

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique  
Université Abderrahmane Mira de Bejaïa  
Faculté de la Technologie  
Département de l'hydraulique

# MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du grade de **Magister en Hydraulique**

Spécialité : Hydraulique Générale

Par :

BENDAHMANE Ibrahim

## Thème

**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.**

**Devant le Jury composé de :**

M <sup>f</sup> . MAZA Mustapha	Maître de conférences (Univ. de Bejaïa)	Président.
M <sup>f</sup> . KADRI Mohamed	Maître de conférences (Univ. de Boumerdès)	Promoteur.
M <sup>f</sup> . CHERRARED Marzouk	Maître de conférences (Univ. de Bejaïa)	Examineur.
M <sup>lle</sup> . BENMAMAR Saadia	Maître de conférences (ENP d'Alger)	Examinatrice.

*Année 2009/2010*

## *Résumé*

La nappe alluviale de Sébaou fait partie des aquifères du nord de l'Algérie. Face aux besoins des populations, des industries et de l'agriculture des deux wilayas à savoir Tizi Ouzou et Boumerdès, la nappe a subi une exploitation intensive ces dernières années ce qui engendre un abaissement considérable de son niveau piézométrique ainsi que la menace du biseau salé aux endroits plus proches à la mer méditerranéenne. Une gestion par un modèle mathématique devient nécessaire. Le traitement des données hydroclimatiques, hydrodynamiques et géométriques de l'aquifère nous a permis de réaliser la répartition spatiale de ces paramètres. Après une représentation du fonctionnement global du système aquifère, l'utilisation du modèle mathématique sous le logiciel Modflow en régime permanent conduit au calage de ces paramètres. La seconde simulation en régime transitoire conduit à connaître la variation des niveaux piézométriques de la nappe en fonction du temps et de déterminer l'impact des débits prélevés sur la nappe. L'exploitation du modèle a permis aussi de simuler la réponse de la nappe sur la recharge artificielle par injection de l'eau à travers des puits avec différents débits.

**Mots clés :** Bassin de Sébaou, Modélisation numérique, Modflow, calage, surexploitation, bilan de la nappe, gestion.

## *Abstract*

The alluvial layer of Sebaou belongs to the aquifers of the north Algeria. In front of population, industry, and agriculture needs of the two cities which are Tizi Ouzou and Boumerdes, the layer has known an intensive exploitation these last years. This is what leads to a considerable degradation of its water level and the threat of salty bevel in the closer places to the Mediterranean sea. A management by mathematical model is necessary. The processing of hydroclimatic data, hydrodynamic and geometric parameters of the aquifer has allowed us to realise the spatial division of these parameters. After a presentation of the overall functioning of the aquifer system, the use of the mathematical model under Modflow software with permanent regime improves the knowledge of hydraulic characteristics of the aquifer and the evaluation of a complet hydrologic balance. The second simulation with transitory system leads to know the variation of water levels of the layer according to time and to determine the impact of the flows set apart from (deducted on) the layer. The exploitation of the model has also allowed to simulate the response of the layer on the artificial refill by injecting water through wells with different flows (forfeits).

---

**Keywords:** Basin of Sébaou, Modeling digital technology, Modflow, wedging, overexploitation, balance (assessment) of the layer, management

## ملخص

تعد الخزانات الغرينية لسيباو ضمن المياه الجوفية لشمال الجزائر. و أمام احتياجات السكان و الصناعات والزراعة لكل من الولايتين المتمثلتين في تيزي وزو و بومرداس. وقد تعرضت المياه الجوفية لاستغلال بشكل كبير في السنوات الأخيرة. و هذا ما سبب انخفاضا معتبرا لمستواها المعصاري و تهديد الحد المائل المملح لأماكن أقرب إلى البحر الأبيض المتوسط. و يصبح من الضروري الإدارة من خلال نموذج رياضي. وقد سمحت لنا معالجة البيانات الهيدرولوغيا و المؤشرات الهيدرو ديناميكية و الهندسية للمياه الجوفية بانجاز التقسيم الفضائي لهذه المؤشرات. بعد تقديم الأداء العام لنظام طبقة المياه الجوفية باستخدام نموذج رياضي Modflow بنظام منتظم يحسن من معرفة المميزات الهيدروليكية لمحتوى الماء و تقدير حصيلة هيدرولوجية كاملة. و تقود المحاكاة الثانية بتنظيم عابر إلى معرفة تغير مستويات المعصارية لمحتوى الماء بعامل الوقت، و تحديد تأثير النسب المقطعة من طبقة المياه الجوفية. كما سمح استغلال النموذج بتصوير إجابة المياه الجوفية على التعبئة الاصطناعية الثانية و ذلك بضم المياه عبر آبار بمختلف نسب التدفقات.

---

# Remerciements

En tout premier lieu, je tiens à remercier M<sup>r</sup> KADRI Mohamed, mon promoteur, qui a encadré ce travail avec une disponibilité et une immense patience. La clarté de ses idées et sa rigueur scientifique m'ont beaucoup apporté tout au long de ce parcours. Je lui suis profondément reconnaissant et je lui manifeste toute ma gratitude et mon respect.

Toute ma gratitude s'adresse aussi aux membres du jury. M<sup>r</sup> MAZA Mustapha, M<sup>r</sup> CHERRARED Marzouk et Mlle BENMAMAR Saadia, qui m'ont fait l'honneur de lire ce document et de participer au jury de soutenance de mon mémoire.

Je remercie également les personnes qui m'ont fourni les données nécessaires pour la validation de ce travail ; en particulier M<sup>r</sup> BOUCHOUL de l'ANRH d'Alger, M<sup>r</sup> BOUADJLA de l'ANRH Tizi Ouzou et M<sup>r</sup> HAMMACHE Amer le directeur de l'ADE de Boumerdès. Ma reconnaissance va également aux personnels de la direction de l'hydraulique de la wilaya de Tizi Ouzou pour m'avoir bien accueilli et mis à ma disposition les données disponibles.

Un grand merci à madame LARBI Ouardia de l'A.N.R.H d'Alger pour sa disponibilité durant les moments cruciaux et pour le soutien permanent, qu'elle trouve ici mes vifs remerciements. A mademoiselle SEGHIR Karima de l'université de Tébessa pour la mise à ma disposition de sa propre documentation.

J'adresse toute ma gratitude à Mr DRAOUI Amine de l'université de Paris pour la mise à ma disposition de sa propre documentation sur le logiciel MODFLOW et sa disponibilité pour répondre à toutes mes questions lié à mon sujet. Et à M<sup>r</sup> AIT OUALI Kader et IKNI Tahar qui m'ont orienté durant la réalisation de ce travail.

Ces remerciements seraient très injustes s'ils ne s'adressaient pas à mes amis (es) qui ont toujours été à côté de moi aux moments difficiles (Zahir, Tarik, Daoud, Lounis, Akli, Kiki, Oualid, Fateh, Hazim, Malek, Seddek,...).

Enfin, tous mes respects et ma reconnaissance vont à ma famille, source de ma motivation et de mes espoirs : mes chers parents et mes frères et soeurs, leur soutien moral fut déterminant.

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, à tous ceux qui m'ont encadré, à tous ceux qui m'ont encouragé, à tous ceux qui m'ont accordé leur confiance, à tous ceux qui m'ont montré leur intérêt, à vous tous MERCI !!

---

# *Table des matières*

**Introduction générale** ..... 1

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

I: Généralité sur les milieux poreux et recherche bibliographique ..... 3

I.1. Théorie de continuité ..... 3

I.2. Caractéristiques du milieu poreux ..... 3

I.2.1. La granulométrie ..... 4

I.2.3. Infiltration ..... 4

I.2.4. La porosité ..... 4

I.2.4.1. La porosité efficace ( $\square_e$ ), coefficient de porosité ..... 4

I.2.4.2. La porosité cinématique ..... 4

I.2.4.3. La porosité effective ..... 4

I.2.5. Indice des vides ..... 5

I.2.6. Coefficient de saturation  $S_r$  ..... 5

I.2.7. La masse volumique des grains ..... 5

I.2.8. La masse volumique sèche ..... 5

I.2.9. Le coefficient d'emménagement ..... 5

I.2.10. La perméabilité intrinsèque ..... 6

I.2.11. La transmissivité ..... 6

I.3. Classification des aquifères ..... 6

I.3.1. Aquifère à nappe libre ..... 6

I.3.2. Aquifère à nappe captive ..... 6

I.3.3. Aquifère à nappe semi-captive ..... 7

I.3.4. Aquifère à nappe suspendue ..... 7

I.4. Le modèle Mathématique ..... 7

I.4.1. La loi de Darcy ..... 7

I.4.2. Équation de continuité ..... 9

I.5. Les modèles d'écoulement souterrain ..... 11

I.6. La recharge artificielle des nappes alluviales ..... 12

I.6.1. Les dispositifs de la recharge artificielle ..... 13

I.6.2. Quelques exemples de la recharge artificielle des nappes dans le monde ..... 14

I.6.3. Alternatives de la recharge artificielle des nappes en Algérie ..... 16

**Chapitre II : Description et fonctionnement du bassin et de la nappe de Sébaou**

II.1. Situation géographique de la région d'étude ..... 17

II.2. Les paramètres physiques et géomorphologiques du bassin versant du Sébaou 17

II.2.1. Paramètres géométriques ..... 18

II.2.2. Les paramètres de forme.....	18
II.2.2.1. Indice de compacité de Gravelius ( $K_C$ ) .....	18
II.2.2.2. Dimensions du rectangle équivalent.....	19
II.3. Réseau hydrographique .....	19
II.4. La végétation .....	21
II.5. Contexte Géologique .....	21
II.5.1. Les grands ensembles morphologiques .....	22
II.5.1.1. La chaîne du Djurdjura .....	22
II.5.1.2. Le socle kabyle .....	22
II.5.1.3. Le synclinal de Tizi-Ouzou .....	22
II.5.2. Impact de la géologie sur l'hydrologie .....	22
II.5.3. Rôle hydrogéologique des différentes formations.....	23
II.5.3.1. La dorsale Kabyle.....	23
II.5.3.2. Le socle Kabyle et les flyschs.....	23
II.5.3.3. Les alluvions.....	23
II.5.3.4. Géologie des bordures de la vallée du Sébaou .....	23
II.6. Résumé de l'étude hydrologique et climatologique .....	24
II.6.1. Etude des précipitations.....	24
II.6.1.1. Les précipitations du bassin versant de Sébaou.....	24
II.6.1.2. Variation interannuelle .....	26
II.6.1.3. Variation mensuelle.....	29
II.6.1.4. Estimation de la lame d'eau précipitée.....	34
II.6.2. Les températures .....	35
II.6.2.1. Les données de température période:(1989-2006) .....	35
II.6.2.2. Régime climatique.....	36
II.6.3. L'humidité relative de l'air .....	37
II.6.4. Le vent .....	37
II.6.5. Étude de l'évapotranspiration.....	38
II.6.5.1. Évapotranspiration potentielle.....	38
II.6.5.2. Évapotranspiration réelle.....	38
II.6.5.3. Formules de calcul de l'ETP .....	38
II.6.5.3. Formules de calcul de l'ETR .....	40
II.6.6. Hydrologie de surface.....	44
II.6.6.1. Les données des débits aux différentes stations hydrométriques .....	44
II.6.6.2. Régime des débits.....	46
II.6.6.3. Relation Débits –Précipitations pour la période (1977/2006) .....	48
II.6.6.4. Corrélation précipitations- débits .....	49
II.6.6.5. Estimation de la lame de ruissellement .....	50
II.6.6.6. Bilan moyen annuel de l'écoulement.....	50
II.7. Étude hydrodynamique.....	51
II.7.1. Géométrie de la nappe du moyen et bas Sébaou .....	51
II.7.2. Les coupes hydrogéologiques.....	52
II.7.3. Étude de la piézométrie.....	53
II.7.4. Impact du barrage de Taksebt.....	55

---

II.7.4. 1. Présentation du barrage de Taksebt .....	55
II.7.4.2. Impact du barrage sur la recharge de la nappe alluviale de Sébaou .....	55
II.7.5. Impact des sablières sur la nappe de Sébaou .....	56
II.7.6. Alimentation de la nappe .....	56
II.7.7. Les essais de pompage .....	57
II.7.7.1. But d'un essai de pompage .....	57
II.7.7.2. Les essais de pompage de longue durée .....	57
II.7.7.3. Interprétation d'un essai de débit .....	58
II.7.7.4. Exemple de calcul .....	59
II.7.7.4.1. Détermination de la transmissivité .....	60
II.7.7.4.2. Détermination du coefficient d'emmagasinement (S).....	61
II.7.7.4.3. Rayon d'influence ou rayon d'action $r_0$ .....	61

### **Chapitre III : Modélisation et simulation numérique avec modflow**

III.1. Objectif de la modélisation .....	65
III.2.1. Ecoulement de surface .....	65
III.2.2. Ecoulement souterrain .....	66
III.2. Présentation du programme de modélisation .....	66
III.3. Discrétisation spatiale .....	67
III.4. Discrétisation dans le temps .....	69
III.5. Présentation des fonctions du logiciel Modflow .....	69
III.5.1. Fonction de recharge .....	69
III.5.2. Fonction rivière (River).....	69
III.5.3. Charge initiale .....	70
III.6. Modèle transitoire et stationnaire .....	71
III.7. Construction et Calibration du modèle.....	71
III.7.1. Discrétisation du domaine à modéliser .....	71
III.7.2. Les conditions aux limites.....	72
III.7.3. Introduction des Caractéristiques hydrogéologiques dans modèle .....	73
III.7.4. La recharge .....	74
III.7.5. Les puits de pompage et les forages d'observations .....	74
III.7.6- Simulation en régime permanent .....	75
III.7.6.1. Cartes piézométriques restituées .....	76
III.7.6.2. Calage du modèle permanent .....	77
III.7.6.3. Évaluation de la qualité du calage.....	79
III.7.6.4. Bilan hydrique du modèle permanent .....	80
III.7.7. Simulation en régime transitoire .....	81
III.7.7.1. Calage du modèle transitoire.....	82
III.7.7.2. Comparaison des résultats calculés avec ceux mesurés sur terrain.....	82
III.7.8. Quelques scénarios de simulation .....	83
III.7.8.1. La surexploitation de la nappe .....	83
III.7.8.2. Simulation de la réponse de la nappe à la recharge artificielle .....	84

---

A- Injection de l'eau au niveau des forages .....	84
B- Recharge avec un débit $Q=4000\text{m}^3/\text{j}$ pendant 4 mois de l'année.....	87
C- Lâchée d'eau à partir du barrage de Taksebt.....	88
<b>Conclusion générale</b> .....	90
<b>Références bibliographiques</b> .....	92
<b>Annexes</b> .....	96

---



# Liste des figures

## Chapitre I :

Figure (I-1): Volume élémentaire de contrôle.....	9
Figure (I-2): Schéma d'un dispositif de la recharge artificielle par bassins d'infiltration .....	14

## Chapitre II :

Figure (II-1): Situation géographique de la région d'étude.....	17
Figure (II-2): Les sous bassins versant de la vallée du Sébaou.....	18
Figure (II-3): Réseau hydrographique du bassin versant de la vallée du Sébaou .....	20
Figure (II-4): Carte géologique de la vallée du Sébaou .....	24
Figure (II-5): Emplacement des stations pluviométriques du bassin versant « Sébaou ».....	25
Figure (II-6): Variation des précipitations moyennes interannuelles aux différentes stations.....	28
Figure (II-7): Variation mensuelle des précipitations à chaque station .....	30
Figure (II-8): Variation mensuelle des précipitations à chaque station .....	31
Figure (II-9): Variation mensuelle des précipitations à chaque station .....	32
Figure (II-10): Variation mensuelle des précipitations à chaque station .....	33
Figure (II-11): Variation mensuelle des précipitations aux différentes stations .....	34
Figure (II-12): Histogramme des températures moyennes mensuelles période (1989/2006) .....	36
Figure (II-13): Abaque de Wundt.....	41
Figure (II-14) : Évaluation annuelle de la précipitation et de l'ETP.....	43
Figure (II-15): Variation des débits moyens interannuels aux différentes stations.....	47
Figure (II-16): Variation des débits mensuels aux différentes stations.....	48
Figure (II-17): Relation Précipitation- Débit période (1977/1996).....	49
Figure (II-18): Corrélation Précipitations- Débits.....	49
Figure (II-19):Géométrie de la nappe du moyen et bas de Sébaou .....	51
Figure (II-20):Coupe hydrogéologique de la zone de Drâa Ben Khadda .....	52
Figure (II-21):Coupe hydrogéologique de la zone Baghlia .....	52
Figure (II-22):Coupe hydrogéologique du bas Sébaou .....	53
Figure (II-23):Carte piézométrique la nappe de l'année 2000 .....	54
Figure (II-24) : Carte piézométrique la nappe de l'année 2004 .....	54
Figure (II-25) : Exécution du pompage d'essai et interprétation des données par la méthode d'approximation logarithmique de C.E. Jacob (1950) .....	57
Figure (II-26): Carte de situation du forage F1R-VAS1 (ANRH Tizi Ouzou).....	60
Figure (II-27): Coupe lithologique du forage F1R-VAS1 .....	60
Figure (II-28): Courbes de descente et remontée dans le forage F1R-VAS1 (ANRH) .....	62
Figure (II-29): Courbes de descente et remontée dans piézomètre F1R-VAS1 (ANRH).....	62

---

**Chapitre III :**

Figure (III-1): Discrétisation spatiale d'un aquifère .....	67
Figure (III-2a): Cellule i, j, k et les indices pour les six cellules adjacentes.....	68
Figure (III-2b): Écoulement dans la cellule i, j, k provenant de la cellule i, j-1, k .....	68
Figure (III-3): Schéma de la condition-limite « Rivière » .....	70
Figure (III-4): Topographie et géométrie de la nappe du Bas de Sébaou .....	71
Figure (III-5) : Maillage de la carte avec laquelle les conditions aux limites .....	72
Figure (III-6) : Carte de répartition du Substratum de la nappe.....	73
Figure (III-7): La localisation des points d'eau le long de la vallée de Sébaou.....	74
Figure (III-8) : Carte piézométrique simulée en mars 2000 en régime permanent.....	76
Figure (III-9) : Répartition spatiale de la piézométrie en mars 2000 en régime permanent.....	76
Figure (III-10): La direction de l'écoulement souterrain .....	77
Figure (III-11): Calibration en régime permanent.....	78
Figure (III-12): Distribution spatiale de la perméabilité après calage du modèle.....	78
Figure (III-13): Bilan hydrique de la zone modélisée en régime permanent .....	80
Figure (III-14): Carte piézométrique simulée en régime transitoire à l'année 2005.....	81
Figure (III-15): Calibration du modèle en régime transitoire .....	82
Figure (III-16): Chroniques piézométriques mesurées et calculées .....	82
Figure (III-17): Carte piézométrique simulée en 2014 de la nappe de Sébaou.....	83
Figure (III-18): Niveaux piézométrique simulés pour la période 2000/2014 .....	84
Figure (III-19): Réponse de la nappe à la recharge artificielle avec différents débits .....	85
Figure (III-20): Recharge avec $Q=2000 \text{ m}^3/\text{j}$ .....	86
Figure (III-21): Recharge avec $Q=3000 \text{ m}^3/\text{j}$ .....	86
Figure (III-22): Recharge par injection avec un débit ( $Q=4000 \text{ m}^3/\text{j}$ ) .....	87
Figure (III-23): Recharge par injection avec un débit ( $Q=5000 \text{ m}^3/\text{j}$ ) 4 fois dans l'année .....	87
Figure (III- 24): Réponse de la nappe à la recharge artificielle par lâchée d'eau du barrage .....	88

---

# Liste des tableaux

## Chapitre II :

Tableau (II-1) : Répartition des superficies par sous bassin .....	18
Tableau (II-2) : Paramètres de forme .....	19
Tableau (II-3): Les différentes stations pluviométriques et son code ANRH.....	25
Tableau (II-4): Variation interannuelle des précipitations aux différentes stations .....	26
Tableau (II-5): Suite des précipitations des autres stations.....	27
Tableau (II-6) : Variation mensuelle des précipitations aux différentes stations.....	29
Tableau (II-7) : La variation interannuelle des précipitations.....	34
Tableau (II-8): Température moyenne mensuelle à la station de Tizi Ouzou .....	35
Tableau (II-9): Valeurs de l'indice de Martonne ( $A_m$ ).....	37
Tableau (II-10): Variation de l'humidité de l'air .....	37
Tableau (II-11) : Moyennes mensuelles des vitesses des vents. ....	37
Tableau (II-12): Les valeurs de l'ETP par la méthode de Thornthwaite .....	39
Tableau (II-13): Les valeurs de l'ETP par la méthode de Serra.....	40
Tableau (II-14) : valeurs du paramètre (C-F).....	42
Tableau (II-15) : Résultats de la méthode du bilan de Thornthwaite.....	43
Tableau (II-16) : Tableau récapitulatif des valeurs de l'évapotranspiration .....	44
Tableau (II-17) : Caractéristiques des stations hydrométriques.....	45
Tableau (II-18): Débit mensuels inter annuels ( $m^3/s$ ) de 1977 à 1996 à la station de Baghlia. ....	46
Tableau (II-19) : Variation des débits moyens annuels aux différentes stations .....	47
Tableau (II-20): des Débits moyens mensuels .....	47
Tableau (II-21) : Relation précipitations-Débits .....	48
Tableau (II- 22): Tableau récapitulatif du bilan hydrologique du bassin versant du Sébaou .....	51
Tableau (II- 23): État des forages de la nappe de l'oued Aïssi (DHW de Tizi-Ouzou, 2001).....	56
Tableau (II-24):différents résultats des essais de pompage réalisés sur la nappe de Sébaou.....	62
Tableau (II-25): Valeurs du coefficient d'emmagasinement de la vallée du Sébaou .....	63

## Chapitre III :

Tableau (III-1): Valeurs statistiques des erreurs du niveau piézométrique.....	79
Tableau (III-2) : Bilan total de la zone du modèle permanent .....	80

---

## Principales Notations

Symbole	Définition	Unité
$A$	: Section l'écoulement	[m <sup>2</sup> ]
$a$	: Exposant climatique	-
$A_m$	: Indice de Martonne	-
$b$	: L'épaisseur de la nappe	[m]
$C$	: Capacité de rétention	-
$C_r$	: La porosité effective	-
$C_{riv}$	: La conductance de la rivière	[m <sup>2</sup> /s]
$D'$	: Densité apparente	-
ETR	: évapotranspiration potentielle	[mm]
ETR	: Évapotranspiration réelle	[mm]
$e$	: Indice des vides	-
$F$	: Capacité du point de flétrissement	-
$h$	: La charge hydraulique	[m]
$h_{nappe}$	: Le niveau de la nappe ;	[m]
$h_{riv}$	: Le niveau d'eau dans la rivière	[m]
$I$	: Largeur du rectangle équivalent	[m]
$I$	: Indice thermique annuel	-
$i$	: Indice thermique mensuel	-
$g$	: L'accélération de la pesanteur	[m/s <sup>2</sup> ]
$K$	: La perméabilité	[m/s]
$K_C$	: Indice de compacité de Gravelius	-
$K_{riv}$	: La perméabilité des sédiments du lit de la rivière	[m/s]
$L$	: Pouvoir évaporant	-
$L_{riv}$	: La longueur de la section du cours d'eau de la cellule	[m]
$M_{riv}$	: L'épaisseur du lit de la rivière	[m]
$M_s$	: La masse des grains solides	[kg]
$n$	: Nombre de points d'observation	-
$N_S$	: Niveau statique	[m]
$P$	: Précipitation	[mm]
$P_i$	: Précipitation moyenne (mm)	[mm]
$Q$	: Débit d'eau	[m <sup>3</sup> /s]
$Q_{riv}$	: Le flux passant à travers le niveau d'infiltration	[m <sup>3</sup> /s]
$R$	: Ruissellement superficiel moyen annuel	[mm]
$RFU$	: Réserve en eau utile	[mm]
$r$	: Distance de piézomètre	[m]
$R_i$	: Différence entre le résultat calculé et l'observé	[m]
$S$	: Coefficient d'emmagasinement;	[l/s]
$S_r$	: Coefficient de saturation	-
$s$	: Rabattement;	[m]
$s_r$	: Rabattement résiduel	[m]
$T$	: La transmissivité	[m <sup>2</sup> /s]
$T_m$	: Température moyenne	[C°]

---

Symbole	Définition	Unité
$t$	: Temps de pompage	[s]
$t'$	: Temps écoulé depuis l'arrêt de pompage	[s]
$V_e$	: Volume de l'eau	[m <sup>3</sup> ]
$V_r$	: Volume de rétention	[m <sup>3</sup> ]
$V_s$	: Volume des solides	[m <sup>3</sup> ]
$V_v$	: Volume des vides	[m <sup>3</sup> ]
$W_{riv}$	: La largeur du cours d'eau	[m]
$X_{cal}$	: Valeur de la piézométrie observée	[m]
$X_{cal}$	: Valeur de la piézométrie observée	[m]
$\alpha$	: La compressibilité verticale du squelette solide	-
$\beta$	: La compressibilité isotherme de l'eau	-
$\rho$	: La masse spécifique de l'eau	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_d$	: La masse volumique sèche	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_s$	: La masse volumique des grains	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\eta$	: Porosité	-
$\eta_e$	: La porosité efficace	-

---

---

***Introduction***  
***Générale***

---

# *Introduction Générale*

La surexploitation de la nappe phréatique de l'Oued Sébaou pour satisfaire les besoins en eau (AEP, irrigation et...) de la région des deux wilayas de Tizi-Ouzou et Boumerdès et le manque des points de recharge engendre un abaissement du niveau de la nappe pendant les dernières années.

L'oued Sébaou subit une dégradation significative le long de son cours et devient un véritable dépotoir des rejets domestiques et industriels. On note par ailleurs, dans le secteur aval de la nappe, la menace de l'avancée du biseau salé. Il y a lieu également, d'invoquer l'extraction anarchique et incontrôlée des sables et alluvions du lit de l'oued Sébaou, véritable filtre protecteur de la nappe souterraine. En conséquence, la nappe est exposée à toutes les éventuelles formes de pollution.

Parallèlement, des volumes importants des eaux superficielles se perdent dans la mer dépassant parfois les quantités annuelles prélevées de la nappe. Notre projet de recherche s'inscrit dans un programme axé principalement sur la récupération de ces eaux superficielles non mobilisées et de protéger la nappe qui est menacée par le phénomène d'intrusion marine.

Le présent rapport décrit donc, une étude de la modélisation de l'échange entre les eaux de surface et la nappe phréatique de Sébaou. Des scénarios de recharge artificielle afin de mobiliser les eaux de pluies sont présentés.

Le plan de ce mémoire, constitué de trois chapitres, reprend les grandes étapes du travail tel qu'il s'est déroulé:

*Le premier chapitre* comporte les généralités sur le sujet étudié, après avoir présenté les caractéristiques essentielles du milieu poreux et les processus hydrologiques majeurs, en lien avec la physique du sol, nous abordons les connaissances disponibles sur le modèle mathématique qui traduit le fonctionnement des nappes phréatiques. Enfin, un rapide tour d'horizon sur la technique de la recharge artificielle des aquifères et son expérimentation à travers le monde.

*Le deuxième chapitre* Cette partie présente l'exploitation des données climatologiques hydrologiques qui nous a permis de caractériser le climat de cette région ainsi que de construire le bilan hydrologique. Le chapitre se poursuit par l'analyse du contexte géologique et hydrogéologique global de la nappe pour évaluer les caractéristiques hydrodynamiques

nécessaires à la paramétrisation du domaine considéré à savoir : la transmissivité, la perméabilité et le coefficient d'emmagasinement.

*Le troisième chapitre* aborde une modélisation numérique tridimensionnelle réalisée avec le logiciel *Modflow (3.0)* qui permet non seulement de valider le modèle conceptuel établi mais aussi de tester la sensibilité de la nappe aux variations climatiques, à l'augmentation des prélèvements et la réponse aux différents scénarios de la recharge artificielle. Une interprétation des résultats des différents cas de simulation ont fait l'objet de la suite de ce chapitre.

On termine par une discussion en guise de conclusion sur les résultats obtenus par la simulation. Quelques remarques et perspectives sont soulignées.



---

# *Chapitre I*

*Généralités sur les milieux  
poreux et recherche  
Bibliographique*

---

## **I. Généralités sur les milieux poreux et recherche bibliographique**

Nous nous intéressons dans cette étude à l'écoulement dans les milieux poreux aquifères. Un aquifère est une formation géologique contenant de l'eau et à travers laquelle, en conditions normales, une quantité significative de cette eau s'écoule. Un milieu poreux est un matériel constitué par une matrice solide et des vides, appelés pores. Le pourcentage de vide d'une roche définit sa porosité totale. Ces vides peuvent être occupés par de l'eau, de l'air ou d'autres fluides. [Louis. J, 1980]. Dans notre étude nous nous intéressons aux milieux saturés en eau c'est à dire dans lesquels tous les vides sont remplis d'eau.

En hydrogéologie, l'analyse de la porosité n'est pas exclusivement géométrique mais se réfère également à l'eau contenue dans le milieu poreux, à ses liaisons physiques avec la matrice solide et à ses mouvements possibles. En effet, la porosité totale d'une roche n'est pas une condition suffisante à l'écoulement d'eau. C'est l'interconnexion des pores ainsi que les relations fluides-solide qui définiront la circulation du fluide. [Besnard. K, 2003]

Dans ce chapitre, nous définissons d'abord les caractéristiques du milieu poreux puis nous décrirons mathématiquement les modèles d'écoulement de l'eau dans un milieu poreux.

### **I.1. Théorie de continuité**

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

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

### **I.2. Caractéristiques du milieu poreux**

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

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

Etant donné l'irrégularité des milieux poreux naturels, il importe de définir l'échelle de l'homogénéité. Ainsi, une alluvion constituée par des grains d'environ 1mm de diamètre sera considérée homogène à l'échelle du  $dm^3$ .

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

### **I.2.1. La granulométrie**

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

### **I.2.2. Infiltration**

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

### **I.2.3. La porosité**

La porosité d'une couche de sol en place notée  $\eta$ , est la partie d'un volume apparent unitaire qui n'est pas occupé par la phase solide. C'est le rapport volumique des vides d'un corps au volume total. Elle est exprimée en % :

$$\eta = \frac{V_v}{V_t}.$$

#### **I.2.3.1. La porosité efficace $\eta_e$ , coefficient de porosité**

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

$$\eta_e = \frac{V_e}{V_t}.$$

#### **I.2.3.2. La porosité cinématique**

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

#### **I.2.3.3. La porosité effective**

Appelée aussi la capacité de rétention. C'est le rapport du volume de rétention  $V_r$  (eau non égouttable par gravité) au volume total apparent  $V_t$ . Elle est donnée en pourcentage, par la formule :

$$C_r = \frac{V_r}{V_t}$$

**I.2.5. Indice des vides [Lefebvre. R, 2006]**

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

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

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

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

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

**I.2.6. Coefficient de saturation  $S_r$**

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

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

**I.2.7. La masse volumique des grains [Hillel, 1998]**

La masse volumique  $\rho_s$  [ $M/L^3$ ] est la masse des grains solides  $M_s$  divisée par le volume de la phase solide  $V_s$ :

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

**I.2.8. La masse volumique sèche [Hillel, 1998]**

La masse volumique sèche  $\rho_d$  est le rapport entre la masse des grains solides  $M_s$  et le volume total du milieu poreux  $V_T$  :  $\rho_d = \frac{M_s}{V_T}$  .

**I.2.9. Le coefficient d'emménagement:[François. R, 2002]**

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

$$s_s = n \rho g \left( \beta + \frac{\alpha}{n} \right)$$

Avec :

- $n$  : est la porosité;
- $\rho$ , la masse spécifique de l'eau ;
- $g$ , l'accélération de la pesanteur ;
- $\alpha$ , la compressibilité verticale du squelette solide de milieu poreux;
- $\beta$ , la compressibilité isotherme de l'eau.

Le coefficient d'emménagement de la nappe  $s$  (sans dimensions), est défini comme le volume d'eau libéré par une colonne verticale de section unitaire correspondant à une diminution unitaire de la hauteur piézométrique moyenne.

Dans le cas de nappes confinées, le coefficient d'emménagement est donné par  $s=b.s_s$  ( $b$  étant l'épaisseur de la nappe). Dans les nappes phréatiques le coefficient d'emménagement est donné par  $s=b.s_s + n_e$  où  $n_e$  est la porosité effective correspond au volume d'eau libéré par unité de volume, par suite de l'action de la gravité.

Etant donné que  $n_e \gg b.s_s$  on admet dans la pratique que  $s = n_e$  dans les nappes phréatiques.

### **I.2.10. La perméabilité intrinsèque [Besnard. K, 2003]**

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

### **I.2.11. La transmissivité [Castany. G, 1982]**

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

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

## **I.3. Classification des aquifères**

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

### **I.3.1. Aquifère à nappe libre**

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

### **I.3.2. Aquifère à nappe captive**

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

### **I.3.3. Aquifère à nappe semi-captive**

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

### **I.3.4. Aquifère à nappe suspendue**

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

## **I.4. Le modèle Mathématique**

### **I.4.1. La loi de Darcy**

L'écoulement de l'eau à travers les formations perméables a été étudié par H. Darcy en 1856. La vitesse de circulation de l'eau dans les milieux poreux sont très variables. Elles dépendent d'un certain nombre de facteurs, dont évidemment la perméabilité de l'aquifère, mais aussi le gradient hydraulique qui est défini par la différence d'élévation entre deux points de la surface de la nappe, divisée par la distance entre ces deux mêmes points, et la viscosité de l'eau.

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

$$Q = -K \times A \times \frac{dh}{dl} \quad (I-1)$$

Avec  $Q$  : Débit,  $K$  : Conductivité hydraulique ou perméabilité,  $A$  : Aire de la section perpendiculaire à l'écoulement,  $dh/dl$  : Gradient de charge hydraulique.

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

On peut se référer dans cette section aux travaux de plusieurs auteurs [**Bear .1972, Freeze et al. 1979, Fetter. 1994, Gélinas et al, 1992**] pour leur dérivation :

- **Cas d'une nappe Captive**

On considère l'écoulement transitoire en trois dimensions dans une nappe captive. On représente d'abord le cas général où la conductivité hydraulique est anisotrope (différente dans les trois directions  $x$ ,  $y$  et  $z$ ), l'aquifère et l'eau sont compressibles mais que la densité de l'eau varie peu tout de même avec la pression et l'équation qui gouverne l'écoulement est donnée par l'expression (I-2):

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (I-2)$$

La divergence des flux (le bilan des écoulements à travers la surface d'un volume de contrôle élémentaire)

Changement d'emmagasinement en fonction du temps

La relation (I-2) peut être simplifiée. Si l'aquifère est isotrope, la conductivité hydraulique sera la même indépendamment de la direction dans l'espace ( $K_x = K_y = K_z = K$ ). Aussi, on peut considérer l'écoulement en plan uniquement, en deux dimensions, de sorte que le terme en  $z$  est éliminé dans l'expression précédente. Finalement on peut utiliser les propriétés globales de l'aquifère homogène considérant son épaisseur saturée  $b$ , soient la transmissivité  $T$  ( $T = K \cdot b$ ) et le coefficient d'emmagasinement  $S$  ( $S = S_s \cdot b$ ). La relation (I-2) devient alors :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (I-3)$$

• **Cas d'une nappe libre**

La limite supérieure des nappes libres est représentée par la surface libre où l'eau à la pression atmosphérique. L'écoulement dans ce type de nappe pose un problème particulier parce que l'épaisseur saturée  $b$  est variable. Si on utilise la base de l'aquifère libre comme référence d'élévation pour la charge hydraulique  $h$ , on a que la charge est équivalente à l'épaisseur saturée. Pour qu'il y ait écoulement, il doit y avoir différence de charge, ce qui entraîne aussi un changement de l'épaisseur saturée et de la section d'écoulement. Le problème de l'écoulement en nappes libres est donc intrinsèquement non linéaire puisque la valeur de la charge dépend de la charge elle-même. Cependant, ce problème peut être linéarisé en supposant que l'épaisseur saturée est très grande relativement aux changements de son épaisseur relié à l'écoulement (gradient hydraulique). On utilise donc une valeur moyenne de  $b$  pour l'ensemble de l'aquifère. La capacité d'emmagasinement des nappes libres dépend de leur porosité de drainage  $n_d$ . On obtient ainsi une équation différentielle approximative, équation de Boussinesq, représentant l'écoulement dans les nappes libres :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{n_d}{K_d} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (I-4)$$

L'analyse de la filtration comporte toujours en premier lieu la détermination de la charge hydraulique en différents points du domaine étudié. Pour les écoulements permanents, le potentiel  $\phi(x, y, z)$  ne dépend que des variables spatiales.

La description d'un écoulement permanent par l'équation de *Darcy* consiste à rechercher les équations auxquelles doit satisfaire  $\phi(x, y, z)$  dans le domaine étudié d'une part et sur ses limites d'autre part.

Dans le cas d'un milieu isotrope la loi de *Darcy* généralisée s'écrit :

$$\left. \begin{aligned} u &= -K \frac{\partial \phi}{\partial x} \\ v &= -K \frac{\partial \phi}{\partial y} \\ w &= -K \frac{\partial \phi}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (I-5)$$

Avec :

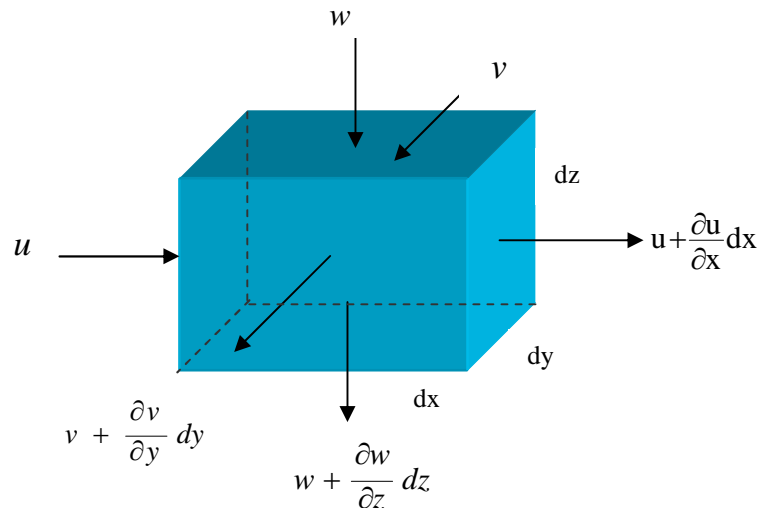
- $K$ : Le coefficient de perméabilité ;
- $h$ : La charge hydraulique qui s'exprime, dans un environnement soumis à la gravité terrestre  $g$ , par :

$$h(x, y, z) = \frac{P(x, y, z)}{\rho} + z + \frac{|V|^2}{2g}$$

Où :

- $\rho$  : Est le poids volumique de l'eau ;
- P : La pression en tout point du domaine.

A ces équations nous devons ajouter l'équation de continuité qui stipule que : Si nous considérons le petit volume élémentaire de la figure (I-1) et que nous supposons que le liquide filtrant ainsi que le milieu poreux sont incompressibles, nous devons admettre que la somme des débits entrant par les trois faces est égale à la somme des débits sortant par les faces opposées.



**Figure (II.1):** Volume élémentaire de contrôle.

#### I.4.2. Équation de continuité

L'équation de continuité est basée sur le principe de conservation de la masse. Elle s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (I-6)$$

Avec:  $u$ ,  $v$  et  $w$  les composantes de la vitesse.

