveau modèle dans le menu Fichier.

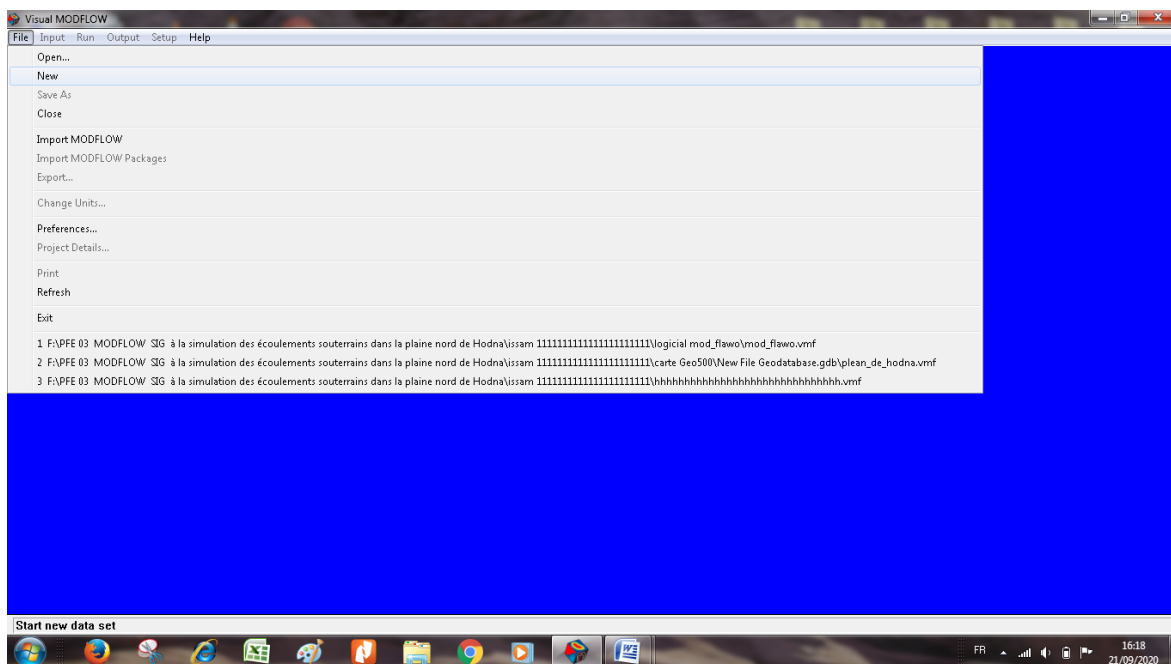


Figure IV .9:Créer un nouveau projet

Étape 2: définir les données du modèle

La deuxième étape de l'exécution d'une simulation d'écoulement consiste à créer une grille de modèle (maillage), à définir les conditions aux limites et à définir les paramètres de modèle pour la grille de modèle. MODFLOW nécessite l'utilisation d'unités cohérentes tout au long du processus de modélisation. Par exemple, si vous utilisez des unités de longueur [L] de mètres et de temps [T] d'unités de secondes, la conductivité hydraulique sera exprimée en unités de [m / s], les débits de pompe seront des unités de [m ' / s] et les dispersants seront des unités de [m].**Figure IV.10**

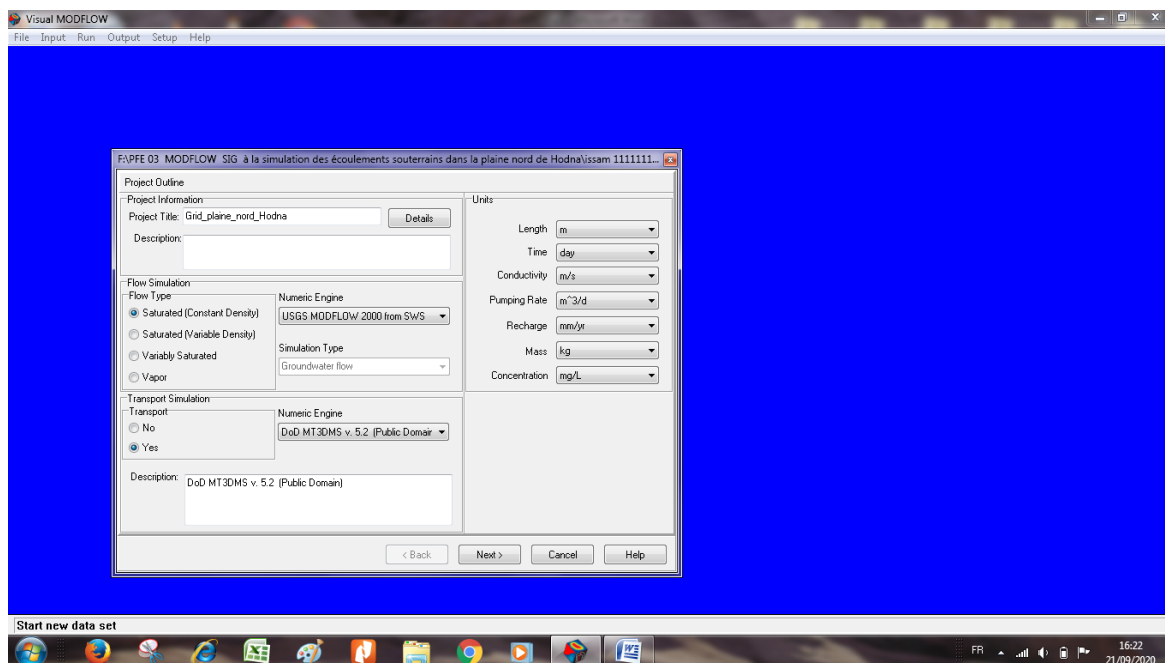


Figure IV.10 :fixés les unités et les paramètres de modèle

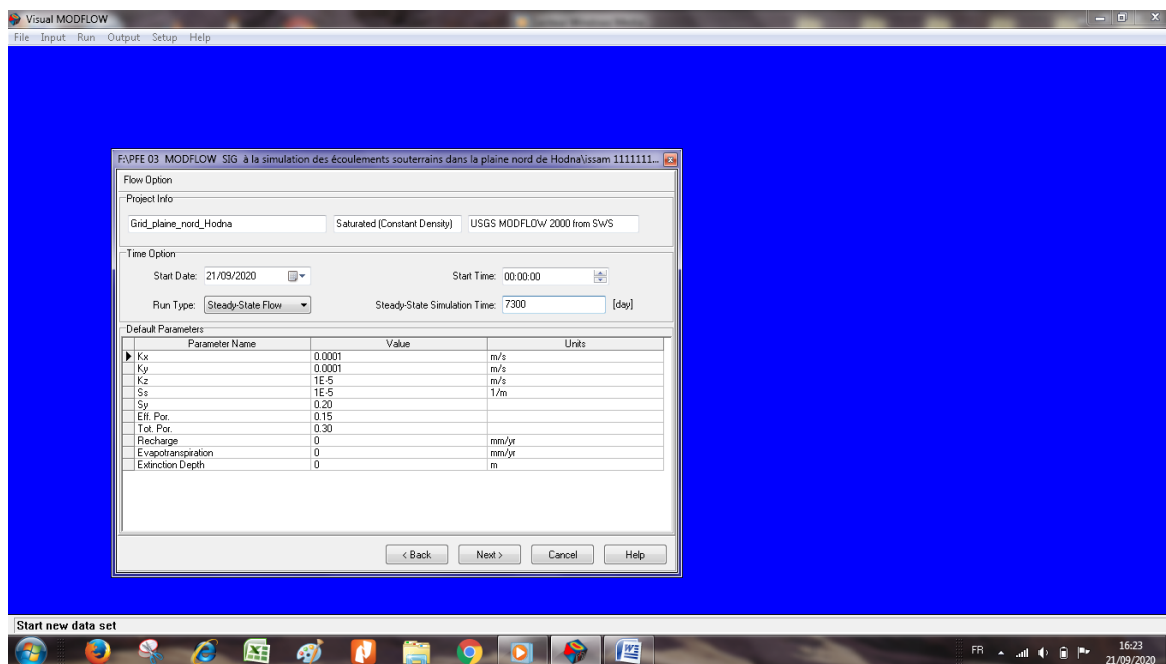


Figure IV .11 :fixés le temps de modèle

Dans MODFLOW, le système aquifère est remplacé par un domaine séparé constitué d'un ensemble de nœuds finis associés et de blocs de différence (cellules). Le réseau ganglionnaire forme le cadre du modèle numérique. Les unités hydrostatographiques peuvent être représentées par une ou plusieurs couches modulaires. L'épaisseur de chaque cellule typique et la largeur de chaque colonne et description seraient variables. Les emplacements des cellules sont décrits en termes de colonnes, de lignes et de couches. MODFLOW utilise la notation d'index [J, I, K] pour localiser les cellules.

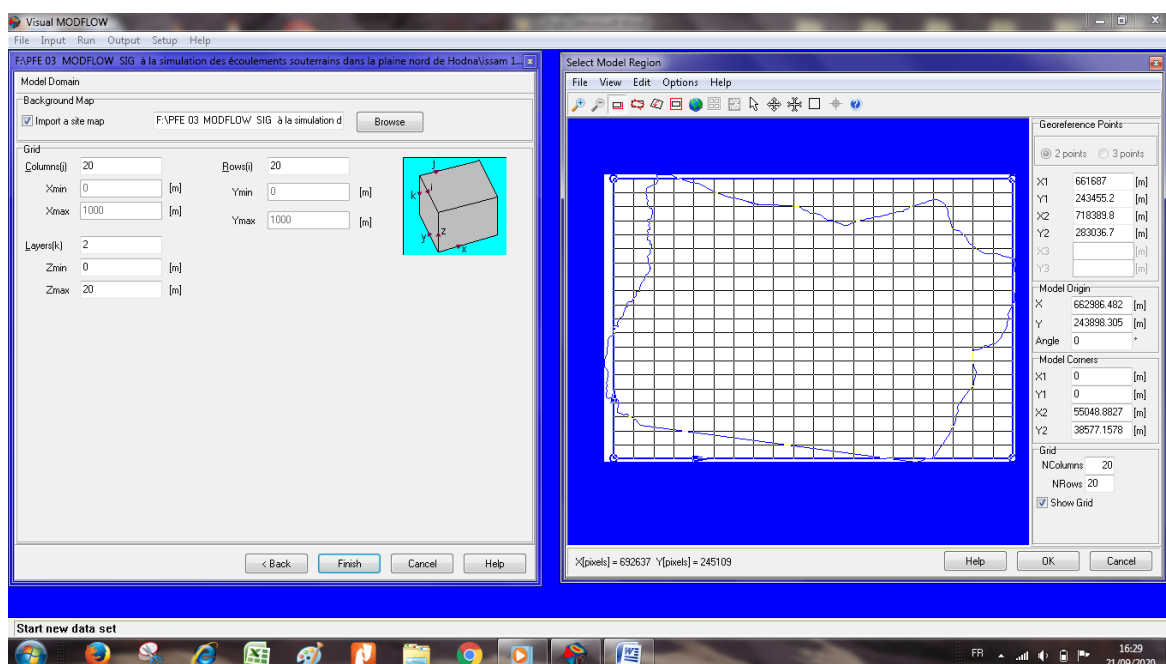


Figure IV .13 :Construction de la géométrie et du maillage

IV.10.2. Travailler sur un modèle

Les données nécessaires à l'importation sont préparées sous forme selon un certain nombre d'étapes

- **GRID** : Le modèle couvre toute la zone. L'ensemble de la zone d'étude est représenté dans une grille de référence. **Figure IV .14**