Débit entrant :

$$\sum_e dq = u dy dz + v dx dz + w dx dy \quad (I-7)$$

Débit sortant :

$$\sum_s dq = (u + \frac{\partial u}{\partial x} dx) dy dz + (v + \frac{\partial v}{\partial y} dy) dx dz + (w + \frac{\partial w}{\partial z} dz) dx dy \quad (I-8)$$

En posant  $\sum_e dq = \sum_s dq$ , on trouve :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (I-9)$$

(I-9) est l'équation de continuité. On peut l'écrire vectoriellement:



$$\operatorname{div} \vec{V} = 0 \quad (\text{I-10})$$

La distribution de la charge hydraulique est caractérisée par les équations (I-6) et (I-10). Si nous dérivons chacune des équations (I-6) par rapport à  $x, y, z$ , respectivement et si nous les additionnons nous obtenons compte tenu de (I-10):

$$\left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (\text{I-11})$$

La charge hydraulique est donc un potentiel harmonique (fonction de  $x, y, z$ ,) satisfaisant l'équation de *Laplace*.

➤ Pour un écoulement non permanent, dans un milieu homogène et isotrope l'équation devient [Bear, J, 1979] :

$$K \nabla^2 \phi \equiv K \operatorname{div}(\operatorname{grad} \phi) \equiv K \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) = S \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (\text{I-12})$$

Tel que  $S$ , est le coefficient d'emmagasinement.

➤ Pour un milieu isotrope non homogène l'équation devient :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = S \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (\text{I-13})$$

➤ Pour un milieu anisotrope non homogène l'équation (I-13) devient :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = S \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (\text{I-14})$$

➤ Pour un écoulement non permanent à deux dimensions, avec un apport extérieur  $Q$ , dans un milieu homogène anisotrope l'équation (I-14) s'écrit:

$$K_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + Q = S \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (\text{I-15})$$

➤ Pour un écoulement permanent à deux dimensions (I-15) devient :

$$K_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + Q = 0 \quad (\text{I-16})$$

L'équation (I-16) est l'équation de base pour un écoulement permanent à deux dimensions dans un milieu poreux saturé.

## **I.5. Les modèles d'écoulement souterrain**

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

Les modèles numériques 3D sont largement utilisés en hydrogéologie [**Oreskes et al., 1994; Bradley, 1996; Barone, 2000**] Ils permettent de comprendre et de caractériser les écoulements souterrains, les transports de solutés, ou encore les bilans hydrologiques des systèmes souterrains [**Su et al., 2000; Bradley, 2002; McKenzie et al., 2002; Meriano et Eyles, 2003; Triganon et al., 2003; Weng et al., 2003; Zhang et Mitsch, 2005**].

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

Plusieurs modèles hydrologiques ont déjà été développés et utilisés dans des contextes de zones humides. Hydrus 2D est un modèle 2D d'écoulements saturés – non saturés [**Joris et Feyen, 2003**]. Appliqué à un transect de zone humide riveraine de la Dijle (Belgique), il a montré son efficacité à reproduire la dynamique des eaux souterraines. Marthe, développé par le BRGM, modélise les écoulements saturés – non saturés à 3D [**Weng et al, 2003**]. Il a permis de quantifier les interactions hydrologiques entre la zone humide des marais de Rochefort (France) et l'aquifère sous-jacent, et de caractériser les flux échangés entre les deux. Wetlands décrit les écoulements souterrains dans des conditions de saturation du sol et d'évapotranspiration variable et simule efficacement la variabilité de la surface libre et l'évolution du niveau d'eau dans le marais [**Mansell et al, 2000**].

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

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

Plusieurs validations ont été effectuées pour tester le pouvoir de résolution de SEEP/W [**Chapuis et al, 1993; Crespo, 1994**]. Ces auteurs arrivent à la conclusion que le logiciel présente l'avantage d'avoir une bonne résolution à déterminer de nombreux problèmes en hydrogéologie.

Des modèles physiques ont aussi été utilisés, ils consistent en des modèles réduits d'aquifères, toutefois, dans le cadre de l'étude des interactions entre les écoulements souterrain et en cours d'eau. L'ordre de grandeur des facteurs d'échelles à considérer pose des difficultés techniques majeures [**Bear, (1979)**]. Les modèles physiques sont surtout utilisés pour le développement et la validation de modèles théoriques à partir d'analyses en laboratoire sur une colonne de sol.

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

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

## **I.6. La recharge artificielle des nappes alluviales**

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

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

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

- a- Restauration d'un équilibre perturbé et protection contre des perturbations diverses :
  - Surexploitation d'une nappe;
  - Déviation d'un cours d'eau;
  - Intrusion d'eaux salées ou polluées dans la nappe;
  - Etc...
- b- Amélioration de la qualité des eaux :
  - Epuration naturelle des eaux infiltrée (dans des dispositifs superficiels de la recharge artificielle et à travers la zone non saturée).
  - Diminution de la minéralisation des eaux souterraines en réinjectant des eaux douces.
  - Régularisation thermique des eaux réinjectées (pour le refroidissement industriel).
  - Etc...
- c- Accroissement de la ressource en eau et optimisation du régime d'exploitation pour une gestion rationnelle et durable des eaux superficielle et souterraines (d'un bassin ou d'un groupe de bassins naturels) afin d'atténuer ou de régler les problèmes de pénuries saisonnières, d'alimenter une région déficitaire par une autre, etc.

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

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

### **I.6.1. Les dispositifs de la recharge artificielle**

On peut citer plusieurs types de la recharge artificielle :

- Des lâchées d'un barrage ;

- Injection de l'eau douce à travers des forages et galeries souterraines;
- A partir des bassins d'infiltration.

➤ **Infiltration autochtone favorisée**

Une méthode fréquemment employée est la construction de petits barrages sur les cours d'eau afin de réguler les écoulements de surface et de favoriser l'infiltration dans les retenues ainsi créées. Les exemples sont nombreux en zones semi-désertiques comme dans le sud tunisien où une vaste campagne de construction de barrages sur les oueds est conduite depuis plusieurs années. Cette technique offre de plus l'avantage de stocker des terres arables et de permettre ainsi des cultures. Sur l'île de Malte, des retenues collinaires ont été mises en place sur les oueds pour favoriser l'infiltration, dans le but de limiter l'intrusion saline induite par les pompes.

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

L'eau de surface d'un cours d'eau peut être détournée pour alimenter un aquifère. Les milieux karstiques, grâce à leurs propriétés de recharge rapide, peuvent donner lieu à l'intéressante recharge, comme c'est le cas de Cisjordanie où l'aquifère du Yaqon-Taninim (formation carbonatée du Cénomano-turonien) sollicitée à raison de  $400.10^6 \text{ m}^3 / \text{an}$ , reçoit un complément de  $100.10^6 \text{ m}^3 / \text{an}$  par infiltration des eaux de surface du Jourdain.

Mais l'action quantitative peut aussi se faire en utilisant l'aquifère comme système capacitif régulateur. On peut ainsi réguler le débit de certains cours d'eau en injectant leur eau dans les aquifères bordiers. L'eau de l'Oise ainsi prélevée en périodes de crues, infiltrée dans l'aquifère crayeux est restituée en périodes d'étiage pour augmenter le débit d'étiage de l'Oise d'environ  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

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

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

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

Ces paramètres se retrouvent dans les craies et les formations poreuses (sable, gravier). Les aquifères fissurés et les karsts, dans lesquels l'eau circule trop rapidement, sont généralement peu favorables à la réalimentation artificielle, mais d'autres méthodes de gestion active peuvent être développées.

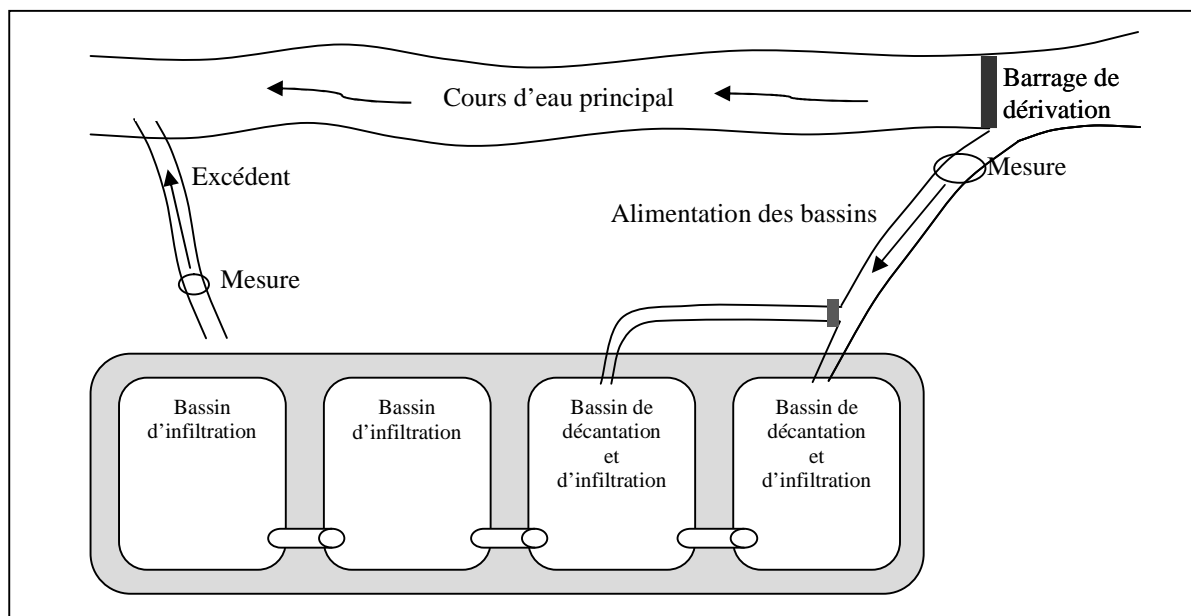
La réalimentation artificielle des aquifères se fait généralement à partir de bassins ou de fossés d'infiltration (Figure II-2), souvent d'un lit de sable. Le taux d'infiltration est compris entre 15 m et 0,1 m/jour selon les installations. Il se situe en général autour de 1 m/jour. On peut aussi procéder à des aménagements des berges des cours d'eau pour augmenter la surface de contact avec la formation géologique contenant l'aquifère. Des barrages de dérivation permettant de diriger l'eau des cours d'eau vers les bassins

d'infiltration. Des barrages gonflables en caoutchouc sont utilisés en Californie (Etats-Unis), pour dériver vers des bassins d'infiltration d'eau de la rivière Santa Ana et recharger artificiellement un aquifère alimentant 2 millions d'habitants. 70 % de l'eau prélevée provient de ce dispositif. Les barrages se gonflent et dégonflent à volonté, en fonction du débit de la rivière et de la turbidité, afin de ne recueillir que des eaux limpides et éviter le colmatage des bassins.

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

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

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



**Figure (I-2):** Schéma d'un dispositif de la recharge artificielle par bassins d'infiltration

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

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

Malgré le recours à la recharge artificielle depuis déjà fort longtemps; jusqu'au années 60, la quasi-totalité des nappes du sud restaient surexploitées avec des rabattements atteignant les 60 m de profondeurs (le niveau initial se trouvait à 2.5 m sous le sol). Et le biseau salé continuait à avancer dans la plaine côtière de Los-Angeles jusqu'à plus 1000 m. Pour pallier à cette situation, il a été décidé vers les années 70, la mise en ouvre progressive et la gestion rationnelle des ressources en eau de toute la Californie.

Le projet « California water plan » consiste à transférer l'eau du nord vers le sud sur un réseau de 700 km de long, avec un débit en tête fixé à 850 m<sup>3</sup>/s. Au niveau de la plaine côtière de Los-Angeles (au sud) le débit prévu est de 175 m<sup>3</sup>/s.

▪ **En Europe:**

**1. Aux Pays-Bas**, la ville d'Amsterdam est alimentée en eau potable grâce à des lacs artificiels d'infiltration aménagés dans des dunes littorales et recevant de l'eau du Rhin à raison de 1.5 m<sup>3</sup>/s après un transfert par conduite de 53 km.

**2. En France** : La nappe alluviale de la Garonne a fait l'objet d'une recherche expérimentale prometteuse à la fin de l'année 1995 et au début de 1996. Un volume d'eau de 132 000 m<sup>3</sup> a été injecté à partir d'eau de surface via un fossé d'environ 4 m de profondeur. Les résultats permettent, selon les niveaux calculés par un modèle numérique monocouche développé aux déférences finis, d'évaluer un volume disponible de l'ordre de 70 000 à 80 000 m<sup>3</sup> un mois après l'arrêt de l'injection et 20 000 à 30 000 m<sup>3</sup> à la fin du suivi soit environ 2 mois plus tard ; ceci réparti sur une superficie environ 1.5 Km<sup>2</sup>. [David et al ,1995]

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

- L'étude de faisabilité de la recharge artificielle du complexe « Alluvions-Calcaires » draine par l'oued Tagmoute est basée sur une modélisation mathématique des débits à différentes périodes de retour. Le calcul des volumes infiltrés en absence et en présence du barrage a été fait par le logiciel ECRET qui a permis d'estimer l'apport en eau vers la nappe. Le prolongement du temps de contact entre le complexe « alluvions-calcaires » et les eaux de la crue, par l'écrêtement du barrage a induit, un volume infiltré 12 fois plus important qu'en conditions naturelles. [Saïd et al, 2006].

▪ **Et en Tunisie** (la nappe de Sousse, Nabel...).

- A la mise en eau des retenues collinaires, il est remarqué sur certains puits en aval des digues des barrages la remontée de leurs niveaux d'une manière impressionnante (plus de 10 m). Le niveau phréatique a été rencontré à 3 à 4 m de la surface du sol lors du creusement des puits. Un modèle unidimensionnel implicite à éléments finis a été développé pour calculer les débits souterrains à chaque heure selon la loi de Darcy en fonction du gradient piézométrique de maille à maille. Ce modèle a permis de quantifier les flux d'eau entre la retenue et l'aquifère alluvial en aval et de simuler le comportement de cette nappe en fonction des variabilités de remplissage de la retenue. [Nasri et al, 2001].

▪ **En Iran** : Une étude a été menée sur trois sites de recharge artificielle (Kohrouyeh, Bagh-Sorkh et Kachak) dans la province d'Ispahan (Iran central) dans le but de déterminer les facteurs limitant le taux de la recharge artificielle. Cinq traitements (T1–T5) ont été testés et l'infiltration a été mesurée sur une couche de sédiments déposés; T2, après enlèvement du sédiment; T3, grattage des sédiments et du sol sur 5 cm; T4, grattage des sédiments et du sol sur 10 cm; et T5, enlèvement des sédiments et de 15 cm de sol. La teneur initiale en eau du sol sur les sites va de 1.0 à 2.87% à Kohrouyeh, 1.18 à 3.47% à Bagh-Sorkh, et 1.89 à 3.93% à Kachak. Un accroissement significatif du taux final d'infiltration de la procédure T5 comparée à T1 a été observé sur tous les sites de recharge. Les taux finaux d'infiltration des procédures T1 et T5 à Kohrouyeh, Bagh-Sorkh et Kachak étaient respectivement 0.35 et 7.9, 1.22 et 12.3, et 0.93 et 6.2 cm/h. Les taux d'infiltration des procédures T2, T3 et T4 ne

présentaient pas statistiquement de différences significatives. On en conclut donc qu'en moyenne la capacité d'infiltration de la recharge non traitée s'est accrue de 20.3 % par rapport aux valeurs initiales, et que le grattage du sommet du sédiment et du sol sur 15 cm peut améliorer 68.3 % de la capacité initiale d'infiltration [Mousavi et al, 1999].

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

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

- La seule application sur le terrain a eu lieu le 27 avril 1998 par des compagnes de lâchers des eaux du barrage de Boukourdane (Ouest d'Alger) pour recharger la nappe alluviale de Oued El Hachem dont le volume totale infiltré est 52,3 m<sup>3</sup>, soit une infiltration de 10,87% du volume lâché [Remini. B, 2005].
- **Kadri et Al** : Dans le cadre d'un projet de recherche « Réalimentation artificielle de la nappe de Sébaou à partir du barrage de Taksebt – exploitation, gestion et protection » un modèle de simulation numérique de la recharge artificielle a été établi, il nous donne l'évolution dans le temps de l'échange d'eau de la nappe avec le domaine extérieur pour différents types de recharge. Ce modèle peut être utilisé pour la simulation de la recharge d'une nappe réelle et tient compte de la différence de perméabilité du sol [Kadri et Al, 2005, 2006]
- **Lagha-Bouزيد. S** : En 2000 elle a proposé une étude de faisabilité de la recharge pour la nappe de Metidja et la technique proposée est l'implantation des bassins d'infiltration au Sud Ouest de la plaine de Metidja au niveau de la vallée de l'Oued Chiffa. Il a proposé un dispositif de 10 bassins, disposé côte à côte suivant un alignement parallèle à l'oued à une distance comprise entre 700 à 1000 m. Le débit d'infiltration est estimé à 40 m<sup>3</sup>/jour par mètre linéaire. Mais ce dispositif demande une station de pompage pour pomper l'eau dans l'oued et alimenter les bassins d'infiltration. [Lagha-Bouزيد. S, 2000].
- **Seghir. K** : Elle a présenté les résultats d'une étude de faisabilité de la technique de la recharge artificielle des nappes dans la région de Tébessa à travers une communication. Elle est basé sur l'augmentation de l'infiltration efficace du sol du site en question par des bassins d'infiltration et galeries verticales de profondeur 30 m remplies par des graviers (Ø2-5 mm) avec l'implication des matériaux synthétiques. [Seghir. K, 2008]

#### ***Remarque importante***

Condition de la recharge artificielle de la nappe: Disposer d'un aquifère à conditions favorables (Coefficient de perméabilité  $K > 10^{-5}$  m/s), bonne transmissivité et diffusivité.

#### **Conclusion**

Dans ce chapitre, on a présenté brièvement les différentes propriétés du milieu poreux influençant les écoulements souterrains dans les aquifères. Nous avons passé aux lois régissant l'écoulement de l'eau dans ces milieux poreux saturés et aux différents travaux réalisés sur la technique de la recharge artificielle des nappes dans le monde. Ces différents rappels nous permettent finalement de définir plus précisément les grandes questions de ce travail.

---

# *Chapitre II*

## *Description et fonctionnement du bassin et de la nappe de Sébaou*

---



## II.1. Situation géographique de la région d'étude

Administrativement, la plaine alluviale du Sébaou chevauche deux wilayas Tizi Ouzou (haut et moyen Sébaou) et Boumerdès (bas de Sébaou), se localise à 80 Km à l'Est d'Alger voire la Figure (II-1).

La surface drainée par l'oued Sébaou et ses affluents (bassin versant) est limitée entre les latitudes 36°27' et 36°55' Nord et les longitudes 3°55' et 4°53' Est.

Notre région d'étude est caractérisée par un relief typiquement montagneux, couvrant 82% de la superficie totale, elle se délimite:

- Au nord ouest par la mer méditerranée ;
- Au nord et nord est par la chaîne littorale ;
- Au sud et sud est par la chaîne du Djurdjura ;
- A l'ouest par les chaînons de Naciria et Sidi-Ali-Bounab orienté ENE-WSW.

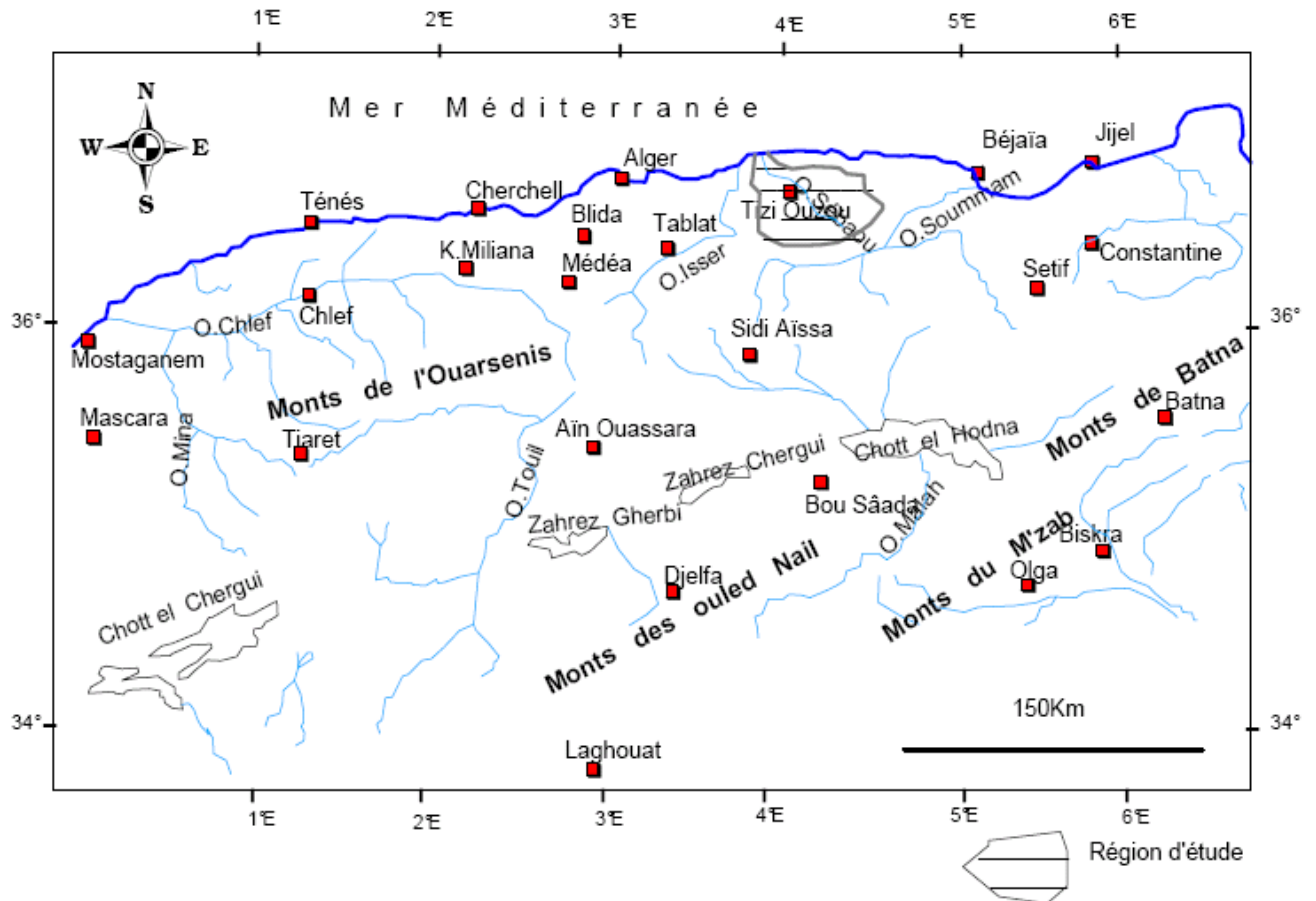


Figure (II-1): Situation géographique de la région d'étude.

## II.2. Paramètres physiques et géomorphologiques du bassin versant du Sébaou

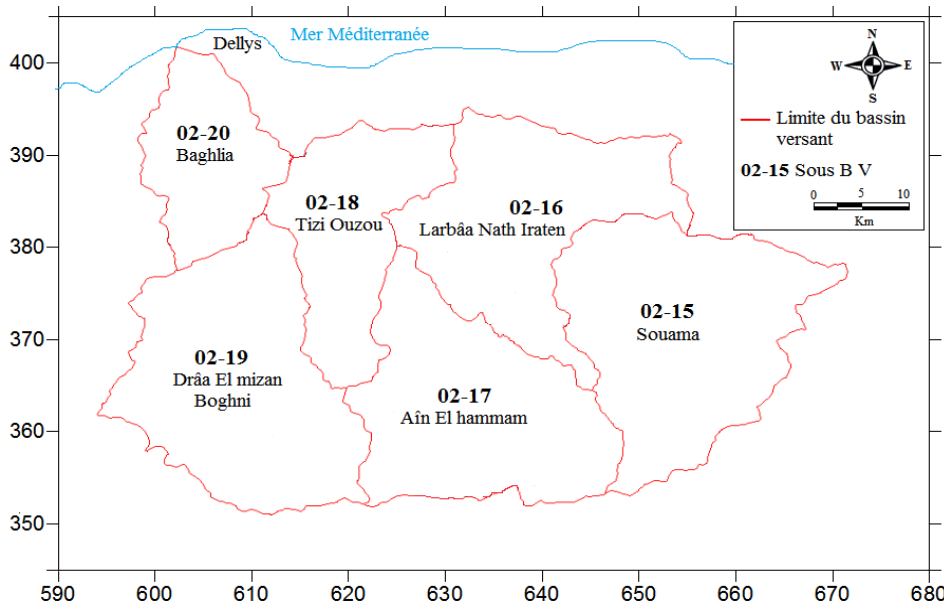
La morphométrie du bassin fait partie des facteurs permanents, leur variation influe sur les modalités des écoulements superficiels et leur analyse permettra une meilleure compréhension des causes de variation des régimes hydrogéologiques.

**II.2.1. Paramètres géométriques**

Le bassin versant de la vallée de Sébaou (code 02 au répertoire de l’ANRH) couvre une superficie de 2500 Km<sup>2</sup> avec un périmètre de 250.4 Km, subdivisé en 06 sous bassins répartis de façon inégale sur le Haut, Moyen et le Bas Sébaou (Figure (II-2)). Cette répartition est représentée dans le tableau suivant :

**Tableau (II-1) :** Répartition des superficies par sous bassin

Région	Code des sous bassins versants de Sébaou	Superficie en Km <sup>2</sup>	Périmètre en Km
<b>Haut Sébaou</b>	02-15	532	102.4
	02-16	432	112
	02-17	468	98.6
<b>Moyen Sébaou</b>	02-18	304	82
	02-19	544	94.2
<b>Bas Sébaou</b>	02-20	220	62.6



**Figure (II-2):** Les sous bassins versant de la vallée du Sébaou.

**II.2.2. Les paramètres de forme**

**II.2.2.1. Indice de compacité de Gravelius (K<sub>C</sub>)**

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

$$K_c = \frac{0.28 P}{\sqrt{A}} \tag{II-1}$$

Avec : - P : périmètre du bassin (Km)

- A : surface (Km<sup>2</sup>).

Les valeurs de Kc pour l'ensemble du bassin versant de Sébaou ainsi pour ces sous bassins, sont mentionnées dans le tableau suivant :

**Tableau (II-2) : Paramètres de forme (Source ANRH)**

Bassin versant		Périmètre (Km)	Surface (Km <sup>2</sup> )	Kc
<b>Haut Sébaou</b>	02-15	102.4	532	1.24
	02-16	112	432	1.50
	02-17	98.6	468	1.27
<b>Moyen Sébaou</b>	02-18	82	304	1.31
	02-19	94.2	544	1.13
<b>Bas Sébaou</b>	02-20	62.6	220	1.18
<b>Le grand bassin</b>		<b>250.4</b>	<b>2500</b>	<b>1.40</b>

Les valeurs de Kc, aussi bien pour le grand bassin, que pour ces sous bassins sont supérieures à l'unité, suggérant à priori une forme allongée pour l'ensemble, donc la concentration des eaux à l'exutoire se fait lentement, ce qui favorise l'infiltration sur le ruissellement.

### II.2.2.2. Dimensions du rectangle équivalent

Le principe consiste à dimensionner un bassin fictif de forme rectangulaire, ayant les mêmes paramètres de forme que le bassin considéré, la détermination des dimensions du rectangle équivalent s'effectue par la formule empirique suivante :

$$L = \frac{Kc \sqrt{A}}{1.22} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{Kc} \right)^2} \right] \tag{II-2}$$

$$l = \frac{Kc \sqrt{A}}{1.22} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{Kc} \right)^2} \right] \tag{II-3}$$

Avec :

L : longueur du rectangle équivalent (Km);

l : largeur du rectangle équivalent (Km);

Pour :

Kc = 1.40 et A = 2500 Km<sup>2</sup>;

On trouve :

L = 100 Km et l = 25 Km.

### II.3. Réseau hydrographique

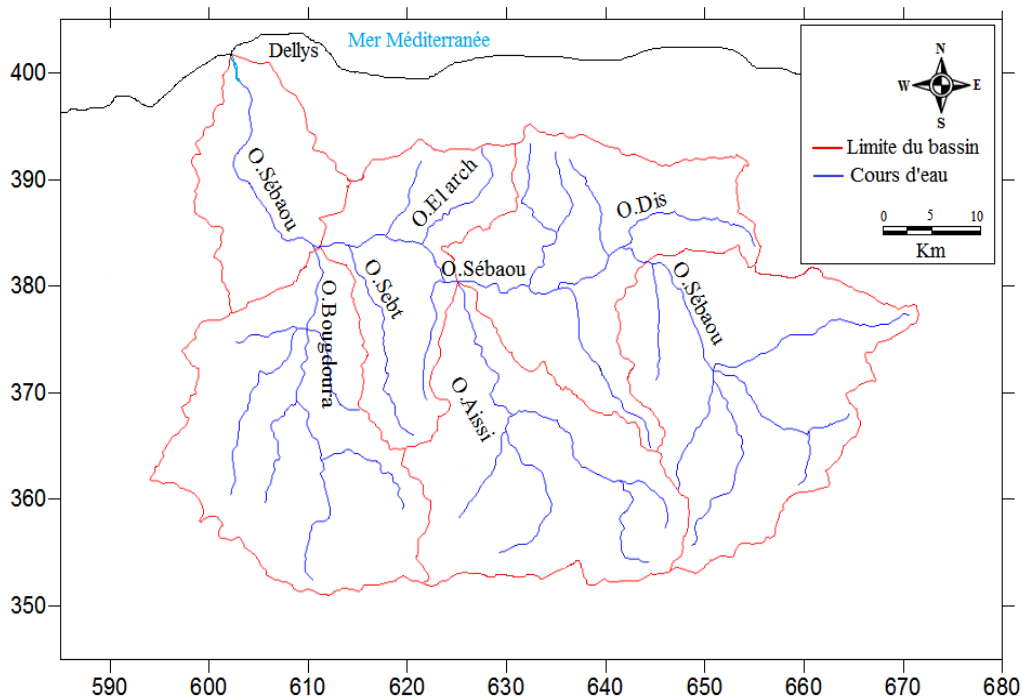
Le cours d'eau de Oued Sébaou est l'un des plus grands cours d'eau de la haute Kabylie. D'une manière générale, le réseau hydrographique est dense, hiérarchisé et on y dénombre des talwegs d'ordre 4 selon la classification d'Horton. Ce réseau est représenté essentiellement par

l'oued Sébaou qui prend sa source dans le Djurdjura et coule sensiblement de l'Est à Ouest jusqu'à Tademaït où il bifurque vers le nord pour rejoindre la mer. Il est à noter aussi que le drainage des eaux de ruissellement est assuré par l'oued Sébaou et ses principaux affluents saisonniers plus au moins longs, dont les principaux sont :

- **En rive droite :** oued Dis, est le torrent qui a le plus fort débit, provient de la chaîne littorale, il s'étend sur une quinzaine de Kilomètres et prend sa sources au Djebel Tamgout qui culmine (1278 m) et débouche dans l'oued Sébaou juste après le premier coude majeur de celui-ci au niveau de Fréha.
- **En rive gauche :** l'oued Bougdoura et l'oued Aissi sont les deux principaux affluents de l'oued Sébaou, qui prennent leur source dans la chaîne du Djurdjura, au sud du bassin versant à des altitudes respectivement 1900, 2000 m.

La confluence de ces affluents qui s'écoulent de part et d'autre de la montagne, forme l'oued Sébaou qui traverse une plaine étroite mais très allongée sur une longueur de 110Km. Depuis sa naissance à l'est (Djurdjura) jusqu'à l'embouchure à la mer méditerranée, l'oued Sébaou s'allonge sous trois formes de direction :

- **Dans la partie amont :** l'oued suit une direction SSE-NNW jusqu'à un coude majeur, situé entre Azazga et Fréha.
- **Dans la partie médiane :** l'oued prend une direction E-W dans le synclinal Miocène de Tizi-Ouzou.
- **Dans la partie aval :** l'écoulement de l'oued Sébaou s'allonge à nouveau selon une direction SSE-NNW, parallèlement à la section amont débouchant vers la mer au niveau de Dellys.



**Figure (II-3):** Réseau hydrographique du bassin versant de la vallée du Sébaou.

## **II.4. La végétation [Bagloul. A, 1992]**

L'occupation végétale a une influence directe sur l'écoulement fluvial aussi bien que les facteurs orographiques et climatiques. La résistance à l'écoulement est d'autant plus grande que le couvert végétal est plus dense. Cette influence de la forêt sur le régime des eaux en domaine méditerranéen a un rôle considérable. Le paysage végétal du bassin de Sébaou a été largement dégradé et défriché en montagne par les incendies et par une petite agriculture extensive et un surpâturage endémique. Ce qui a entraîné une perte d'eau par évaporation et une accélération de l'érosion.

La végétation de la région d'étude est de type méditerranéen, sa répartition est dominée par les cultures annuelles. Caractérisée dans son ensemble par trois étages bioclimatiques bien distincts :

- **Les cultures :** elles sont concentrées dans la plaine et représentées par l'arboriculture et les superbes champs des cultures maraîchères, aux quelles s'ajoutent le laurier rose et le roseau dominant les zones incultes et inondables.
- **Les maquis :** caractérisant en particulier les zones intermédiaires, constitués essentiellement de très denses champs d'oliviers, de petites parcelles de figuiers, quelque peuplement de chêne de liège (la chaîne littorale) et de chêne vert, complétés par une végétation arbustive assez basse qui reflète l'état de dégradation de la végétation dans la région.
- **Les forêts :** occupant les zones montagneuses et représentées généralement par le chêne vert, le chêne liège et le pin d'alpe.

Malgré sa diversification, le couvert végétal de notre région d'étude demeure très dégradé et n'occupe que 19% (soit 55025 ha) de la surface totale. Cette dégradation due indubitablement à l'activité humaine (défrichements, coupes, incendies...) expose la région à une forte érosion et une déperdition accélérée des sols fertiles surtout en haute montagne.

## **II.5. Contexte Géologique**

La lithologie joue un rôle important sur le ruissellement et l'infiltration. Les matériaux géologiques se distinguent en formations meubles (sables, argiles, marnes) ou en formations consolidées (grés, calcaires, dolomies,...). La nature des affleurements a une influence sur l'hydrologie de surface et le type du dépôt alluvionnaire.

Dans cette partie, nous allons présenter brièvement quelques caractères généraux sur la géologie de la vallée de Sébaou et la description des formations en essayant de mettre en relief leur impact sur l'hydrogéologie.

La région d'étude est constituée d'une formation géologique appartenant à différents étages statistiques. Le centre est dominé par un massif ancien, d'âge paléozoïque séparé de la mer par une crête littorale de basse altitude et par la vallée de l'Oued Sébaou. Au sud, il fait une transition avec le massif alpin du Djurdjura dominé par des calcaires crayeux tandis que les dépressions sont essentiellement constituées de roches argileuses de l'eo-oligocène. L'intensité de fissuration des formations rocheuses du Djurdjura définit les conditions favorables de formation de nappe karstique alimentée par des précipitations importantes [Kader. O, 2006].

**II.5.1. Les grands ensembles morphologiques [Durand Delga M, 1969 ; Gelard. J, 1979]**

Le paysage de la région d'étude est diversifié, caractérisé par un relief montagneux très accidenté. Les chapelets de surélévations rudes et accentuées apparaissent dans toute la région.

Le grand bassin versant du Sébaou est entouré par la chaîne littorale au Nord et le massif Kabyle au Sud culminant une altitude de 2300 m.

Cette double masse surélevée délimite un couloir étroit d'orientation générale Est-ouest, formant la vallée de l'oued Sébaou, qui s'étend d'Azazga à l'est jusqu'au Dellys à l'Ouest.

Nous distinguons trois (03) unités morphostructurales nettement différenciées :

**II.5.1.1. La chaîne du Djurdjura**

Elle fait partie de la dorsale calcaire des Maghribides, délimite au sud notre domaine d'étude et représenté par un ensemble morphologique très compétant d'âge secondaire et tertiaire, formant des escarpements considérables, dont les points les plus culminants atteignent 2308 à Lala Khedidja et 2305 à Ras Timedouine.

**II.5.1.2. Le socle kabyle**

Constitue le relief intermédiaire qui fait l'union entre le synclinale de Tizi-Ouzou au Nord et la chaîne du Djurdjura au sud.

La chaîne littorale surplombant la plaine alluviale au nord, culmine des altitudes de 600 m à l'Ouest et 1278 m à l'Est.

Cet ensemble morphologique est caractérisé par des formations plus au moins tendres et compartimentées d'âge récentes ou anciennes c'est là qu'on voit se succéder les différents types d'érosion, allant du plus simple (ravinement plus simple) au plus complexe (mouvement de masse, éboulement, glissements).

**II.5.1.3. Le synclinal de Tizi-Ouzou**

C'est le seul matériel autochtone dans la région, représenté essentiellement par les grès et les marnes du miocène "Post-nappe" [Benhassaine. M, 1980]

Dans sa partie médiane, s'allonge une série de chaînons de socle aligné, que l'oued Sébaou traversent orthogonalement, il s'agit de :

- Massif de Naciria ;
- Massif de Draâ Karouche ;
- Sidi-Ali Bounab, Belloua et massif de Aïssa Mimoune.

Et à l'intérieur de cette cuvette, s'étale la plaine alluviale du Sébaou, qui se présente sous forme d'une bande étroite à fond plat orienté E-W, constituée d'un remplissage alluvionnaire d'âge quaternaire.

**II.5.2. Impact de la géologie sur l'hydrologie**

Le type de formations géologiques qui affleurent dans les bassins versants a une influence sur la répartition des écoulements superficiels. En effet, un bassin formé de matériaux très perméables avec une couverture végétale continue aura en générale une densité de drainage faible assurant une meilleure infiltration des eaux superficielles. Par ailleurs, un bassin formé de roches imperméables mais meubles et érodables, comme des marnes et des argiles, avec une végétation moyenne, présente souvent une densité de drainage élevée, ce qui favorise le ruissellement des eaux superficielles aux dépens de l'infiltration.

Le bassin versant de Sébaou est formé essentiellement par des formations de perméabilité moyenne et faible qui occupent presque la totalité de la superficie du bassin, et une petite partie à une perméabilité élevée ce qui favorise l'infiltration des eaux de surface.

### **II.5.3. Rôle hydrogéologique des différentes formations**

#### **II.5.3.1. La dorsale Kabyle**

L'intensité de la fracturation et la dissolution des calcaires du Lias inférieur, attribuent à la dorsale la particularité d'un véritable réservoir hydrogéologique. Néanmoins, à l'exception de quelques émergences de sources à la faveur des failles et des grands accidents. Ce réservoir demeure inexploité du fait de l'ignorance de son système hydraulique [Durand Delga M, 1969].

#### **II.5.3.2. Le socle Kabyle et les flyschs**

Le socle présente un intérêt hydrogéologique très modeste bien qu'il soit altéré et fracturé. Il est exploité par puits paysans et par émergence de sources dans les schistes et gneiss. Les flyschs essentiellement riches en argile ne présentent pas d'intérêt hydrogéologique.

#### **II.5.3.3. Les alluvions**

Les alluvions Quaternaire de la plaine du Sébaou constituent le réservoir le plus important de la région. Par ailleurs, l'approvisionnement en eau potable, industrielle et d'irrigation est assuré dans sa majorité par les ouvrages hydrauliques implantés dans ce niveau.

Cette couverture Quaternaire a été étudiée en détail, pour identifier la structure du remplissage alluviale et ses caractéristiques géométriques, à travers l'interprétation des résultats de la prospection géophysique réalisée dans la vallée du Sébaou.

#### **II.5.3.4. Géologie des bordures de la vallée du Sébaou**

Les bordures de la vallée du Sébaou sont formées essentiellement par :

- Des marnes et argiles du Miocène dans le haut et moyen Sébaou.
- Des schistes et micaschistes dans le moyen Sébaou.
- Des grès du Miocène, des argiles et marnes des unités charriées (unité tellienne, le numidien et les olistostromes) dans le bas Sébaou.

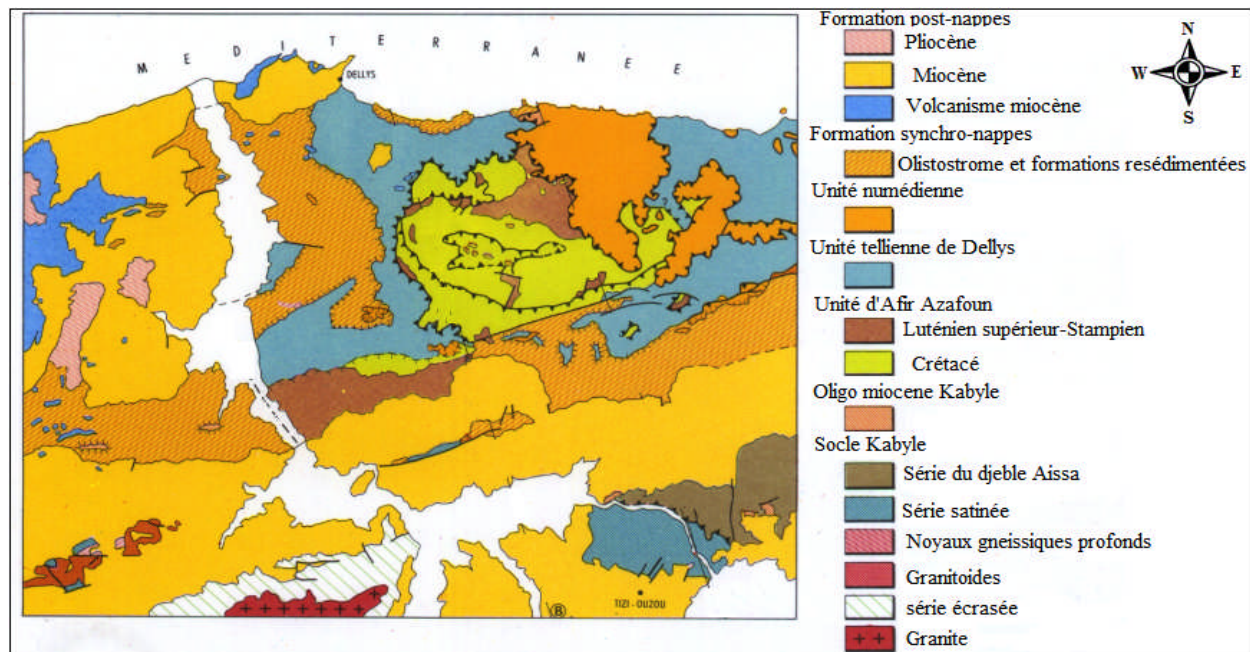


Figure (II-4): Carte géologique de la vallée de Sébaou.

## II.6. Résumé de l'étude hydrologique et climatologique

L'objectif de cette étude est de définir les principales caractéristiques hydroclimatologiques du bassin versant du Sébaou, notamment celles qui rentrent dans l'équation du bilan hydrologique (précipitations, évapotranspiration et écoulement).

### II.6.1. Étude des précipitations [Bouannani. A, 2004]

Plus encore que les facteurs morphologiques, lithologiques et biogéographiques, les conditions climatiques du bassin versant jouent un rôle capital dans le comportement hydrologique des cours d'eau. Ce sont les précipitations, surtout liquides, qui constituent le facteur essentiel intervenant par :

- leur hauteur totale annuelle qui détermine l'abondance fluviale,
- leur répartition mensuelle et saisonnière qui influence directement les régimes hydrologiques,
- leurs totaux journaliers et surtout les averses génératrices de crues.

En général, la répartition des précipitations est soumise à l'influence de certains facteurs comme l'orientation des vallées, l'exposition des versants et l'éloignement de la mer. On peut définir un gradient pluviométrique pour chaque région. La pluviosité augmente avec l'altitude jusqu'au seuil optimal pluvial.

Les précipitations renouvellent les stocks d'eau et entretiennent l'écoulement dans les systèmes hydrologiques. L'unique source d'alimentation des nappes souterraines est l'eau des précipitations efficaces. L'évaluation de la ressource en eau souterraine sollicite une étude minutieuse des paramètres hydrologiques.

#### II.6.1.1. Les précipitations du bassin versant de Sébaou

- La région du Sébaou est soumise à l'influence d'un climat méditerranéen, caractérisé par :
- Des précipitations d'origine cyclonique apportées par les vents nord ouest du mois de décembre à février.
  - Des pluies orageuses en automne et au printemps.
  - L'évapotranspiration réelle est inférieure à l'évapotranspiration potentielle à l'échelle annuelle.



Le régime des cours d'eau est caractérisé par une alternance de crues courtes et brutales. La période d'étiage sévère, est soutenue par les sources karstiques, la fonte des neiges et les nappes aquifères.

Pour mieux caractériser le régime climatique dans la région d'étude, nous avons choisi 12 stations climatiques, systématiquement réparties sur la surface du bassin versant (Figure (II-5)), couvrant une période de 30 ans (1977-2006), les différentes caractéristiques relatives à ces stations sont regroupées dans le Tableau (II-3) ci- après:

Tableau (II-3): Les différentes stations pluviométriques et son code ANRH

Station	Code ANRH	X (km)	Y (km)	Z (km)
Baghlia Village	022002	603,65	390	30
Ouled Aïssa (mon98-06)	022005	599,2	389,33	410
Draa El Mizan	021902	600,95	359,2	530
Boughni	021903	612,55	361,15	250
Bouassem M, F	021801	620	371,5	600
Draa ben khedda	021804	615,2	382,45	90
Larbaa Makouda	021805	622,65	390,15	520
Beni Yenni	021712	635	365,25	760
Larbaa Nath Irethen	021705	634,9	370,8	980
Aghribs''adrar''	021601	645,1	391,25	680
Freha	021603	641,9	383,5	140
Djemaa Saharidj	021503	641,7	377,75	370
Ait Aïcha	021509	661,8	373,9	1000

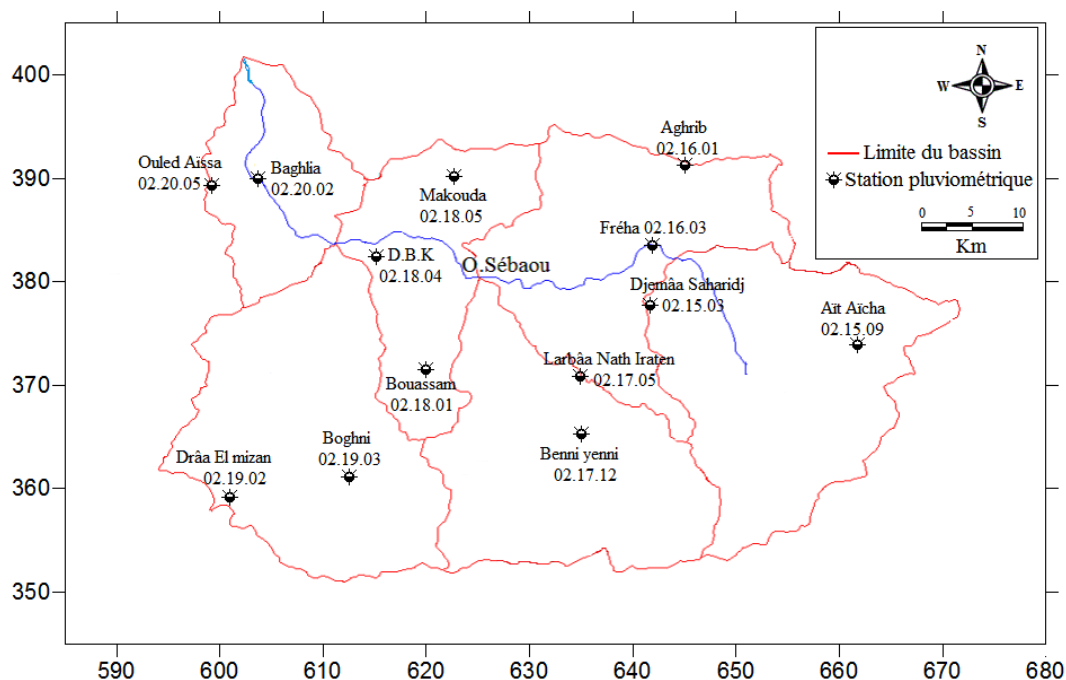


Figure (II-5): Emplacement des stations pluviométriques sur du bassin versant « Sébaou ».

**II.6.1.2. Variation interannuelle**

Les données pluviométriques observées sur une période de 30 ans (1977/2006) sont données par l’A.N.R.H et après le traitement de ses données, on les enregistre sur le tableau suivant:

**Tableau (II-4):** Variation interannuelle des précipitations aux différentes stations en (mm).

<b>Année</b>	<b>Baghlia village (022002)</b>	<b>Draa Ben Khedda (021902)</b>	<b>Boughni 021903</b>	<b>Bouassem M, F 021801</b>	<b>Draa ben khedda 021804</b>	<b>Larbaa Makouda 021805</b>
1977	684,4	472,8	632,3	750,6	594,6	277,6
1978	626	602,9	639,2	777,9	585,3	803
1979	839,2	657,1	720	720	819,9	819,9
1980	763,5	734	814,5	998	751,8	981
1981	597,2	635,1	609,1	802	675,6	769,5
1982	688,9	668,2	585,7	859,6	780,1	860,9
1983	550,3	594,2	634,7	697	629,6	863
1984	809,1	835,7	775,6	1050	842,7	1002,4
1985	750,1	715,8	665,9	820,3	629,1	869,7
1986	769,1	880,6	912,6	1049,5	799,4	961,8
1987	596,3	520,9	496,3	642,4	541,7	521,1
1988	658,6	597,7	685,6	765,3	637,9	660,8
1989	523,8	475,6	487	613,4	421,2	525,1
1990	725,1	743,6	699,6	868,3	636,8	831,9
1991	766,4	729	623,5	781,6	684,7	853,3
1992	669,6	586,8	642,5	740,5	581,8	810,3
1993	516	514,2	505,8	553,4	497,8	528,9
1994	734,7	670,3	773,8	848,7	787,3	943,6
1995	767,1	702,2	807,3	993,6	796,4	825,2
1996	499,6	394	372,2	580,8	432,4	477,6
1997	1031,2	936,6	892,2	1169,8	1057,2	1021,4
1998	737,7	557,8	642,6	742,4	637,6	744,8
1999	567,7	414,7	462	592,5	520,7	606,8
2000	620,1	624,2	702,5	724,5	610,8	665
2001	456,9	392,5	351,8	508	356,1	492,1
2002	1099,8	1106,9	1073	1370,2	1068,9	1266
2003	845,8	740,2	708,6	895,6	803,6	802
2004	716,6	716,9	746,3	799,4	657	730,7
2005	729,1	590,2	574,1	780,2	644,5	810,2
2006	882,7	859,2	700,4	862,7	813,1	835
<b>Moy. A (mm)</b>	<b>707,42</b>	<b>655,66</b>	<b>664,55</b>	<b>811,94</b>	<b>676,52</b>	<b>772,02</b>

Tableau (II-5): Suite des précipitations des autres stations en (mm).

Année	Beni Yenni (021712)	Larbaa. N. Irethen (021705)	Aghribs "adrar" (021601)	Freha (021603)	Djemaa Saharidj 021503	Ait Aicha 021509
1977	714,5	847,7	803,7	702	710	1029,9
1978	660,1	825	867,3	794,05	720,8	695,8
1979	857,6	856,5	963	671,2	727,6	986,5
1980	928,1	1077,2	1138,4	832	950,9	1136,6
1981	894,3	849,1	816,7	709	728,6	1063,9
1982	828,8	863,4	1041,6	694,9	689,2	827,2
1983	885,6	881,8	861,3	650,5	743,1	943,7
1984	990,6	1153	1296,6	861,2	1002,2	1397,5
1985	868,5	894,7	1117,6	712,4	854,3	1049,5
1986	1047,5	988,2	1389,8	898,8	883,75	1246,1
1987	721	638,9	710,5	580,3	605	774,6
1988	764	641,6	860,7	604,4	669,2	824,1
1989	522,4	607,9	631,1	425,1	486,4	681,6
1990	842,8	831,2	1063	681,7	669	1025
1991	725,6	821,4	1044,1	647,1	816,9	916
1992	702	786,8	1030	667,7	805,1	900,5
1993	618,9	667,7	781,6	553,1	618,2	758
1994	922,5	899,9	1132,9	752,6	901,2	985,5
1995	890,8	1100,9	1155,5	767,7	989,3	1181,1
1996	505,5	664,1	738,6	473	588,9	716,9
1997	1192,3	1319,6	1656,5	948,7	1096,8	1534
1998	768,4	859,7	1140,4	678,7	750,1	925,6
1999	624,2	604,9	884	597,7	594,9	694,7
2000	785,3	706	992	604,3	771,6	927,7
2001	479,6	522,7	761,5	387,7	492,1	716
2002	1366,5	1255	1630,6	1192,3	1244,9	1498,3
2003	903,6	968,9	1165,1	832,2	824,4	1104,6
2004	879,5	815,3	1123,6	779,1	834	1230,8
2005	754,2	814,6	1068,7	690,4	543	949,6
2006	698,2	868,6	1266,4	869	810,4	1093,7
<b>M. A (mm)</b>	<b>811,43</b>	<b>854,41</b>	<b>1037,76</b>	<b>708,63</b>	<b>770,73</b>	<b>993,8</b>

La figure suivante montre la variation moyenne interannuelle des précipitations aux différentes stations disponibles au bassin versant du Sébaou :

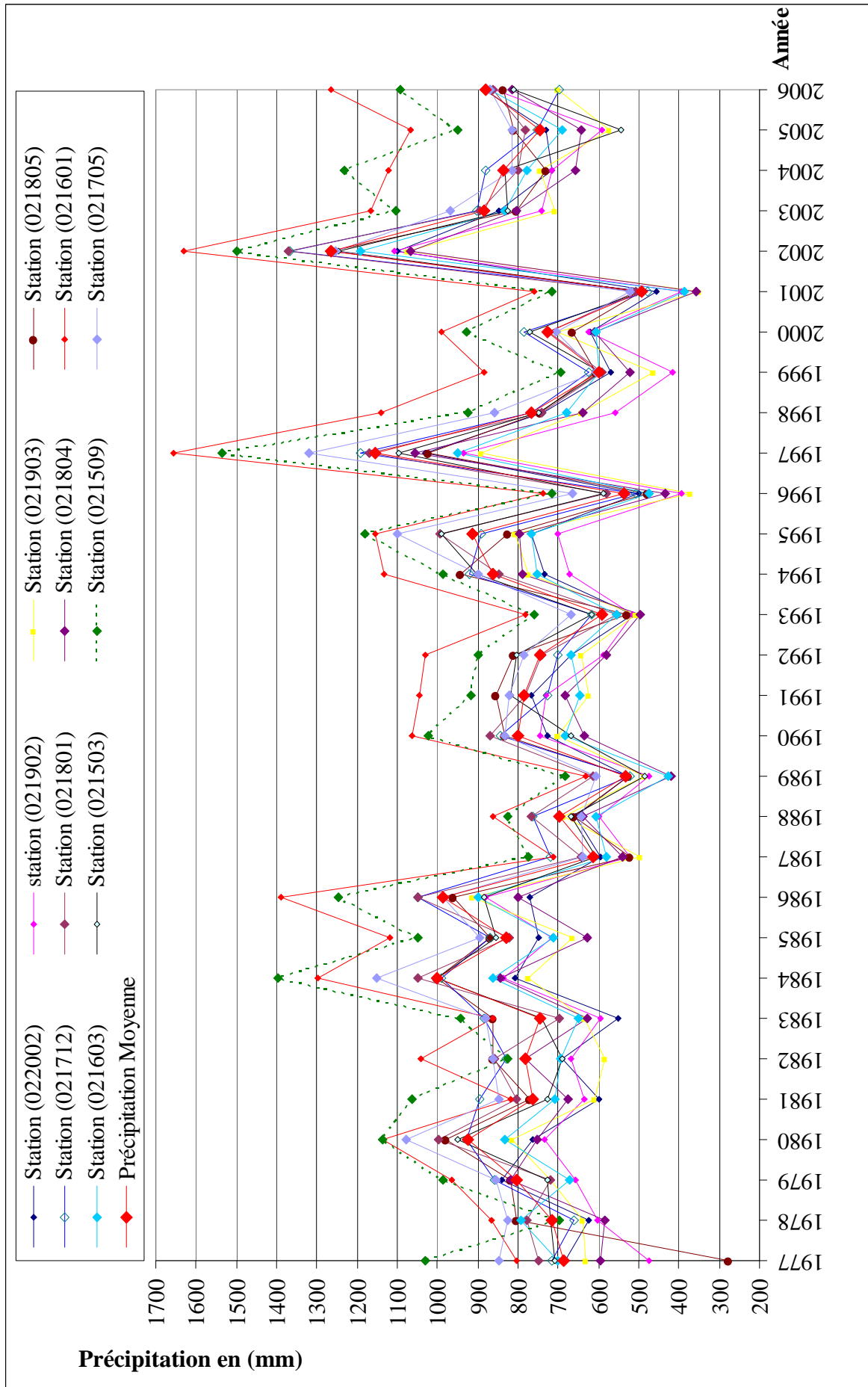


Figure (II-6): Variation des précipitations moyennes interannuelles aux différentes stations.

Il en ressort de l'examen des graphiques de figure ce qui suit :

- Une nette concordance des variations inter- annuelles est constatée entre les 12 stations ;
- Une sensible augmentation des modules pluviométriques annuels d'Ouest en Est ;
- Le plus grand module pluviométrique aux années 1997 et 2002.

**II.6.1.3. Variation mensuelle**

**Tableau (II-6) :** Variation mensuelle des précipitations aux différentes stations en (mm).

<b>Code</b>	<b>Sept</b>	<b>Oct.</b>	<b>Nov.</b>	<b>Déc.</b>	<b>Janv.</b>	<b>Fév.</b>	<b>Mars</b>	<b>Avril</b>	<b>Mai</b>	<b>Juin</b>	<b>Juil.</b>	<b>Août</b>
<b>22002</b>	32,19	56,18	95,29	126,36	104,29	85,92	69,43	72,50	48,52	6,74	2,81	7,18
<b>21902</b>	31,44	52,55	79,49	107,28	95,09	81,69	72,83	69,15	46,92	7,64	3,28	8,30
<b>21903</b>	32,25	48,97	78,17	107,36	101,40	81,44	70,79	74,02	48,91	8,88	5,08	7,28
<b>21801</b>	35,13	59,86	98,27	143,37	118,93	102,38	85,52	87,90	59,70	8,78	4,38	7,71
<b>21804</b>	29,04	54,51	82,57	120,92	108,18	82,60	72,51	67,21	42,61	6,41	2,93	7,03
<b>21805</b>	32,70	57,92	92,13	144,97	129,06	98,96	84,95	76,60	38,89	5,93	3,11	6,81
<b>21712</b>	36,31	66,50	98,55	135,90	117,30	97,81	92,54	86,87	59,41	11,41	4,26	8,89
<b>21705</b>	37,17	66,94	106,11	138,99	119,81	101,77	89,58	101,31	66,19	13,09	4,41	9,03
<b>21601</b>	35,86	81,56	136,07	185,88	166,01	124,64	107,78	116,49	62,92	8,00	3,84	8,71
<b>21603</b>	26,64	58,87	90,01	131,29	110,18	86,83	74,39	72,54	42,81	6,91	2,19	5,95
<b>21503</b>	31,31	65,08	92,64	136,53	109,52	93,29	81,23	82,73	56,41	10,15	3,41	8,42
<b>21509</b>	38,98	74,46	117,63	175,49	133,26	119,58	107,49	121,04	76,89	11,87	6,05	11,10
<b>Moy.</b>	<b>33,25</b>	<b>61,95</b>	<b>97,24</b>	<b>137,86</b>	<b>117,75</b>	<b>96,41</b>	<b>84,09</b>	<b>85,70</b>	<b>54,18</b>	<b>8,82</b>	<b>3,81</b>	<b>8,03</b>

Le tableau ci-dessus montre que les précipitations sont réparties suivant deux saisons distinctes à savoir :

- Une saison pluvieuse, humide s'étalant du mois de novembre à avril, avec un maximum enregistré au mois de décembre.
- Une saison sèche qui s'étend du mois de mai à octobre avec un minimum aux mois de juillet et août.

Pour analyser ces données, on peut les représenter sous forme d'histogrammes pour chacune des 12 stations :

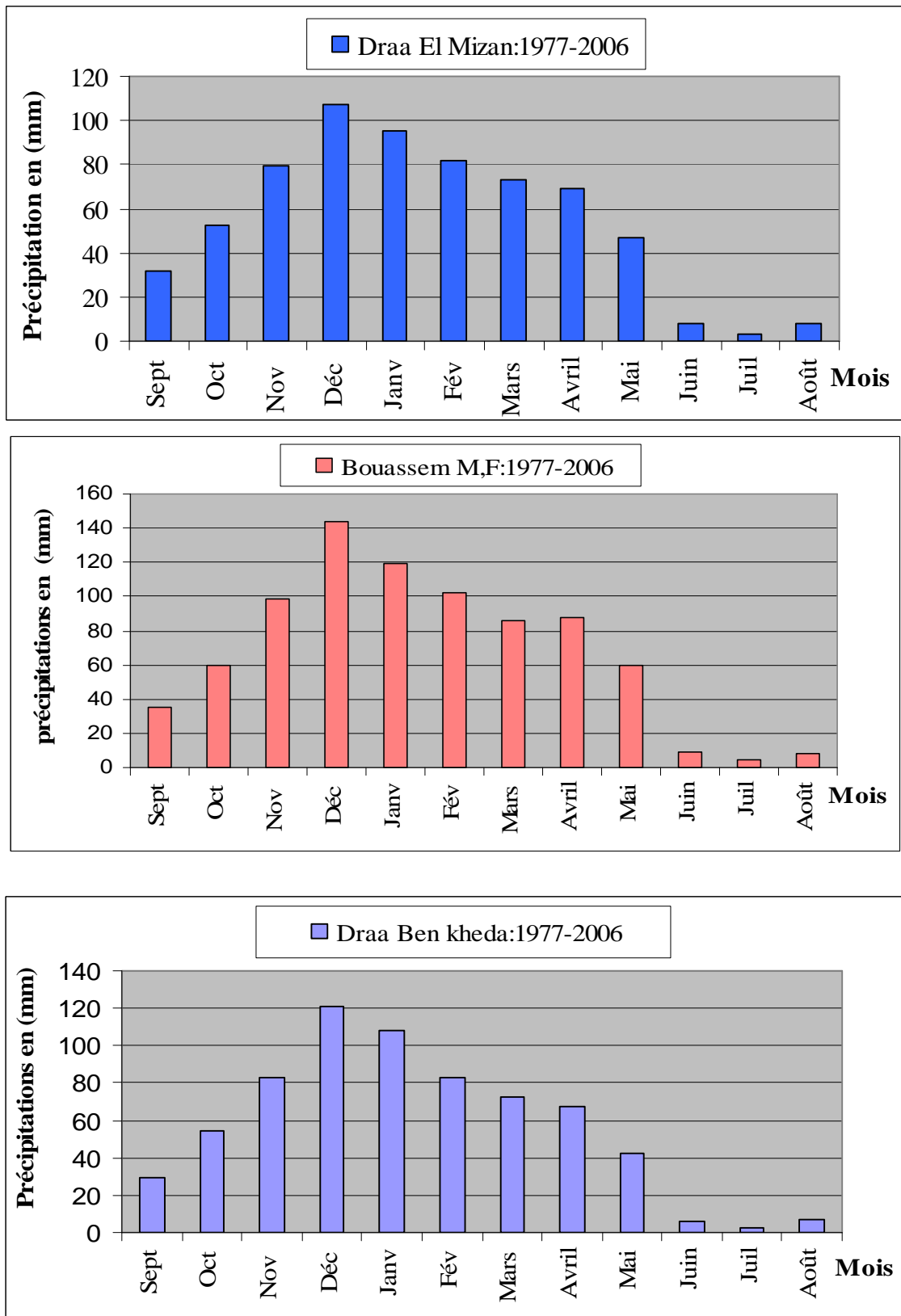


Figure (II-7): Variation mensuelle des précipitations à chaque station.

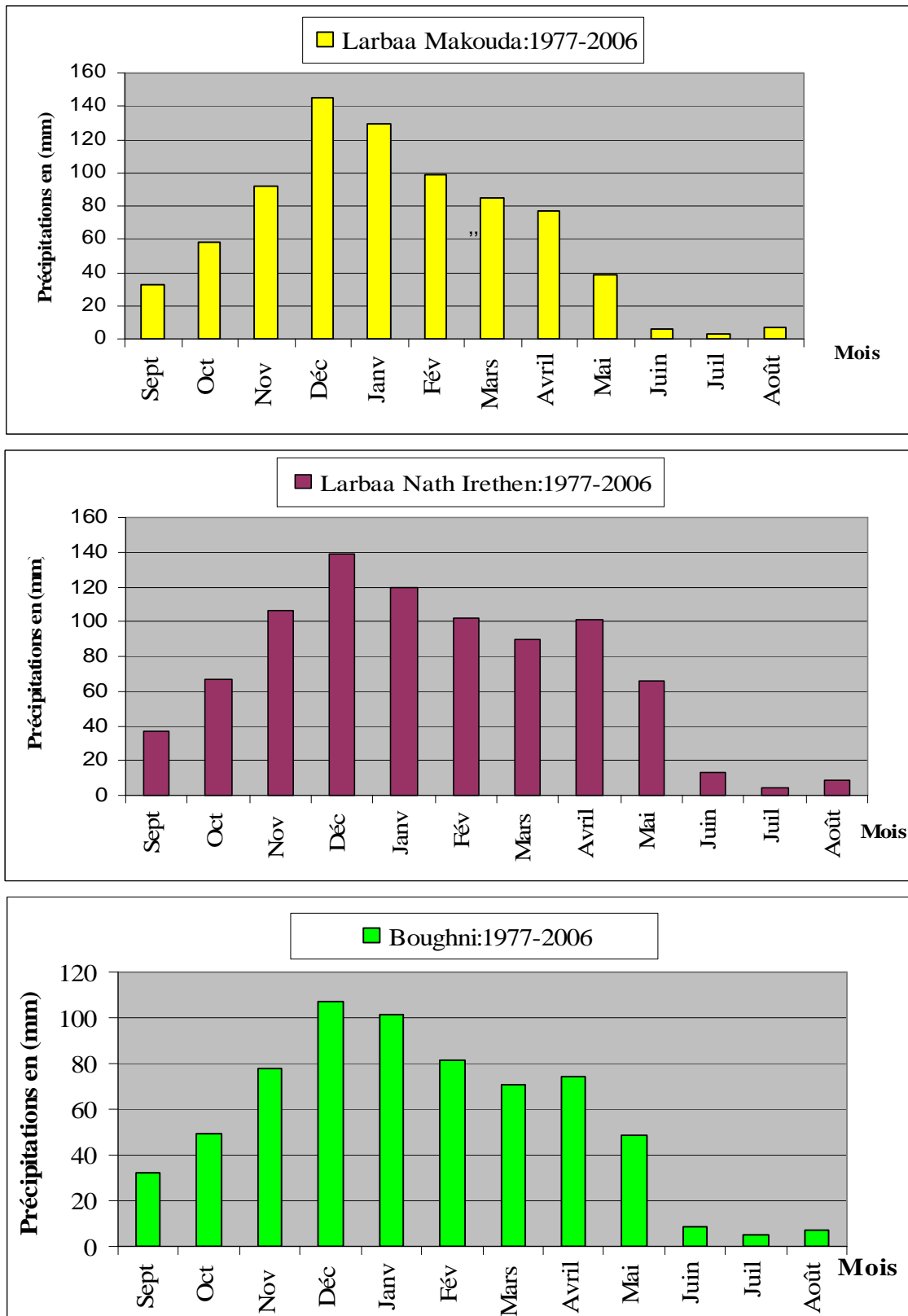


Figure (II-8): Variation mensuelle des précipitations à chaque station.

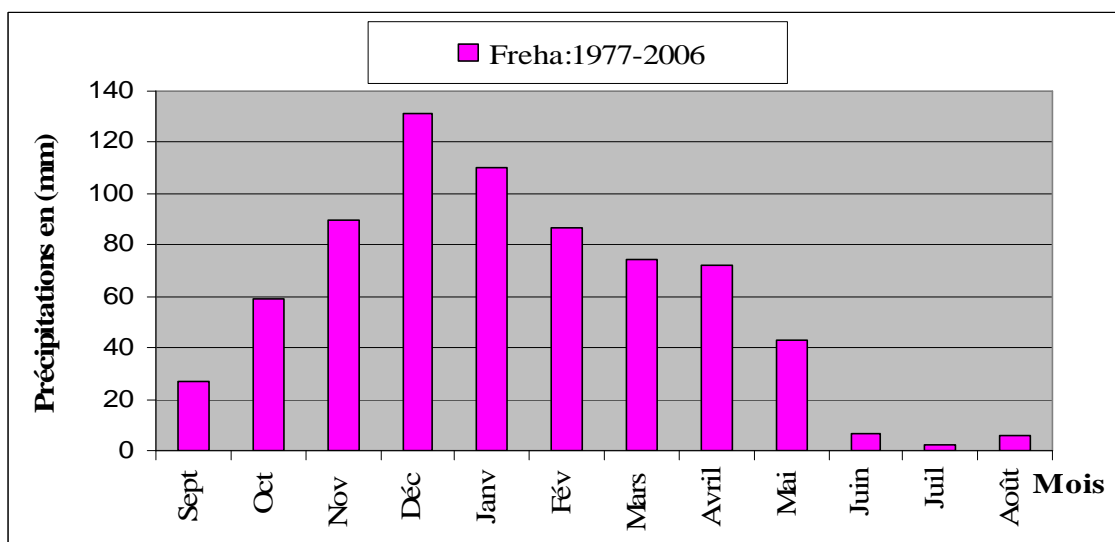
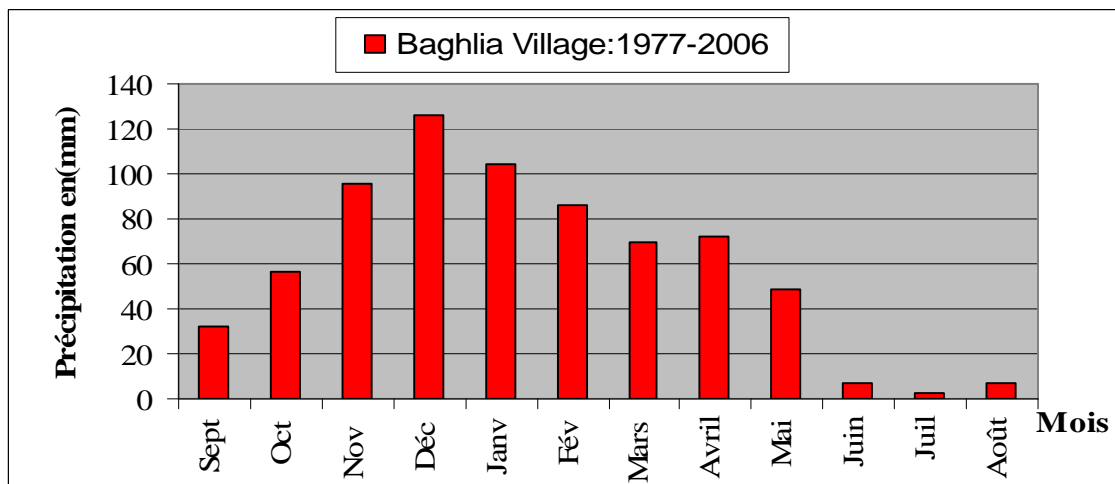
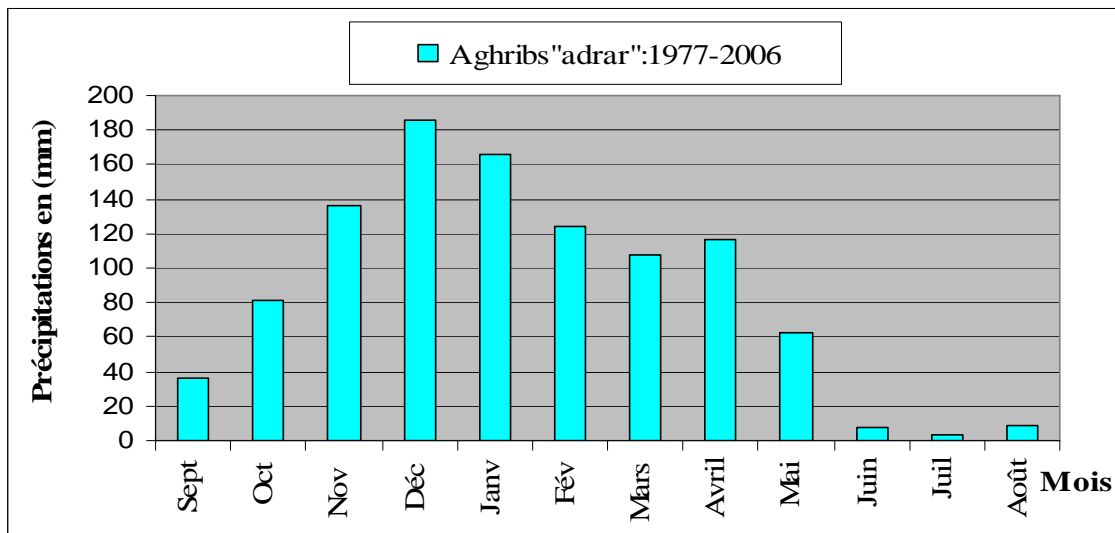


Figure (II-9): Variation mensuelle des précipitations à chaque station.



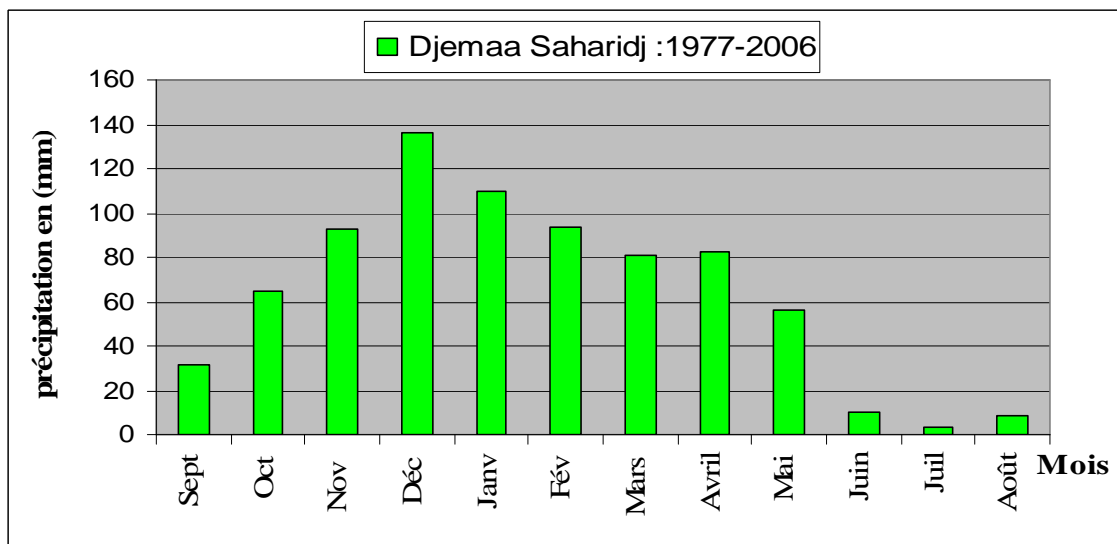
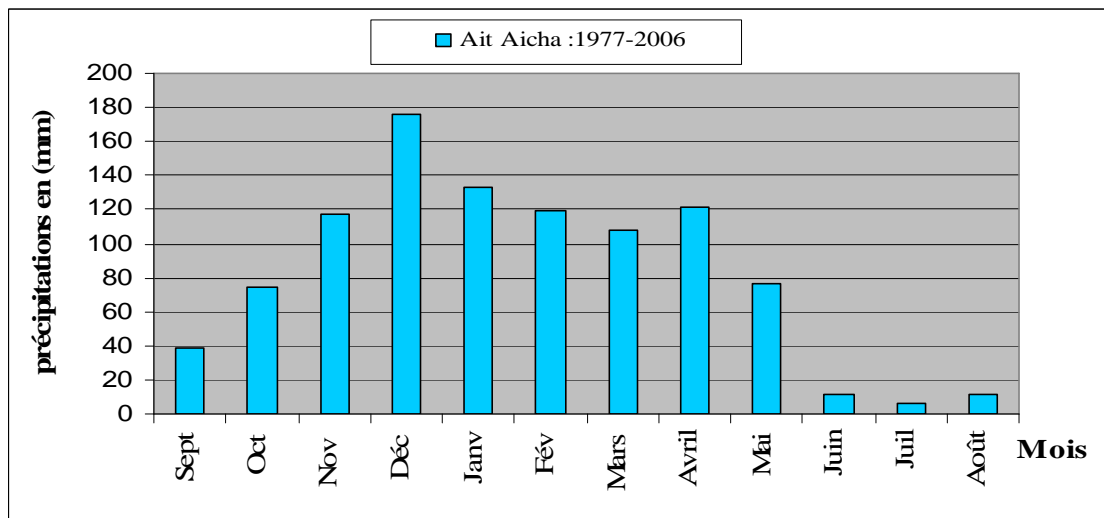
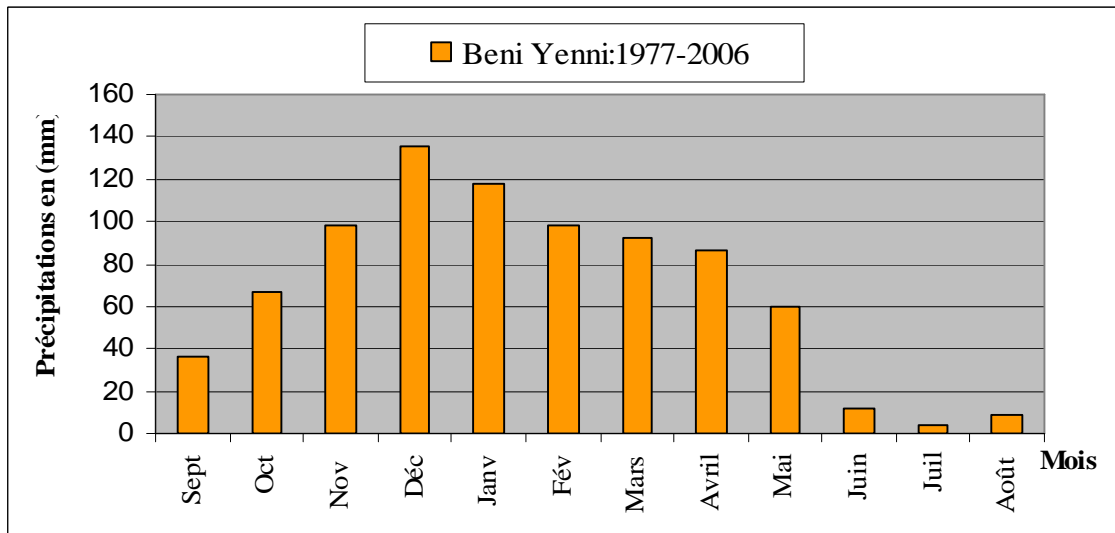


Figure (II-10): Variation mensuelle des précipitations à chaque station.