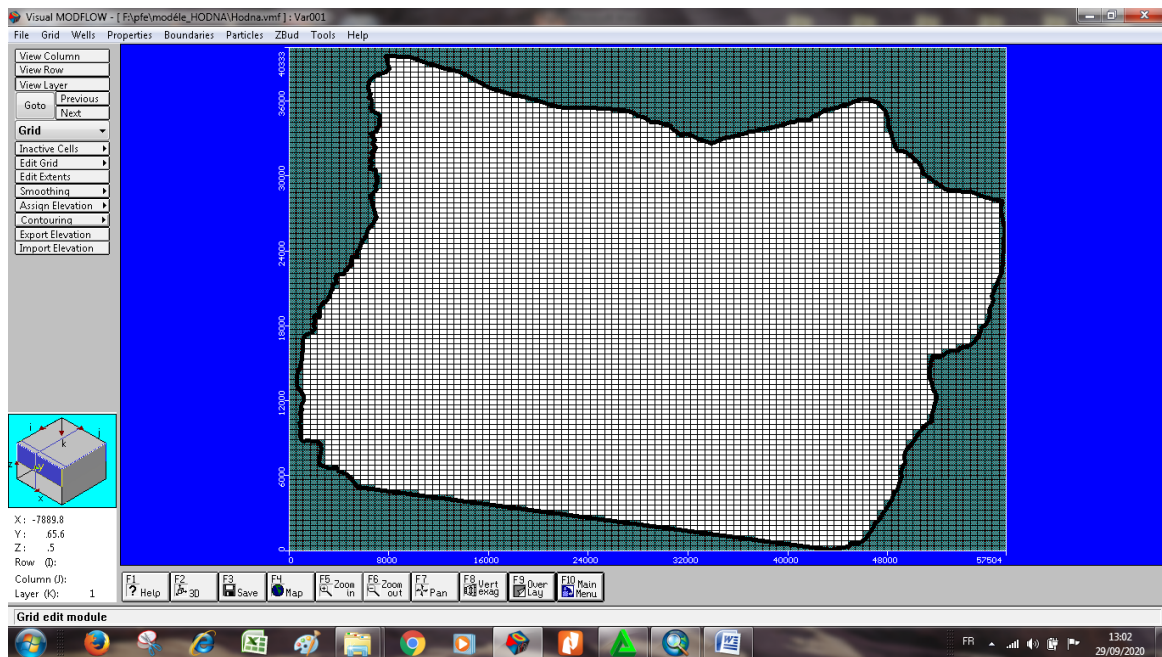


Figure IV .14 : Grille modèle de plaine nord du Hodna

L'espacement de la grille peut être spécifié pour une meilleure précision. Il est basé sur la subdivision répétée d'une grille carrée régulière.

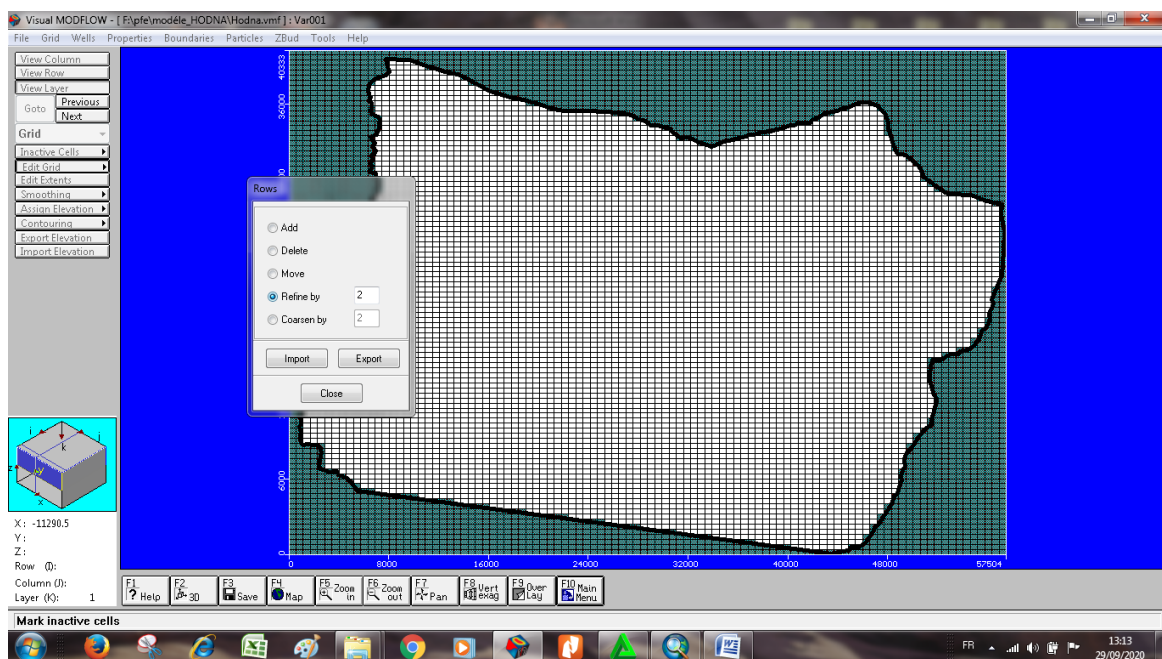


Figure IV .15 : raffinage de Grille

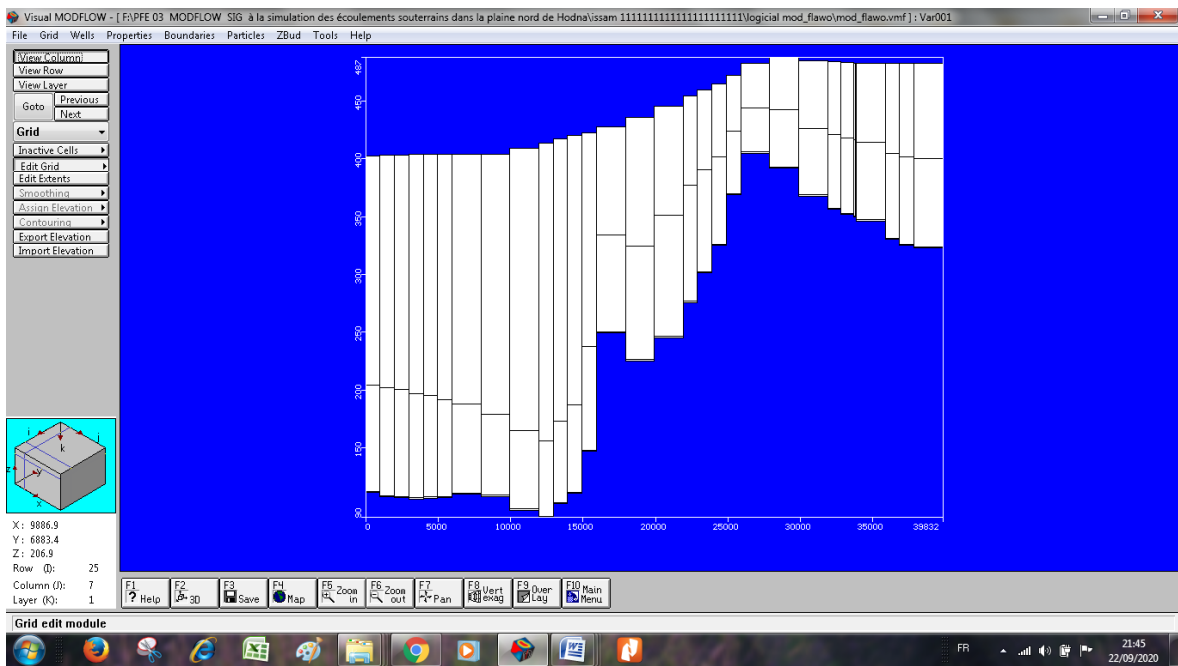


Fig. (b): Coupe transversale (colonne)

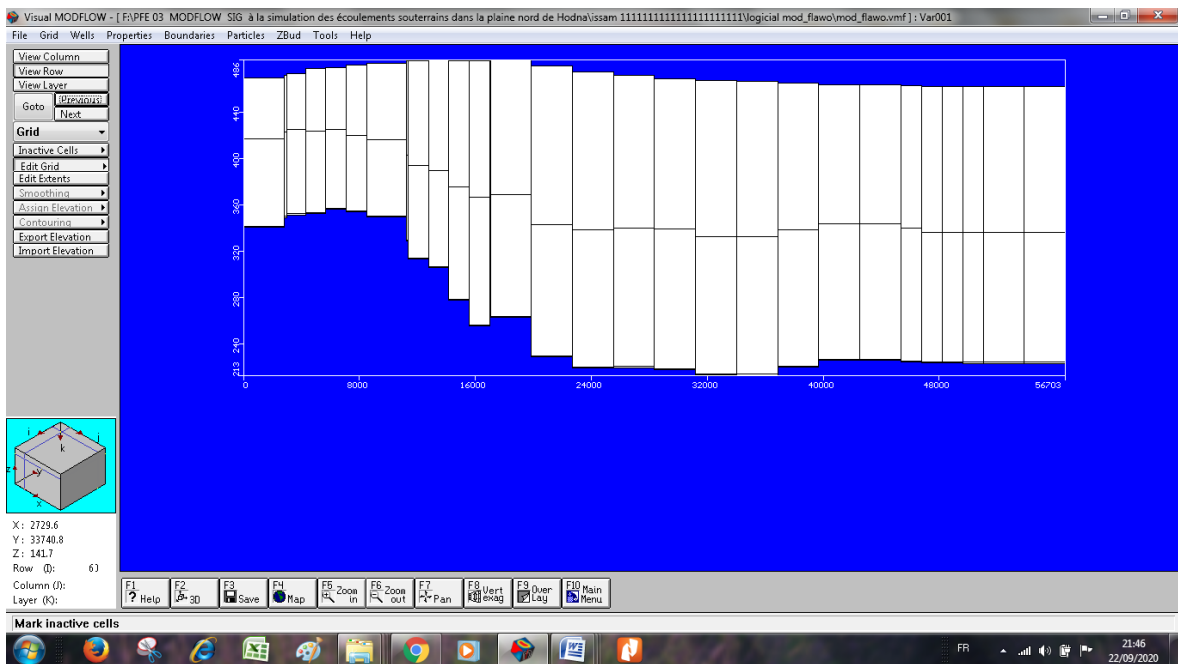


Fig. (a): Coupe transversale (rangée)

L'étape suivante consiste à déterminer la géométrie du modèle:

Toutes sortes de données liées aux paramètres hydrogéologiques et à la géométrie de l'aquifère sont utilisées pour créer le réseau de grille modèle, Détermine la hauteur du haut des calques du modèle

1. Importer la hauteur(import elevation) dans le menu Grille.
2. Ground surface à partir de layer surface
3. Importez des données (import data) à partir des options

4. Import la hauteur du haut de la première couche.
5. Accédez au deuxième calque en cliquant sur l'option Importer la hauteur du menu Grille.
6. botom of layer 1 à partir de layer surface.
7. Répétez les étapes 4 et 5 pour ajuster la hauteur inférieure pour la deuxième couche et la hauteur supérieure pour la troisième couche.
8. Répétez la même procédure que ci-dessus pour régler la troisième hauteur inférieure