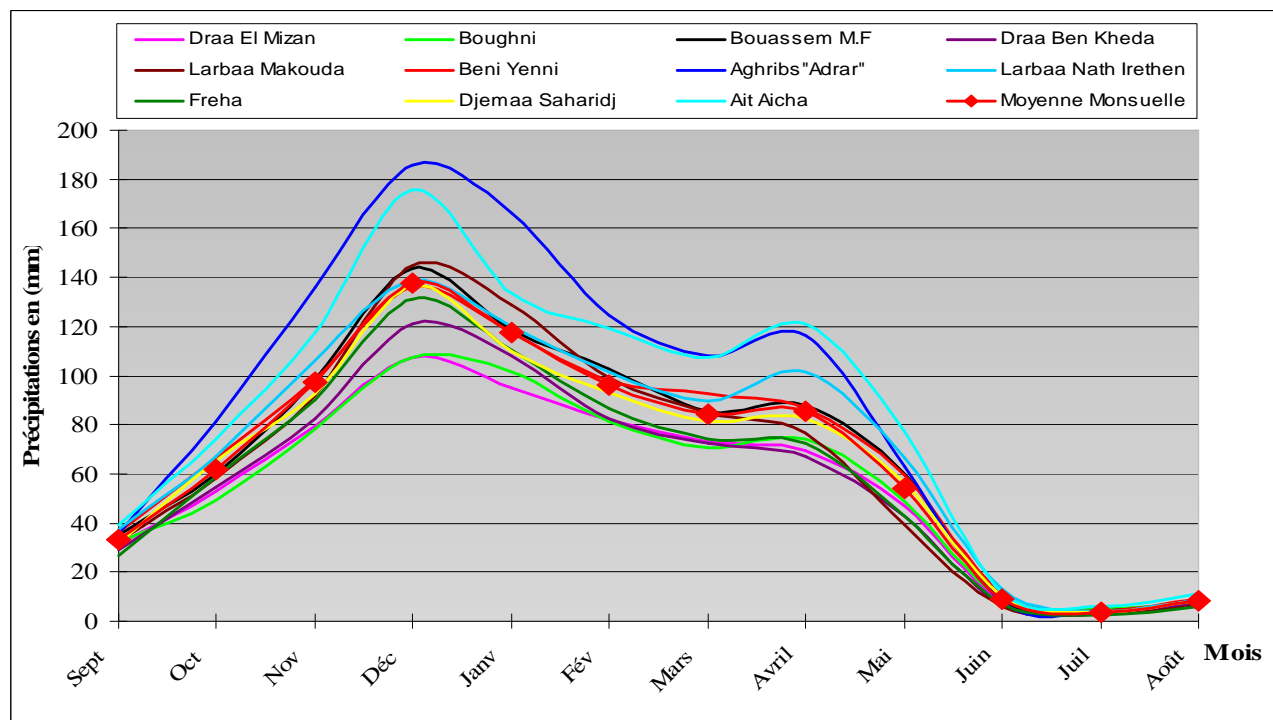


Figure (II-11): Variation mensuelle des précipitations aux différentes stations.

Le graphique de la figure (II-11), montre que l'évolution saisonnière des précipitations est similaire dans toutes les stations. Toutefois, nous constatons que la région la plus arrosée est celle de Aïn El Hammam avec une moyenne annuelle de 1062.2 mm, cela peut s'expliquer par sa position très élevée par rapport aux autres stations d'une part et l'influence maritime d'autre part. En revanche, la station de Draâ El Mizane, qui est relativement loin de la mer, reçoit le minimum de pluie soit une lame d'eau précipitée de 550 mm par an.

#### II.6.1.4. Estimation de la lame d'eau précipitée

La lame d'eau précipitée à l'échelle du bassin versant est estimée par les deux méthodes suivantes :

- Méthode arithmétique,
- Méthode analytique.

Les résultats des calculs sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau (II-7) : La moyenne interannuelle des précipitations.

Méthode	Arithmétique	Analytique	Moyenne Arithmétique Des deux méthodes
Moyenne Annuelle (mm)	789.10	796.31	792.16

## II.6.2. Les températures

La température est un facteur déterminant dans l'établissement d'un bilan hydrologique, car les phénomènes de condensation et de l'évaporation sont intimement liés à ce paramètre. Elle permet, en effet, de caractériser le régime climatique d'une région.

### II.6.2.1. Les données de température période:(1989-2006)

Pour ces données, seules les mesures relevées à la station de Tizi-Ouzou sont mises à notre disposition par l'ONM (Office Nationale de Météorologie). Le tableau (II-8) ci-dessous donne la répartition mensuelle des valeurs moyennes des températures en degrés (C°).

**Tableau (II-8):** Température moyenne mensuelle à la station de Tizi Ouzou période (1989-2006)

Année	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai.	Juin.	Juill.	Août.
1989	23,60	19,80	15,80	14,00	10,05	10,63	12,21	13,90	17,63	22,46	28,40	28,50
1990	27,10	20,20	14,10	9,00	10,20	13,20	13,90	14,40	18,80	24,80	26,70	27,30
1991	25,40	18,30	13,00	9,00	9,10	9,30	14,00	13,50	15,80	23,50	27,80	28,50
1992	24,90	18,00	14,30	10,80	8,50	10,00	11,60	14,40	18,70	20,80	25,60	27,60
1993	22,50	18,90	13,50	10,80	8,70	9,50	12,30	14,40	19,20	23,70	26,50	27,50
1994	24,10	19,70	15,20	10,80	10,00	11,10	14,60	13,80	21,40	24,40	29,70	30,90
1995	22,50	20,30	15,70	13,50	9,60	12,60	12,60	14,40	20,80	23,60	27,80	27,20
1996	21,60	16,90	14,80	12,30	12,90	9,90	13,10	15,40	18,30	22,60	26,30	26,80
1997	24,90	20,10	15,10	11,60	11,90	12,30	12,90	15,90	20,50	25,00	26,40	27,60
1998	24,60	17,40	13,70	9,80	10,60	11,90	13,20	15,70	18,00	23,90	27,60	27,10
1999	25,40	22,40	13,40	10,50	10,00	8,90	13,30	15,80	21,40	25,20	27,80	29,40
2000	24,90	18,50	14,60	12,10	8,20	11,70	14,30	16,60	21,60	25,10	28,90	29,40
2001	24,70	23,00	14,00	9,20	10,80	10,30	16,80	15,90	19,10	26,60	28,30	29,10
2002	29,90	20,20	15,20	12,90	9,70	11,40	13,70	15,40	20,10	25,60	26,80	26,30
2003	23,90	20,40	15,70	10,60	10,10	9,30	13,80	15,70	18,70	27,10	28,80	29,40
2004	22,50	25,20	13,30	11,50	10,60	12,20	13,60	14,70	16,50	23,80	26,60	27,00
2005	23,20	20,50	13,00	10,60	7,40	7,70	12,80	15,50	20,60	25,20	28,30	26,90
2006	23,90	22,30	17,30	12,10	9,20	10,00	14,20	18,30	21,90	24,80	28,80	26,70
<b>Moy</b>	<b>24,42</b>	<b>20,12</b>	<b>14,54</b>	<b>11,17</b>	<b>9,86</b>	<b>10,66</b>	<b>13,50</b>	<b>15,21</b>	<b>19,39</b>	<b>24,34</b>	<b>27,62</b>	<b>27,96</b>

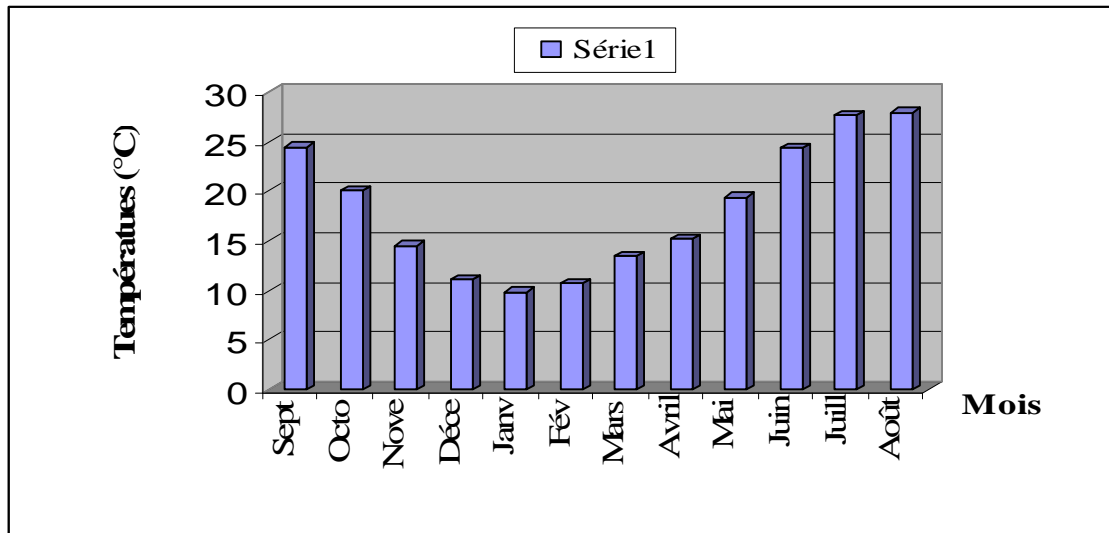


Figure (II-12): Histogramme des températures moyennes mensuelles période (1989/2006).

Les températures minimales sont observées en janvier, avec une moyenne de 9,86 C°. Les températures maximales sont relevées en juillet et août avec une pointe au mois d'août soit une moyenne de 27,96 C° alors que l'année peut être divisée en deux saisons :

- La saison chaude s'étale de juin à octobre, le mois de juillet et août étant les plus chauds.
- La période froide s'étale de novembre à mai, janvier étant le mois le plus froid.

### II.6.2.2. Régime climatique

De Martonne (1923), a conçu une formule, dite indice de Martonne, basée sur la notion d'aridité, elle s'écrit :

$$A_m = \frac{Pi}{T_m + 10} \tag{II-4}$$

- Avec :
- $Pi$  = Précipitation moyenne (mm);
  - $T_m$  = Température moyenne (C°) ;
  - $A_m$  = Indice de Martonne.

La valeur de l'indice de Martonne permet de correspondre à chaque région un étage bioclimatique. On distingue, ainsi, les cas suivants :

- $A_m < 5$ , correspond à une période aride;
- $5 < A_m < 20$ , correspond à une période semi-aride;
- $20 < A_m < 30$ , correspond à une période tempérée.

Les résultats mentionnés dans le tableau (II-9) montrent, à l'échelle mensuelle, l'existence de deux périodes :

- Une période tempérée (décembre, janvier, février et mars) ;
- Une période aride (juin, juillet, et août);

Quant à l'échelle annuelle, les valeurs de l'indice de Martonne indiquent que le bassin versant du Sébaou se caractérise par un climat humide et tempéré.

Tableau (II-9): Valeurs de l'indice de Martonne ( $A_m$ ).

Mois	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Annuelle
$T_m$ (°C)	18,80	15,29	10,56	7,46	5,96	6,44	8,41	9,92	13,98	18,13	21,06	21,89	13,16
P (mm)	33,25	61,95	97,24	137,86	117,75	96,41	84,09	85,70	54,18	8,82	3,81	8,03	789,10
$A_m$	1,15	2,45	4,73	7,90	7,38	5,87	4,57	4,30	2,26	0,31	0,12	0,25	34,07

### II.6.3. L'humidité relative de l'air

L'humidité relative de l'air est le rapport, exprimé en %, de la tension de vapeur d'eau à la tension de vapeur d'eau saturante. C'est un élément atmosphérique très important puisqu'il donne le taux de condensation de l'atmosphère. Les seuls enregistrements disponibles pour ce paramètre sont ceux effectués à la station de Tizi-Ouzou pour une période de six ans [1989-1994] et dont les valeurs sont consignées dans le tableau ci-après :

Tableau (II-10): Variation de l'humidité de l'air (source l'ONM de Tizi Ouzou).

Année	Sept	Octo	Nov	Déce.	Janv.	Fév.	Mar	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Moy
Moy (%)	58,19	66,78	76,03	76,92	75,22	72,39	68,44	66,56	65,17	55,00	49,40	49,97	65,01

Le tableau ci-dessus indique une humidité relative moyenne de l'air de 65,01 % pour la période 1989-2006. Sur un autre plan, ces résultats montrent que l'humidité de l'air est relativement faible à partir du mois de juin jusqu'au mois de septembre avec un minimum de 49,40 % au mois juillet et sensiblement élevée du mois d'octobre jusqu'au mois mai, caractérisant la saison humide, avec un maximum de 76,92 % au mois de décembre.

### II.6.4. Le vent

Est l'un des éléments caractéristiques du climat régissant l'évaporation à la surface du sol et de la végétation. Les résultats des moyennes mensuelles de la vitesse du vent enregistrée au niveau de la station de Tizi-Ouzou sont présentés dans tableau suivant :

Tableau (II-11) : Moyennes mensuelles des vitesses des vents (source l'ONM de Tizi Ouzou).

Année	Sept	Octo	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mar	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Moy
Vitesse (m/s)	1,64	1,46	1,34	1,51	1,20	1,31	1,63	1,81	1,85	2,29	2,16	1,96	1,57

Le tableau ci-dessus montre que la fréquence maximale de jour du sirocco s'observe au mois de juin et la minimale est observée au mois de janvier.

La durée du sirocco est très variable, mais il souffle rarement sans interruption pendant plusieurs jours. Le vent dominant semble de direction SW-NW.

**II.6.5. Etude de l'évapotranspiration [Gilli et al 2008]**

Des différentes parties du cycle de l'eau, l'évapotranspiration est le point le plus délicat à évaluer. Contrairement aux pluies ou aux écoulements qui peuvent faire l'objet d'une approche quantitative satisfaisante, bien que peu précise, il est très difficile de mesurer directement le flux de vapeur d'eau dans l'atmosphère.

L'évapotranspiration est le phénomène de retour d'eau vers l'atmosphère à partir de surface d'eau libre (lacs, rivières, mers...) et la transpiration des plantes. Elle englobe l'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'évapotranspiration réelle (ETR).

L'évapotranspiration dépend de nombreux facteurs:

- Température du sol, de l'air et de l'eau ;
- Rayonnement solaire;
- Vitesse du vent et pression atmosphérique;
- Nature et état de la végétation;
- Topographie et exposition du bassin versant;
- Hygrométrie de l'air.

**II.6.5.1. Évapotranspiration potentielle [Castany. G, 1982]**

L'émission de vapeur d'eau, ou évapotranspiration, considérée comme une perte les hydrogéologues, s'effectue dans tous les milieux. Elle résulte de deux phénomènes, l'un physique l'évaporation, l'autre biologique la transpiration. L'évaporation intervient dans l'atmosphère, au cours des pluies, à la surface des lacs et des cours d'eau ainsi que le sol nu. La transpiration est le fait couverture végétale. L'évapotranspiration dans le sol atteint une profondeur de quelques mètres selon ses caractéristiques et le climat.

**II.6.5.2. Évapotranspiration réelle [Castany. G, 1982]**

Les pertes d'eau d'un sol atteignent l'évapotranspiration potentielle si le stock d'eau de la RFU lui est supérieur ou égal. En cas d'insuffisance elles sont limitées à une quantité plus petite. Cette limite est l'évapotranspiration réelle, notée ETR.

**Remarque :**

En raison de la non disponibilité de mesures d'évapotranspiration sur le site, nous utiliserons plusieurs formules empiriques pour l'estimation de l'ETP et ETR.

**II.6.5.3. Formules de calcul de l'ETP [Castany. G, 1982]**

L'ETP peut être évaluée à l'aide de nombreuses formules, on peut citer : Thornthwaite, Sarra, Turc, ...

**a) Formule de C.W. Thornthwaite**

$$ETP = 1.6 \left( 10 \frac{T_m}{I} \right)^a \quad (II-5)$$

$$\text{Où, } I = \sum_1^{12} i \quad i = \left( \frac{T_m}{5} \right)^{1.514}$$

Avec,

- $ETP$  = Évapotranspiration potentielle (mm);
- $T_m$  = Température moyenne annuelle (C°);
- $I$  = Indice thermique annuel;
- $i$  = Indice thermique mensuel;
- $a$  : Exposant climatique :

$$a = 0.492 + 1.79 \times 10^{-2} \times I - 7.71 \times 10^{-5} \times I^2 + 6.75 \times 10^{-7} \times I^3$$

Les valeurs mensuelles de l'ETP ainsi calculées sont multipliées par un facteur de correction K qui tient compte à la fois du nombre de jours par mois et de la durée du jour en fonction de la latitude.

Les résultats de calcul sont portés dans le tableau suivant :

Tableau (II-12): Valeurs de l'ETP calculées par la méthode de Thornthwaite.

Mois	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Annu.
$T_m$ (°C)	24,42	20,12	14,54	11,17	9,86	10,66	13,50	15,21	19,39	24,34	27,62	27,96	18,23
$i$	11,04	8,23	5,03	3,38	2,80	3,15	4,50	5,39	7,78	10,98	13,30	13,54	89,11
ETP (mm)	114,51	78,42	41,60	24,88	19,51	22,71	35,97	45,41	72,99	113,78	145,56	149,07	864,40
K	1,03	0,97	0,85	0,84	0,87	0,85	1,03	1,10	1,21	1,22	1,24	1,16	-
ETP (mm) corrigé	117,94	76,07	35,36	20,90	16,97	19,31	37,05	49,95	88,32	138,81	180,49	172,92	954,08

### b) Formule de Serra

C'est la même formule de Thornthwaite, mais avec des paramètres I et a différent que précédemment :

$$ETP = 1.6 \left( 10 \frac{T_m}{I} \right)^a \quad \text{(II-6)}$$

Avec,

- $ETP$  = Évapotranspiration potentielle (mm);
- $T_m$  = Température moyenne annuelle (C°);
- $I$  = Indice thermique annuel;

$$I = \sum_{i=1}^{i=12} i \quad i = 0.09 T_m^{3/2}$$

- $a$  : Exposant climatique qui égal à :  $a = \frac{1.6 \times I}{100 + 0.5}$

Les résultats obtenus par cette formule sont portés dans le tableau ci- dessous

Tableau (I-13): Valeurs de l'ETP calculées par la méthode de Serra.

Mois	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Annu
T <sub>m</sub> (°C)	24,42	20,12	14,54	11,17	9,86	10,66	13,50	15,21	19,39	24,34	27,62	27,96	18,23
i	10,86	8,12	4,99	3,36	2,79	3,13	4,46	5,34	7,68	10,81	13,06	13,30	87,91
ETP (mm)	66,86	50,96	32,35	22,38	18,80	20,96	29,15	34,45	48,41	66,55	79,41	80,77	551,04
K	1,03	0,97	0,85	0,84	0,87	0,85	1,03	1,10	1,21	1,22	1,24	1,16	-
ETP (mm) corrigé	68,86	49,43	27,50	18,80	16,35	17,82	30,02	37,89	58,57	81,19	98,46	93,70	598,60

### II.6.5.3. Formules de calcul de l'ETR

L'estimation de l'ETR est facilement accessible grâce à des formules empiriques qui utilisent les données faciles à quantifier comme la température et les précipitations.

#### a) Formule de Turc (1949)

Turc a proposé une relation entre le déficit hydrique, la pluie moyenne annuelle et la température moyenne annuelle :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (II-7)$$

$$L = 300 + 25T_m + 0.05T_m^3$$

Avec :

- ETR : Évapotranspiration réelle moyenne annuelle (mm);
- P : Précipitation moyenne annuelle (mm);
- T<sub>m</sub> : Température moyenne annuelle (C°);
- L : Pouvoir évaporant.

On a :

- Les précipitations moyennes annuelles : P (mm) = 792.16 mm;
- Température moyenne annuelle : T<sub>m</sub> = 13.16 (°C);
- Le pouvoir évaporant : L = 742.96.

L'évapotranspiration réelle : ETR = 555.05 mm. Soit 70.06 % des précipitations.

#### b) Méthode de Coutagne

$$ETR = P - \lambda P^2 \quad (II-8)$$

Avec :

- ETR : déficit d'écoulement (m/an);
- P : Hauteur moyenne des précipitations en m;
- T<sub>m</sub> : Température moyenne annuelle (°C);
- $\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14T}$



Cette formule n'est valable que pour :  $(\frac{1}{8\lambda} < P < \frac{1}{2\lambda})$

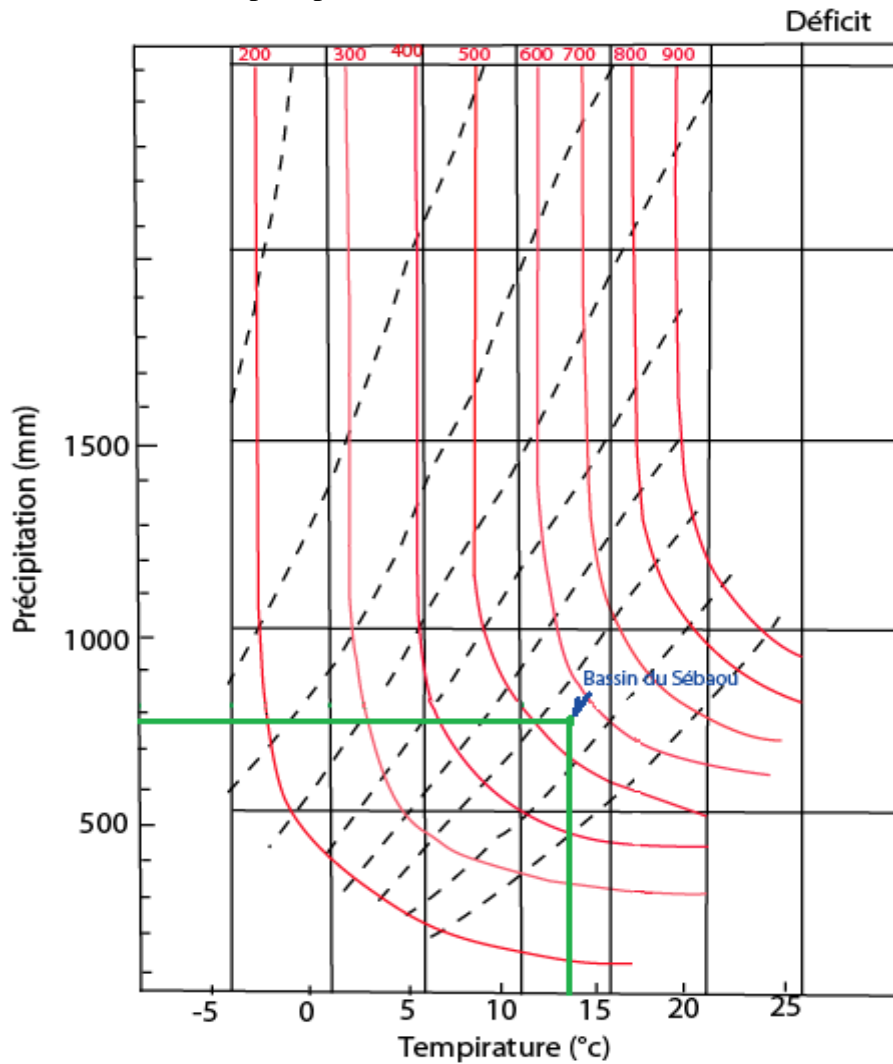
Dans notre cas la condition est satisfaisante puisque  $P = 792.16 \text{ mm}$  et  $\lambda = 0.38$

$\frac{1}{8\lambda} = 0.33$  et  $\frac{1}{2\lambda} = 1.32 \Rightarrow (0.33 < 0.792 < 1.32)$  donc la condition est vérifiée.

$ETR = P - \lambda P^2$  On déduit :  $ETR = 553,70 \text{ mm}$  soit 69.89% des précipitations.

**c) Formule de Wundt (Méthode graphique)**

Avec l'abaque de Wundt (**Figure (II-13)**), on déduit une évapotranspiration réelle (ETR) de 534.78 mm, soit 67.77 % des précipitations.



**Figure (II-13):** Abaque de Wundt.

Pour la précipitation moyenne de :  $P = 789.10 \text{ mm}$  (porté en ordonnées) et pour une température de  $T_m = 13.16 \text{ °C}$  (sur les courbes théoriques), cette abaque nous donne un déficit d'écoulement que l'on peut assimiler à l'ETR :

On obtient un déficit d'écoulement en ordonnée  $D = ETR = 534.78 \text{ mm}$ .

**d) Méthode du bilan de Thornthwaite**

Cette méthode basée sur les précipitations et les températures, permet de calculer à la fois l'ETP et ETR. Comme les températures maximales et minimales subissent l'influence de l'humidité de sol, Thornthwaite propose l'utilisation des températures moyennes.

Dans la vallée du Sébaou, il y a dominance des sols à textures argileuses et argilo-limoneuses. La capacité de rétention est de l'ordre de 18 % (moyenne des valeurs extrêmes pour ce type de sol).

$$RFU = \frac{C - F}{100} \times h \times D' + 30 \text{ mm}$$

(II-9)

Avec:

- *RFU* : réserve en eau utile;
- *C* : capacité de rétention;
- *F* : capacité du point de flétrissement;
- *h* : profondeur du sol (mm);
- *D'* : densité apparente ( $D \pm 1$ );
- L'enracinement capillaire est de 30mm.

Le paramètre (C-F) est fonction de la nature du sol selon HALLAIRE :

**Tableau (II-14) : valeurs du paramètre (C-F)**

Nature du sol	(C-F) %
Ligneux sableux	5
Limoneux	10 à 15
Argilo Limoneux	10 à 20

Sur les résultats de l'étude agropédologique menée par SAADI en 1970 (ANRH) dans la région de Sébaou, nous avons retenu que le sol est de nature argilo limoneuse, sur une profondeur moyenne de 100 cm ; l'estimation de la réserve en eau du sol sera donc de :

$$RFU = \frac{18}{100} \times 1000 \times 1 + 30 \text{ mm} = 210 \text{ mm} \quad (\text{II-10})$$

La valeur de la RFU ainsi obtenue est de 210 mm

Les résultats obtenus par la méthode du bilan de Thornthwaite sont reportés dans le tableau (II-15) :

Tableau (II-15) : Résultats de la méthode du bilan de Thornthwaite.

Mois	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Total
<b>ETP</b>	93,4	62,75	31,4	19,85	16,66	18,57	33,54	43,92	73,45	110,00	139,48	133,31	<b>776,3</b>
<b>P (mm)</b>	33,25	61,95	97,24	137,86	117,75	96,41	84,09	85,70	54,18	8,82	3,81	8,03	<b>789,10</b>
<b>(P-ETP)</b>	-60,15	-0,80	65,81	118,01	101,09	77,84	50,55	41,78	-19,26	-101,18	-135,66	-125,28	-
<b>ETR</b>	33,25	61,95	31,43	19,85	16,66	18,57	33,54	43,92	73,45	110,00	93,37	8,03	<b>544,02</b>
<b>RFU</b>	0,00	0,00	65,18	183,19	210	210	210	210	190,74	89,56	0,00	0,00	-
<b>E.C</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	74,28	77,84	50,55	41,78	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>244,45</b>
<b>Déficit</b>	60,15	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	46,11	125,28	-

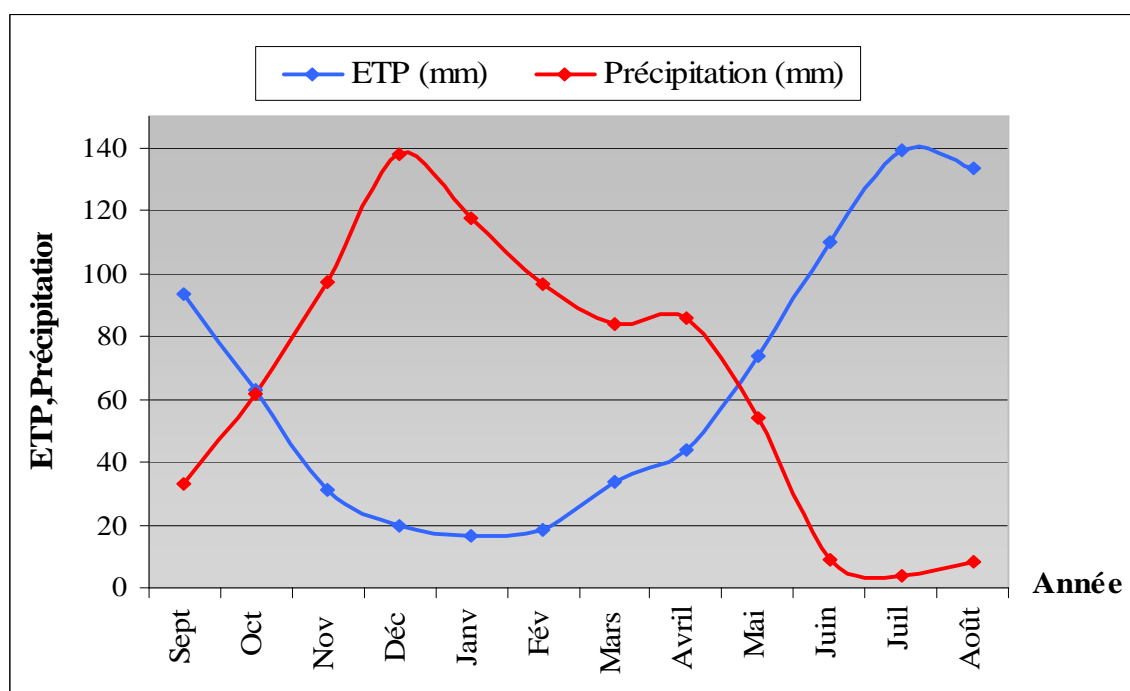


Figure (II-14) : Evaluation annuelle de la précipitation et de l'ETP.

Le ETR calculé par le bilan de Thornthwaite est de 544.02 mm, soit 68.94 % des précipitations moyennes annuelles. Et pour cela, on peut diviser l'année hydrologique moyenne en deux périodes :

- La période humide du mois d'octobre à avril avec  $P > ETR$ ,
- La période sèche du mois de mai à septembre avec  $P < ETR$ .

Et voici un tableau récapitulatif des valeurs de l'évapotranspiration calculée par les différentes méthodes :

Tableau (II-16) : Tableau récapitulatif des valeurs de l'évapotranspiration.

Paramètre	Méthode	Année moyenne		Moyenne arithmétique (mm)
		mm	%	
ETP	Thornthwaite	954.04		776.32
	Serra	598.60		
ETR	Turc	555.05	70.06	546.89
	Coutagne	553.70	69.89	
	Wundt	534.78	67.77	
	Bilan de Thornthwaite	544.02	68.94	

### II.6.6. Hydrologie de surface

Le comportement hydrologique d'un cours d'eau est lié à la diversité des facteurs physico-géographiques analysés précédemment, et dont la dominance a trait, comme on l'a vu aux facteurs climatiques [Bouannani, A, 2004]

Une évaluation précise des ressources en eau et de leur variabilité passe donc par la prise en compte des :

- Débits moyens annuels et bilans hydrologiques,
- Régimes fluviaux et variations saisonnières des débits,
- Débits moyens journaliers,
- Intensités des débits extrêmes des crues et des étiages ainsi que leur fréquence.

Un bassin hydrographique se définit comme la surface topographique drainée par un cours d'eau et ses affluents de telle façon que tout écoulement prenant naissance à l'intérieur de cette surface suive son trajet jusqu'à l'exutoire. En l'occurrence, c'est la mer méditerranéenne qui constitue l'exutoire du Sébaou.

L'hydrologie de surface s'intéresse, justement, à la fraction de la lame d'eau précipitée sur le bassin versant et drainée par le réseau hydrographique.

Le ruissellement est l'écoulement instantané et temporaire des eaux sur un versant, à la suite d'une averse.

#### II.6.6.1. Les données des débits aux différentes stations hydrométriques

Le bassin versant du Sébaou est contrôlé par six (06) stations hydrométriques dont les caractéristiques sont consignées dans le tableau (II-17):

**Tableau (II- 17) :** Caractéristiques des stations hydrométriques.

Station	Code ANRH	X (Km)	Y (Km)	Altitude (m)	Nom d'Oued contrôlé
<b>Fréha</b>	021615	642.95	384.25	130	Dis
<b>RN 12</b>	021716	628.40	372.80	150	Aïssi
<b>RN 25</b>	021909	610.20	375.81	60	Boughdoura
<b>Ksari</b>	021905	603.60	367.50	-	Ksari
<b>Belloua</b>	021803	623.30	381.20	70	Sébaou
<b>Baghlia</b>	022001	603.75	390.10	25	Sébaou

- La station de Baghlia située à l'embouchure, mesure les débits sortants du bassin versant du Sébaou qui se jettent dans la mer ;
- La station de Belloua implantée à l'entrée des gorges de Belloua, comptabilise les apports issus du haut Sébaou ;
- La station RN25, localisée près de Draa Ben Khedda, renseigne sur les potentialités hydriques de l'oued Boughdoura ;
- La station RN12, mesure les apports du sous bassin de l'oued Aïssi ;
- La station de Fréha implantée à l'amont du bassin sur la rive droite de l'oued Sébaou, contrôle l'oued Dis.

Les débits mensuels interannuels en (m<sup>3</sup>/s) pour la période de 1977 à 1996 mesurés à la station hydrométrique de Baghlia sont donnés dans le tableau (II-18), ANRH 2008 :

Tableau (II-18): Débit mensuels inter annuels (en m<sup>3</sup>/s) de 1977 à 1996 à la station de Baghlia.

Année	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Moy-An.
1977	0,23	0,30	1,86	2,43	9,99	17,87	37,94	77,93	13,05	3,64	0,72	0,16	13,84
1978	0,11	0,52	2,60	10,19	8,56	43,17	61,85	23,37	9,79	2,57	0,56	0,15	13,62
1979	0,40	0,57	15,90	8,19	37,06	18,75	49,19	14,94	28,51	3,65	1,86	0,17	14,93
1980	0,14	0,41	0,68	105,3	40,31	50,34	34,11	44,99	22,73	5,01	1,03	0,40	25,46
1981	0,20	0,22	0,31	9,78	79,07	97,56	29,51	18,06	9,97	2,93	0,28	0,07	20,66
1982	0,33	1,89	34,23	101,7	20,57	21,58	15,02	9,53	4,66	0,74	0,19	0,12	17,55
1983	0,04	0,14	1,02	3,50	23,87	80,30	39,69	23,49	13,08	116,5	0,50	33,21	27,94
1984	0,00	4,69	2,01	35,12	69,00	30,22	158,1	27,30	15,54	3,60	0,42	0,00	28,83
1985	0,00	0,03	3,26	7,10	17,87	46,02	111,4	16,55	5,64	1,33	0,05	0,00	17,44
1986	0,00	0,00	0,60	68,23	64,66	185,2	46,07	35,71	7,44	2,46	0,19	0,00	34,21
1987	0,00	0,22	0,27	3,61	6,86	7,73	18,17	6,51	4,70	1,33	0,06	0,00	4,12
1988	0,00	0,00	25,21	148,9	100,3	83,35	89,03	92,18	62,02	46,07	11,47	0,00	54,88
1989	0,00	0,00	0,00	1,18	6,52	6,32	3,16	8,38	17,84	6,12	0,00	0,00	4,13
1990	0,00	0,00	0,00	60,98	23,72	73,38	34,19	22,17	7,30	3,22	0,00	0,00	18,75
1991	0,00	0,00	0,14	0,18	18,66	5,93	44,26	75,47	13,10	10,49	0,58	0,00	14,07
1992	0,00	0,00	1,42	28,59	37,51	8,65	15,83	15,42	17,81	0,84	0,01	0,00	10,51
1993	0,00	0,00	0,00	9,58	25,65	27,64	6,48	3,72	1,13	0,05	0,00	0,00	6,19
1994	0,00	0,47	0,55	8,20	126,0	12,10	59,30	2,42	2,07	0,30	0,00	0,00	17,62
1995	0,00	0,23	0,27	4,10	69,40	36,30	59,30	19,30	16,00	2,92	0,00	0,00	17,32
1996	0,00	0,35	0,25	4,03	49,50	25,50	40,30	15,00	11,00	1,95	0,00	0,00	12,32
Moy-Mon.	0,07	0,50	4,53	31,04	41,75	43,90	47,64	27,62	14,17	10,78	0,90	1,71	--

### II.6.6.2. Régime des débits

#### a- Régime annuel

L'écoulement moyen annuel ou l'abondance annuelle est une notion fondamentale en hydrologie. C'est le volume d'eau écoulé en 365 jours à la sortie d'un bassin. Le module brut ou absolu est généralement exprimé en m<sup>3</sup> /s et le module spécifique se traduit en L s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>.

Nous disposons des séries de données hydrométriques représentant seulement 23 ans d'observation (Tableau (II-19)). Nous n'effectuerons pas une extension des données hydrométriques (maximisation intrinsèque de l'information), car il semble préférable de baser notre analyse sur des données réellement observées et non théoriquement extrapolées, d'autant plus que l'étendue des échantillons et la forte irrégularité du régime hydrologique des bassins ne justifient guère une telle opération.

La variation des débits moyens annuels aux différentes stations est présentée au tableau suivant.

Tableau (II-19) : Variation des débits moyens annuels aux différentes stations en (m<sup>3</sup>/s) .

Station	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988
Balloua 77/99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8,67	1,72	2,89
Oued Aissi 86/94	9,32	12,71	11,61	19,94	16,70	13,55	13,50	14,90	7,50	17,40	3,79	7,44
Baghlia 77/96	13,84	13,62	14,93	25,46	20,66	17,55	27,94	28,83	17,44	34,21	4,12	54,88

Station	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	Ann.
Balloua 77/99	3,93	4,58	2,65	2,96	2,05	5,43	-	-	-	-	-	3,88
Oued Aissi 86/94	3,22	12,29	8,77	7,75	5,11	4,31	2,33	1,58	6,63	3,86	1,42	8,94
Baghlia 77/96	4,13	18,75	14,07	10,51	6,19	17,62	17,32	12,32	-	-	-	17,97

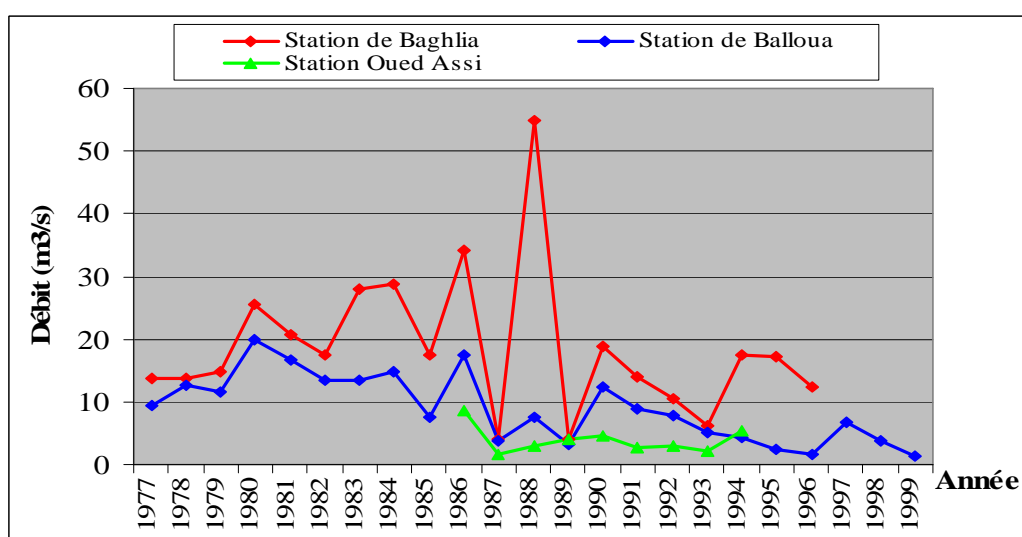


Figure (II-15): Variation des débits moyens interannuels aux différentes stations.