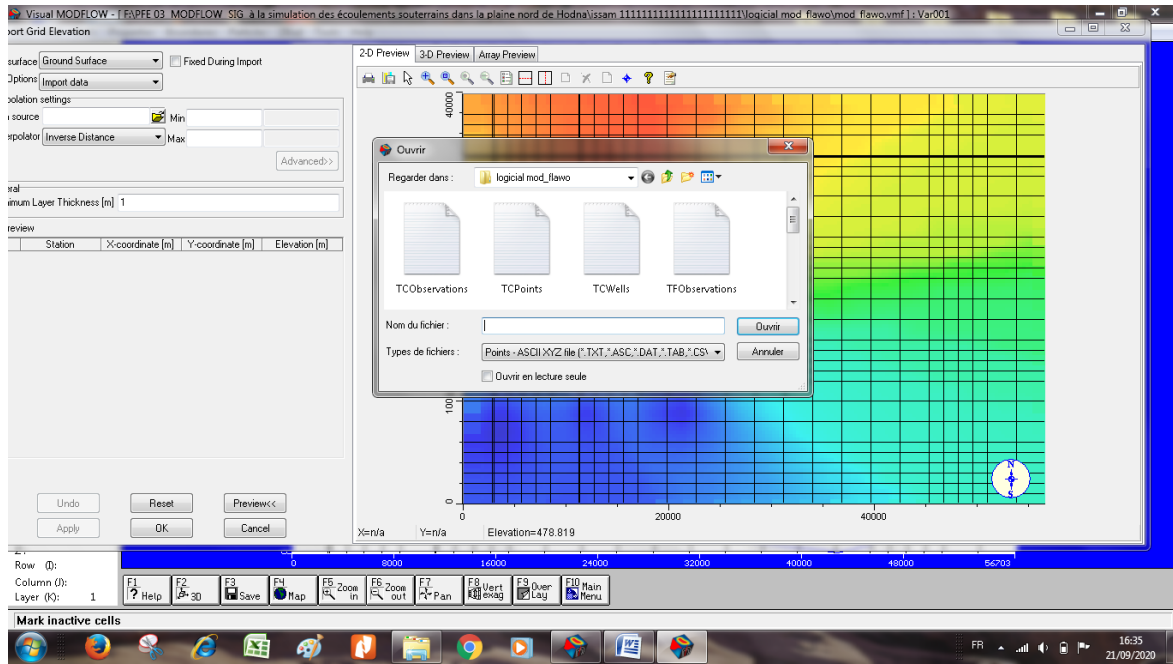


Figure IV .16 : Importer la hauteur (import elevation)

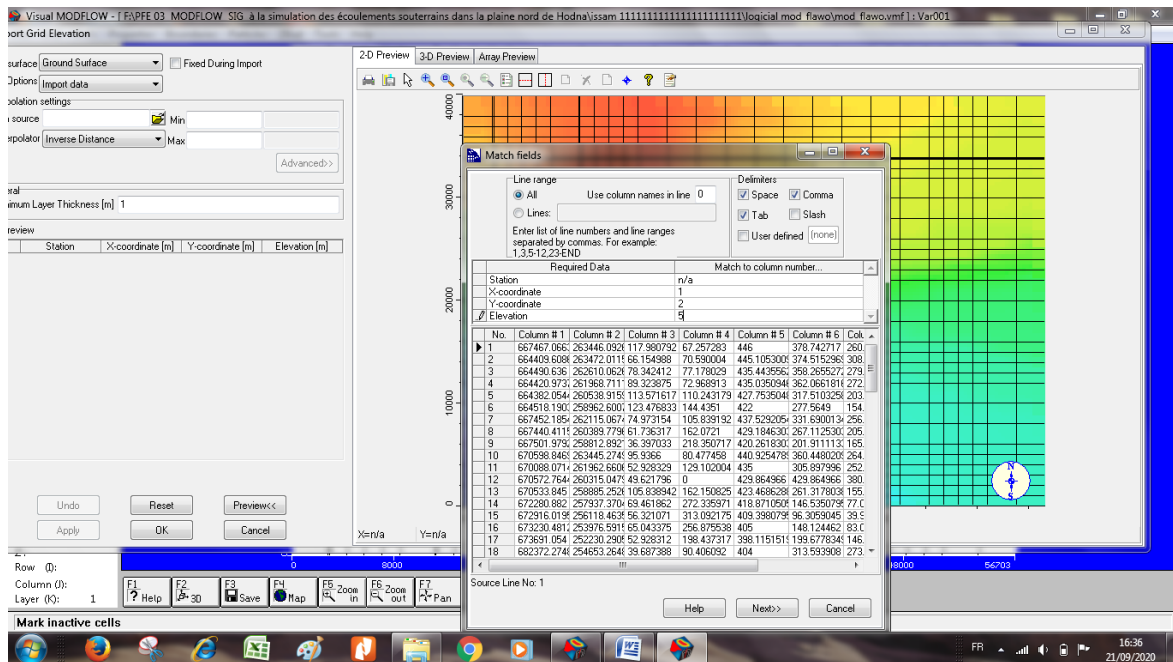


Figure IV .17 :Table de coordonnées

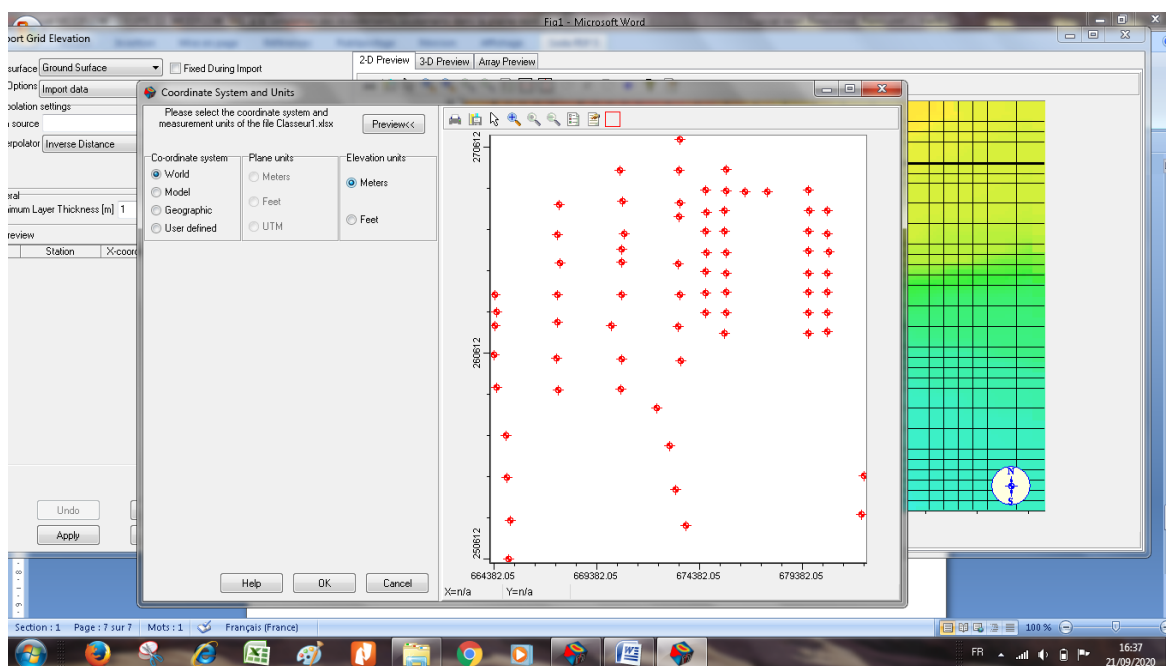


Figure IV .18 : Système de coordonnées et unités

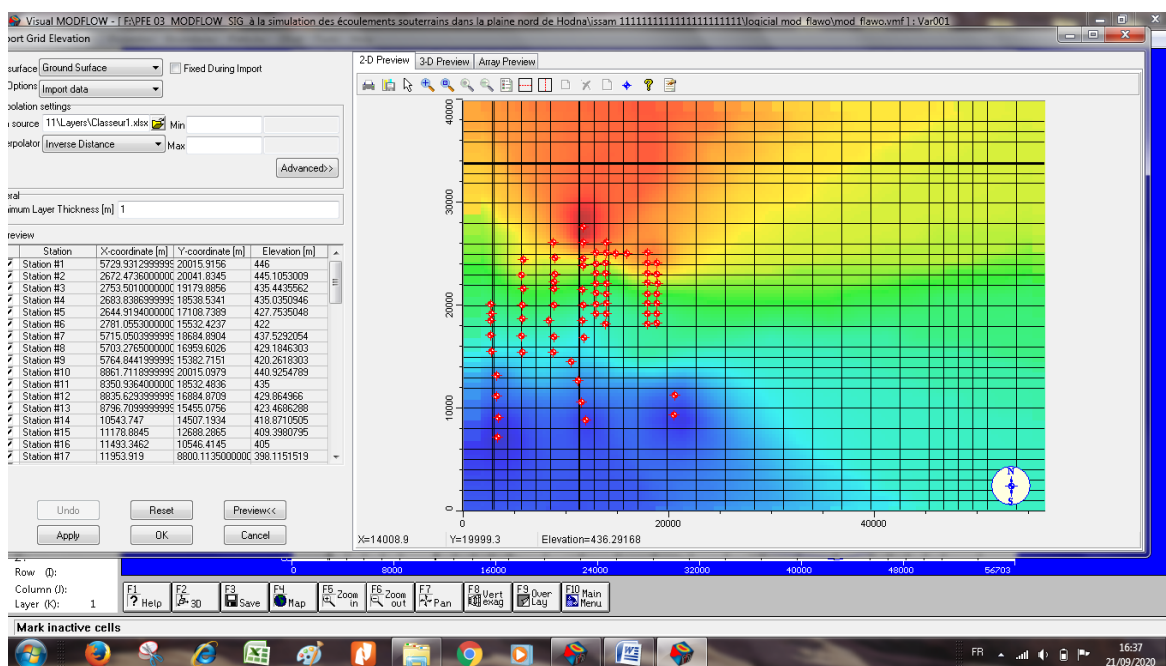


Figure IV .19 : La position du point de coordonnées

- **Conductivité :**

Pour déterminer la conductivité hydraulique, suivez les étapes ci-dessous

1. la conductivité dans la liste des paramètres.
2. window dans le menu Assiqn
3. Balayage du Grille, entrer la valeur de conductivité dans la boîte de dialogue.

Aller à la deuxième couche

- 4.Sélection window dans le menu Assiqn, entrer la valeur de conductivité dans la boîte de dialogue.