On constate une variation interannuelle des débits en dents de scie entre les stations avec une valeur maximale (54,88 m<sup>3</sup>/s) en 1988 à la station de Baghlia.

Les débits enregistrés au niveau des séries continues témoignent d'une irrégularité saisonnière et interannuelle du régime d'écoulement.

### b- Régime mensuel

Tableau (II-20): Variation des débits moyens mensuels (m<sup>3</sup>/s)

Station	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai.	Juin.	Juil.	Août.	Annuel
Balloua	0,53	0,65	3,15	16,23	15,64	20,06	17,43	15,09	8,08	1,88	0,40	0,34	<b>8,29</b>
Oued Aissi	0,08	0,31	1,33	5,46	8,56	10,66	8,33	7,13	3,33	1,05	0,20	0,07	<b>3,88</b>
Baghlia	0,07	0,50	4,53	31,04	41,75	43,90	47,64	27,62	14,17	10,78	0,90	1,71	<b>18,72</b>

On peut représenter aussi ces valeurs sous forme d'un graphe pour mieux expliquer la variation mensuelle des débits des 3 stations

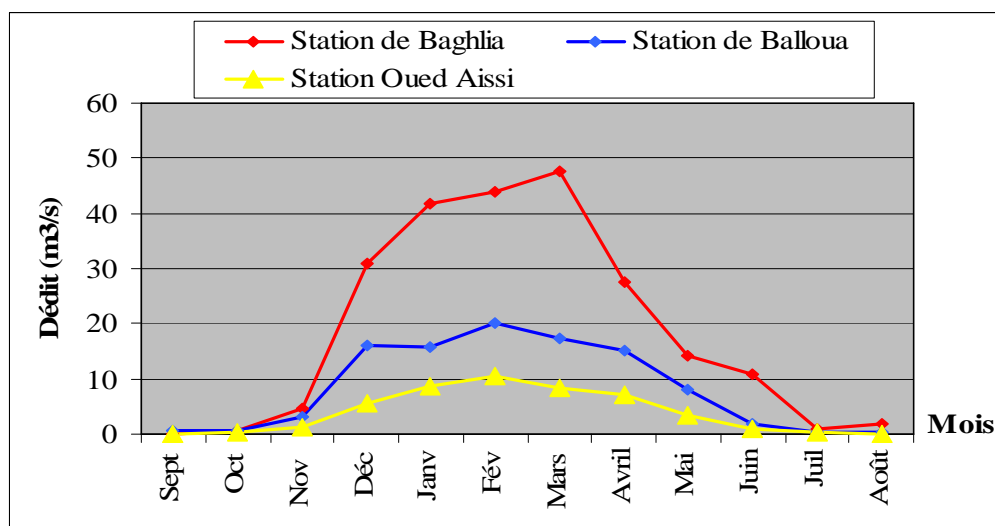


Figure (II-16): Variation des débits mensuels aux différentes stations.

A partir du graphique, on constate que les débits moyens mensuels enregistrés à chaque station présentent deux périodes à savoir :

- Période de hautes eaux (Novembre- avril jusqu'à mai) le débit mensuel maximum est enregistré en Mars (43,90 m<sup>3</sup>/s) pour la station de Baghlia, et en Février (20,06 et 10,66 m<sup>3</sup>/s respectivement pour les stations Balloua et Oued Aissi); cela peut être expliqué par l'apport supplémentaire provenant de la fonte des neiges.
- Période de bases eaux (mai- Octobre) le débit mensuel minimum est enregistré en Août (0,34 m<sup>3</sup>/s) pour la station de Balloua et en Septembre (0,08 et 0,07 m<sup>3</sup>/s) respectivement pour les stations de Oued Aissi et Baghlia.

### II.6.6.3. Relation Débits –Précipitations pour la période (1977/2006)

Tableau (II-21) : Relation précipitations –Débits.

Année	Précipitation (mm)	Débit (m <sup>3</sup> /s)	Année	Précipitation (mm)	Débit (m <sup>3</sup> /s)
1977	685,01	13,84	1992	743,63	10,51
1978	716,45	13,62	1993	592,80	6,19
1979	803,21	14,93	1994	862,75	17,62
1980	925,50	25,46	1995	914,76	17,32
1981	762,51	20,66	1996	536,97	12,32
1982	782,38	17,55	1997	1154,69	-
1983	744,57	27,94	1998	765,48	-
1984	1001,38	28,83	1999	597,07	-
1985	828,99	17,44	2000	727,83	-
1986	985,60	34,21	2001	493,08	-
1987	612,42	4,12	2002	1264,37	-
1988	697,49	54,88	2003	882,88	-
1989	533,38	4,13	2004	835,77	-
1990	801,50	18,75	2005	745,73	-
1991	784,13	14,07	2006	879,95	-



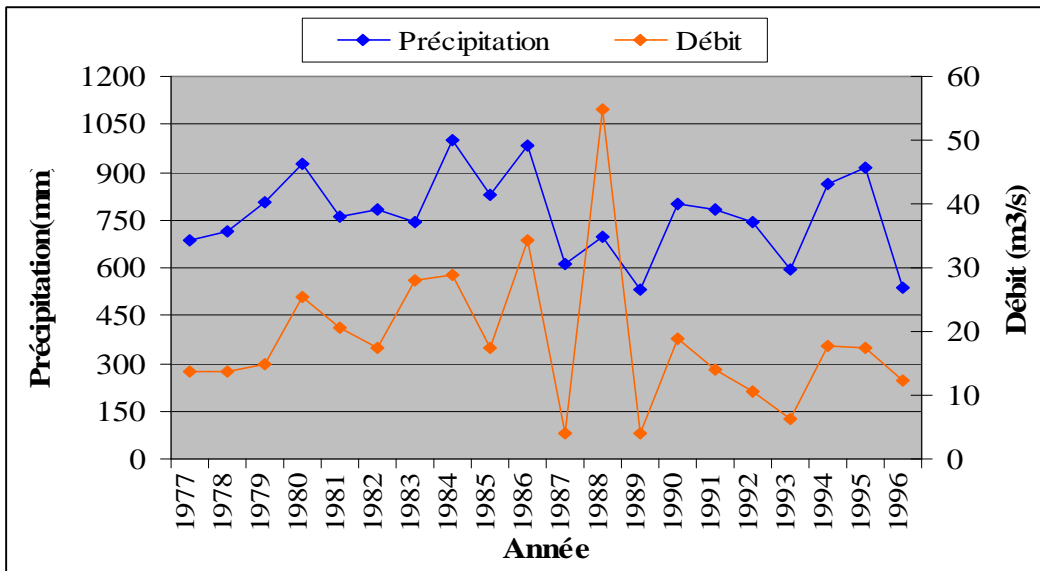


Figure (II-17): Relation Précipitation- Débit période (1977/1996).

II.6.6.4. Corrélation précipitations- débits

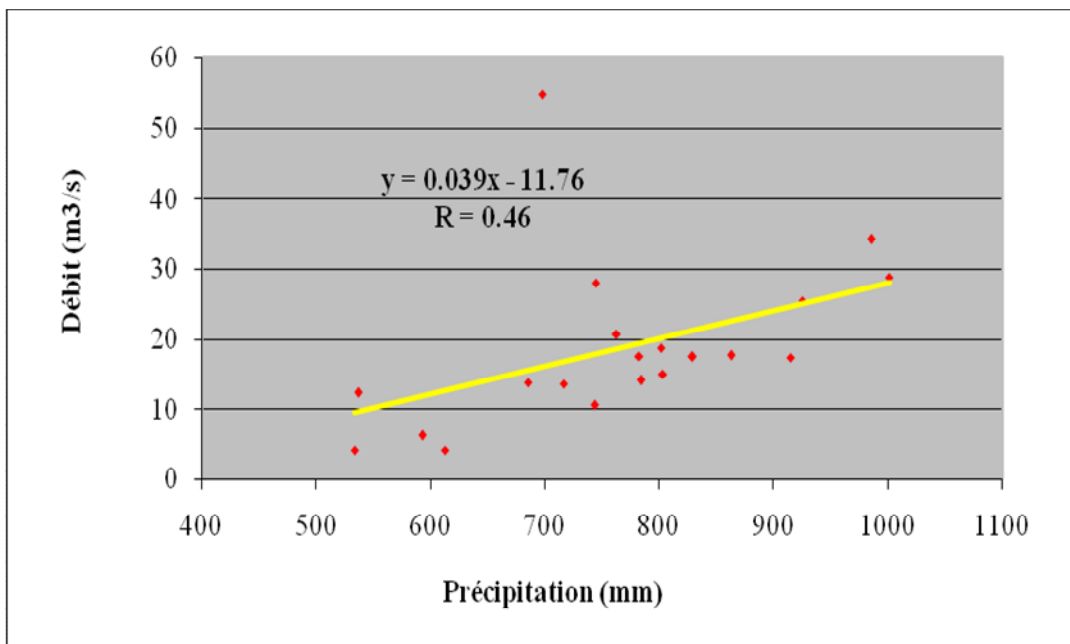


Figure (II-18): Corrélation Précipitations- Débits.

Nous constatons d’après le graphique de la figure que corrélation des paramètres précipitations moyennes et débits relatifs à la station de Baghlia pour la période 1977/2006 n’est pas bonne car le coefficient de corrélation **R=45** est inférieur à 0,70  
La droite de régression a pour équation:

$$Q \text{ (m}^3\text{/s)} = 0.0398 \times P \text{ (mm)} - 11,767 \tag{II-11}$$

**I.6.6.5. Estimation de la lame de ruissellement**

Le ruissellement apparaît dès que l'intensité d'une pluie devient supérieure à la vitesse d'infiltration du sol. Il est nettement plus élevé sur sol nu que sous cultures. Les plus faibles ruissellements proviennent des pluies tombantes après une période sèche. Par contre, les ruissellements et les pertes en terres les plus élevées ont eu lieu à une époque où le sol est déjà très humide et dans le cas de pluies exceptionnelles et des orages d'automne et de printemps.

Le ruissellement ne débute qu'après un cumul pluviométrique journalier de 18 à 20 mm sur le sol sec même si les pluies sont intenses ou après un cumul de 4 mm sur sol humide et compact.

**-Méthode de Tixeront-Berkaloff**

C'est une méthode empirique applicable en zones semi-arides, sa formulation est la suivante :

$$R = \frac{P^3}{3(ETP)^2} \quad (\text{II-12})$$

Avec :

- R : ruissellement superficiel moyen annuel (mm);
- P : précipitations moyennes annuelles (mm);
- ETP : Evapotranspiration potentielle moyenne annuelle (en mm).

Dans le cas du bassin versant du Sébaou, on a :

- P = 789,1 mm
- ETP = 776,32 mm.

Donc : R = 271,76 mm, soit 34,44 % des précipitations.

Pour la méthode de l'hydrogramme le ruissellement et l'infiltration sont estimés respectivement : R = 227.45 mm et I = 17 mm

**II.6.6.6. Bilan moyen annuel de l'écoulement**

Nous exprimons par P la tranche d'eau précipitée et par E la lame d'eau écoulée équivalente en mm. La différence de ces deux notions P-E donne ce qu'on appelle : déficit moyen annuel de l'écoulement (D) en mm.

L'équation du bilan hydrologique est exprimée par:

$$P = ETR + R + I \quad (\text{II-13})$$

Avec :

- P : précipitations moyennes annuelles (mm);
- ETR : évapotranspiration réelle (mm);
- R : ruissellement (mm);
- I : Infiltration (mm).

Tableau (II- 22): Tableau récapitulatif du bilan hydrologique du bassin versant du Sébaou.

Entrées	Sorties				Écart
Précipitations	ETR (mm) moyen	R (mm)	I (mm)	Total	-
789.10	546.89	227.45	17	791.34	-3,24

On constate que le bilan hydrologique est presque équilibré.

## II.7. Étude hydrodynamique

Les formations aquifères de la vallée du Sébaou sont constituées par des dépôts détritiques où sont incorporés des horizons argileux discontinus. Ces formations détritiques d'âge quaternaire représentent l'aquifère de la vallée, qui constitue le remplissage d'un synclinal à cœur miocène, on retrouve dans cette dernière un matériau hétérogène, formé de sables, galets, graviers et limons.

### II.7.1. Géométrie de la nappe du moyen et bas de Sébaou

Vu le manque de données, on s'intéresse seulement à la région du moyen et bas de la nappe alluviale de Sébaou dont la géométrie est présentée dans la figure suivante :

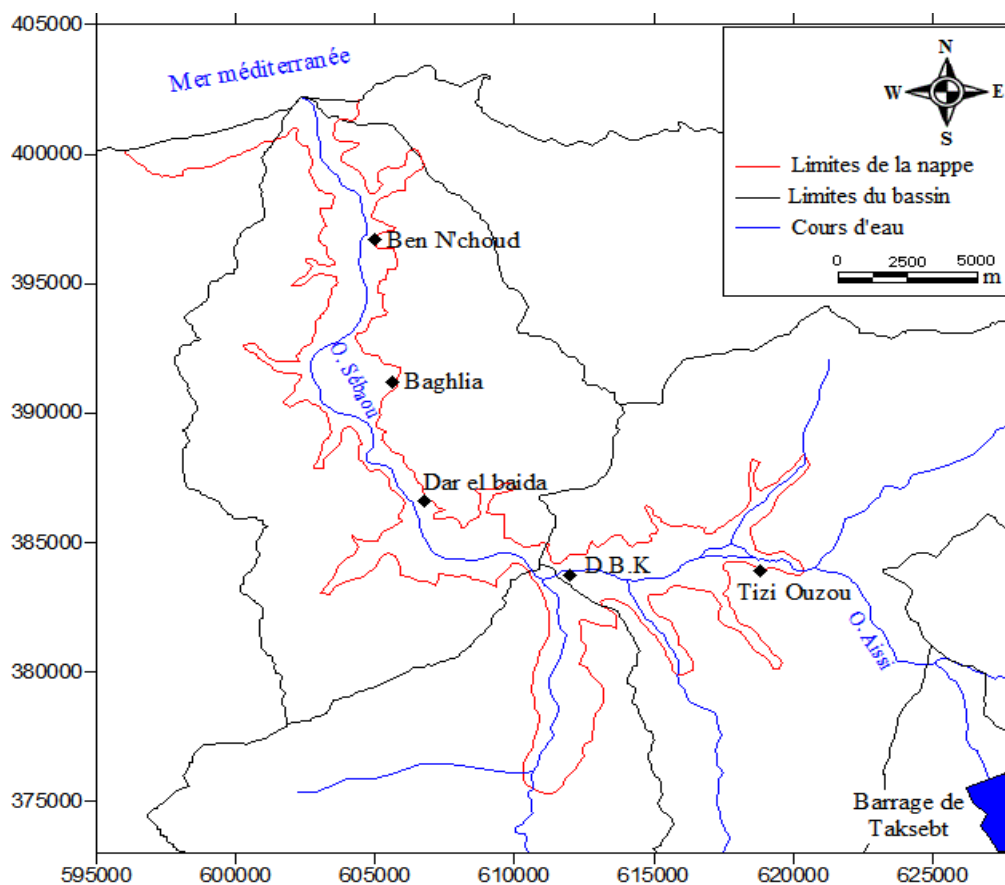
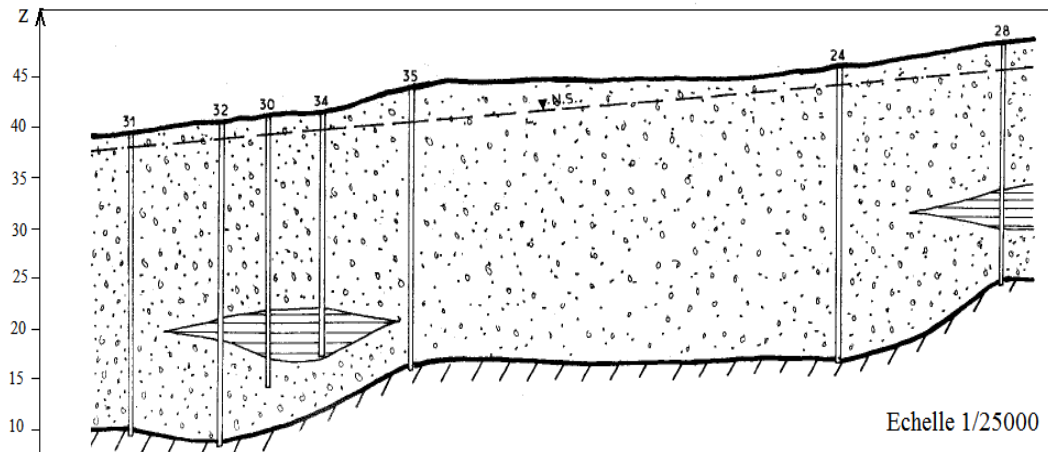


Figure (II-19): Géométrie de la nappe du moyen et bas de Sébaou.

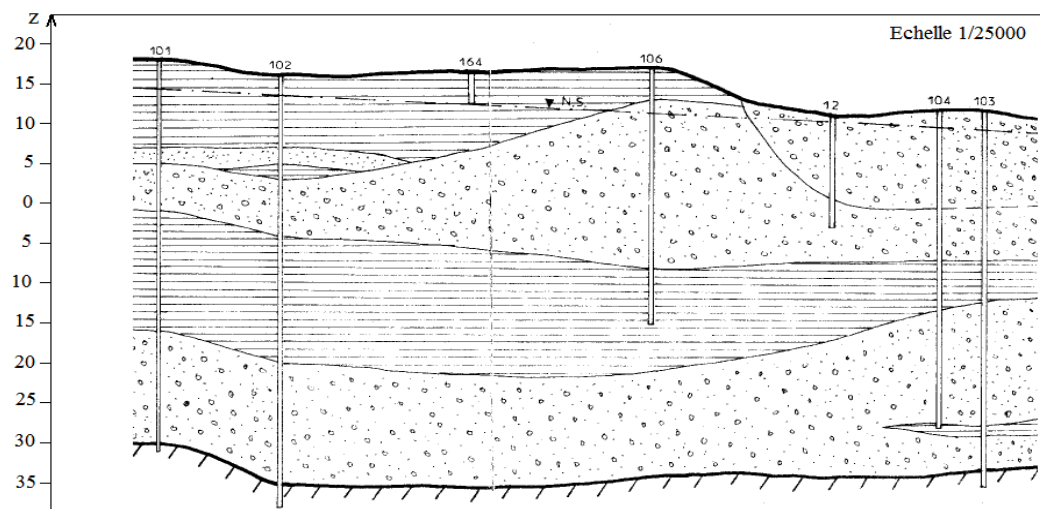
D'après l'étude de Chadrine (1972), la profondeur de la nappe à été déterminée par observation sur un réseau de point d'eau de densité variable. Dans le bas Sébaou cette profondeur des eaux souterraines augmente pour se stabiliser à la profondeur de 3 à 3.5m par rapport au sol (données pour la période d'étiage 1972) [Chadrine. Y ,1972].

**II.7.2. Les coupes hydrogéologiques**

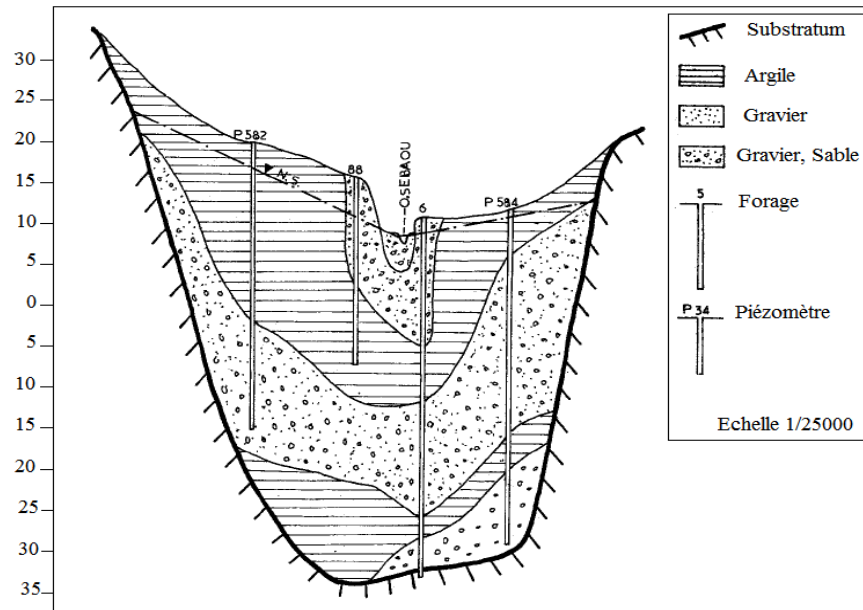
Des coupes hydrogéologiques sont réalisées dans cette étude et les figures ci-après montrent les différentes coupes de la nappe de Sébaou.



**Figure (II-20):**Coupe hydrogéologique de la zone de Drâa Ben Khadda.



**Figure (II-21):**Coupe hydrogéologique de la zone Baghlia.



**Figure (II-22):** Coupe hydrogéologique du bas Sébaou.

Les bordures et le lit mineur de la vallée de l'oued, sont formés par des marnes imperméables ou argiles de l'Oligocène au Pliocène. Dans le bas et le moyen Sébaou sont concentrées les réserves essentielles en eaux souterraines. On note l'existence de deux nappes aquifères, en relation hydraulique dans la zone de Draa Ben Khedda, et bien séparés par une couche argileuse au niveau de la zone de Tadmaït et Baghlia.

L'alimentation s'effectue essentiellement par les eaux superficielles de l'oued Sébaou, dans les secteurs à relation hydraulique.

### II.7.3. Étude de la piézométrie

La piézométrie de la vallée de Sébaou montre que la nappe est en relation hydraulique avec les eaux de surface drainées par l'oued et ces affluents. En basses eaux, l'oued alimente la nappe et en période des hautes eaux, il y a remontée du niveau de la nappe qui alimente ainsi le cours d'eau superficiel et ceci par endroit.

Les cartes piézométriques établies pour différentes périodes (ANRH 2000 et 2004) ne montrent pas de grandes variations dans la position des équipotentielles entre les hautes eaux et les basses eaux mais il est remarqué que le niveau piézométrique est en abaissement continu depuis 1999. Ceci est du non seulement à la diminution des infiltrations directes des précipitations dans la région mais aussi à l'impact du barrage de Taksebt qui réduisant ainsi l'alimentation de la nappe par l'un des plus importants affluents (Oued Aissi) de la vallée de Sébaou.

Les cartes piézométriques des hautes et basses eaux de la nappe de Sébaou réalisées par l'ANRH de Tizi Ouzou en 2004 montrent que :

- Dans le haut Sébaou, les écoulements souterrains se font dans la direction Est-ouest pour traverser la cluse de Belloua.
- Dans la partie moyenne du Sébaou, à partir de Boukhalfa l'écoulement convergent vers une dépression, formée par le champ de captage de Boudid, au-delà de Draa Ben Kheda l'écoulement reprend la direction Est-Ouest.

- Dans le bas Sébaou, à partir de Tadmaït les écoulements se font du Sud vers le Nord. Sur les bordures, les lignes de courant convergent vers l'axe de la vallée alluviale.

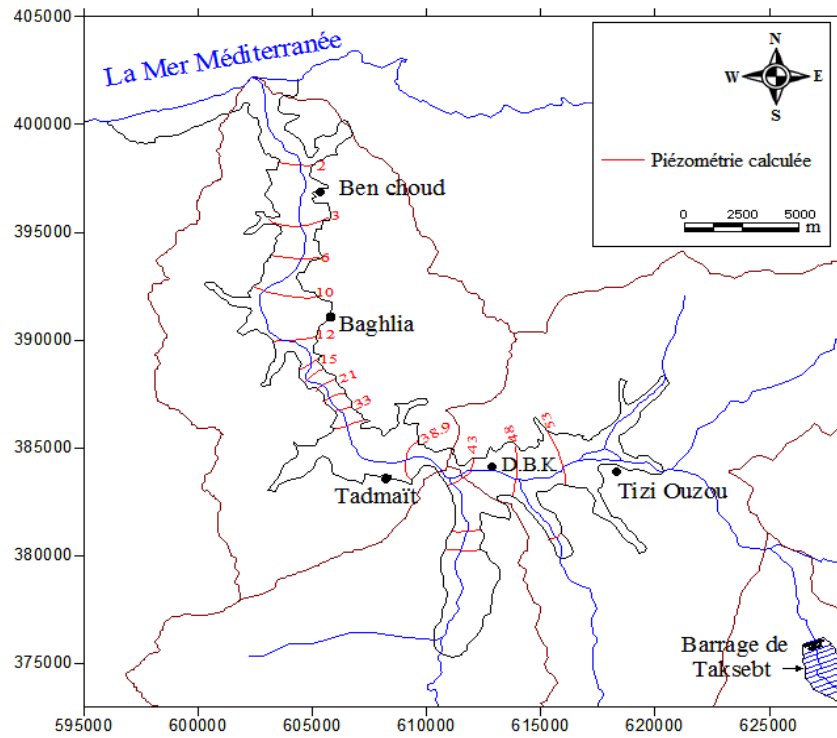


Figure (II-23): Carte piézométrique la nappe de l'année 2000.

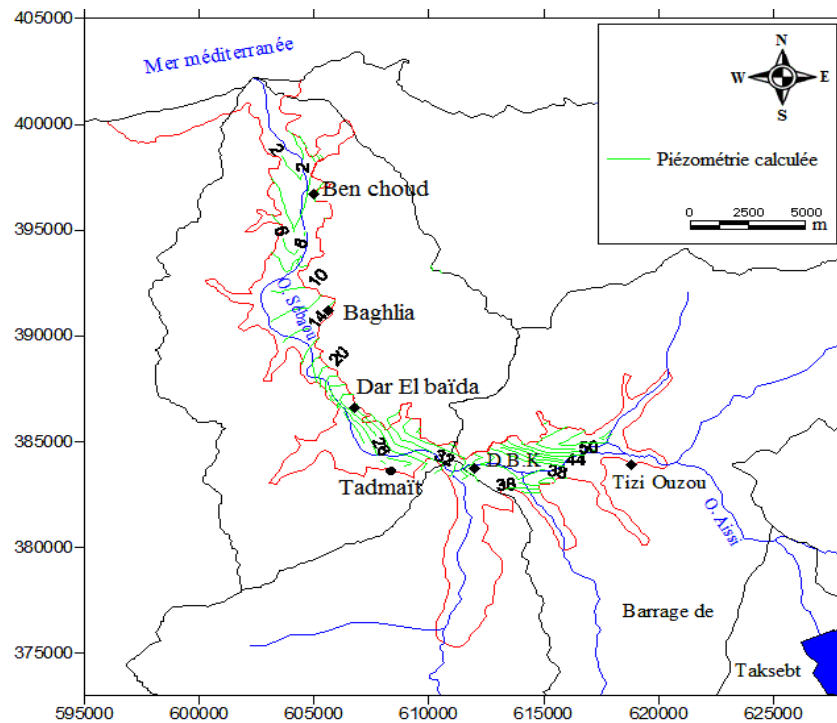


Figure (II-24): Carte piézométrique la nappe de l'année 2004.

**II.7.4. Impact du barrage de Taksebt****II.7.4. 1. Présentation du barrage de Taksebt [DHW Tizi Ouzou]**

Le barrage de Taksebt est implanté sur l'oued Aïssi, affluent du Sébaou situé à environ 10K m au sud-est de la ville de Tizi-Ouzou, aux points de coordonnées Lambert suivants :

**X** = 627.000 Km, **Y** = 376.100 Km, **Z** = 95.5m

Il recouvre les territoires ruraux des communes d'Irdjen, Larbaâ Nath Irathen, Beni Aïssi, Beni Douala et Ait Mahmoud. Il présente une importante ressource superficielle, sa capacité de 175 millions de m<sup>3</sup> permet une régularisation de 180 millions de m<sup>3</sup> destinées à l'alimentation en eau potable dont :

- Un volume de 57 millions de m<sup>3</sup> pour la wilaya de Tizi-Ouzou ;
- Un volume de 123 millions de m<sup>3</sup> pour la wilaya d'Alger.

Notons que le barrage est mis en service, la retenue du barrage de Taksebt crée un déficit dans l'apport solide de l'oued Aïssi. Ce déficit va créer une érosion qui se ressentira à l'aval du site du barrage comme il s'est produit aussi les changements suivants :

- Modification du régime hydrologique des eaux (eau de ruissellement en eau stagnante), ceci entraîne par conséquent la diminution des apports à la nappe ;
- Changement climatique, augmentation de l'humidité, l'évaporation et les précipitations.

**II.7.4.2. Impact du barrage sur la recharge de la nappe alluviale de Sébaou**

D'après les données issues du réseau des eaux souterraines du haut Sébaou (campagnes piézométriques 2002, 2003, 2004, 2005), il est possible de tirer quelques renseignements sur l'influence du barrage de Taksebt sur les niveaux piézométriques.

La campagne de mesure menée en 2002 sur les forages situés en aval de barrage de Taksebt (puits P61 et P62) montre que le niveau piézométriques de la nappe semble être plus élevé que les années antérieures notamment en période d'étiage (ces puits étaient sec durant l'étiage de 1999 et 2000 et ne l'étaient pas en 2002). Ce phénomène peut provenir de la mise en eau de la retenue qui, de fait de la charge hydrostatique, provoque un relèvement du niveau piézométrique à l'aval immédiat de la retenue.

Par contre dès que l'on s'éloigne du barrage, on peut remarquer une baisse notable du niveau piézométrique de -5m par rapport aux années antérieures (points d'eau P182 et P70), que se soit en période d'étiage ou de crue. Rappelons que la nappe du haut Sébaou est libre et alimentée principalement par les eaux superficielles et par les affluents principaux. Ceci nous laisse supposer que l'oued Aïssi rechargeait localement la nappe de Sébaou. Or, du faite de la présence de la retenue, le déficit d'apport provenant de cet oued peut ainsi expliquer la baisse de niveau piézométrique.

La campagne piézométrique effectuée par M. Bouadjla (ANRH de Tizi-Ouzou) en 2004 a révélé que dans la nappe de l'oued Aïssi, le niveau statique est de l'ordre de 12.50 m au point F62, situé juste en aval de la digue du barrage de Taksebt et que la plupart des puits ne dépassant pas 10m de profondeur sont à sec. Donc, le barrage de Taksebt a eu un impact sur la réalimentation de cette dernière.

Tableau (II- 23): État des forages de la nappe de l'oued Aïssi (DHW de Tizi-Ouzou, 2001).

Région	Épaisseur des alluvions(m)			N <sub>s</sub> /sol (m)		Hauteur des alluvions mouillées (m)		Rabattement (m)
	centre	bordure	moyenne	1980	2000	1980	2000	
De la digue au pont d'oued Aïssi	20	13	19	3	10	16	9	7
Du pont de l'oued à la confluence de l'oued Sébaou	-	-	14	5	10	9	4	5

### II.7.5. Impact des sablières sur la nappe de Sébaou

Les sablières sont au nombre de trente (30) réparties en moyenne d'une (1) tous les trois kilomètres, ce qui présente une vraie menace pour l'aquifère alluvial de Sébaou, en facilitant la diffusion de la pollution par suite de la mise à nu du couvert protecteur et filtrant de la nappe. Les d'alluvions sont en voie d'épuisement. La surexploitation d'agrégats est estimée à un million trois cent mille mètres cubes par an, et selon L'A.N.R.H. (1996), les exploitants ne déclarent qu'un quart à un tiers de leur production. 8 m<sup>3</sup> cubes d'agrégats représentent 1 m<sup>3</sup> environ.

L'impact des extractions incontrôlées des agrégats ont pour effet de provoquer :

- La mise à nue de la nappe à plusieurs endroits ;
- L'élimination de la zone non saturée qui filtre les éléments polluants;
- La formation des cratères atteignant des profondeurs de 6 m<sup>3</sup> et des diamètres 300 à 400 m;
- L'érosion des berges provoquant les pertes des terres agricoles;
- L'élargissement du lit majeur du cours d'eau de 500 m par endroit ;
- La menace d'effondrement de plusieurs forages ;
- La formation par endroit de marécages, suite à la dispersion de la couche aquifère.

Dans les dernières années, un problème majeur menace les nappes côtières et il consiste en l'intrusion marine le long du littoral suite à la sécheresse, au pompage anarchique de la nappe et à l'extraction abusive du sable marin. [Remini. B, 2005]

### II.7.6. Alimentation de la nappe

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

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



**II.7.7. Les essais de pompage [Castany. G, 1982]**

**II.7.7.1. But d'un essai de pompage**

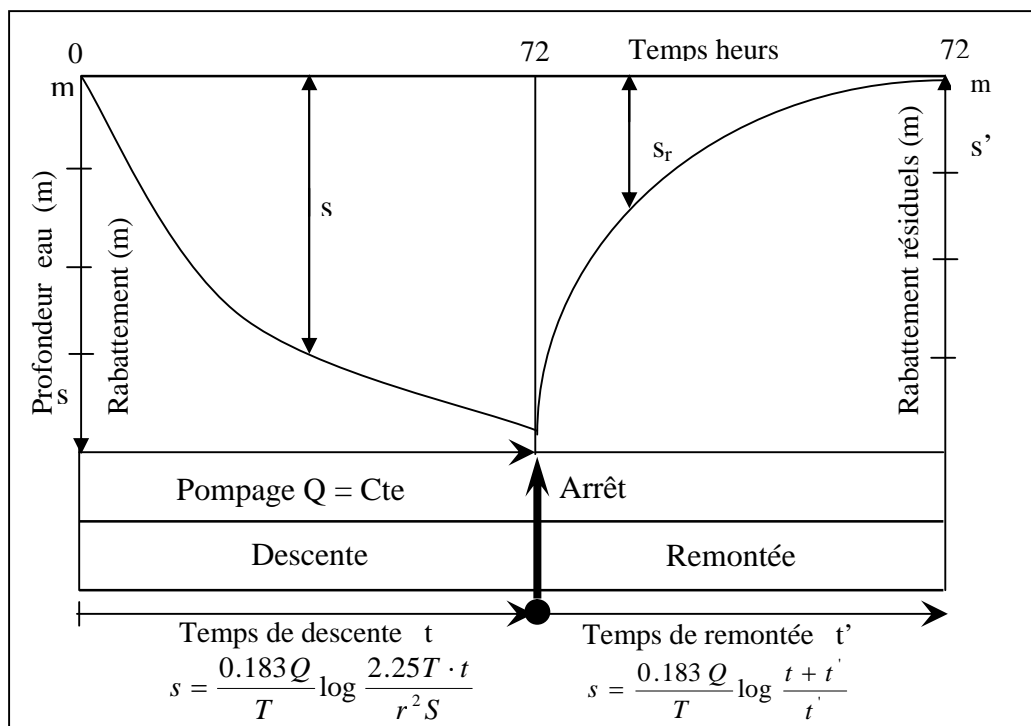
Le pompage d'essai poursuit trois buts principaux :

- Mesure sur le terrain des paramètres hydrodynamiques : transmissivité et coefficient d'emmagasinement ;
- Etude quantitative des caractéristiques particulières de l'aquifère : condition aux limites (confirmation de la distance du puit à la limite, colmatage des berges d'une rivière), structure (hétérogénéité, drainage) ;
- Observation directe, «en vraie grandeur», de l'effet de l'exploitation sur l'aquifère. Prévision de l'évolution du rabattement en fonction des débits pompés. Evaluation de la ressource en eau souterraine exploitable.

Le pompage d'essai, intéressant un volume d'aquifère important, est un test valable de son comportement hydrodynamique.

**II.7.7.2. Les pompages d'essai de longue durée**

Les pompages d'essai de longue durée sont exécutés par un seul palier de débit, à débit constant, prolongé durant au moins 42 heures, avec un optimum de 72 heures. La remontée des niveaux doit être observée pendant une durée égale (voir la figure ci-après). L'exécution et l'interprétation des données mesurées, rabattement et temps, reposent sur l'emploi des expressions d'hydrodynamiques en régime transitoire, établies par C.V. Theiss (1935) et ses successeurs (L.K.Wenzel, 1942 et C.E. Jacob. 1950).



**Figure (II-25) :** Exécution du pompage d'essai et interprétation des données par la méthode d'approximation logarithmique de C.E. Jacob (1950).

### II.7.7.3. Interprétation d'un essai de débit

#### A- Méthode de la courbe de descente de Theiss et Jacob

La méthode de Jacob consiste à reporter sur un graphique semi-logarithmique le rabattement (s) en fonction du temps, à un point donné (puits ou piézomètre). Dans ce cas; l'équation d'approximation de Theiss et Jacob s'écrit :

$$s = \frac{0.183 Q}{T} \log \frac{2.25 T \cdot t}{r^2 S}$$

Avec :

s = Rabattement (Niveau dynamique – NS);

Q = Débit de pompage;

T = Transmissivité;

t = temps de pompage;

S = Coefficient d'emmagasinement;

r = Distance de piézomètre.

La détermination du paramètre T consiste à porter les valeurs de rabattement observé en fonction du logarithme du temps de pompage et à tracer la droite qui passe au mieux par ces points. On détermine ensuite la pente C de cette droite sur un cycle logarithmique et le temps t<sub>0</sub> correspondant à l'intersection de la droite avec l'axe des rabattements nuls: On obtient alors :

$$T = \frac{0.183 Q}{C} \quad \text{et} \quad S = \frac{2.25 T t_0}{r^2}$$

#### B- Courbe de remontée de Theiss et Jacob

Cette méthode de détermination de transmissivité est la plus fiable car; pendant la remontée; l'écoulement des eaux souterraines est soumis à un régime naturel.

Dans la mesure où les conditions de la méthode de Jacob sont satisfaites; c'est-à-dire une nappe captive, homogène, isotrope et infinie; on mesure le rabattement résiduel qui représente la différence entre le niveau d'eau statique et le niveau d'eau mesuré à l'instant t (temps écoulé depuis l'arrêt du pompage).

$$s_r = \frac{0.183 Q}{T} \log \left( \frac{2.25 T t}{r^2 S} \right) - \frac{0.183 Q}{T} \log \left( \frac{2.25 T t'}{r^2 S} \right) \quad (\text{II-14})$$

Ou encore :

$$s_r = \frac{0.183 Q}{T} \log \frac{t}{t'} \quad (\text{II-15})$$

Avec :

s<sub>r</sub>: rabattement résiduel;

t': temps écoulé depuis l'arrêt de pompage.

On représente s<sub>r</sub> en fonction de log (t/t'). Après un certain temps qui est fonction de l'importance des déformations dues au puits de pompage, les rabattements observés se placeront sur une droite dont la pente C permet le calcul de T:

$$T = \frac{0.183 Q}{C}$$

**C- Calcul du coefficient d'emmagasinement (S) [Castany. G, 1982]**

Le coefficient d'emmagasinement est obtenu par calcul numérique dans le deuxième terme de l'expression (II-14). Ou, plus simplement, avec  $t_0$  déterminé graphiquement comme suit : Au point d'intersection de la droite Rabattement – Log T (1) avec l'axe des abscisses (temps en seconde) nous déterminons  $t_0$ .

$$\text{L'équation } s = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25Tt}{r^2 S} \text{ devient } 1 = \frac{2.25Tt}{r^2 S}$$

Où,  $r^2 = X^2$  (distance d'observation)

$$S = \frac{2.25Tt_0}{X^2} \quad (\text{II-16})$$

Avec :

- T = transmissivité;
- X = distance piézomètre – Forage;
- $t_0$  = déterminé sur le graphe.

**D- Rayon d'influence ou rayon d'action**

C'est la distance à partir de laquelle le rabattement devient nul. Il dépend de la transmissivité (T), du coefficient d'emmagasinement (S) et du temps de pompage (t).

$$r_0 = 1.5 \sqrt{\frac{Tt}{S}} \quad (\text{II-17})$$

Avec :

- T = transmissivité;
- t = temps de pompage;
- S = Coefficient d'emmagasinement.