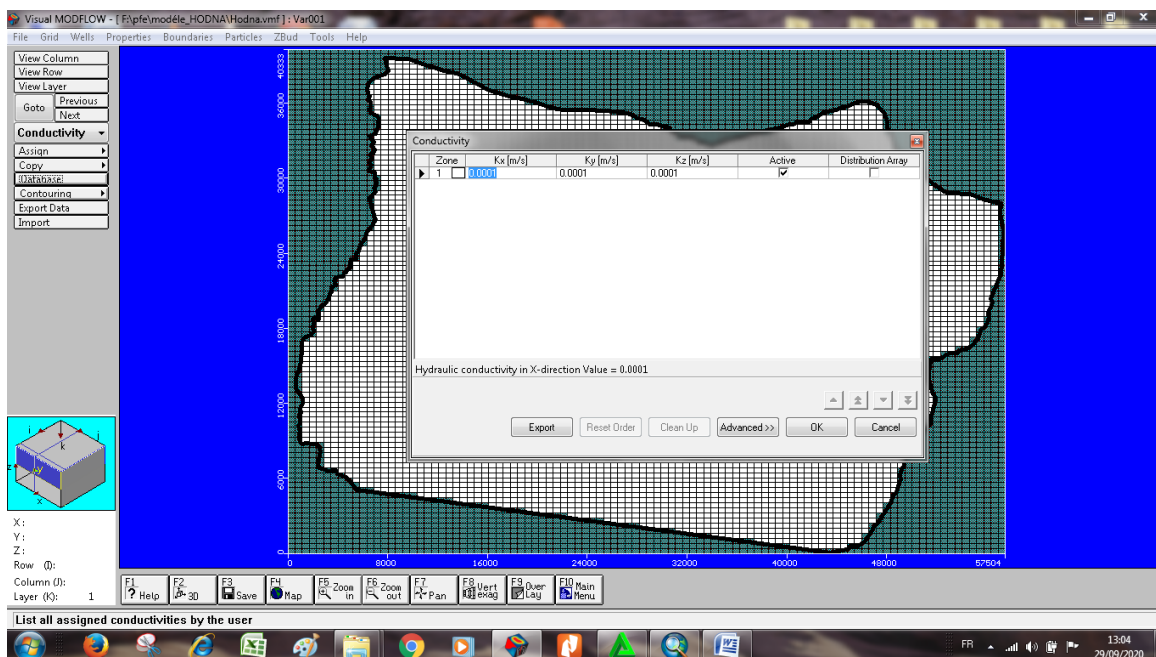


Figure IV .20 : Conductivité

- **Espace en magasinage:**

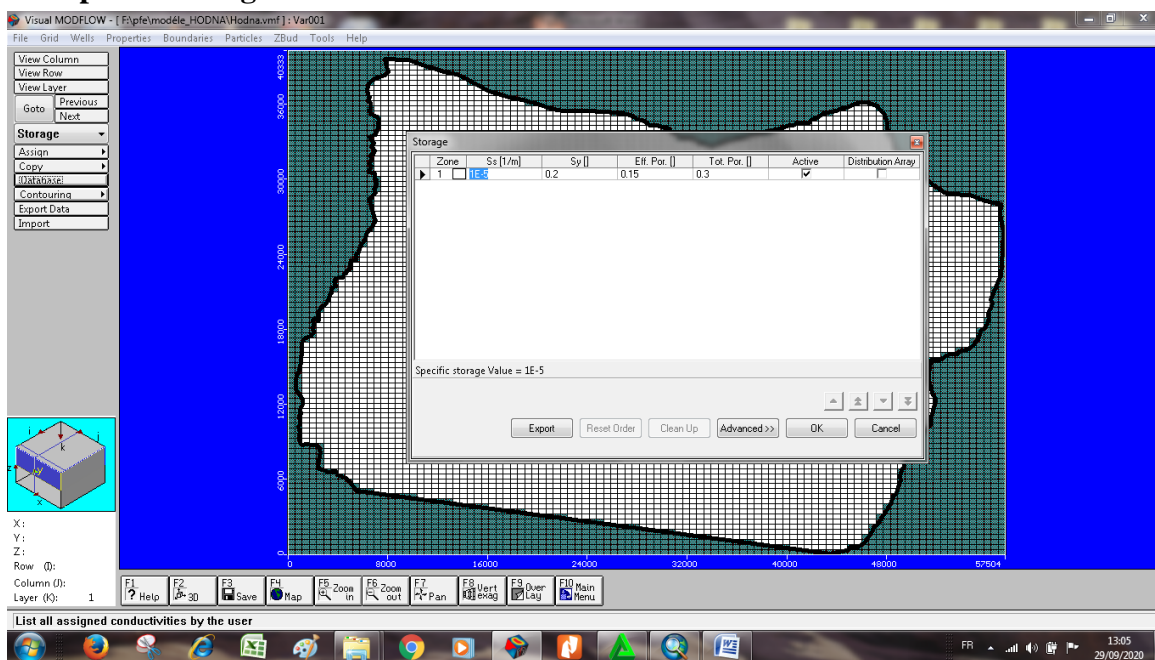


Figure IV .21 :Espace en magasinage (storage)

- **Les forages :**

La dernière étape avant d'effectuer une simulation d'écoulement consiste à déterminer l'emplacement et le débit du forage de pompe. Dans MODFLOW, un forage d'injection ou de pompe est représenté par un nœud (ou une cellule).

Chapitre IV Modélisation et simulation numérique par Modflow

L'utilisateur détermine la vitesse d'injection ou de pompage du nœud isolant. Il est enter du que le forage pénètre complètement dans l'épaisseur de la roche. MODFLOW peut simuler les effets de pompage d'un forage pénétrant dans plus d'un aquifère ou aquifère à condition que l'utilisateur fournisse le taux de pompage de la couche tampon.

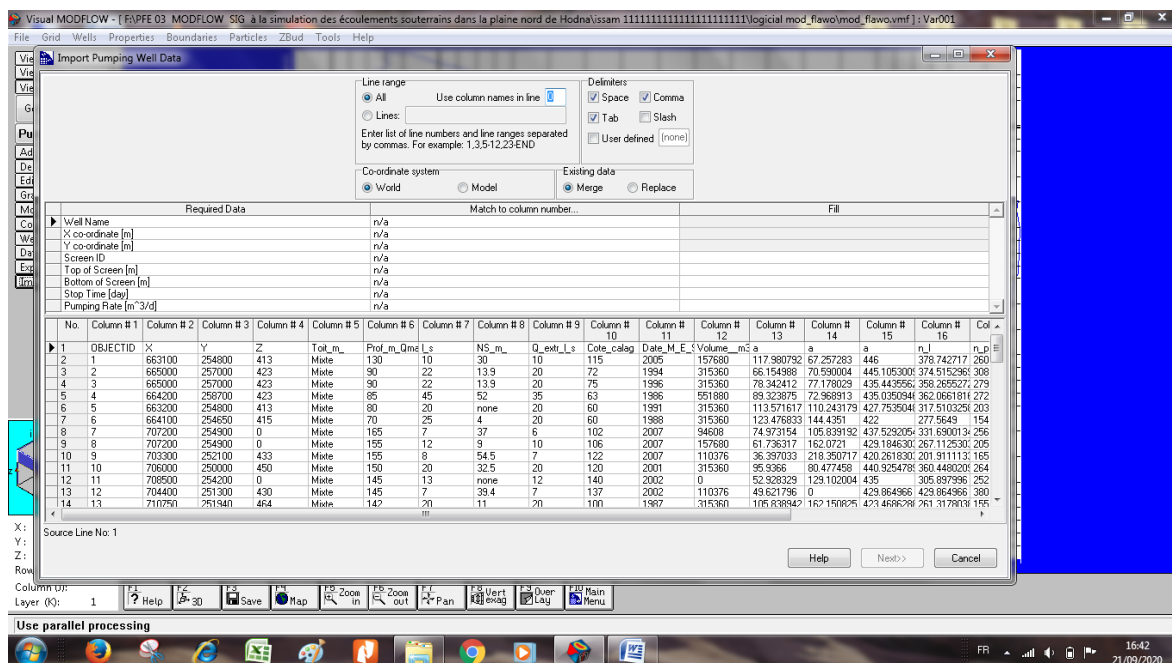


Figure IV .22 :importé des données desforages

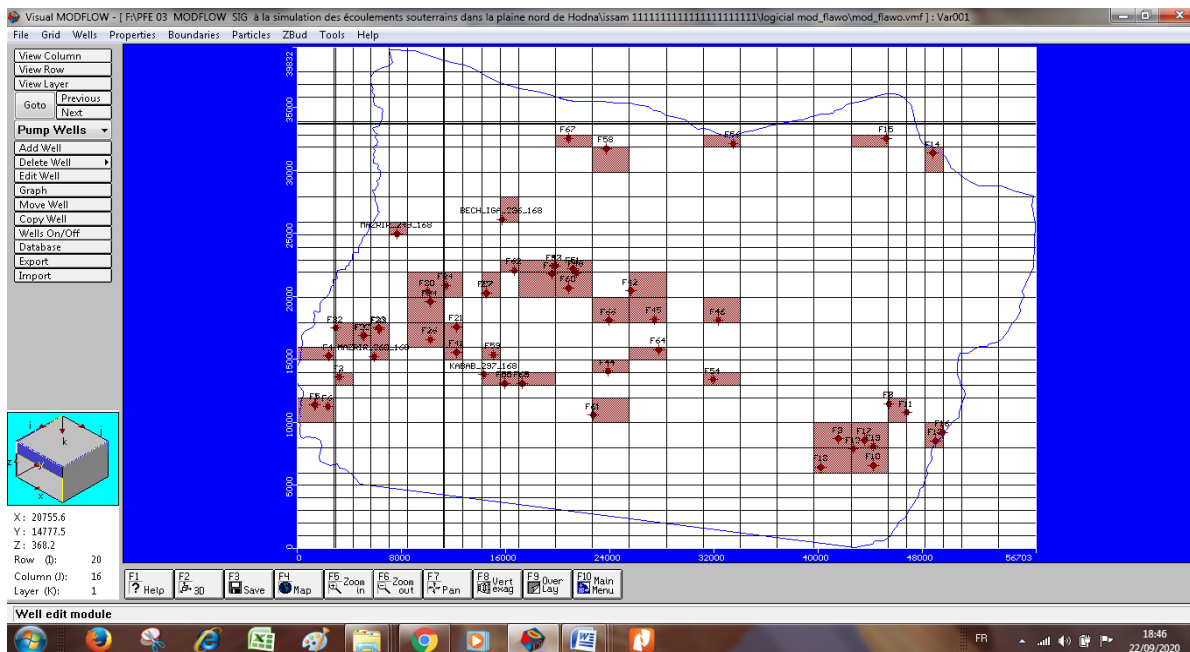


Figure IV .23 :position des forages

- **La recharge** : À ce stade, des précipitations sont enregistrées qui augmentent la valeur de la cargaison dans la nappe, et les valeurs d'alimentation des deux barrages à la nappe sont également prises

Pour déterminer le prix d'expédition

1. Choisissez Recharge dans la liste des modèles.
2. Window from Assiqn, entrer la valeur de livraison dans la boîte de dialogue.

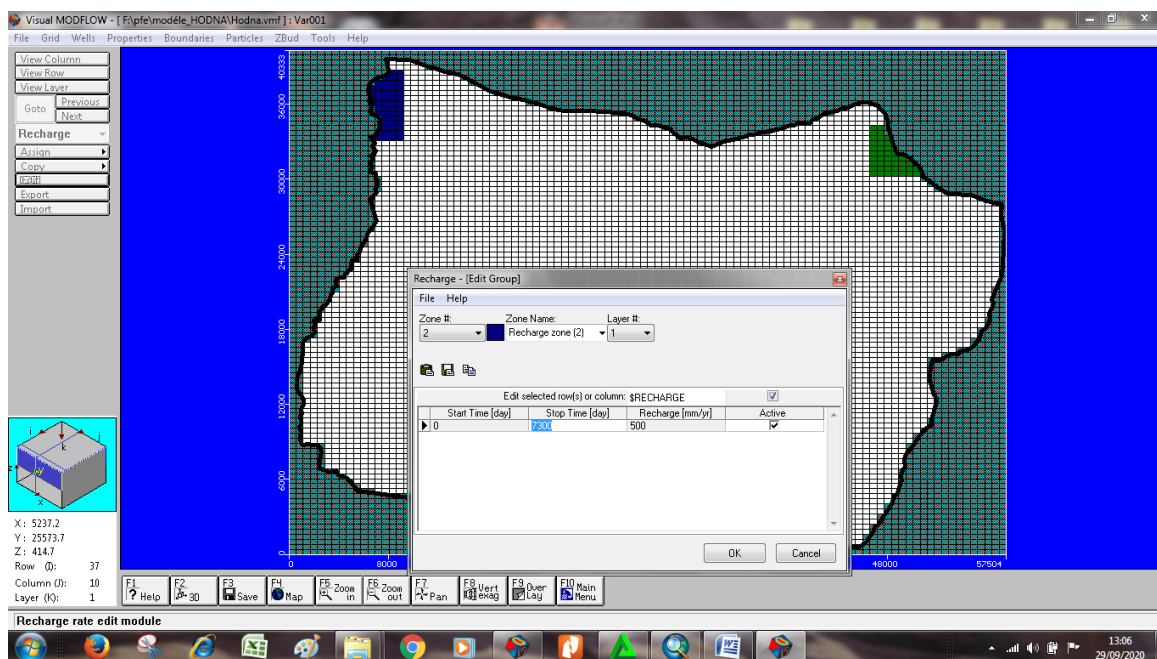


Figure IV. 24: Zones de recharge

- **Constant-Head :**

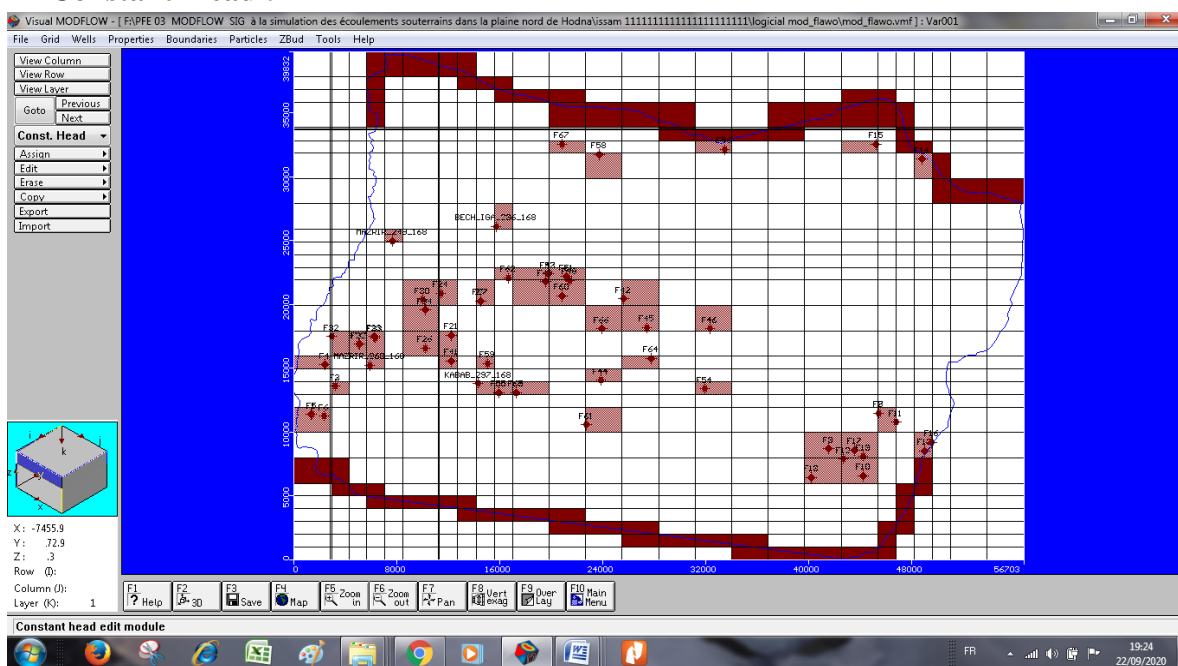


Figure IV. 25: Constant-Head

Particules:

Pour enregistrer la position et les attributs de chaque particule, choisissez Ajouter une particule (Add particle) dans le menu Ajouter (Add) et spécifiez un nom de fichier dans la boîte de dialogue Enregistrer la particule sous. En spécifiant un type de fichier dans cette boîte de dialogue, vous pouvez enregistrer la position de départ ou la position de fin (après le suivi arrière ou avant) pour chaque particule.

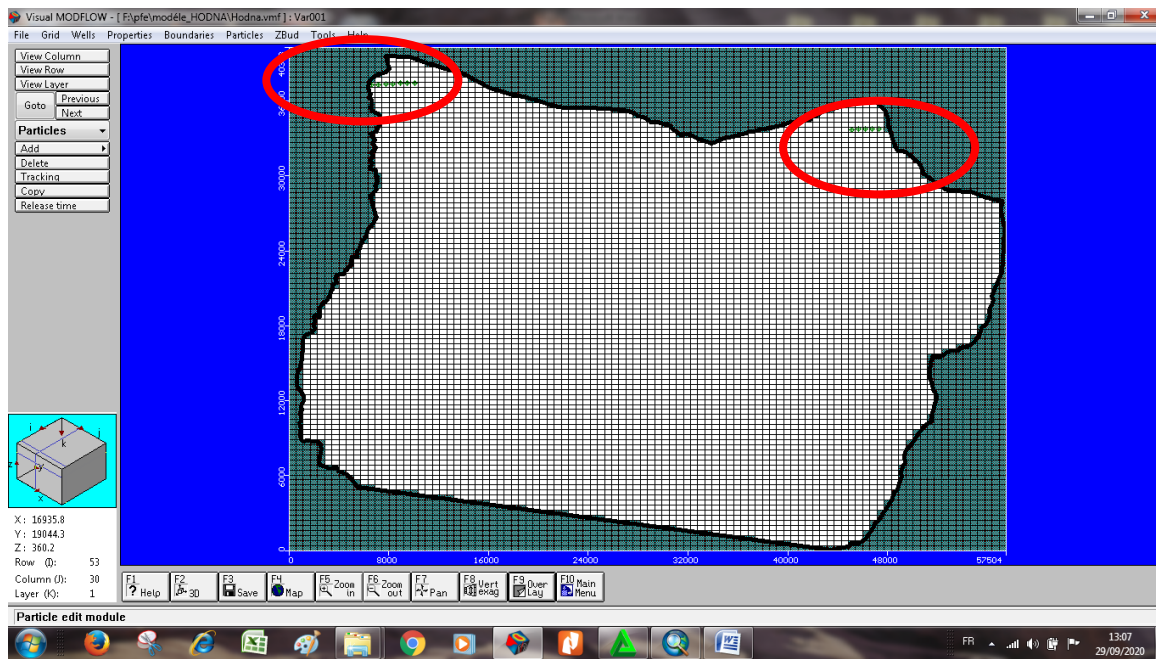


Figure IV.26: Particules zone de recharge

IV.10.3. Simulations et modélisation :

Cette étape est considérée comme l'une des étapes de modélisation les plus importantes, au cours de laquelle les informations sont simulées et les résultats sont produits, à ce stade, les paramètres doivent être ajustés pour des simulations précises et de bons résultats.

- **MODFLOW2000**
- **Solver:**

Pour calculer les têtes dans chaque cellule de la grille aux différences finies, MODFLOW prépare une équation aux différences finies pour chaque cellule, exprimant la relation entre la tête à un nœud et les têtes à chacun des six nœuds adjacents à la fin d'un pas de temps.