**Remarque**

Dans le cas d'une nappe libre, l'expression d'approximation logarithmique de C.E. Jacob ne peut être appliquée que lorsque le rabattement (S) est petit comparé à l'épaisseur e de l'aquifère. Les conditions de validité sont fixées à  $S \leq 0.1$  e avec une tolérance portée à  $S \leq 0.3$  e.

La distance du piézomètre doit être supérieure à 5 m pour éviter l'influence des pertes de charges au voisinage de l'ouvrage provoquées par l'exécution des travaux de fonçage et doit être au maximum de 150 m afin d'obtenir des mesures de rabattement significatives et de rester dans les limites de validité de l'expression de Jacob. Elle sera égale au tiers du rayon d'influence à explorer.

**II.7.7.4. Exemple de calcul**

En appliquant ces relations au forage nommé (F1-VAS1) qui est situé à environ 1 Km au sud est de la localité de Ben N'choud (Figure II-26), distant d'une centaine de mètres du lit majeur de l'oued Sébaou.

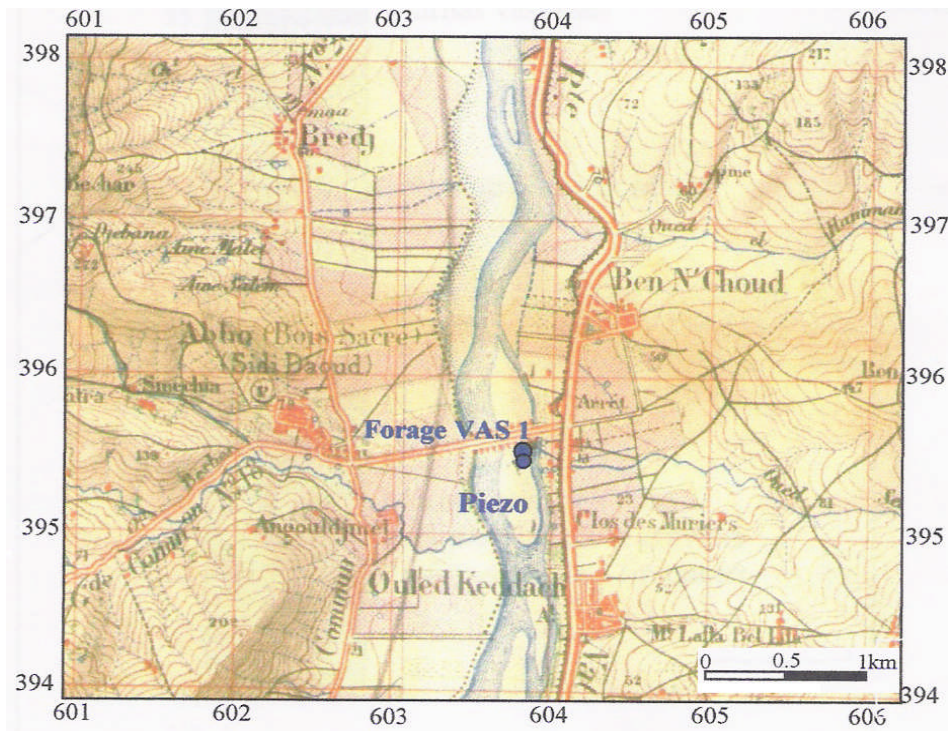


Figure (II-26): Carte de situation du forage F1R-VAS1 (ANRH Tizi Ouzou).

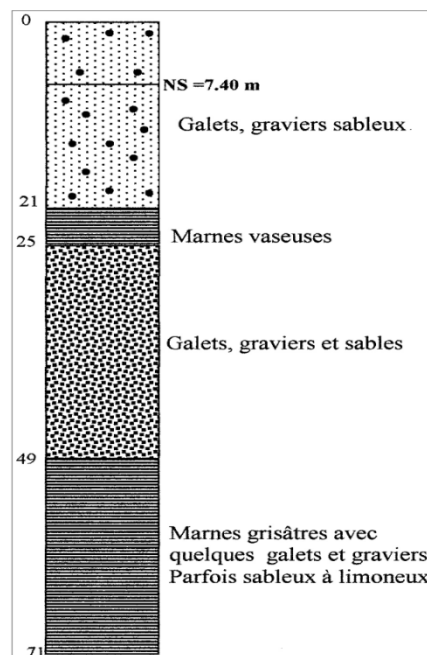


Figure (II- 27): Coupe lithologique du forage F1R-VAS1.

#### II.7.7.4.1. Détermination de la transmissivité:

##### ❖ Courbe de descente dans le forage F1R-VAS1: (Figure (II-28))

La courbe de descente montre une droite représentative avec deux tronçons dont le premier présente une pente assez aigüe correspondant au premier quart d'heure de pompage (c'est l'effet

de vidange) et le deuxième est assez long avec une pente faible et assez régulière. La pente de la droite représentative est  $c = 0.15$  et le débit  $Q = 30$  l/s; on aura donc :

$$T = \frac{0.183Q}{C} = \frac{0.183 \times 3.10^{-2}}{0.15} = 3.66 \times 10^{-2} \text{ m}^2 / \text{s}$$

❖ **Courbe de remontée dans le forage F1R-VAS1: (Figure (II-28))**

De même; la courbe de remontée des rabattements résiduels au niveau du forage montre une droite de pente  $C = 0.12$  ce qui correspond à une transmissivité  $T = 4.75 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ . la transmissivité pour le ce forage est comprise entre  $3.6 \times 10^{-2}$  et  $4.57 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ .

❖ **Courbe de descente dans le piézomètre F1R-VAS1: (Figure (II-29))**

Ce piézomètre est situé à une distance de 58 m du forage et permet d'observer l'évolution du niveau dynamique. La courbe de descente tracée montre deux tronçons de droite séparés par un palier et la détermination de  $C$  sur le premier tronçon qui est égale à 0.056 permet de calculer une transmissivité  $T$  de  $9.8 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ .

L'intersection du premier tronçon de droite avec l'axe des abscisses donne  $t_0 = 40\text{s}$ .

❖ **Courbe de remontée dans le piézomètre F1R-VAS1: (Figure (II-29))**

La courbe de remontée montre deux tronçons de droite séparés par un palier. La pente correspondant au deuxième tronçon relatif aux rabattements résiduels en fin de remontée est :  $C = 0.14$  et la transmissivité correspondante est de :  $T = 3.92 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ .

#### II.7.7.4.2. Détermination du coefficient d'emménagement (S)

L'intersection de la droite avec l'axe des abscisses donne  $t_0 = 40\text{s}$ .

Pour une transmissivité de  $9.8 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  (courbe de descente) et  $X = 58\text{m}$ ; la formule (5) donne un coefficient d'emménagement  $S = 2.91 \times 10^{-3}$ .

#### II.7.7.4.3. Rayon d'influence ou rayon d'action $r_0$

Pour  $T = 3.92 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  et  $S = 2.91 \times 10^{-3}$  avec un temps de pompage de 72 heures; la formule (II-17) donne un  $r_0 = 4441 \text{ m}$ .

La valeur de  $r_0$  ainsi trouvée est très élevée et elle ne reflète pas la réalité. Cela peut être expliqué par les conditions locales de réalisation de ces essais de pompage qui peuvent être résumées comme suit :

- Le pompage dans les ouvrages situés à proximité;
- Infiltrations induites par les précipitations du mois de novembre et décembre;
- Des éventuelles relations oued-nappe (le forage est distant d'une centaine de mètres du lit majeur de l'oued Sébaou);
- La proximité des bordures de la nappe alluviale qui sont de nature imperméable à semi perméable.

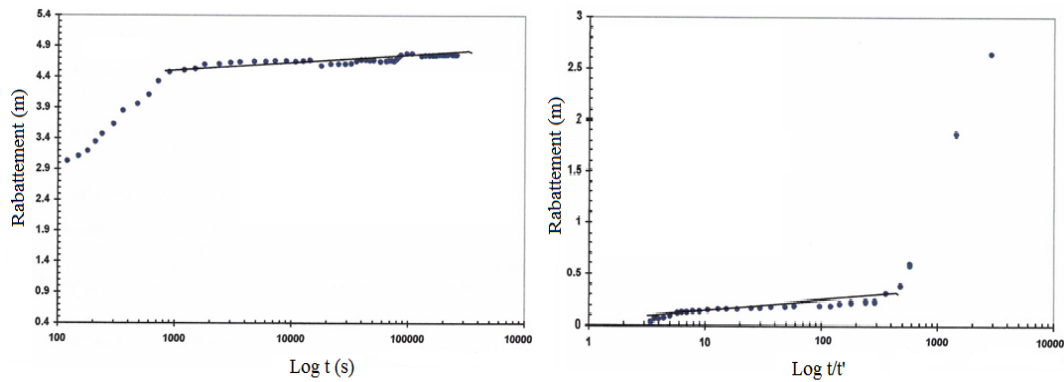


Figure (II- 28): Courbes de descente et remontée dans le forage F1R-VAS1 (ANRH)

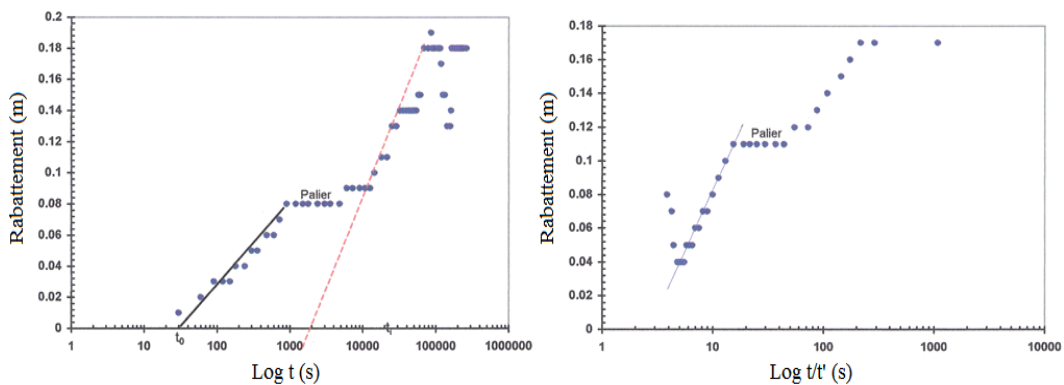


Figure (II- 29): Courbes de descente et remontée dans piézomètre F1R-VAS1 (ANRH)

Tableau (II-24): différents résultats des essais de pompage réalisés sur la nappe de Sébaou.

Point d'eau	X (km)	Y (km)	Transmissivité (m <sup>2</sup> /s)		b (m)	K (m/s)	Transmissivité Moy (m <sup>2</sup> /s)
			Décente	Remonté			
ET3	626.71	377.00	3 10 <sup>-2</sup>	-	16	1.8 10 <sup>-3</sup>	2.94 10 <sup>-2</sup>
F3	630.16	366.25	2.6 10 <sup>-1</sup>	-	10	2.26 10 <sup>-2</sup>	2.43 10 <sup>-1</sup>
2-1	625.50	379.77	6 10 <sup>-2</sup>	-	13	4.6 10 <sup>-3</sup>	6 10 <sup>-2</sup>
SM2	626.17	379.45	6 10 <sup>-2</sup>	-	6	1 10 <sup>-3</sup>	6 10 <sup>-2</sup>
F1	612.26	380.71	4.5 10 <sup>-2</sup>	-	15	3 10 <sup>-3</sup>	1.8 10 <sup>-2</sup>
8 A2	614.57	383.90	1.4 10 <sup>-2</sup>	4,5 10 <sup>-3</sup>	9	3.3 10 <sup>-4</sup>	2.95 10 <sup>-2</sup>
8A3	614.58	383.50	5.2 10 <sup>-2</sup>	-	10	5.2 10 <sup>-3</sup>	5.2 10 <sup>-2</sup>
1-2	608.70	384.40	4.2 10 <sup>-2</sup>	-	27	1.6 10 <sup>-3</sup>	4.26 10 <sup>-2</sup>
BA4	616.45	383.77	1.42 10 <sup>-1</sup>	-	17	8.4 10 <sup>-3</sup>	2.92 10 <sup>-1</sup>
Piéz F1R-Vas	604.975	395.525	8.23 10 <sup>-2</sup>	3.92 10 <sup>-2</sup>	42	1.4 10 <sup>-3</sup>	6.08 10 <sup>-2</sup>
F1R-VAS	604.978	396.200	2.74 10 <sup>-2</sup>	5.5 10 <sup>-2</sup>	42	9.8 10 <sup>-4</sup>	4.12 10 <sup>-2</sup>
Piéz BA61 Bis	616.977	384.216	10.8 10 <sup>-2</sup>	7.32 10 <sup>-2</sup>	18	5 10 <sup>-3</sup>	9.04 10 <sup>-2</sup>
BA5	617.050	384.152	3.66 10 <sup>-2</sup>	4.07 10 <sup>-2</sup>	18	2.2 10 <sup>-3</sup>	3.87 10 <sup>-2</sup>
Piéz TM1	-	-	1.9 10 <sup>-1</sup>	-	6	3.2 10 <sup>-2</sup>	1.9 10 <sup>-1</sup>
VAS1 ben choud	604.878	395.575	3.66 10 <sup>-2</sup>	4.57 10 <sup>-2</sup>	-	9.9 10 <sup>-4</sup>	4.12 10 <sup>-2</sup>

Et pour le coefficient d’emmagasinement, on ne dispose pas d’assez de données pour le quantifier à travers les différents sites de la nappe. Et voici quelques valeurs de ce paramètre :

**Tableau (II-25):** Valeurs du coefficient d’emmagasinement de la vallée du Sébaou.

Point d’eau	Transmissivité (m <sup>2</sup> /s)	Débit spécifique (l/s.m)	Coefficient d’emmagasinement (s)
BA5	10,76. 10 <sup>-2</sup>	32	0.1
TM1	1,9. 10 <sup>-1</sup>	47	2.8
VAS1 ben choud	9,15. 10 <sup>-2</sup>	6.3	0.4

**Conclusion**

L’étude de la pluviométrie au bassin versant de Sébaou montre que la répartition de la pluie subit trois influences,

- La hauteur de pluie augmente avec l’altitude mais est plus élevée sur les versants exposés aux vents humides que sur les versants sous le vent.
- Elle augmente de l’Ouest à l’Est avec un régime pluvial marqué par un pic en décembre.
- Elle diminue à mesure que l’on s’éloigne du littoral.

La lame d’eau précipitée à l’échelle du bassin est évaluée par la moyenne arithmétique et estimée à 789,10 mm.

L’examen des données climatiques nous a permis de définir deux saisons différentes à savoir :

- Une saison chaude, avec un climat sec qui s’étend de mai à septembre.
- Une saison froide, avec un climat humide tempéré s’étendant d’octobre à avril.

On constate une augmentation des débits moyens mensuels de septembre à février, les débits interannuels ne montrent pas une bonne corrélation avec les précipitations car le coefficient de corrélation **R=45** est inférieur à 0,70 et l’équation s’écrit sous la forme :

$$Q \text{ (m}^3\text{/s)} = 0.0398 \times P \text{ (mm)} - 11,767.$$

Après l’élaboration du bilan hydrologique du bassin de Sébaou, on peut constater que le ruissellement et l’infiltration sont nettement sous- estimés en raison de :

- L’inexistence de stations pluviométriques en altitude couvrant une période statistiquement exploitable;
- L’absence d’évaporomètres pour évaluer l’évapotranspiration réelle, cette dernière a été calculée par l’application de formules empiriques;
- L’absence d’une station hydrométrique à l’exutoire du bassin versant du Sébaou.

Pour ce qui est de la gestion de ses ressources, la nappe est partagée entre deux wilayas (Tizi Ouzou et Boumerdès) et chacune d’elle élabore un programme de forage pour satisfaire les besoins de sa population, ce qui a entraîné une surexploitation et une baisse du niveau

piézométrique, ajouter à cela la réalisation de forages sans études, la mauvaise gestion de la ressource va entraîner une intrusion marine.

L'ensemble des données sont insuffisantes pour l'établissement d'un bon modèle mathématique.

Dans la partie qui suit, on va essayer d'élaborer un modèle sous le logiciel modflow pour mieux comprendre le fonctionnement de l'aquifère et pour simuler le comportement de la nappe en différentes périodes de temps pour ainsi proposer quelques solutions aux problèmes rencontrés au cours du travail.



---

***Chapitre III***  
***Modélisation et Simulation***  
***Numérique avec***  
***Modflow***

---

## Introduction

Un modèle d'écoulement souterrain est contrôlé par la configuration de la surface piézométrique et par la distribution de la perméabilité du milieu poreux. De plus, la surface piézométrique est fonction de la topographie et est contrôlée par le climat. Ainsi, le modèle d'écoulement est fonction de la topographie, du climat et de la géologie. Ces trois derniers paramètres représentent «the hydrogeologic environment». L'identification et la caractérisation des relations entre le réseau hydrographique et les eaux souterraines sont importantes. Les écoulements souterrains sont régis par la distribution des champs de perméabilité, de la porosité, du coefficient d'emmagasinement spécifique et des «conditions aux limites». Ces facteurs résultent de la transformation des paramètres climatiques, géomorphologiques et géologiques en paramètres hydrodynamiques. L'utilisation des modèles mathématiques dans la compréhension des écoulements souterrains est maintenant très courant [Ababou. R, 1993 ; Kimmeier. J, 2001].

### III.1. Objectif de la modélisation

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

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

### III.2. 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 [Esteves, 1988; Esteves et al., 1988; Tajjar et al., 1993; Tregarot et al., 1997].

#### III.2.1. Écoulement de surface

Les écoulements de surface sont régis par les équations de Saint-Venant [Ababou et al, 1993 ;Max et al., 1970, Roch et al, 1984].

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_l + q_n \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/S)}{\partial x} + gS \frac{\partial h}{\partial x} = g.S.(i - J) \end{cases} \quad (\text{III-1})$$

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

Avec :

Q : Le débit (m<sup>3</sup>/s) ;

S : La surface mouillée (m<sup>2</sup>) ;

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

i : La pente du lit de la rivière ;

$J = \frac{Q^2 n^2}{A^2 R^{4/3}}$  : La pente de la surface libre de l'eau dans la rivière ;

q<sub>l</sub> : débit de la contribution latérale par unité de la longueur du fleuve ;

q<sub>n</sub> : débit normal par mètre linéaire d'interface rivière nappe.

### III.2.2. Écoulement souterrain

L'écoulement dans un milieu poreux saturé est régi par l'équation de la diffusivité [McDonald et al, 1988], 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 :

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) = W + S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{III-2})$$

Avec:

$K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ ,  $K_{zz}$  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<sub>s</sub> : est le coefficient spécifique d'emménagement (l/s).

t : est le temps (s).

### III.3. Présentation du programme de modélisation

Le code *Modflow (version 3.0)* est un modèle numérique à trois dimensions. Il décrit les écoulements souterrains en milieu poreux anisotrope et hétérogène, en conditions de flux stationnaires ou transitoires, pour des aquifères selon l'équation de diffusivité (III-3) [McDonald et al, 1988]: Le logiciel utilisé pour la modélisation est le Visual MODFLOW (3.0), le plus complet, le plus facile à utiliser pour les applications pratiques dans l'écoulement des eaux souterraines et qui décrivent le transfert hydrique dans un milieu poreux saturé.

La diffusivité à trois dimensions dans un repère cartésien est donnée par l'équation (III-3) et la fonction niveau piézométrique  $h(x, y)$  est la solution :

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) = W + S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{III-3})$$

Où :

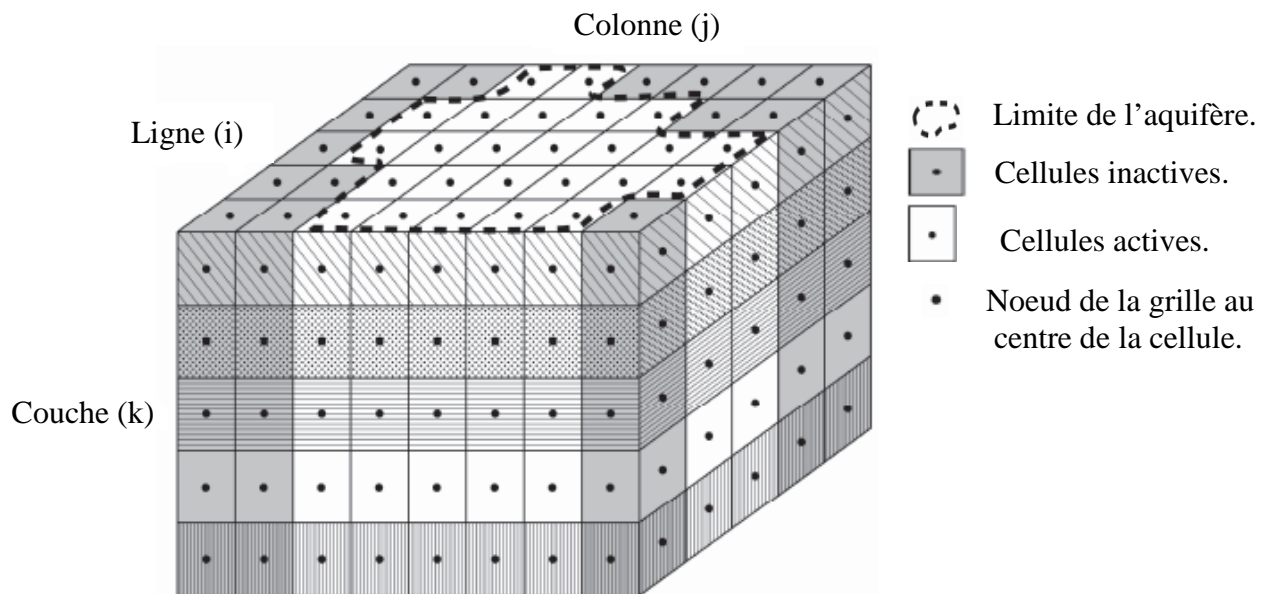
- $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ ,  $K_{zz}$  : sont les conductivités hydrauliques le long des axes, x, y et z en (m/s);
- h : est la charge hydraulique en (m) ;
- W : est le terme source ou perte par unité de volume en (l/s) ;
- S<sub>s</sub> : est le coefficient d'emménagement spécifique (l/s). En nappe libre, 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'emmagasinement 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 noeuds 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.

### III.4. Discrétisation spatiale

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 noeuds de la grille sont centrés sur les cellules dans lesquelles les propriétés du milieu sont considérées homogènes. L'équation de diffusivité est résolue aux noeuds de la grille par itérations successives jusqu'à ce que les changements de charge hydraulique convergent.



**Figure (III-1):** Discrétisation spatiale d'un aquifère [McDonald et al, 1988].

La Figure (III-2a) suivante montre une cellule  $i, j, k$  entourée par six autres cellules. L'équation de Darcy décrit le débit entrant dans la cellule  $i, j, k$  provenant de la cellule  $i, j-1, k$  (Figure III-2b):

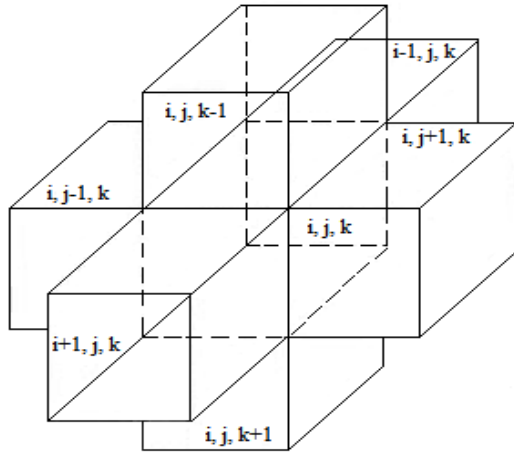


Figure (III-2a): Cellule  $i, j, k$  et les indices pour les six cellules adjacentes.

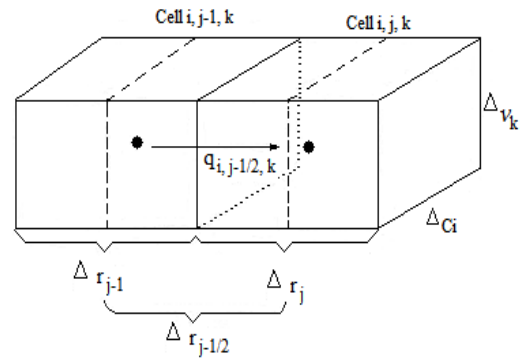


Figure (III-2b): Écoulement dans la cellule  $i, j, k$  provenant de la cellule  $i, j-1, k$ .

$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \times \Delta C_i \times \Delta v_k \frac{(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j-1/2}} \quad (III-4)$$

Où :

- $h_{i,j-1,k}$  et  $h_{i,j,k}$  : 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  $(i, j-1, k)$  [ $m^3/s$ ] ;
- $KR_{i,j-1/2,k}$  : Est la conductivité hydraulique entre les centres des cellules  $(i, j, k)$  et  $(i, j-1, k)$  [ $m/s$ ];
- $\Delta C_i \times \Delta v_k$  : Est la surface de la cellule, perpendiculaire sur la direction de l'écoulement [ $m^2$ ] ;
- $\Delta r_{j-1/2}$  : 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 :

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

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

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

Où :

- $CR$ ,  $CC$  et  $CV$  : Représentent les conductances ( $m^2/s$ ) ;
- $P$  : Est la somme des sources dépendantes de la charge ( $m^2/s$ ) ;
- $Q$  est la somme des sources indépendantes de la charge ( $m^3/s$ ) ;
- $h$  : Est la charge (m) ;
- $SS$  : Est le coefficient d'emmagasinement spécifique (1/m).

En écrivant l'équation (III-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.

### III.5. Discrétisation dans le temps [Saltel. M, 2008]

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 period) 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 recommandé. 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.

### III.6. 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 :

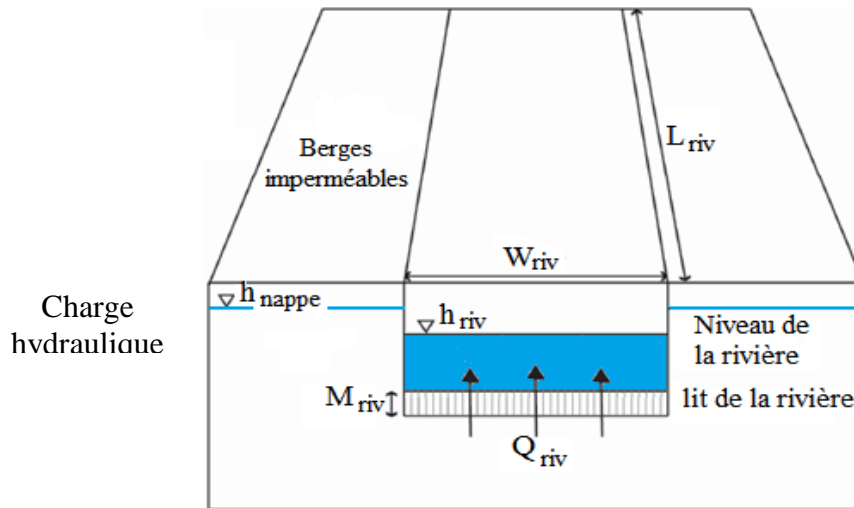
#### III.6.1. Fonction de recharge

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).

#### III.6.2. Fonction rivière (*River*)

Cette fonction simule l'interaction entre les eaux souterraines et les eaux de surface (rivières, lacs, marais, etc.) par l'intermédiaire d'un niveau d'infiltration séparant la rivière du système souterrain voire Figure (III-3) [McDonald et al, 1988]. Le code *Modflow* calcule la conductance

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



**Figure (III-3):** Schéma de la condition-limite « Rivière » [McDonald et al, 1988].

$$C_{riv} = \frac{(K_{riv} \times L_{riv} \times W_{riv})}{M_{riv}} \quad (III-7)$$

Avec :

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

$$Q_{riv} = C_{riv} \times (h_{nappe} - h_{riv}) \quad (III-8)$$

Avec :

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

### III.6.3. Charge initiale

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

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

### III.7. 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.

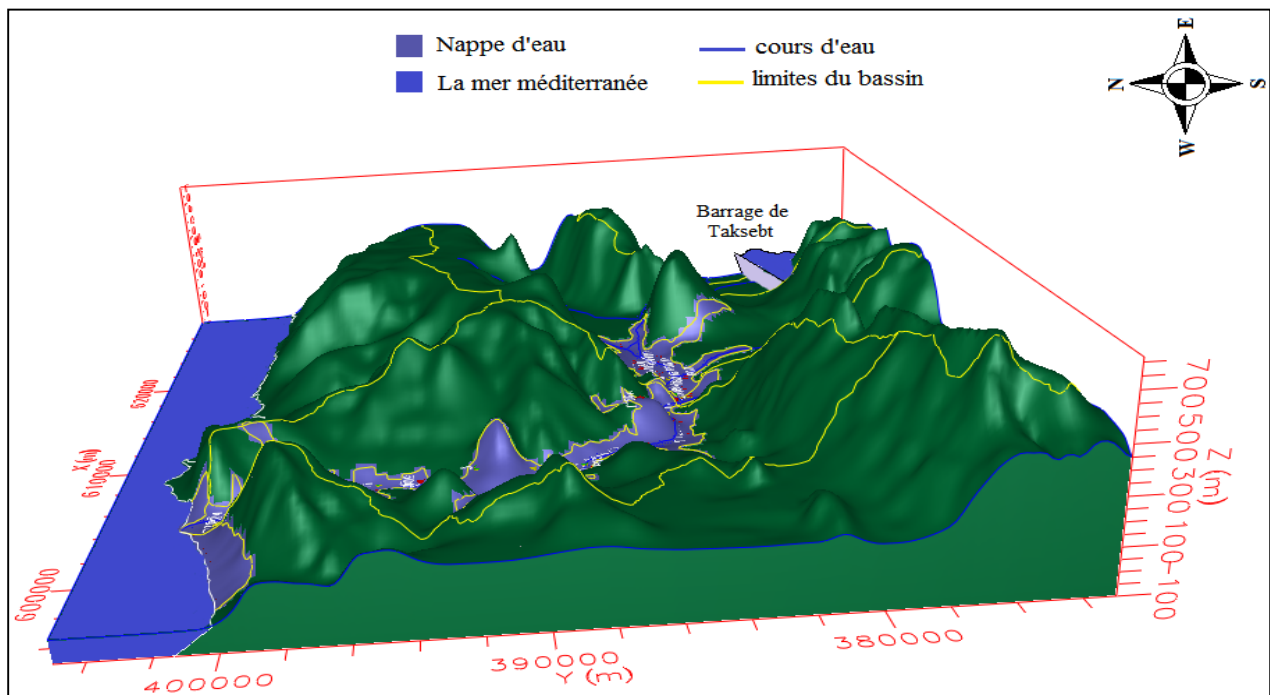
### III.8. Construction et Calibration du modèle

#### III.8.1. Discrétisation du domaine à modélisée

La première tâche a été de délimiter la zone à modéliser. La nappe du bas du Sébaou est considérée comme une unique couche d'alluvions subdivisée en maille carrée de 200 m de côté.

- Le toit de la nappe, niveau supérieur du modèle, correspond à la topographie. Il est défini à partir de la carte topographique.
- L'épaisseur de l'aquifère varie dans le modèle. Il est déduit de la topographie d'après les cartes topographiques et des relevés de terrain aux forages situés le long de la vallée alluviale.

La figure suivante montre la topographie et la géométrie de la région d'étude :



**Figure (III-4):** Topographie et géométrie de la nappe du Bas de Sébaou.



### III.8.2. Les conditions aux limites

Les limites du modèle peuvent être physiques ou hydrauliques [Barone. V. C, 2000]. 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. Par conséquent, les frontières choisies pour le modèle de Sébaou correspondent aux limites physiques réelles du domaine étudié. Toutes les cellules de la grille se situant au-delà de ces limites ont été désactivées.

- **Limite Nord** : Cette limite est constituée par la mer (exutoire naturel). La charge est égale à zéro. Cette limite est formée par mailles.
- **Limite Ouest et Est** : Les affleurements bordant aussi bien la rive droite que ceux de la rive gauche de la nappe alluviale du Sébaou, sont considérés comme limite à flux nul. Il s'agit pratiquement de formations géologiques peu perméables à imperméables.
- **Limite sud** : Est considéré comme limite à flux nul, sauf sur la partie où l'Oued Sébaou est traversé. Ce cours d'eau est modélisé comme une charge imposée, dont les valeurs sont connues en amont et en aval. Modflow suppose que la variation de charge entre ces deux points est linéaire.

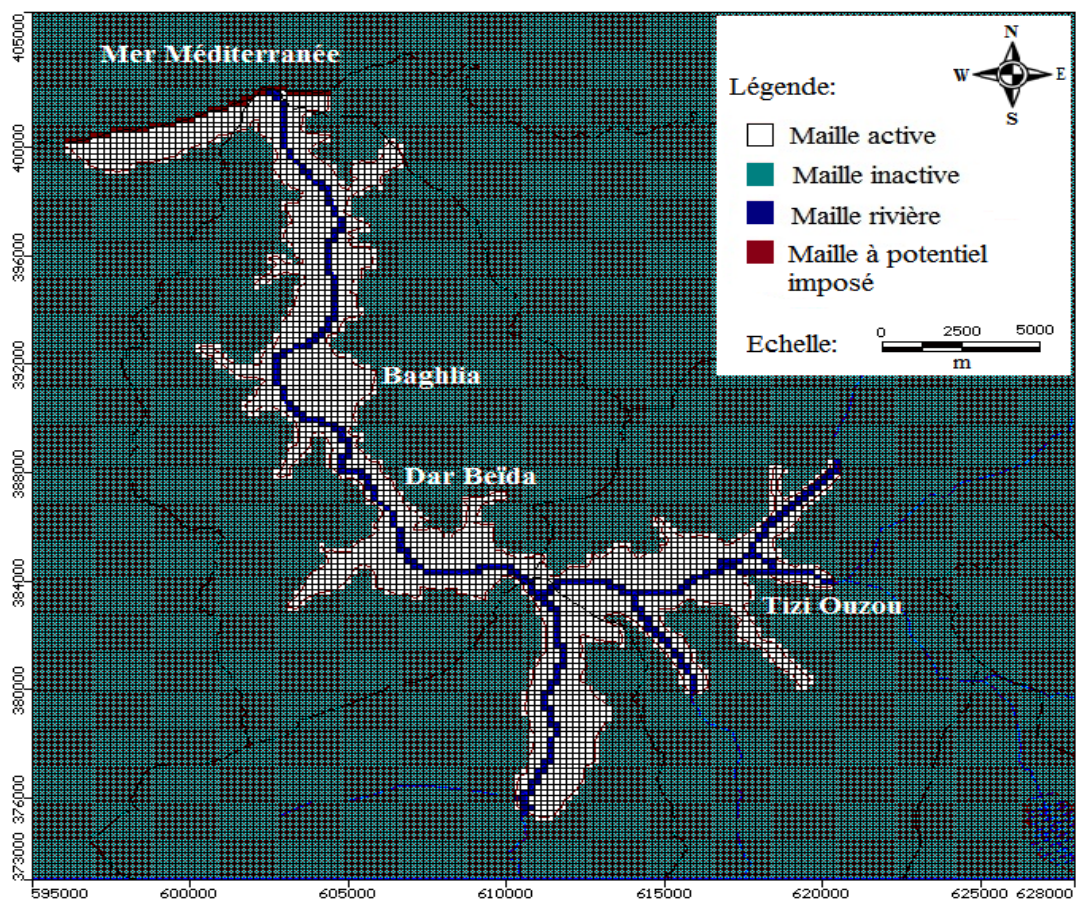


Figure (III-5) : Maillage de la carte, avec les conditions aux limites sont définies.

### ➤ Le fond de la nappe

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

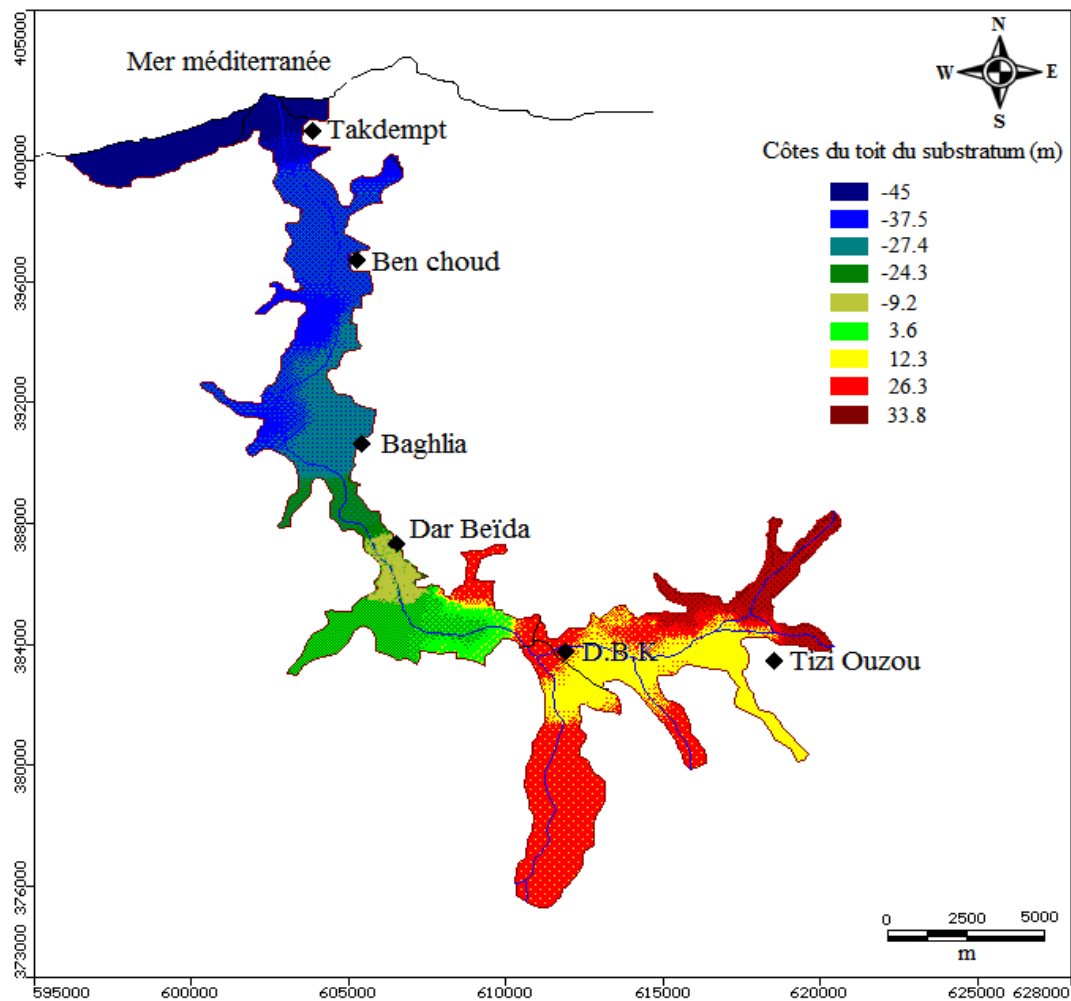


Figure (III-6) : Carte de répartition du Substratum de la nappe.