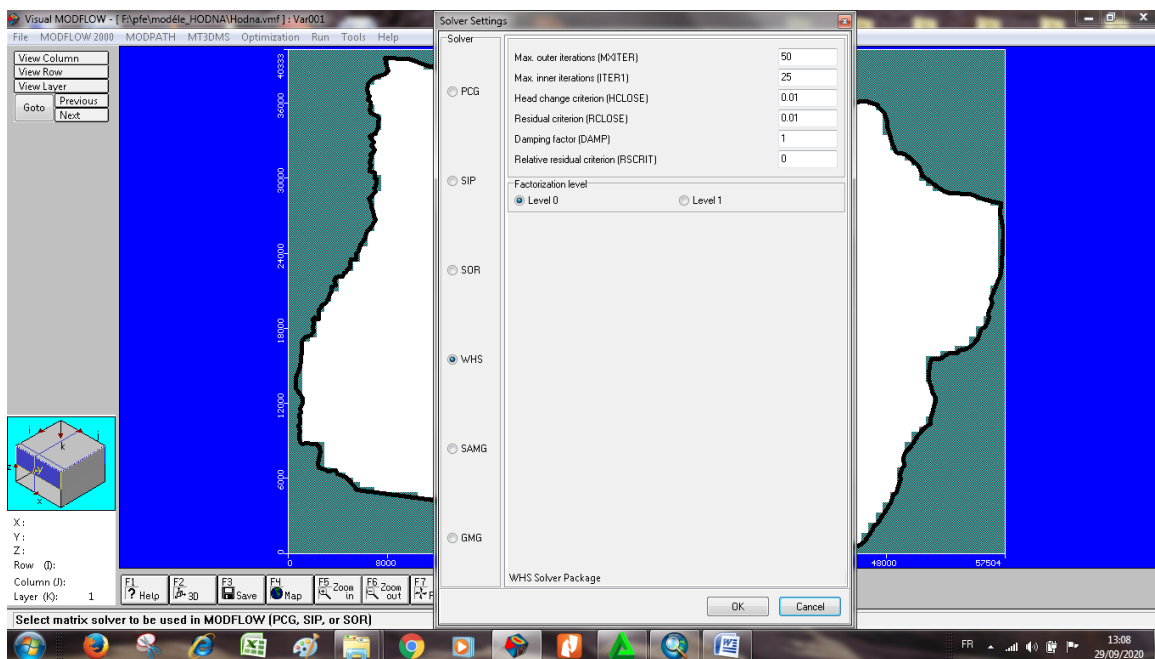


Figure IV.27: Solver

• **Rewetting:**

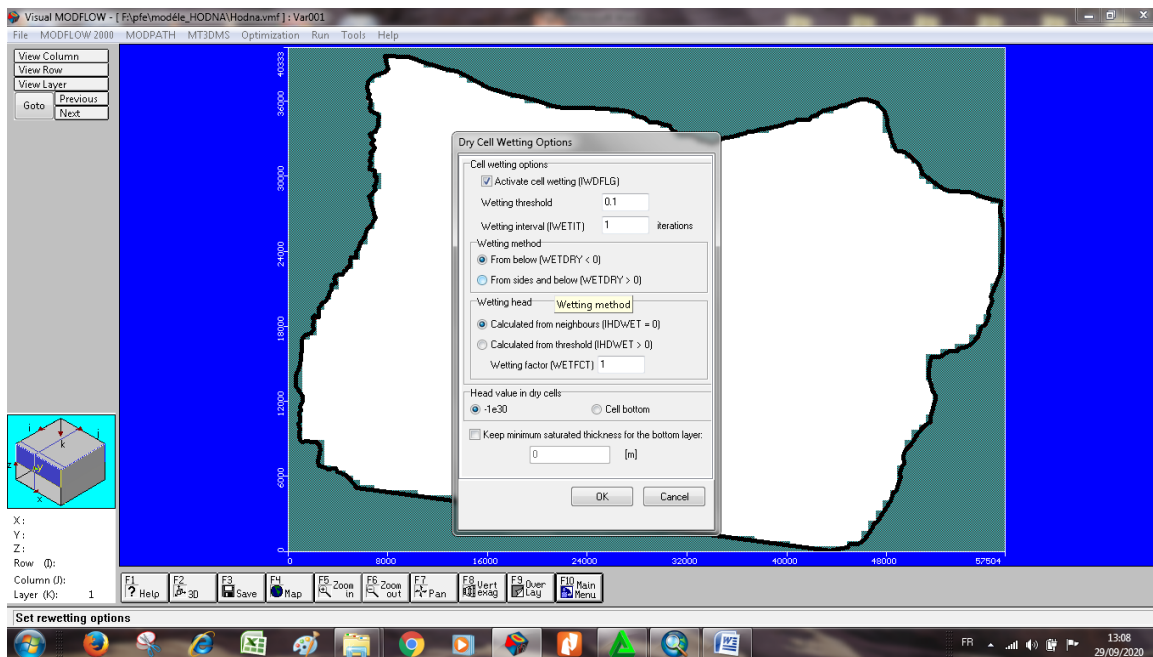


Figure IV. 28: Rewetting

- **MT3DMS:**
 - **Solution méthode**

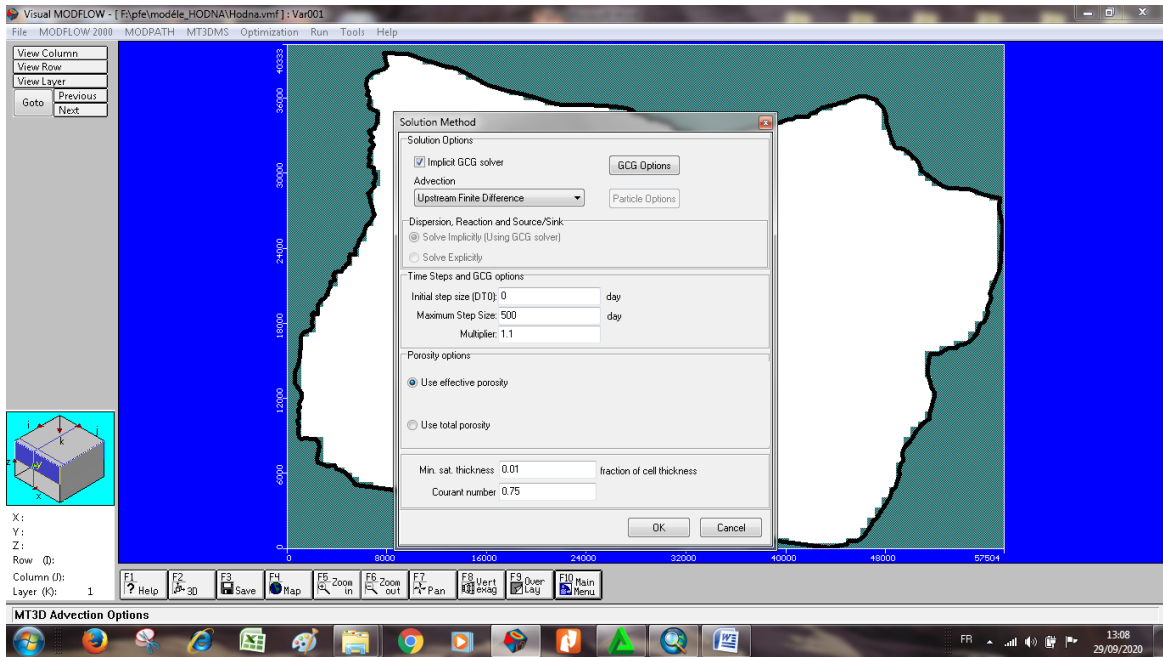


Figure IV. 29: Solution méthode

- **Time step control:**

Dans cette étape, le temps de simulation pendant lequel l'eau souterraine est étudiée est contrôlé, La période de simulation est découpée en périodes de stress et pas de temps. La notion de stress est définie comme toutes les perturbations sur le domaine, qui peuvent être assimilées aux variables de forçage du modèle : la recharge, un régime de pompage, etc. La discrétisation du temps tient compte de toutes les chronologies pour obtenir des périodes de pas de temps durant lesquelles tous les stress ont une valeur constante.

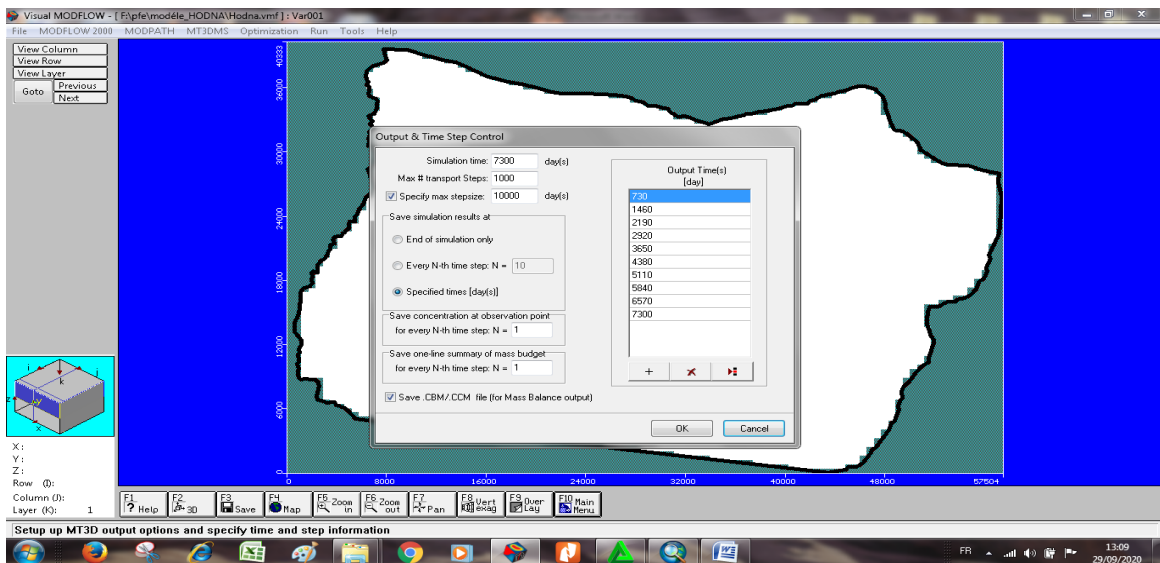


Figure IV. 30: Calendrier de distribution du temps

- **Run:** Au cours de laquelle les informations saisies sont simulées et les résultats de la modélisation sont affichés.

Pour exécuter la simulation de flux

1. Sélectionnez les modèles MODFLOW Run ...
2. Cliquez sur OK dans la boîte de dialogue Exécuter Modflow pour générer les fichiers de données requis et pour exécuter MODFLOW, vous verrez une fenêtre DOS s'ouvrir et MODFLOW effectuera les itérations requises pour terminer la simulation de flux.
3. Appuyez sur n'importe quelle touche pour quitter la fenêtre DOS.

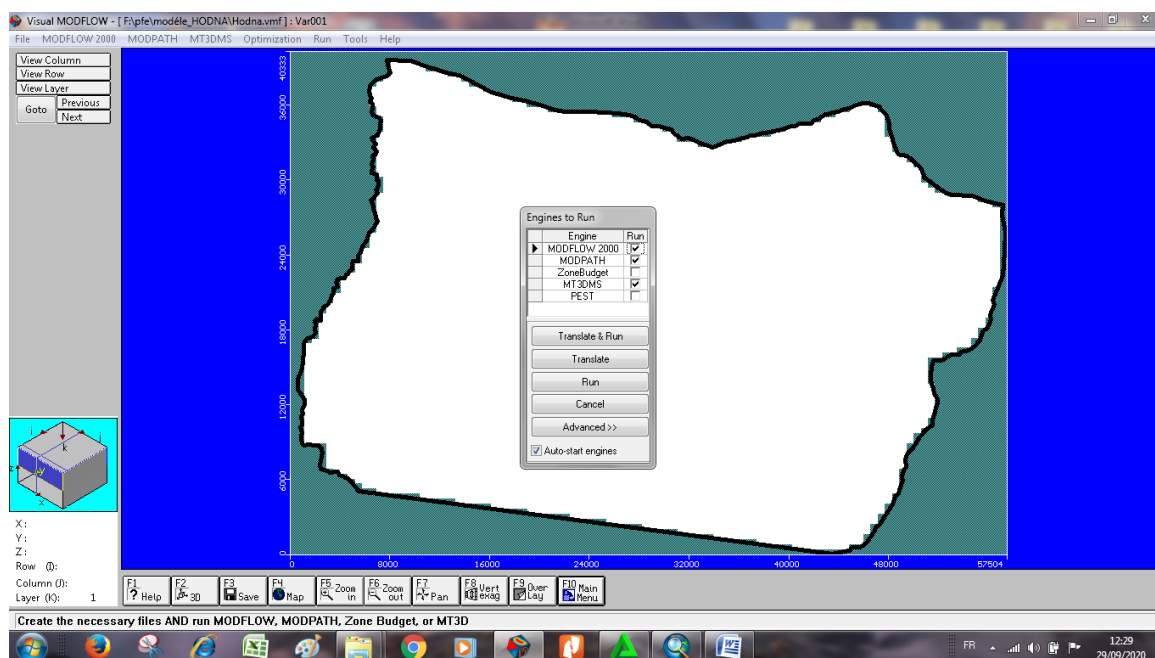


Figure IV. 31: Exécution de la simulation

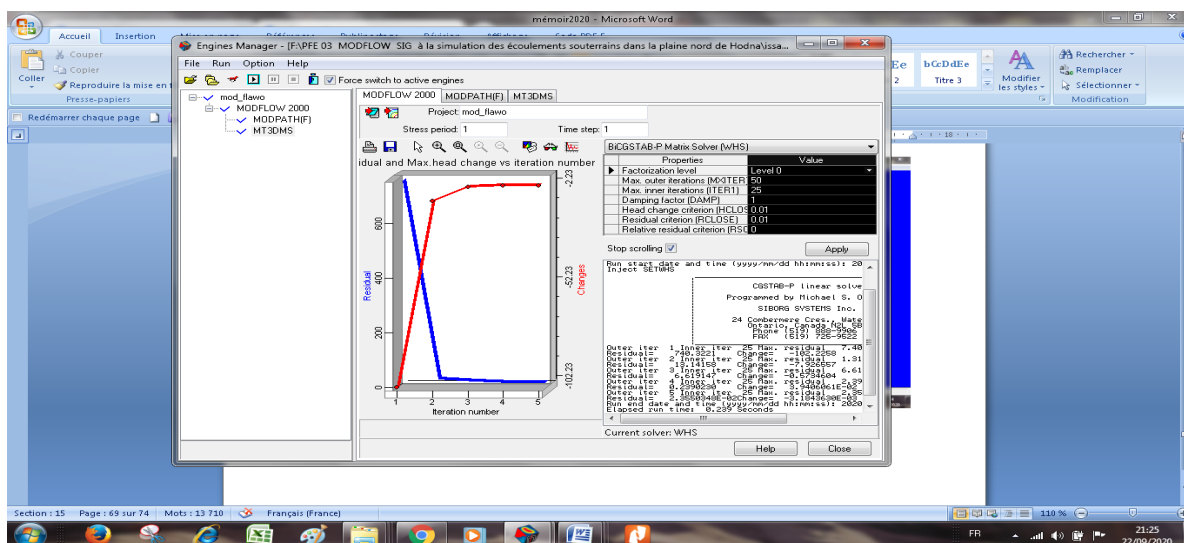


Figure IV. 32: résultat de Run

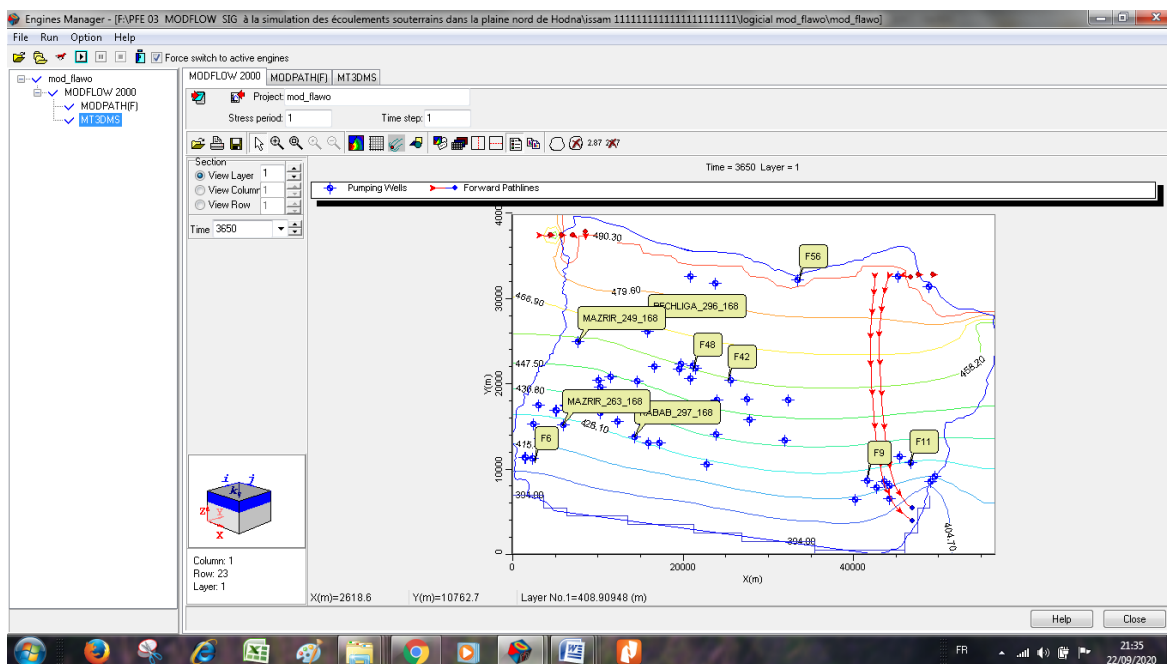


Figure IV.33: Carte des écoulements hydrogéologiques des aquifères superficiel et profond