### III.8.3. Introduction des Caractéristiques hydrogéologiques dans le modèle

L'aquifère de Sébaou est considéré comme un milieu isotrope, au sein d'une maille de calcul, les paramètres hydrodynamiques sont identiques dans toutes les directions de l'espace ( $K_x = K_y = K_z$ ). Les valeurs des paramètres hydrogéologiques introduites dans le modèle sont la perméabilité et le coefficient d'emmagasinement. Modflow exige une distribution spatiale de ces paramètres. Les valeurs doivent être introduites pour chaque maille, mais à défaut des données disponibles ces valeurs sont introduites par zones pour toute l'étendue de la couche modélisée, ces paramètres seront calibrés au cours de l'établissement du modèle. La perméabilité (K), est l'un des paramètres hydrogéologiques nécessaire au modèle hydraulique, cette donnée est obtenue à partir des essais de pompage sous forme de transmissivité (T) (**Voire la partie essais de pompage**). K et T sont des propriétés de mesure de la capacité d'un aquifère à conduire l'eau. Par la suite la distribution a été modifiée au cours du calage du modèle.

### III.8.4. 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.

### III.8.5. Les puits de pompage et les forages d'observations

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

Les prélèvements introduits pour le régime permanent sont ceux recueillis de l'inventaire de l'ANRH de Tizi Ouzou (2000/2001). La nappe du Sébaou compte environs 45 forages productifs, répartis le long de la vallée alluviale. Les débits de captage sont très variables dans le temps et dans l'espace, certains puits sont exploités a 300 l/s d'autres forages produisent environs 50 l/s. Le débit global de captage relatif à la nappe du bas et moyen Sébaou est au voisinage de 299 l/s avec un maximum de 359 l/s soit 11,22 Mm<sup>3</sup>/an.

Pour le régime transitoire, les prélèvements sont introduits pour chaque pas de temps pour la période (2000-2006). Les services de l'ADE des deux willayas Boumerdès et Tizi Ouzou ont mis à notre disposition une liste des points de prélèvement pour les différents usages soit l'AEP où l'irrigation. Néanmoins ces données sont incomplètes, d'un autre côté certains problèmes sont rencontrés en ce qui concerne la correspondance des points recueillis des documents anciens et des documents récents.

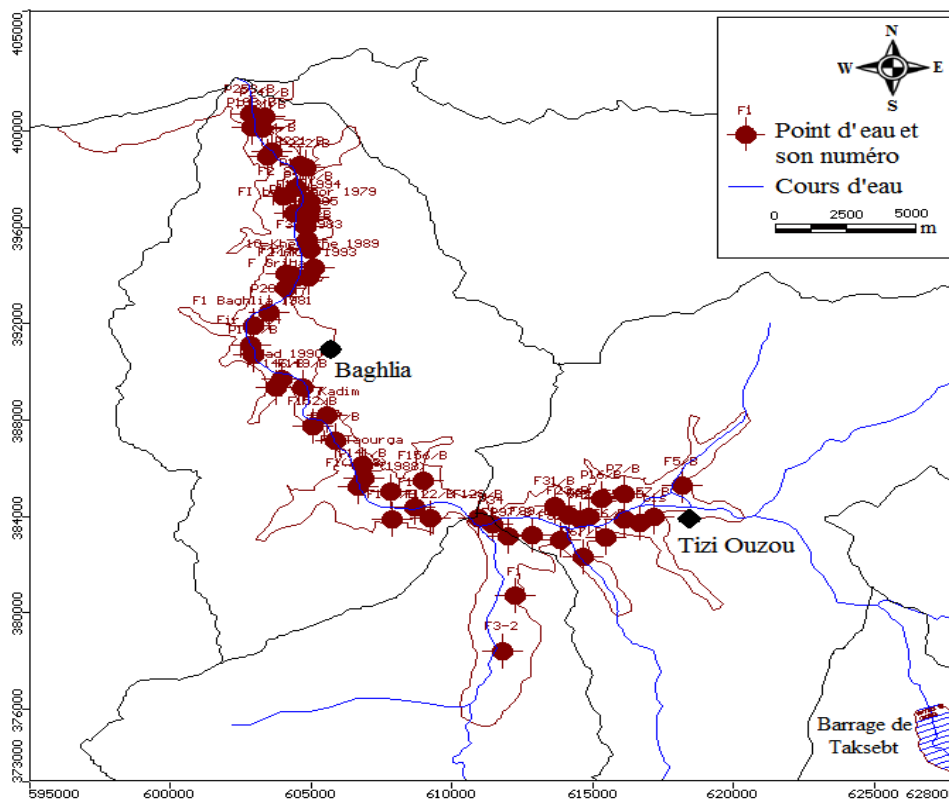


Figure (III- 7): La localisation des points d'eau le long de la vallée de Sébaou.

### **III.8.6. Simulation en régime permanent**

Après avoir introduit toutes les données nécessaires dans le modèle. Une phase de simulation en régime permanent a été réalisée à partir des données (prélèvements, recharge, charges initiales et les points d'observation) de l'année 2000, période pour laquelle le plus grand nombre d'informations était disponible. Cette première étape de modélisation a plusieurs objectifs:

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

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

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

Après avoir tourné le modèle en régime permanent, les cartes piézométriques obtenues sont présentées sur les figures (III-8) et (III-9).

La carte piézométrique obtenue par Modflow est similaire à la carte de base mesurée sur le terrain. L'écoulement est en général de direction Nord, l'eau provient de la zone des montagnes de Djurdjura s'écoule vers le Nord, converge vers la zone du bas de Sébaou (l'embouchure du cours d'eau vers la mer méditerranée).

III.8.6.1. Cartes piézométriques restituées

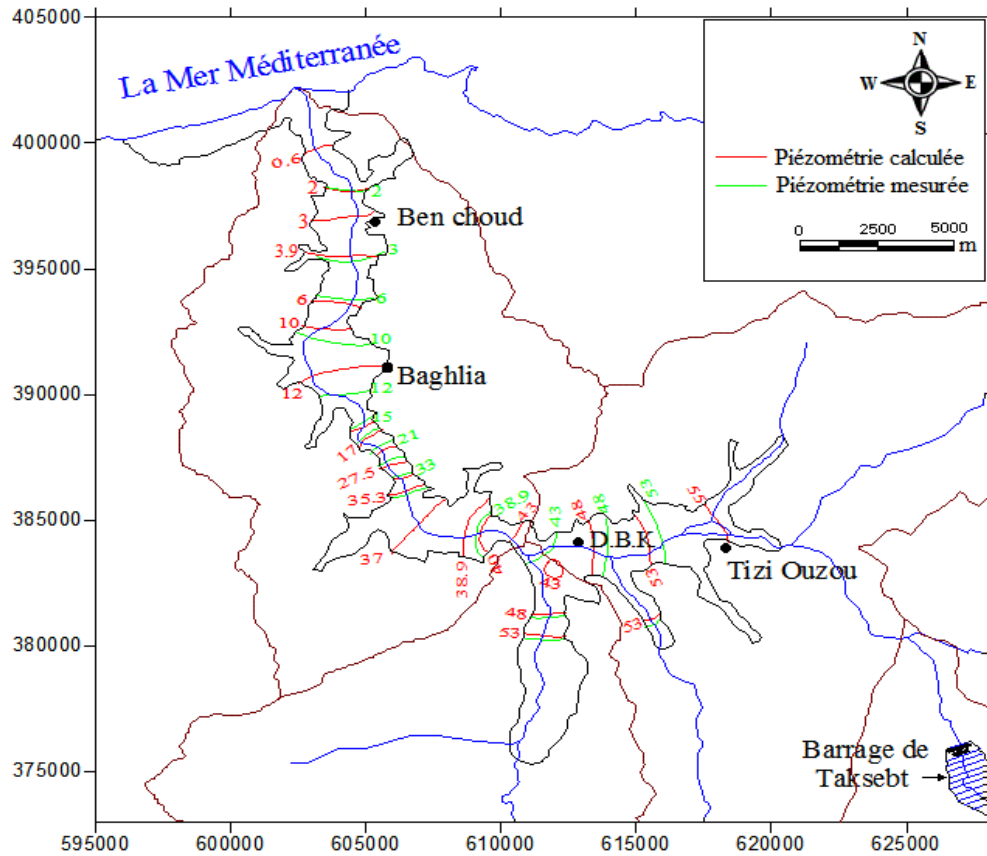


Figure (III-8) : Carte piézométrique simulée en mars 2000 en régime permanent.

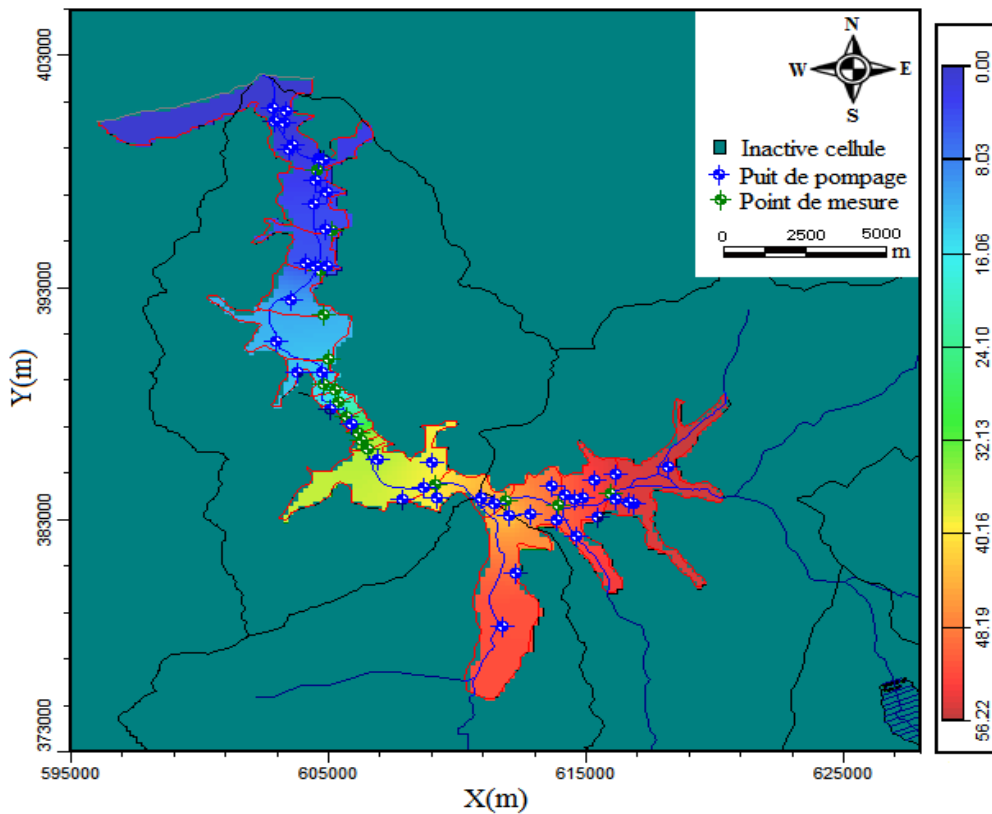


Figure (III-9) : Répartition spatiale de la piézométrie en mars 2000 en régime permanent.



Cette modélisation en régime permanent nous a permis de déterminer les conductivités hydrauliques. Elle conduit également à ajuster les paramètres de la fonction rivière utilisée. Enfin, cette étape suppose également de déterminer le flux d'entrée imposé à la couche de schiste sain à l'amont.

On peut également représenter les vitesses et le sens de l'écoulement souterrain sur la figure ci-après :

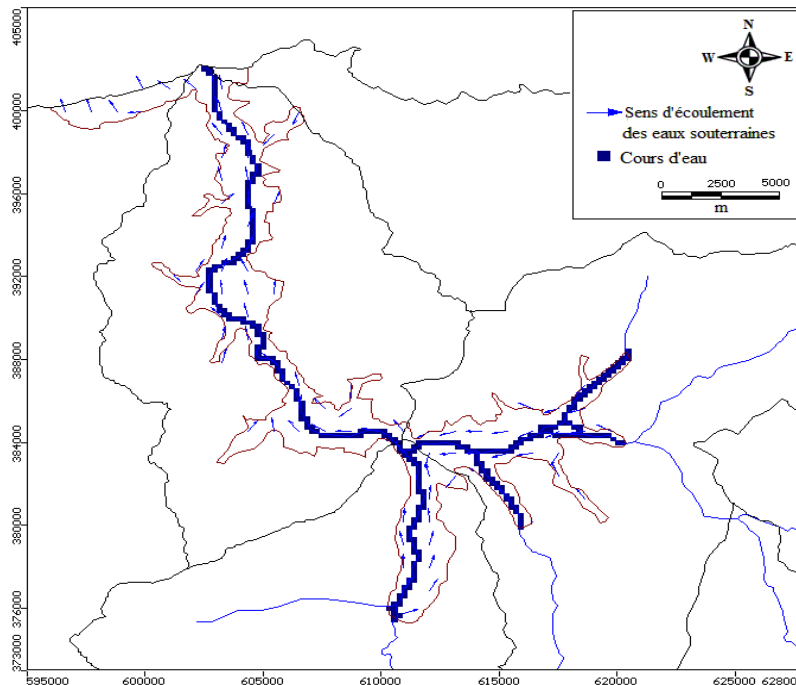


Figure (III-10): La direction de l'écoulement souterrain.

### III.8.6.2. Calage du modèle permanent

L'étape de calage des paramètres du modèle consiste à ajuster les valeurs de certains paramètres, en général ceux connus avec le moins de précision, en essayant de reproduire le plus fidèlement possible le comportement du système hydrogéologique réel par la simulation.

Le calage du modèle a été effectué « manuellement » par la méthode des essais – erreurs en changeant les paramètres de calage jusqu'à ce que les différences entre les valeurs simulées et mesurées soient suffisamment faibles.

Pour la piézométrie, les données initiales étaient basées sur les données de l'année (2000), des valeurs simulées à  $\pm 2.5$  m des niveaux initiaux ont été considérées acceptables vu qu'on ne dispose pas assez de données de terrain.

La comparaison entre la piézométrie observée et la piézométrie calculée est également interprétée par les 16 points d'observations « figure (III-11) »  
Le résultat montre que les points sont alignés le long d'une droite de regression linéaire.

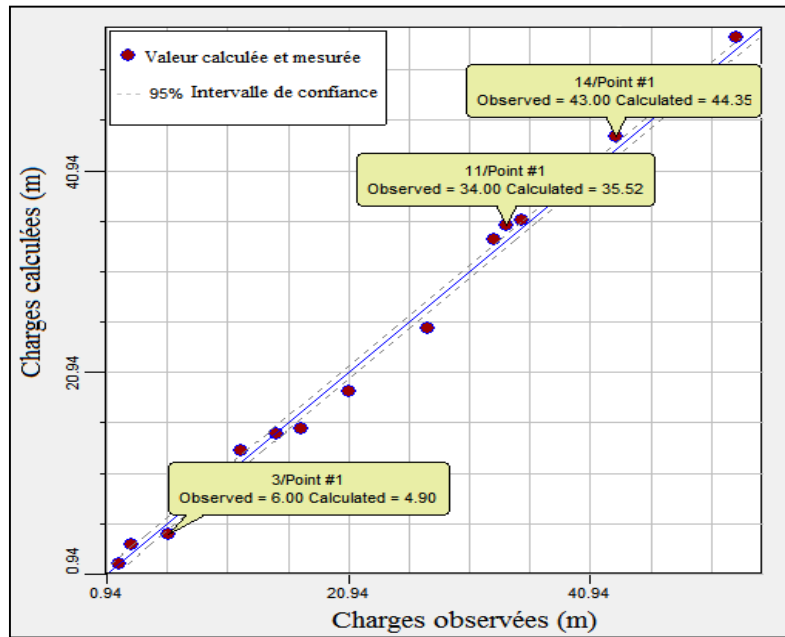


Figure (III-11): Calibration en régime permanent.

Les valeurs de perméabilités, se répartissent en plusieurs zones, les valeurs varient de  $10^{-4}$  à  $9.10^{-2}$  m/s. Notons que parfois, on est amené à utiliser des conductivités hydrauliques plus importantes que celles mesurées à une échelle très locale. De façon générale, ces valeurs correspondent en moyenne aux valeurs des essais de pompages.

Ces valeurs de la perméabilité obtenues après le calage final du modèle en régime permanent et sa distribution spatiale sont présentées dans la figure suivante:

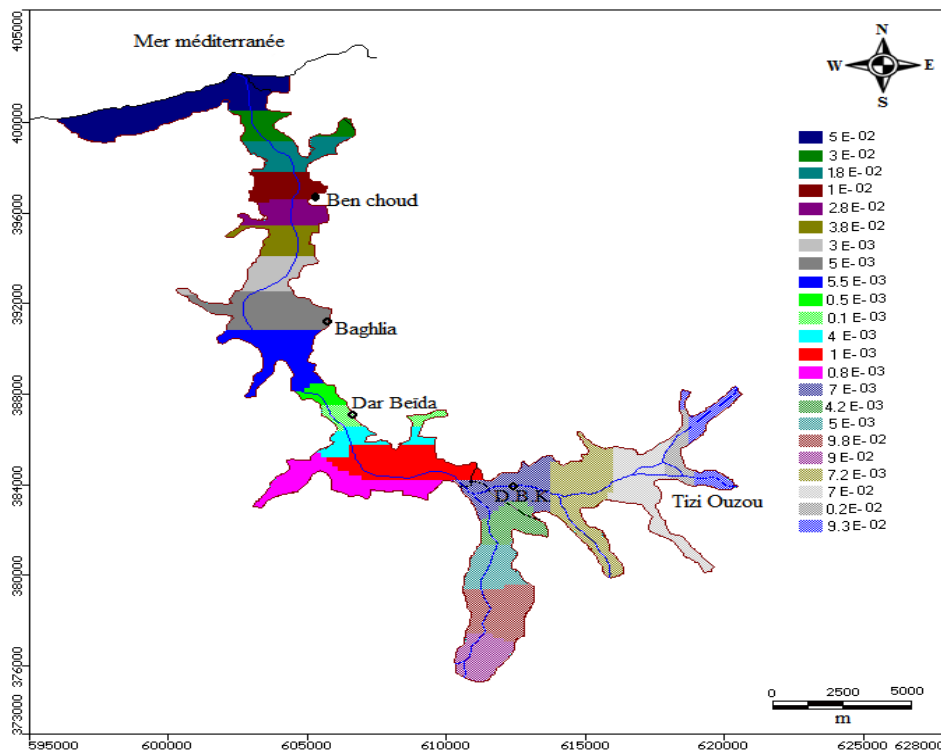


Figure (III-12): Distribution spatiale de la perméabilité après calage du modèle.

### III.8.6.3. Évaluation de la qualité du calage

La précision de la modélisation et la qualité du calage sont estimées à partir d'une fonction critère (F) élaborée à partir de tous les points d'observation. Ce paramètre, exprimé en pourcentages est défini comme suit :

$$F = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i^2}}{(X_{obs})_{\max} - (X_{obs})_{\min}} \quad \text{(III-9)}$$

Et

$$R_i = X_{cal} - X_{obs} \quad \text{(III-10)}$$

Avec :

- $R_i$  : différence entre le résultat calculé et l'observation au point donné noté de  $i$  à  $n$  ;
- $n$  : nombre de points d'observation ;
- $X_{cal}$  : valeur simulée ;
- $X_{obs}$  : valeur observée.

- Le calibrage résiduel est défini par la différence entre les résultats calculés et les résultats observés on peut le calculer à travers cette équation:

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{cal} - X_{obs})_i \quad \text{(III-11)}$$

- Le résiduel moyen est une mesure de l'erreur moyenne et il est défini par l'équation :

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \quad \text{(III-12)}$$

- La valeur absolue du résiduel moyen est définie par l'équation:

$$|\bar{R}| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |R_i| \quad \text{(III-13)}$$

Les valeurs statistiques des erreurs résultant de la simulation du niveau piézométrique sont représentées dans le tableau suivant

**Tableau (III-1):** Valeurs statistiques des erreurs du niveau piézométrique.

Nombre de points	16	Erreur standart de l'estimation	0.32597
Résiduel maximal (m)	-2.22515	Racine carrée moyenne	1.29479
Résiduel minimal (m)	-0.01463	Racine carrée moyenne normale RMS (%)	2.53881
Résiduel moyen (m)	0.28745		
Résiduel moyen absolu (m)	1.1605		

L'analyse des résultats des paramètres de calage traduisent un résultat satisfaisant à l'échelle de la modélisation.



III.8.6.4. Bilan hydrique du modèle permanent

D'un autre côté on peut voir les résultats du bilan hydrique à partir de la figure suivante :

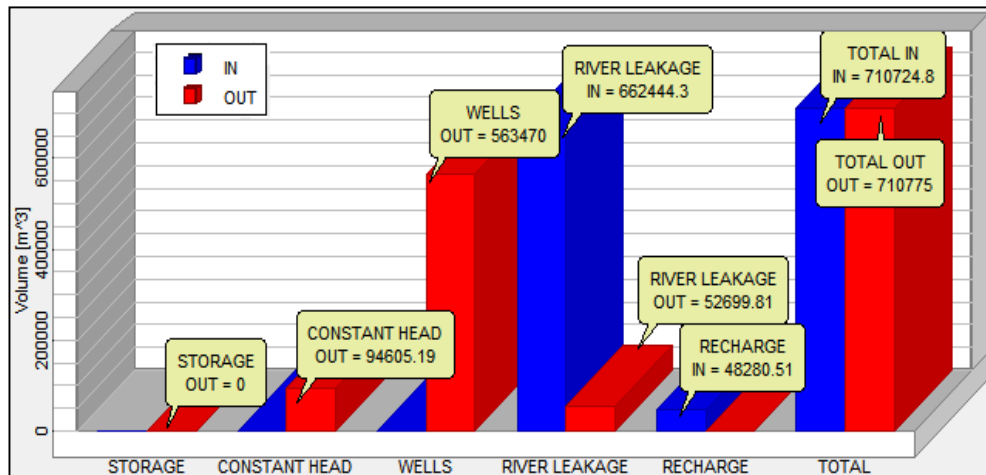


Figure (III-13): Bilan hydrique de la zone modélisée en régime permanent.

Les résultats du bilan total sont reportés dans le tableau suivant

Tableau (III-2) : Bilan total de la zone du modèle permanent

Apports (m³/j)		Exhaures (m³/j)	
Précipitation	48280.51	Points d'eau	563470.0
Oueds	662444.3	Oueds	52699.81
Exutoire	0.00	Exutoire	94605.19
<b>Total</b>	<b>710724.8</b>	<b>Total</b>	<b>710775.0</b>

L'équilibre est obtenu pour la nappe alluviale du haut Sébaou, avec un débit approximatif de 710775.0 m³/jour soit 8.22 m³/s.

Les résultats de simulation en régime permanent aboutissent à un équilibre des entrées et des sorties totales de la zone modélisée avec un débit de 710775.0 m³/jour soit 8.22 m³/s.



### III.8.7.1. Calage du modèle transitoire

Un calage en régime transitoire où la réponse du modèle aux changements de la recharge et des prélèvements pour la période (2000-2006) a été simulée et comparée au comportement observé de l'aquifère.

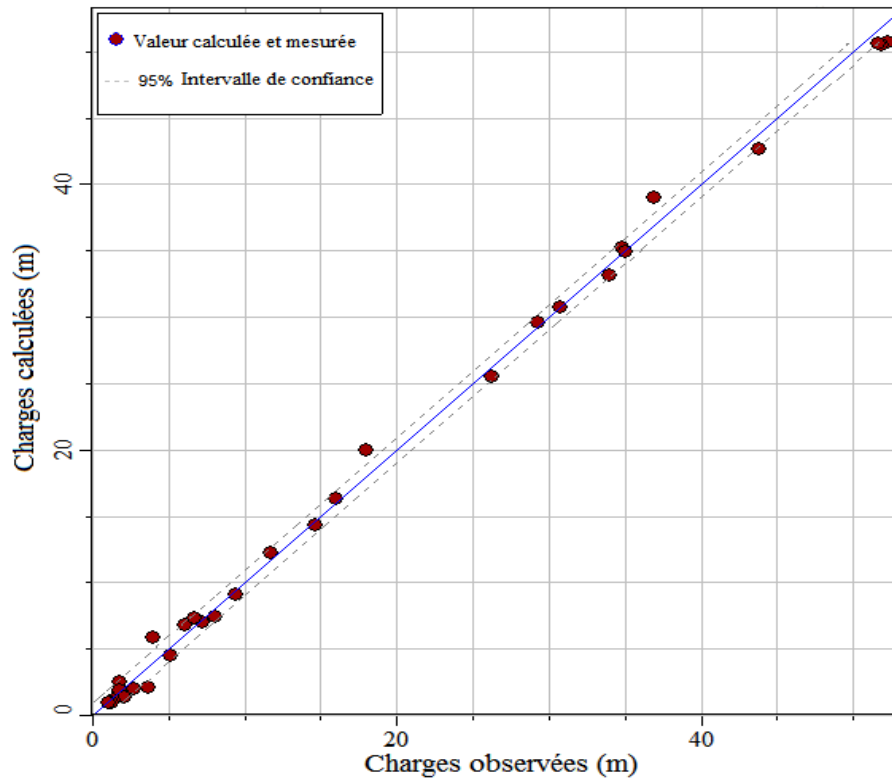


Figure (III-15): Calibration du modèle en régime transitoire.

### III.8.7.2. Comparaison de des résultats calculés avec celles mesurés sur terrain

Après la simulations en régime transitoire. On a passé à la comparaison entre les chroniques calculées et mesurées. Le graphe suivant montre bien cette comparaison:

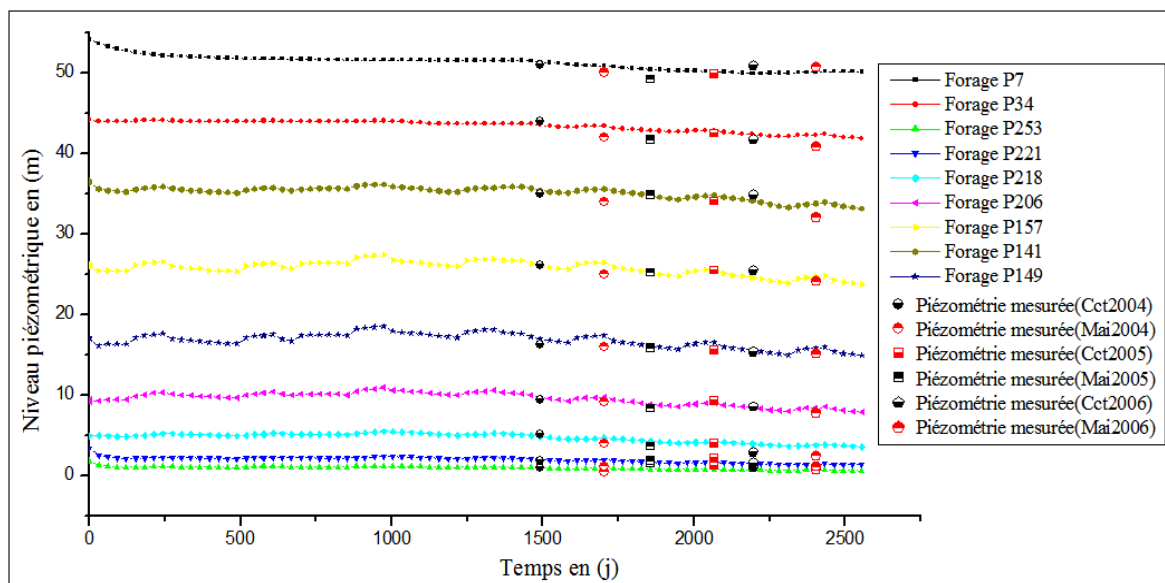


Figure (III-16): Chroniques piézométriques mesurées et calculées.

Il existe peu de piézomètres captant la nappe du sébaou. Néanmoins, les chroniques d'observation à disposition permettent de caractériser le comportement de cette nappe et de valider la simulation (Figure III-16).

Les chroniques sont caractérisées par leur stabilité dans le temps. D'une manière générale, les valeurs simulées restent proches des observations. A noter cependant une légère surestimation de la hauteur piézométrique pour quelques points.

### III.8.8. Quelques scénarios de simulation

#### III.8.8.1. La surexploitation de la nappe

Nous avons simulé un scénario d'exploitation en accroissant notablement de trois fois le débit des captages (Qx3). La variation des  $\Delta H$  dans le temps montre une baisse considérable du niveau de la nappe.

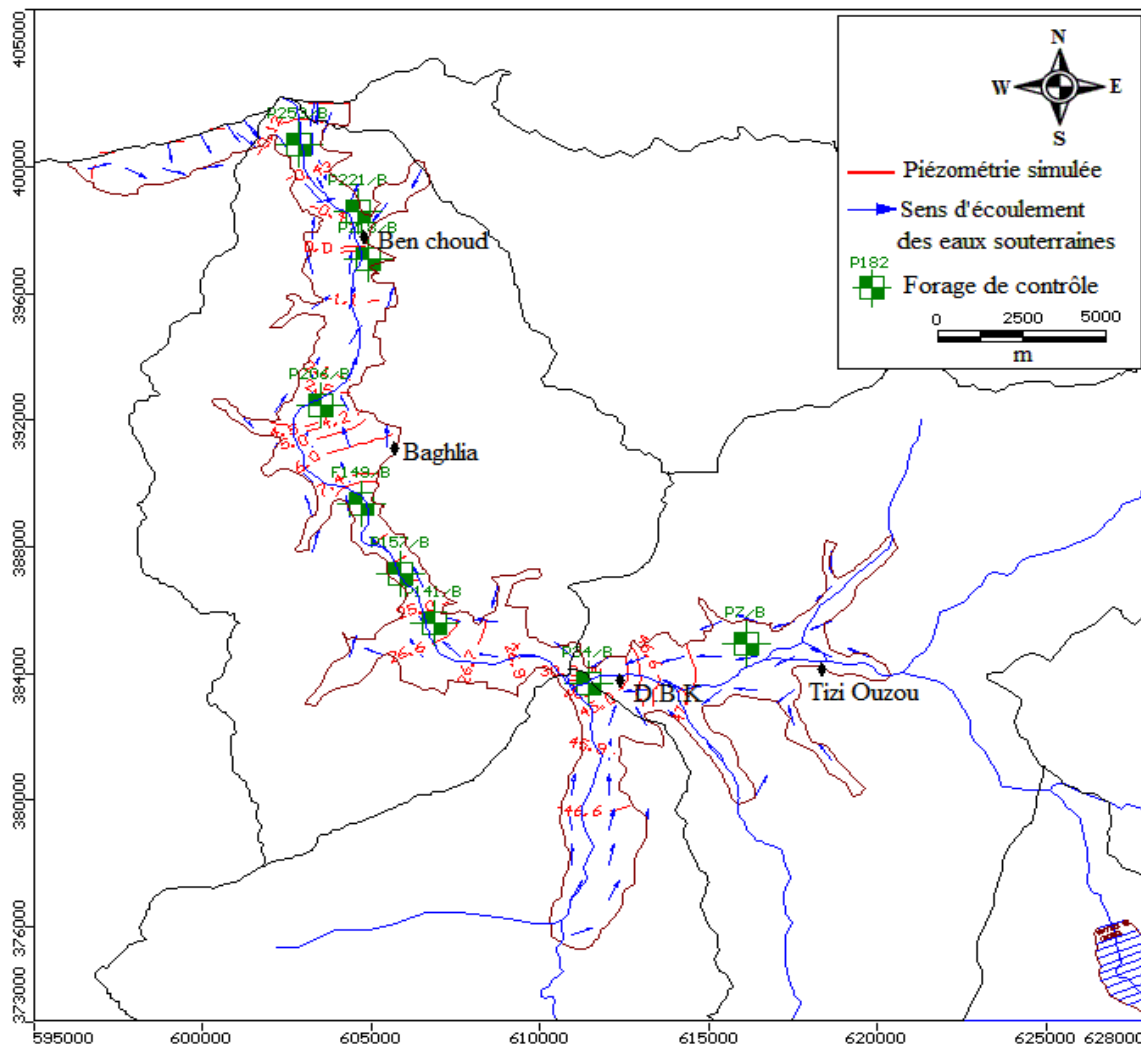


Figure (III-17): Carte piézométrique simulée de la nappe de Sébaou en 2014.

La figure (III-17), montre précisément qu'après 14 ans d'exploitation intense, le sens d'écoulement des eaux souterraines, s'est inversé à l'embouchure. Nous percevons un appel d'eau de mer vers la nappe, qui atteint la région de Ben Choud.

Toutefois il est important de remarquer que les chroniques piézométriques mesurées semblent être fortement influencées. C'est notamment le cas pour le forage P34, localisé en à la région de D.B.K et le forage P253 marqué par une formation d'un cône de dépression à l'aval du bas de Sébaou.

Et pour mieux visualiser les résultats du scénario (I), on représente en quelques points de contrôles la variation de la piézométrie de la nappe de Sébaou au cours de la période de simulation (Figure (III-18)):

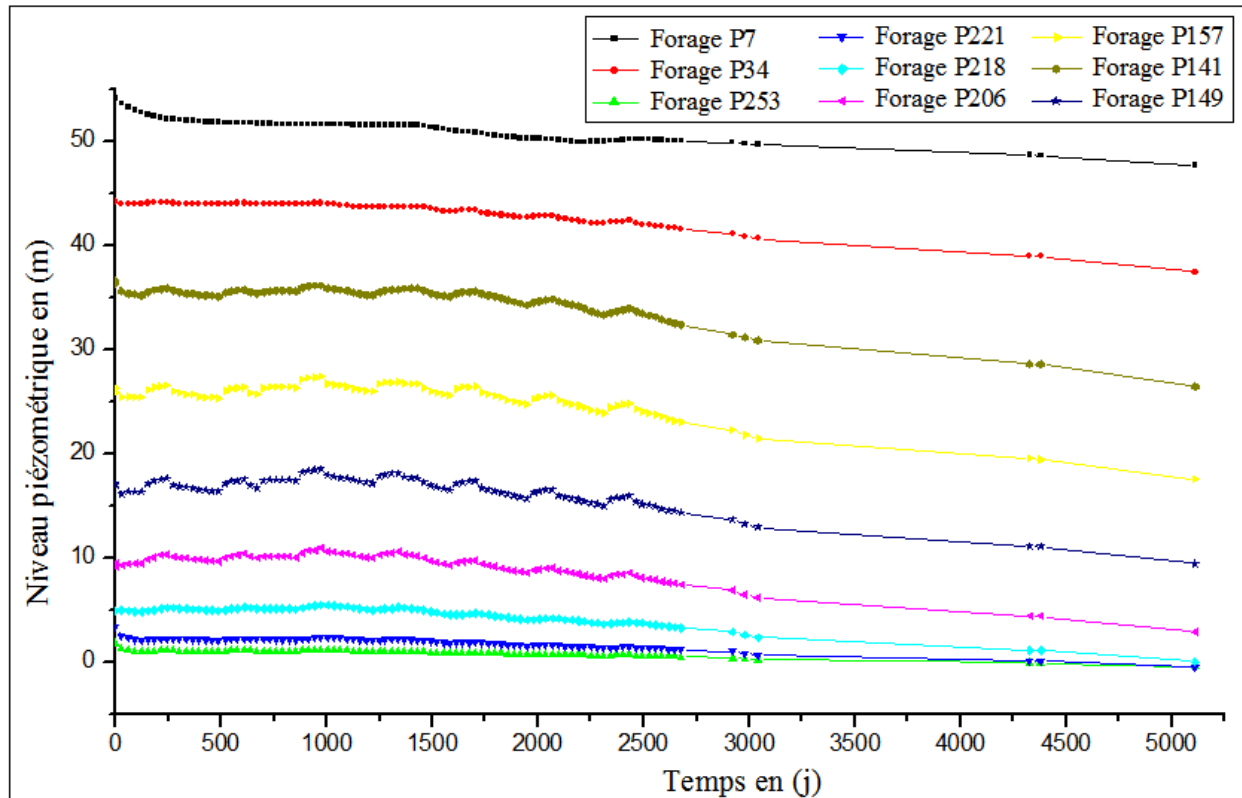


Figure (III-18): Niveaux piézométriques simulés pour la période 2000/2014.

Il convient de ce fait, de limiter les prélèvements dans le secteur aval de la nappe et d'éviter toute implantation d'ouvrage de pompage à l'embouchure de l'oued Sébaou pour éviter le phénomène de l'intrusion marine.

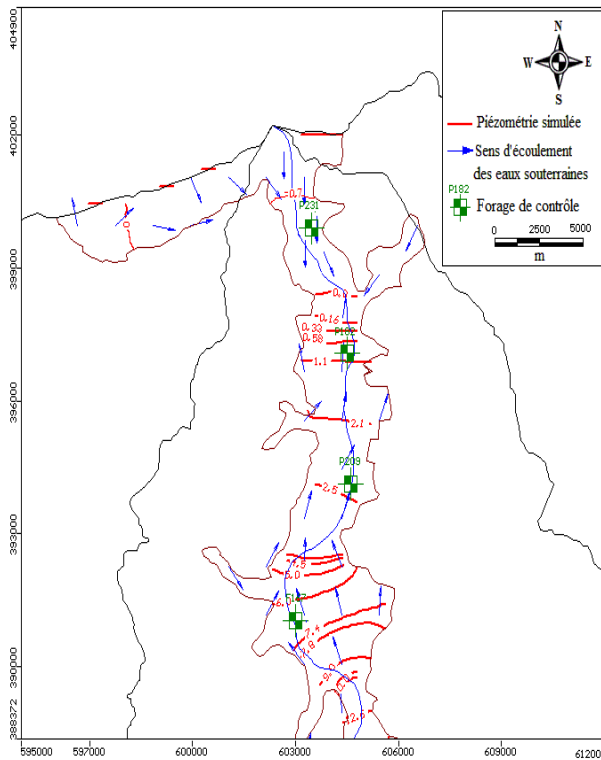
### III.8.8.2. Simulation de la réponse de la nappe à la recharge artificielle

#### A- Injection de l'eau au niveau des forages

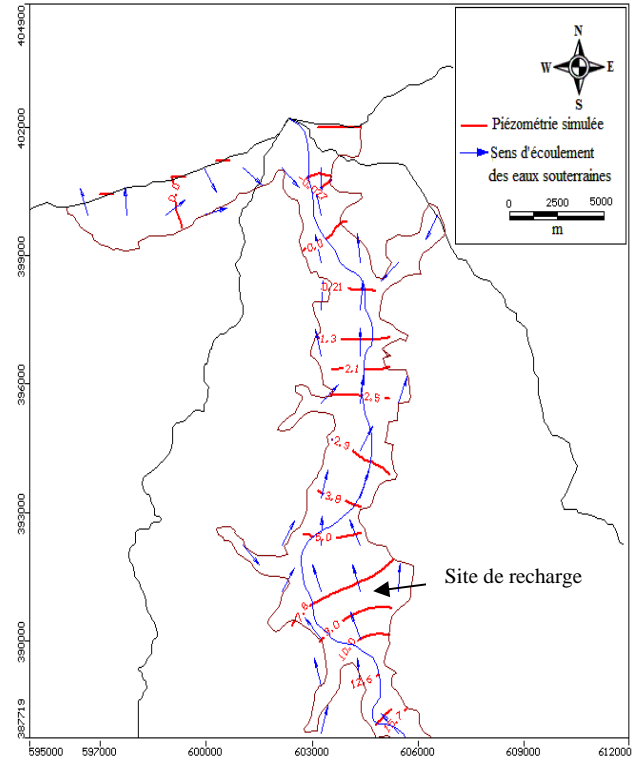
Dans le modèle actuel, un scénario pronostique peut être établi, il permet de suivre l'évolution du niveau piézométrique de la nappe alluviale après l'introduction d'un débit connu dans le site de la recharge artificielle.

On a supposé 4 forages d'injection installés sur la rive du cours d'eau de Sébaou. Et on a varié le débit de l'injection pour différents cas de simulation dans le but de prévoir la réponse de la nappe à cette recharge artificielle.