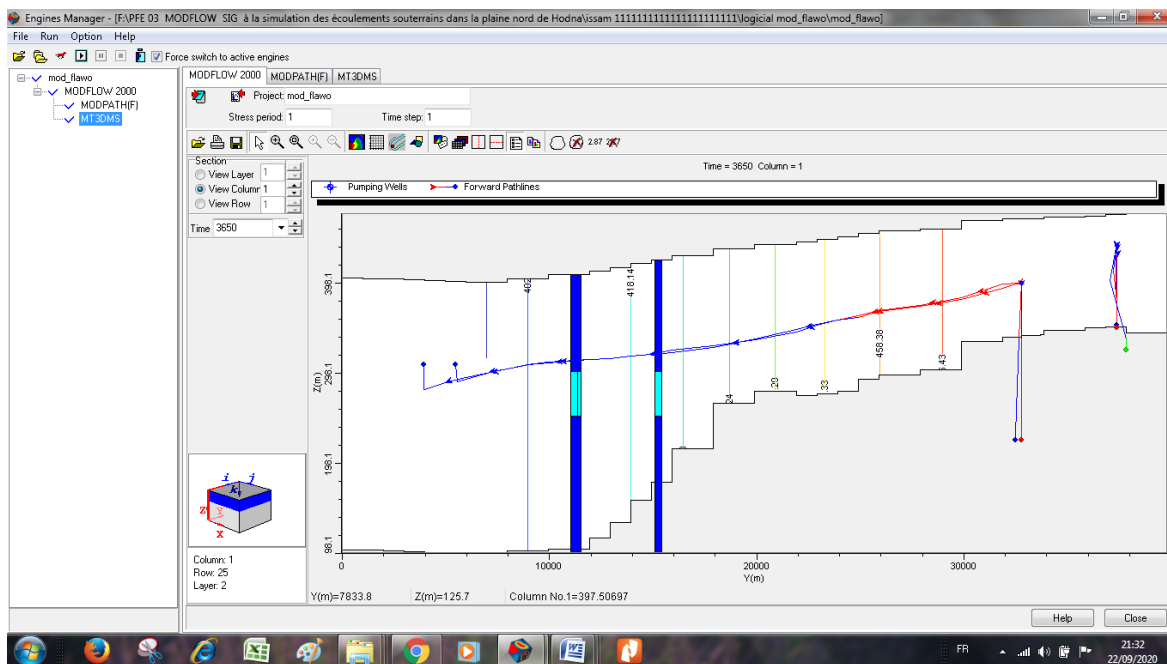


Figure IV.34: Coupe transversale des flux hydrogéologiques dans l'aquifère

Les résultats de la simulation sont de la simulation sur Modflow (figure IV.35) sont représentés soit par la représentation vecteurs vitesses pour permettre de visualiser le sens de dimensions afin de visualiser le rabattement d Les résultats de la simulation sont représentés dans le chapitre IV.

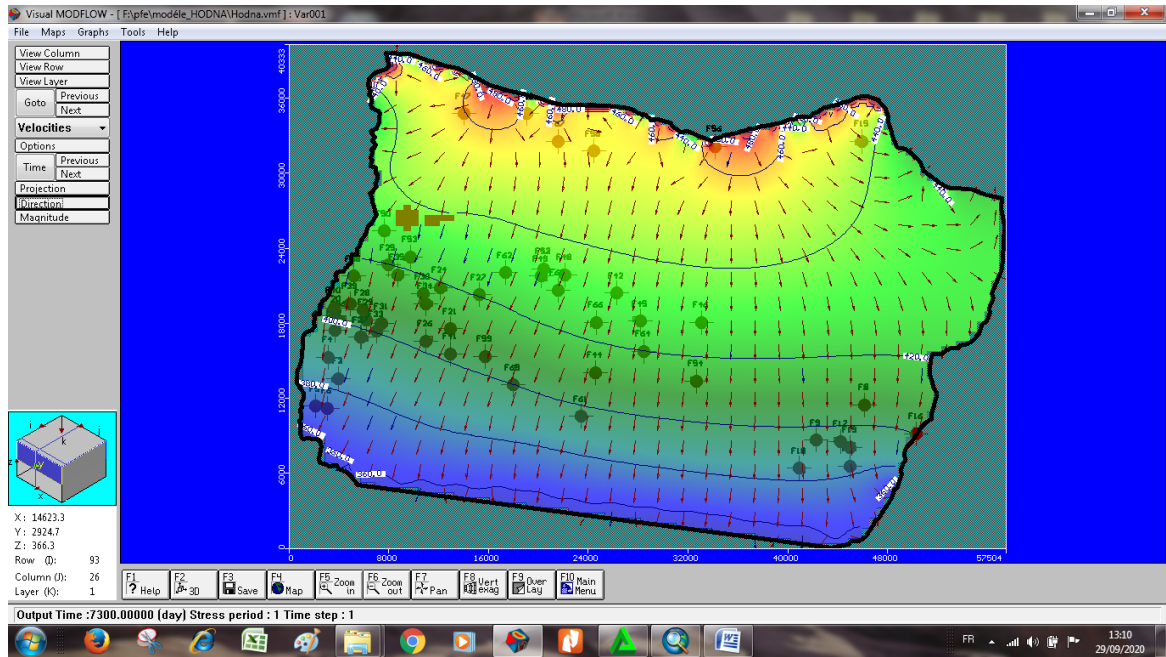


Figure IV .35 :Représentations des résultats par des courbes Equipotentielles et des vectrices vitesses

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'objectif de la modélisation et l'importance de la numérisation des études problématiques des écoulements souterrains, et nous avons présenté le programme Modflow que nous avons utilisé dans nos travaux. Il existe également les différentes étapes nécessaires à la simulation numérique.

-Après le calendrier des études que nous avons menées, nous avons obtenu les résultats suivants:

- Les aquifères sont expédiés à partir de deux barrages
- Le réservoir d'eau souterraine est situé sur le côté sud de notre zone d'étude

Conclusion générale

Conclusion générale :

Dans ce projet de fin d'étude, nous avons mené une étude sur l'enfoncement des eaux souterraines exactement dans le bassin versant de plaine nord Hodna, suivie d'une application SIG pour construire une base de données avec l'application le modèle des eaux souterraines. Par conséquent, la connaissance et l'étude du comportement des eaux souterraines dans ce bassin sont d'une grande importance et permettent la production de certains modèles et cartes objectifs

Le principal objectif de ce travail est d'étudier les eaux hydrologiques, géomatiques et souterraines du bassin de plaine nord Hodna. La méthodologie est principalement basée sur la collecte, l'agrégation et la manipulation de données à l'aide d'ArcGis 10.0 et des logiciels Modflow.

Après avoir analysé les données hydrologiques disponibles provenant de différentes sources, les caractéristiques hydrologiques et les mesures du niveau des eaux souterraines de ce bassin ont été déterminées, et il a été constaté qu'il y avait une pénurie de dispositifs et un déséquilibre spatial dans leur distribution, les données n'étaient pas très fiables en termes de qualité et de quantité. Le programme utilisé est un programme multifonctionnel. Cela nous permet de reconstruire des bases de données et des infographies pour différents sujets ... etc.

A cet égard, la principale difficulté rencontrée par la majorité des études hydrologiques de ce bassin est l'insuffisance de l'information temporelle et spatiale et sa qualité qui génère un manque d'information.

Dans la production de nombreuses cartes thématiques, la gestion des données hydrographiques, la gestion durable des ressources naturelles de la région, et donc la création de nombreuses Couches thématiques (base de données).

Ces travaux nous ont permis d'acquérir des connaissances sur l'hydrologie des bassins versants à l'aide du SIG et le modèle des eaux souterraines. Le SIG a permis la création d'une base de données contenant des informations hydrologiques pour les bassins versants et la production de cartes et de modèles esthétiques. La technologie SIG offre une immense maîtrise des capacités de représentation graphique et une flexibilité de réflexion qui nous permet d'apprendre à penser à l'espace et aux processus qui y opèrent, une extension de nos capacités à en cours d'analyse.

L'utilisation de systèmes d'information géographique et le modèle des eaux souterraines, en plus de la production de cartes et de graphiques, a permis d'effectuer des recherches et des analyses géographiques, une meilleure organisation de l'information et une prise de décision plus rapide.

La méthode utilisée pour créer la base de données et effectuer une analyse SIG peut être décrite comme suit:

- 1) Des données géo-hydrologiques, y compris la surveillance des têtes d'eau souterraine dans puits, des mesures de débit fluvial et des données climatiques ont été générées sous forme de base de données pour le projet dans tout le nord du couvain.
- 2) Modèle numérique d'élévation (DEM) dans un SIG avec des cartes numériques de la géologie, du sol et de l'utilisation des terres.

3) En utilisant des cartes d'analyse de la conductivité hydraulique, les zones de transport des eaux souterraines et les zones de recharge ont été calculées;

4) Dans le module de transmission de données, la base de données SIG et MODFLOW et des cartes des niveaux simulés des eaux souterraines ont été importées.

Notre contribution est d'introduire le SIG et Modflow comme outil de gestion moderne et pertinent dans l'environnement d'évaluation hydrologique des bassins versants.

Enfin, les points utiles qu'un SIG et le modèle des eaux souterraines peut atteindre:

- ✚ Les informations sont stockées de manière claire et définitive.
- ✚ Gestion de nombreux attributs d'informations sur les objets.
- ✚ Comprendre les phénomènes.
- ✚ Créez des cartes rapides.

La mise en œuvre d'un tel projet nous a permis d'explorer les capacités du SIG et le modèle des eaux souterraines comme outil d'aide à la décision. Ainsi, il peut être utilisé dans toute étude liée au cours de la rivière Hodna.

En tant que vues, il serait souhaitable:

- ❖ La nécessité de former un comité pour un bassin à couvain dont la tâche est de suivreContrôle des ressources hydrologiques;
- ❖ Mettre en place un système d'alerte précoce basé sur les données climatiques, notamment les précipitations, afin de pouvoir faire des prévisions pour évaluer le stockage de l'eau dans les années à venir.
- ❖ .le recherches sur une modélisation du transport de polluant dans les nappes d'eau souterraines

annexes

N° de Forage	X	Y	EPAISEUR_ N	EPAISEUR_ 1	Z	Z -(E_N)	Z-(E_N+E_1)
F1	674650	268550	162.567	0	474	311.432	311.432
F2	674700	267450	38.593	117.036	458.726	420.133	303.096
F3	674650	266550	103.745	146.129	457.090	353.345	207.215
F4	674700	265500	173.332	111.971	446.800	273.468	161.497
F5	674650	264600	160.679	164.474	443	282.320	117.846
F6	674650	263550	141.701	227.734	436.585	294.884	67.150
F7	674650	262600	105.010	201.264	431.671	326.660	125.396
F8	675650	269550	81.3472	213.807	490.002	408.655	194.847
F9	675650	268500	137.508	230.576	480	342.491	111.914
F10	675600	267550	191.167556	202.905	458	266.832	63.9265
F11	675600	266550	215.48889	192.005917	451	235.51111	43.505193
F12	675650	265500	226.388523	183.623427	445.77597	219.38745	35.764024
F13	675650	264500	240.637798	169.40086	437.13228	196.49449	27.93631
F14	675650	263600	221.353311	179.446738	439.90539	218.55208	39.10535
F15	675650	262600	196.214265	207.938309	431.48244	235.26818	27.329873
F16	675600	261600	115.718747	281.721836	430.05469	314.33595	32.614114
F17	676600	268450	123.378384	103.919492	473.98229	350.60390	246.68441
F18	677650	268450	152.854788	262.038625	477.02333	324.16854	62.129921
F19	679650	268550	105.415129	75.810919	486.35361	380.93848	305.12756
F20	679700	267550	170.391372	87.59203	476.93664	306.54526	218.95323
F21	679650	266550	165.671143	68.638356	463.31591	297.64477	229.00641
F22	679650	265600	134.910816	81.652483	458	323.08918	241.43670
F23	679650	264500	136.119647	98.216342	448.96422	312.84458	214.62823
F24	679650	263600	192.868704	82.82712	440.10952	247.24082	164.41370
F25	679650	262600	192.883569	88.75115	435.46210	242.57854	153.82739
F26	679650	261600	64.168356	102.949021	429.88865	365.72029	262.77127
F27	680600	267550	73.926	140.725	485.879	411.953	271.227
F28	680600	2664	87.553	165.373	467.502	379.948	214.575
F29	680650	265550	108.951	164.7130	459.044	350.092	185.379
F30	680600	264500	107.647	160.843	446.893	339.246	178.403
F31	680600	263600	98.577	154.337	443.605	345.028	190.691
F32	680600	262600	79.156	163.421	437.397	358.240	194.819
F33	680600	261650	44.115	136.278	435.595	391.479	255.200
F34	667467	263446	117.980	67.257	445.907	327.926	260.669
F35	664409	263472	66.154	70.590	445.513	379.357	308.768
F36	664490	262610	78.342	77.178	435.776	357.434	280.256
F37	664420	261968	89.323	72.968	435.373	346.050	273.081
F38	664382	260538	113.571	110.243	427.373	313.802	203.558
F39	664518	258962	123.476	144.435	422	298.523	154.088
F40	667452	262115	74.973	105.839	436.642	361.669	255.829
F41	667440	260389	61.7363	162.072	429.392	367.655	205.583
F42	667501	258812.	36.397	218.350	420.516	384.119	165.768

F43	670598	263445	95.936	80.477	441.120	345.184	264.706
F44	670088	261962	52.928	129.102	435	382.071	252.969
F45	670533.84	258885.25	105.838942	162.150825	423.55586	317.7169	155.56609
F46	672280.88	257937.37	69.461862	272.335971	418.97330	349.51143	77.175467
F47	672916.02	256118.46	56.321071	313.092175	409.88164	353.56057	40.468394
F48	673230.48	253976.59	65.043375	256.875538	405	339.95662	83.081087
F49	673691.05	252230.29	52.928312	198.437317	398.46107	345.53276	147.09544
F50	682372.27	254653.26	39.687388	90.406092	404	364.31261	273.90652
F51	682262.14	252779.33	49.719425	99.243088	394.42367	344.70425	245.46116
F52	673386.64	269504.83	24.278363	19.8744	500.06214	475.78378	455.90938
F53	667558.15	267833.75	97.020237	73.862854	468.33017	371.30993	297.44708
F54	667444.90	266378.78	125.754388	66.154988	462	336.24561	270.09062
F55	667604.42	264999.84	124.618492	70.555546	447.79768	323.17919	252.62365
F56	670503.34	269507.53	125	31.989358	474.98253	471.98253	439.99317
F57	670638.99	268005.13	90.399125	73.895763	463.03471	372.63559	298.73983
F58	670700.64	266428.24	113.555838	68.35945	460	346.44416	278.08471
F59	670606.94	265663.51	109.146321	66.154867	455.10395	345.95763	279.80276
F60	670586.74	265047.18	109.140504	67.284396	451.01148	341.87098	274.58658
F61	673400.14	271008.38	33.0914	67	511.56961	478.47821	478.47821
F62	673423.44	267927.78	47.45565	40.789825	463.80454	416.34889	375.55907
F63	673378.88	267237.37	59.623225	54.019275	458	398.37677	344.3575
F64	673346.50	264945.06	70.555546	111.345492	447.22879	376.67324	265.32775
F65	673432.27	263466.94	112.496692	119.067396	436.06384	323.56715	204.49975
F66	673319.68	261913.35	146.689562	125.720421	428.68592	281.99636	156.27594
F67	673456.63	260238.43	144.418158	148.893446	422.64005	278.22189	129.32844
F68	664958.40	256624.57	154.340067	166.481683	409.22025	254.88018	88.398505
F69	665023.56	254579.51	138.910362	199.649604	406.16515	267.25479	67.605191
F70	665188.32	252510.49	138.905988	164.265796	398	259.09401	94.828216
F71	665103.20	250612.03	140.013004	162.090967	394	253.98699	91.896029

Références bibliographiques

[1]. **HAMIDAT Amel** *BIODIVERSITE DES ARBRES D'ALIGNIEMENTS DE LA VILLE DE M'SILA * 2016 /2017

[2] **Benaissa Belkacem.** *Elaboration des cartes des données du bassin hydrogéologique de la région d'El-Hodna à l'aide hydrogéologique de la région d'Eldes systèmes d'information géographique * Thèse de MAGISTER. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2017/2018

[3]. **KENDRAOUI Hocine** *CARTOGRAPHIE DE LA POTABILITE ET DE L'APTITUDE A L'IRRIGATION DES EAUX DE LA NAPPE QUATERNAIRE DE MAGRA (W. M'SILA) * Session – 2018

[4] **de Marsily G.** *Quelques réflexions sur l'utilisation des modèles en hydrologie* Rev Sci Eau 7(3) :219-234, 1994.

[5] **Bear J.** *Dynamics of fluids in porous media.* New York: McGraw-Hill, 1972.

[6] **Buckingham E.** *Studies on the Movement of Soil Moisture.* Bulletin No. 8, Washington, DC, US, Department of Agriculture, Bureau of Soils, 1907.

[7] **Muskat, M.** *The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media,* McGraw-Hill Inc., New York. Reprinted by J. W. Edwards, Ann Arbor, 1937.

[8] **MAKHZOUM Youcef** *Hydrologie du bassin du Hodna : Construction d'une base de données à l'aide d'un SIG. * Thèse de MAGISTER. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2018 /2019.

[9] **TEMIM Djamel** *Conception d'un réseau d'assainissement avec l'utilisation du Système Information Géographique (SIG) pour la présentation « Village d'Ouled Bia » Commune d'Ouled Addi Guebala (W. M'sila). * Thèse de MAGISTER. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF. 2015/2016

[10] **MAKHLOUF Hadja et KACIMI Nour Elhouda** *Apport du Système d'Information Géographique dans la répartition du diabète dans la ville de M'sila-Algerie * Thèse de MAGISTER. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF . Année universitaire : 2018 /2019

[11] **Chitour Samira** *Etude du schéma directeur D'AEP de la ville de Theniet Ennasr (W. B.B.A) élaboration d'un SIG d'aide à la Décision *Thèse de MAGISTER. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF. Promotion : 2015/2016.

[12] **Benaïssa Belkacem et Nechneche Ouail** * *Elaboration des cartes des données du bassin hydrogéologique de la région d'El-Hodna à l'aide hydrogéologique de la région d'Eldes systèmes d'information géographique* *Thèse de MAGISTER. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF. Promotion : 2017/2018

[13] **BENDAHMANE Ibrahim.** *Modélisation et simulation numérique de l'écoulement dans un milieu poreux : Application pour la nappe alluviale du Sébaou Tizi Ouzou en vue de la prévision du niveau d'eau dans chaque période de l'année.* Thèse de MAGISTER. Université Abderrahmane Mira de Bejaïa 2009/2010

[14] **AUTERIVES, C.** **Influence des flux d'eau souterraine entre une zone humide superficielle et un aquifère profond sur le fonctionnement hydrochimique des tourbières : Exemple des marais du Cotentin, Basse-Normandie.* * Thèse de doctorat Université de Rennes 1, France ,2000.

[15] **BARONE, V. C.** **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 2000.*

[16] **McDonald. M. et Harbaugh, A.W.** **A modular three-dimensional finite difference ground water flow model , open-file Report 83-875,pp.588, US Geological survey techniques of Water-Resources Investigation , Washington ,1988*

Résumé:

Des techniques efficaces de gestion de l'eau ont évolué, dont le SIG (système d'information géographique) et la modélisation des eaux souterraines sont d'une grande importance. Dans cette étude, le SIG a été lié au modèle modulaire des eaux souterraines MODFLOW pour simuler la dynamique hydrologique de l'aquifère alluvial de la base de données sur les eaux souterraines dans le SIG, la conductivité hydraulique et la transmissivité de l'aquifère ont été analysées par des techniques de superposition et importées dans PROCESSING MODFLOW et MODFLOW. Après avoir établi l'hydraulique de l'aquifère, MODFLOW a été étalonné pour des conditions stationnaires et transitoires. De plus, et dans l'infiltration simulée des rivières dans l'aquifère. MODFLOW a simulé la dynamique des eaux souterraines dans l'aquifère avec un bon ajustement aux données observées pour les conditions de régime permanent et transitoires. En utilisant la base de données raster SIG et le module de TRAITEMENT de MODFLOW, un pré et post-traitement efficace et amélioré a été obtenu. L'objectif principal de cette étude est de mettre en évidence l'utilisation des techniques Visual MODFLOW et SIG pour présenter un examen complet de leurs applications à l'hydrologie des eaux souterraines. Les recherches futures porteront sur les liens (de la zone insaturée avec l'aquifère, et du modèle MODFLOW avec le système SIG).

Mots clés: écoulement, eaux souterraines, hydrologie, nappe, modélisation, Visual MODFLOW 2011.1, GIS, écoulement souterrain, Simulation numérique.

ABSTRACT

Efficient techniques for water management have evolved of which GIS (geographic information system) and groundwater modeling is of great significance. In this study the GIS was linked to the modularly structured groundwater model MODFLOW to simulate the hydrological dynamic of the alluvial aquifer of the groundwater data base into the GIS the hydraulic conductivity and the transmissivity of the aquifer were analyzed by overlay techniques and imported into PROCESSING MODFLOW and MODFLOW. After establishing the hydraulics of the aquifer, MODFLOW was calibrated for steady-state and transient conditions. Additionally, and in the simulated infiltration from the rivers into the aquifer. MODFLOW simulated the groundwater dynamics in the aquifer with a good fit to the observed data for steady-state and transient conditions. By using the GIS raster data base and the PROCESSING module of MODFLOW an effective and improved pre- and post-processing was obtained. The main intent of this study is to highlight the usage of Visual MODFLOW and GIS techniques to present a comprehensive review on their applications to groundwater hydrology. Future research will focus on the linkages (of the unsaturated zone with the aquifer, and of the MODFLOW model with the GIS system)

Key words: flow, groundwater, hydrology, groundwater, modeling, Visual MODFLOW 2011.1, GIS, Underground flow, Numerical simulation.