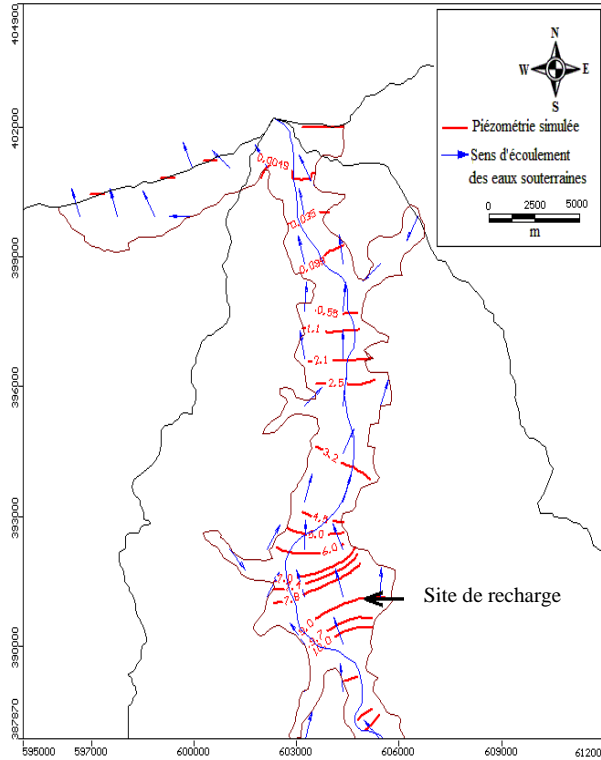
La comparaison entre la piézométrie avant et après la recharge est présentée dans les figures suivantes:



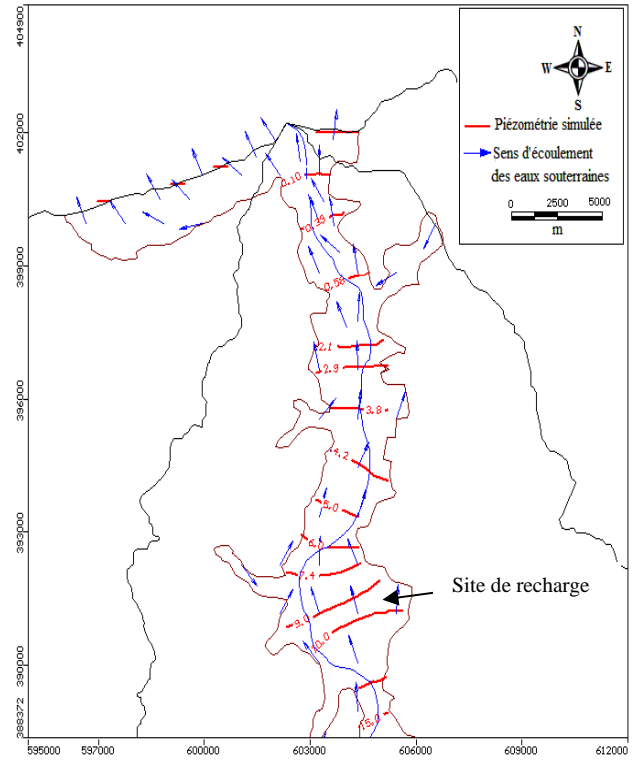
(a) : Piézométrie avant recharge.



(b): Après recharge ( $Q=2000\text{m}^3/\text{j}$ ).



(c) : Après recharge ( $Q=3000\text{m}^3/\text{j}$ ).



(d): Après recharge ( $Q=4000\text{m}^3/\text{j}$ ).

Figure (III- 19): Réponse de la nappe à la recharge artificielle avec différents débits.

Les charges calculées, avec ou sans injection, ont été comparées aux différents piézomètres de contrôle afin de rendre compte de l'influence de la recharge artificielle sur le milieu, les graphiques représentés sur les figures ci- après montrent une influence évidente de la recharge artificielle sur l'évolution des niveaux de la nappe :

- Au forage F 167 l'augmentation du niveau est de 3.5 m et cette augmentation se diminue au fur et à mesure dans les forages P209 et F 177.
- Au forage F222 les deux courbes sont confondues car l'influence de la recharge n'atteint pas les zones éloignées pour le premier débit injecté ( $2000\text{m}^3/\text{j}$ ).
- Dans l'embouchure du Oued le sens de l'écoulement est renversé, cela évite la formation du biseau marin dans le cas où le débit injecté est de  $3000\text{m}^3/\text{j}$

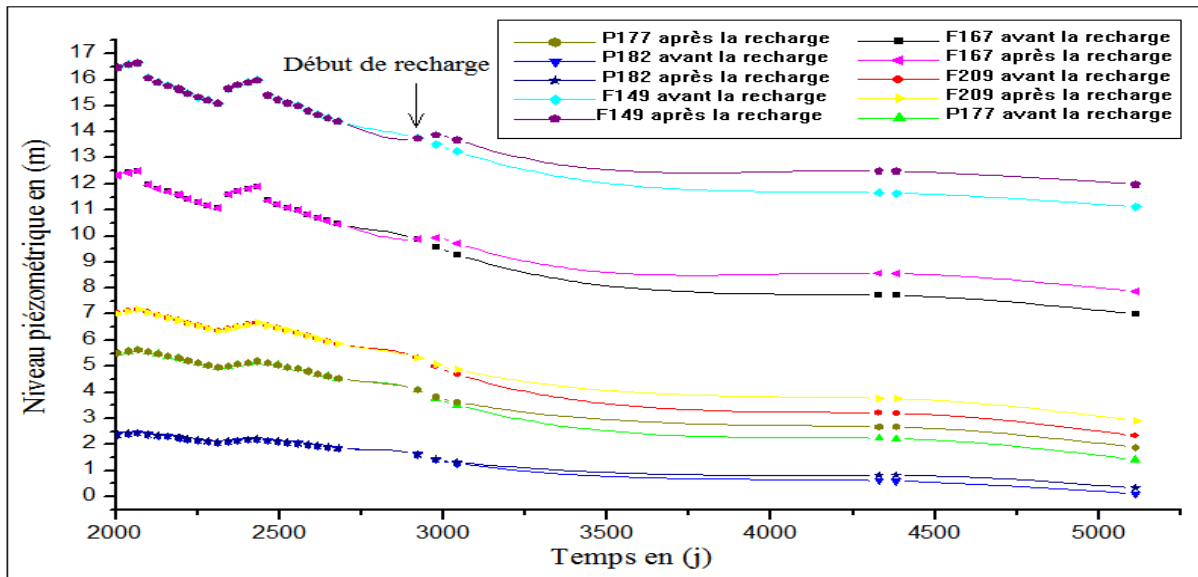


Figure (III-20): Recharge avec  $Q=2000\text{m}^3/\text{j}$ .

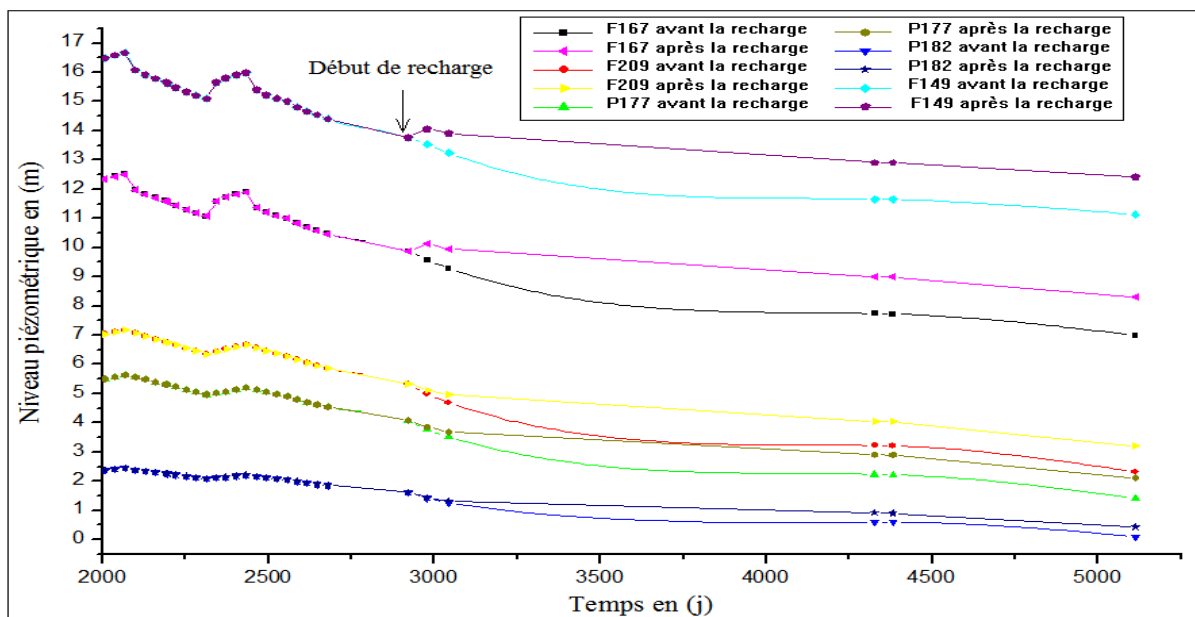


Figure (III-21): Recharge avec  $Q=3000\text{m}^3/\text{j}$ .

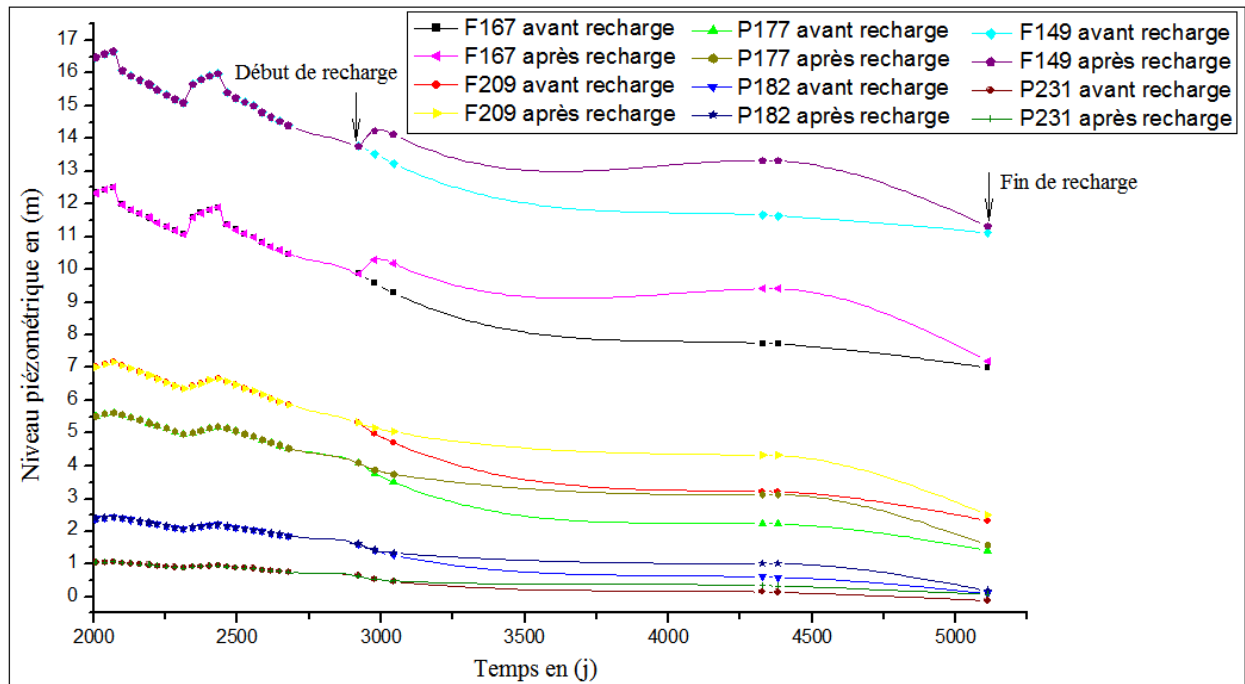


Figure (III-22): Recharge par injection avec un débit ( $Q=4000 \text{ m}^3/\text{j}$ ).

**B- Recharge avec un débit  $Q=4000 \text{ m}^3/\text{j}$  pendant 4 mois de l'année**

Dans cette simulation, on propose une recharge discontinue avec un débit de  $Q=4000 \text{ m}^3/\text{j}$  pendant les 4 premiers mois de chaque année (la période la plus pluvieuse de l'année) et les résultats de simulation sont portés sur le graphe de la figure suivante :

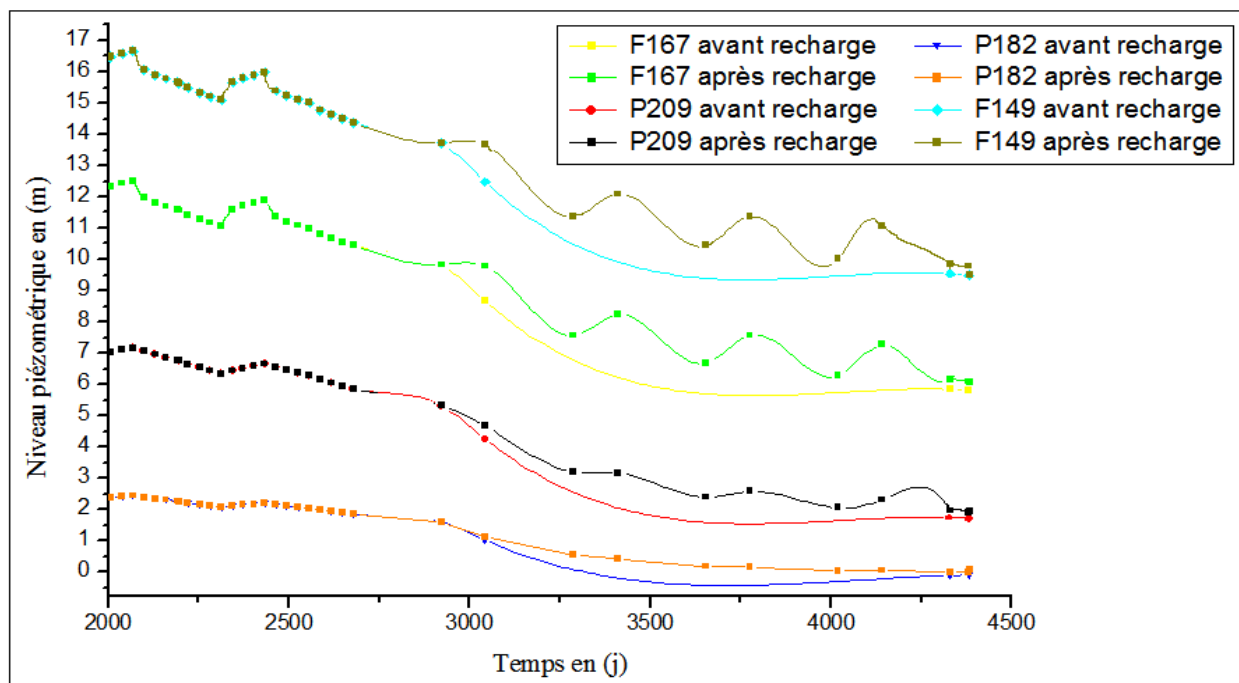


Figure (III-23): Recharge par injection avec un débit ( $Q=5000 \text{ m}^3/\text{j}$ ) 4 fois dans l'année.



L'analyse de ces résultats montre une augmentation considérable du niveau de la nappe dans les différents points de contrôle à savoir l'espacement entre le lieu de recharge et le point lui-même

La simulation de la recharge artificielle sur une période donnée montre que les effets sur la nappe alluviale s'étalent sur une distance plus de 6km environ en effet le niveau de la nappe a augmenté au niveau de la zone de l'injection qui s'étend progressivement en direction Nord le long de l'oued Sébaou.

Les débits injectés dans la nappe aux différents scénarios sont arbitraires car en réalité l'infiltration varie selon les propres caractéristiques du milieu naturel, et qu'une croissance régulière du volume infiltré sera observée aux premiers jours de l'injection. A partir de là les capacités d'absorption du milieu diminuent en raison du colmatage vraisemblablement.

### C- Lâchée d'eau à partir du barrage de Taksebt

Pour cette simulation, on a varié la hauteur d'eau dans le cours d'eau de Oued Aissi et sa conductance.

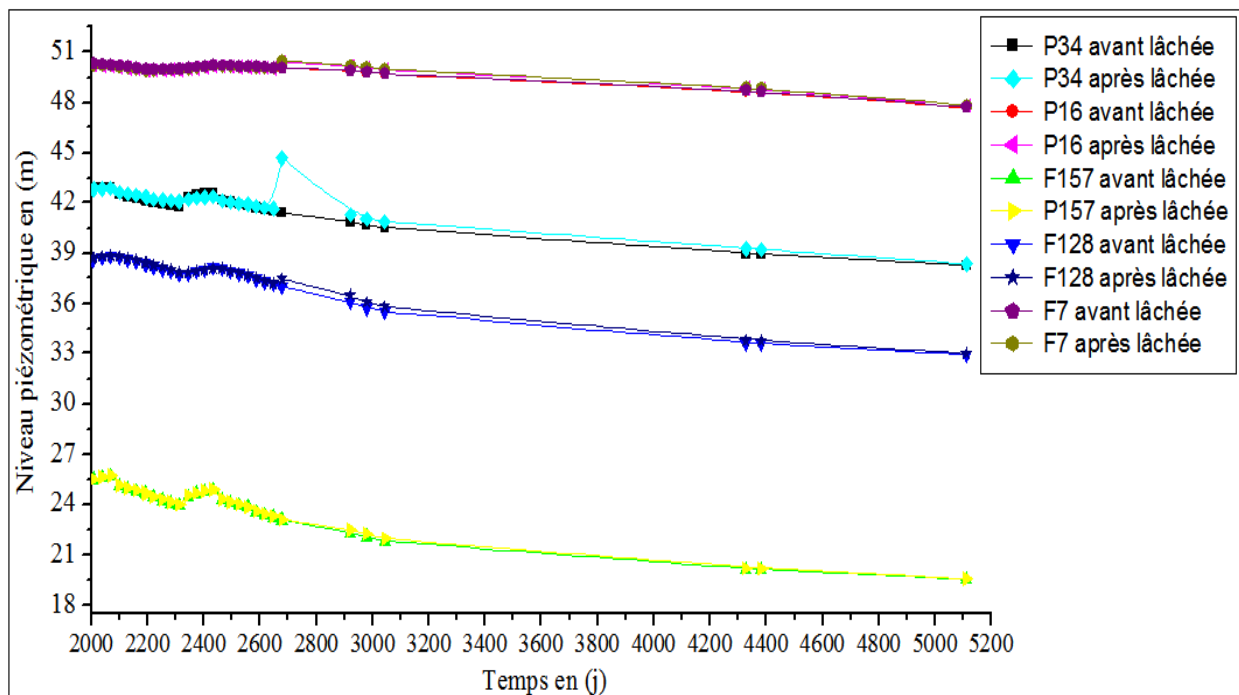


Figure (III- 24): Réponse de la nappe à la recharge artificielle par lâchée d'eau du barrage.

On remarque une légère augmentation du niveau piézométrique au niveau des différents points de contrôles sauf au point P34 qui se situe presque sur le lit du cours d'eau, cette augmentation est de 3.27m et sur les autres points elles est de l'ordre de 0.5 m.

A défaut de données de la rivière, et de manque de mesures de débit d'écoulement et hauteurs de la lame d'eau sur des périodes bien précises, on ne peut proposer une telle simulation d'une lâchée de barrage car ce type de problème demande un pas de temps très court de l'ordre quelques heures par contre sur notre modèle le pas du temps est mensuel.

**Conclusion**

En fin de cette étude de la modélisation de la nappe de Sébaou et de la recharge artificielle, les objectifs atteints sont comme suit :

- Calibrage du modèle en régime permanent ; cette étape est très importante vu que c'est la base des simulations en régime transitoire, c'est là où on peut apercevoir le comportement général de la nappe alluviale. D'un autre côté, elle nous a permis de comprendre les mécanismes hydrodynamiques du flux d'eau, de réaliser le bilan d'eau dans les conditions d'équilibre et voir l'influence des pompages sur certaines zones.
- La deuxième étape est d'étudier le comportement de la nappe en régime transitoire où les conditions hydrologiques et hydrogéologiques varient suivant l'influence des différents paramètres, en particulier les pompages excessifs et la variation des précipitations. Cette étape a été difficile à équilibrer vu le manque des données.
- La simulation pour quelques scénarios de la recharge artificielle sur une période montre que les effets sur la nappe alluviale s'étalent sur une distance de 6 km environ, en effet le niveau de la nappe a augmenté au niveau de la zone d'injection qui s'étend progressivement en direction du nord le long de l'oued Sébaou.

---

*Conclusion*  
*Générale*

---

## *Conclusion Générale*

La vallée alluviale du moyen et bas du Sébaou se situe à l'Est- Sud Est d'Alger, limitée au Nord et au Nord Ouest par la chaîne côtière, au Nord Est par la mer méditerranée et au Sud par la chaîne calcaire du Djurdjura. Elle est de forme allongée, de direction Est- Ouest et couvre une superficie de 2500 Km<sup>2</sup>.

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

La recharge naturelle est directement liée aux précipitations et aux ruissellements des eaux superficielles engendrées par les pluies orageuses, la majorité de ces eaux se perdent dans la mer. Pour profiter de ce volume considérable des eaux de surface, nous avons essayé de simuler la recharge artificielle de la nappe de Sébaou par différents procédés : injection, ruissèlement et lâchers à partir du barrage de Taksebt.

Une modélisation est accomplie sur l'ensemble de la nappe, via le logiciel *Visual Modflow (3.0)*, afin de tester le schéma de fonctionnement obtenu à travers l'analyse de données, et de quantifier le sens et l'intensité des échanges des nappes. La modélisation de la nappe alluviale du Sébaou s'est avérée globalement satisfaisante, bien que le calage effectué en régime permanent, a pourtant conduit quelquefois à utiliser des conductivités hydrauliques, plus importantes que celles mesurées, à une échelle très locale sur les sites. Les simulations effectuées en régime transitoire, permettent de bien se rendre compte de la dynamique des nappes face à l'accroissement des débits prélevés aux différents forages.

La recharge artificielle des nappes constitue le meilleur moyen de stocker l'eau, elle permet aussi d'éviter des pertes considérables par le phénomène d'évaporation et par envasement et d'avoir une eau de meilleure qualité.

La contamination des nappes côtières par l'eau de mer est l'un des vrais problèmes à l'heure actuelle. La recharge artificielle s'avère une technique sûre et peut ralentir la propagation du biseau salé vers les régions les plus lointaines de la mer.

D'un autre côté plusieurs recommandations peuvent être émises :

- Notre étude s'est basée uniquement sur la région du bas et du moyen Sébaou , la façon la plus correcte est de considérer tout le système aquifère, mais à condition d'avoir les données hydrodynamiques, pour cela il faut effectuer des essais de pompage sur les formations captant cet aquifère afin de déterminer les paramètres hydrodynamiques pour lesquels très peu de valeurs existent et de prendre des mesures du niveau piézométrique, cela conduit à une meilleur connaissance du comportement hydrodynamique et une estimation beaucoup plus précise du bilan hydrique.
- Disposer des paramètres hydrodynamiques plus fiables et le réseau piézométrique doit être régulièrement suivi.

- Disposer des données hydrologiques : pour les oueds, des mesures régulières doivent être effectuées à l'amont et à l'aval pour pouvoir quantifier les entrées et les sorties d'eau vers la nappe.
- Disposer des données détaillées des prélèvements d'eau, il est nécessaire de connaître la fréquence des prélèvements pour avoir la quantité exacte prélevée. Le modèle dans les simulations en régime transitoire demande des données pour une période très longue. Dans l'état actuel il est très difficile voire impossible d'établir un historique de prélèvement correcte, beaucoup de difficultés sont rencontrées, il est recommandé aux autorités concernées de remettre à chaque fin d'année un inventaire détaillé des points d'eau et des prélèvements et de mettre à disposition cette donnée pour les futures études de modélisation.

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

---

*Références*  
*Bibliographiques*

---

## Références bibliographiques

[Ababou. R, Bagtzoglou. A.C, 1993]: «BIGFLOW, a Numerical Code for Simulating Flow in Variably Saturated Heterogeneous Geologic Media: Theory and User's» Manual 1.1, NUREG/CR-6028. Report. U.S. NRC, Government Printing Office, Washington DC.

[Ambroise. B, 1998]: La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant. Processus, facteurs, modèles. Edition H.G.A. Bucarest.

[Auterives. C, 2006]. 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). 261 pages.

[Bagloul. A, 1992] : Étude piézométrique du biseau sale dans le bas Sébaou, Mémoire d'ingénieur, institut national agronomique, El-Harrach, Algérie.

[Barone, V. C, 2000]: Modeling the impacts of land use activities on the subsurface flow regime of the upper Roanoake river watershed, Master of Science in Biological Systems Engineering, pp. 184, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.

[Bear. J, 1972]: Dynamics of fluids in porous media. Academic Press, New York and London.

[Bear. J, 1979]: Hydraulics of groundwater, McGraw Hill series in water resources and environmental engineering, 567 pages.

[Besnard. K, 2003]: Modélisation du transport réactif dans les milieux poreux hétérogènes. Application aux processus d'adsorption cinétique non linéaire. Thèse de doctorat Université de Rennes1, France. 251 pages.

[Bradley. C, 1996]: Transient modelling of water-table variation in a floodplain wetland, Narborough Bog, Leicestershire, *J. Hydrol.*, 185, 87-114.

[Benhassaine. M, 1980]: Recherche sur les modèles du relief et les formations superficielles dans la vallée de l'Oued Sébaou (Haute Kabylie). Thèse de 3ème cycle.

[Bradley. C, 2002]: Simulation of the annual water table dynamics of a floodplain wetland, Narborough Bog, UK, *Journal of Hydrology*, 261(1-4), 150-172.

[Bouannani. A, 2004]: Hydrologie, transport solide et modélisation: étude de quelques sous bassins de Tafna (NW-Algérie). Thèse de doctorat, université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen (Algérie), 250 pages.

[Castany. G, 1982] : hydrogéologie « principes et méthodes, Ed Dunond, Paris. P129-150.

[Chadrine Y, 1975]. Étude hydrogéologique de la nappe de l'Oued Sébaou. Document ANRH de d'Alger, 72p.

**[Chapuis. R, Crespo. P., Chenaf. D et Aubertin. M, 1993]:** Evaluation of a groundwater f.e.m software for steady and unsteady state conditions, 46th Canadian Geotechnical Conference, Saskatoon, 61 -70.

**[Crespo. R, 1994]:** Modélisation par éléments finis des écoulements à travers les ouvrages de retenue et de confinement de résidus miniers, Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal.

**[David. A, Lapeyre. E, Chatlard. F, Berthoumieu. J.F, Sourisseau. B, Collin. J, 1996]:** Etude des possibilités de recharge artificielle des nappes alluviales : Application à la nappe alluviale de la Garonne en Lot –et- Garonne, 34 pages, 18 figures, 12 annexes. BRGM 1996.

**[Durand Delga M, 1969] :** Mise au point sur la structure du NE de la berbérie. In Bull. Service Géologie de l'Algérie, N° 39. Alger, p90-131.

**[Durand Delga M, 1969] :** Mise au point sur la structure du NE de la berbérie. In Bull. Service Géologie de l'Algérie, N° 39. Alger, p90-131.

**[Esteves. M, 1988] :** Modélisation des relations entre un aquifère alluvial et une rivière: Application au ried de colmar (alsace-france) , 113' Congrès national des Sociétés savantes, Strasbourg, Géographie, p . 41-61.

**[Esteves. M. et Ackerer. P, 1988] :** Interaction entre eaux souterraines et eaux de surface, 30 May-3 June 1988, Ystad, Sweden, Edited by Peter Dahlblom and Gunnar Lindh Department of Water Resources Engineering, Lund University, Sweden, Proceedings of the International Symposium.

**[François R, 2002] :** Master professionnel. DESS cours d'hydrogéologie Edition 2002. France.

**[Fetter, C.W., 1994]:** Applied hydrogeology, 3<sup>rd</sup> edition. Prentice Hall Englewood Cliffs, N.J, page 691.

**[Freeze, R.A., et Cherry. J.A, 1979] :** Groundwater. Printice Hall, Englewood Cliffs, N.J.

**[Gelard. J.P, 1979] :** Géologique du NE de la grande Kabylie. Thèse de doctorat, université de Dijon, 335p.

**[Gélinas, P.J, et Lefebvre, R. (1992)] :** GGL-10355 Hydrogéologie Note de cours, Université Laval. Belgique.

**[Gilli. E, Mangan. C, Mudry. J, 2008] :** Hydrogéologie (Objets, méthodes et applications), 2<sup>ème</sup> édition, Paris. 199 p.

**[Hillel. D, 1998]:** Environmental Soil Physics. Academic Press. Page 707-756

**[Joris, I. et Feyen. J, 2003]:** Modelling water flow and seasonal soil moisture dynamics in an alluvial groundwater-fed wetland, *Hydrology and Earth System Sciences*, 7(1), 57-66.

**[Kader. O, 2006] :** Délimitation des zones inondables (Cas de l'Oued Sébaou), mémoire de magister, école nationale polytechnique d'Alger.



**[Kadri et Al. 2005]** : Modélisation numérique en éléments finis de la recharge artificielle d'une nappe souterraine. Premier séminaire national sur la mobilisation et l'exploitation en eau. Batna 12-13 décembre 2005.

**[Kadri et Al. 2006]** : Simulation numérique de la recharge artificielle d'une nappe souterraine. Colloque international sur la protection et la préservation des ressources en eau – C.P.P.R.E 2006. Blida 18-19 février 2006.

**[Kirmaier. J, 2001]**. Modélisation des écoulements souterrains à l'échelle d'un bassin versant. Mémoire de fin d'études. Institut National Agronomique Paris-Grignon. 73 pp.

**[Lagha-Bouزيد. S, 2000]**: La recharge artificielle des nappes d'eau souterraines : Alternative en Algérie (CMEE 2000) Institut de génie Civil, Département d'hydraulique, Université des sciences et de la technologie Houari- Boumediène USTHB Alger.

**[Lefebvre. R, 2006]**: Écoulements multiphase en milieu poreux et les aquifères.

**[Louis. J, 1980]**: Hydraulique générale et appliquée, Edition 1980.

**[Mansell, R. S., Bloom. S. A. et Sun. G, 2000]**: A model for wetland hydrology: description and validation, *Soil Science*, **165**(5), 384-397.

**[Max. A. et Saint. P, 1971]** : Alimentation artificielle des nappes, Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology, XVI, 2. 6/1971, Présenté au Colloque International sur les Eaux Souterraines, Palerme, Italie, 6-8 Décembre 1970, Géologue-Conseil, ELC- Electroconsult, Milan, Italie.

**[McDonald. M, et Harbaugh. A. W, 1988]**: A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model, Open-File Report 83-875, pp.588, US Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Washington.

**[Meriano, M., and N. Eyles, 2003]**: Groundwater flow through Pleistocene glacial deposits in the rapidly urbanizing Rouge River-Highland Creek watershed, City of Scarborough, southern Ontario, Canada, *Hydrogeology journal*, 11(2), 288-303.

**[Mousavi. SF et Rezai. V, 1999]**: Evaluation of scraping treatments to restore initial infiltration capacity of three artificial recharge projects in central Iran, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Iran, *Hydrogeology Journal* (1999) 7: 490–500 .

**[Nasri. S, Grunberger. O, Monteroi. JP et Albergel. J, 2001]** : Recharge artificielle de nappes phréatique par les lacs collinaires. Exemple de l'oued El Gouazine (Ousseltia-Kairouan Tunisie), Séminaire international sur les petits barrages dans le monde méditerranéen Tunis du 28 au 31 mai 2001.

[Oreskes. N, Shrader-Frechette. K, et Belitz. K, 1994]: Verification, Validation, and Confirmation of Numerical Models in the Earth Sciences, *Science*, 263 (5147), 641- 646.

[Remini. B, 2005]: La problématique de l'eau en Algérie. Edition Office des Publications Universitaires. p122.

[Roch P., Thiery. D, 1984] «Simulation globale de bassins hydrologiques. Introduction à la modélisation et description du modèle GARDENIA», Rapport BRGMno 84 SGN 337 EAU.

[Saïd. B et Lhoussaine. B, 2006]: Étude de faisabilité de la recharge artificielle des formations calcaires en zone semi-aride. Cas de l'oued Tagmoute, (Anti-Atlas occidental, Maroc) -Actes du 8<sup>ème</sup> colloque d'hydrogéologie en pays calcaire, Neuchâtel, Suisse - ISBN 2-84867-143-2- Presses universitaires de Franche-Comté, Université de Franche-Comté, Édition en ligne, N. Goldscheider, J. Mudry, L. Savoy et F. Zwahlen, éditeurs – 268 pages.

[Saltel. M, 2008] : Impact de structures géologiques sur l'alimentation de systèmes aquifères profonds-Fonctionnement hydrogéologique des antifformes du sud de Bordeaux, Thèse de Doctorat Université Michel de Montaigne – Bordeaux 3, institut EGID. 268 pages.

[Seghir. K, 2008]: La recharge artificielle des nappes d'eau souterraine dans les régions semi arides. Cas de la nappe alluviale Ain Chabro-Hammamet (Nord-est de l'Algérie). 4<sup>ème</sup> conférence internationale sur : les ressources en eau dans le bassin méditerranéen WATMED 4 Alger du 22 au 24 Mars 2008.10 pages.

[Su, M., Stolte W. J., et van der Kamp. G, 2000]: Modelling Canadian prairie wetland hydrology using a semi-distributed streamflow model, *Hydrological Processes*, 14(14), 2405-2422.

[Tajjar M. H, 1993] : Modélisation de l'hydrodynamique des échanges nappe-rivière, Simulation d'une lâchure expérimentale en seine en période d'étiage. Thèse de doctorat, Ecole supérieure des mines de paris.

[Taylor et Francis. G, 2006]: Applied flow and solute transport modeling in aquifers (Fundamental Principles and Analytical and Numerical Methods) Boca, Raton, London, New York, Singapore. P 277-296.

[Tregarot G., Ababou R., Larabi A, 1997]: Inondations, infiltrations et couplages d'écoulements partiellement saturés et non-saturés. 22<sup>èmes</sup> journées du GFHN. 25-26 novembre 1997. Meudon, France.

[Wanakule. N, 1995]: A Lumped parameter model for the Edwards aquifer.

[Weng, P., Giraud. F, Fleury. P et Chevallier. C, 2003]: Characterising and modelling groundwater discharge in an agricultural wetland on the French Atlantic coast, *Hydrology and Earth System Sciences*, 7(1), 33-42.

[Zhang. L. et Mitsch. W. J, 2005]: Modelling hydrological processes in created freshwater wetlands: an integrated system approach, *Environmental Modelling & Software*, 20(7), 935-946.

---

# *Annexes*

---

## Annexe 1 : Précipitation au niveau des différentes stations hydrométriques

Nom de la station : DJEMAA SAHARIDJ

Code de la station : 021503

X : 641,7

Y : 377,75

Z : 370

Année	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avr	ma	juin	juil	août	total
1977	0.50	20.80	-31.80	16.60	117.30	61.40	-34.10	-35.90	31.30	0.00	0.00	0.00	710.00
1978	2.10	-15.60	87.70	42.20	69.60	201.20	66.90	76.90	22.30	4.90	6.30	5.40	720.80
1979	52.50	74.50	-44.10	46.10	87.30	53.40	-01.80	-31.20	30.70	6.80	0.00	0.20	727.60
1980	2.80	66.70	-08.00	351.30	59.70	104.80	66.30	76.40	51.30	-3.60	0.00	30.20	930.90
1981	6.30	46.50	22.90	107.30	234.40	161.00	46.40	36.90	36.10	2.80	0.10	2.30	728.60
1982	44.50	-21.10	-71.50	146.30	2.30	91.00	64.60	46.70	11.10	0.00	0.00	18.30	639.20
1983	5.50	60.90	68.90	76.60	146.30	146.70	66.40	40.50	16.10	-2.50	-0.30	0.20	743.10
1984	40.10	-31.70	31.40	214.20	105.10	73.20	273.20	31.60	36.10	0.60	0.00	0.00	1002.20
1985	57.60	66.70	88.30	73.00	93.50	116.40	233.20	66.60	4.60	45.50	3.70	3.60	854.30
1986	31.20	64.60	-09.20	230.10	141.00	197.90	66.90	16.00	16.30	-2.70	1.10	5.75	833.75
1987	26.80	60.00	-42.00	46.30	47.70	49.50	60.50	63.20	36.30	24.70	5.40	0.00	635.00
1988	47.00	5.70	64.90	212.40	58.20	29.90	67.00	-31.60	5.40	24.00	-2.00	21.10	639.20
1989	17.00	16.30	76.50	26.60	9.00	0.00	46.70	67.00	36.20	-3.40	-4.40	0.00	436.40
1990	4.50	26.50	50.00	209.70	8.00	156.80	66.50	26.20	36.30	3.20	0.00	10.00	639.00
1991	16.80	-32.90	53.30	19.00	119.70	35.50	-13.60	-35.40	46.30	32.80	4.40	0.00	816.90
1992	31.30	60.20	76.70	208.40	60.60	79.90	66.50	-23.10	36.10	1.30	0.00	7.70	835.10
1993	66.50	74.90	88.90	131.70	94.70	72.50	5.00	71.60	12.30	0.60	0.00	0.00	618.20
1994	93.20	76.60	12.40	128.30	292.00	43.20	-67.00	40.50	2.00	23.80	0.70	22.30	931.20
1995	16.30	71.90	38.40	69.20	177.20	326.10	76.60	-25.50	36.30	-5.00	6.30	9.70	939.30
1996	46.50	76.40	97.80	109.30	58.60	15.70	66.20	66.00	34.00	7.00	2.30	22.30	538.90
1997	52.50	-35.40	-98.50	124.30	5.00	106.20	61.50	62.80	261.90	4.10	0.00	8.30	1096.80
1998	46.00	66.30	-60.10	100.30	132.30	81.40	67.10	26.20	32.30	-3.30	0.00	0.00	750.10
1999	41.70	21.10	-46.40	225.30	24.20	9.40	11.50	47.20	36.30	-1.00	0.30	-0.20	634.90
2000	16.30	62.50	65.50	60.40	284.40	87.50	46.50	63.30	36.20	0.00	0.30	7.70	771.60
2001	16.30	16.20	46.70	62.60	80.60	47.70	47.80	60.80	41.30	6.30	-0.20	55.10	432.10
2002	23.30	36.00	241.60	341.40	236.00	97.20	46.60	-33.80	46.30	6.80	5.40	4.20	1244.90
2003	46.10	60.20	66.80	226.40	83.50	36.30	16.00	66.80	170.50	-5.80	2.10	7.90	824.40
2004	46.50	46.90	-31.60	159.30	185.40	156.70	46.60	60.10	4.60	0.00	3.10	2.60	834.00
2005	17.30	40.70	42.10	138.20	52.60	116.40	40.00	20.90	70.70	0.00	1.50	5.60	643.00
2006	23.30	3.60	15.20	169.70	18.10	45.90	251.90	245.20	30.30	6.00	3.00	0.00	810.40

Nom de la station : DRAA EL MIZAN

Code de la station : 021902

X : 600.95

Y : 359.20

Z : 530

Arnee	sept.	oct.	nov.	dec.	janv.	fev.	mars.	avr.	mai.	juin.	juil.	sept.	annue
1377	0.00	2.80	95.10	13.30	75.30	47.90	80.20	115.20	43.00	0.00	0.00	0.00	472.80
1378	2.10	74.60	102.60	22.10	52.50	32.00	127.40	70.50	3.80	2.30	7.10	3.00	602.90
1379	40.10	63.10	105.60	35.10	127.40	36.70	95.00	119.20	34.90	0.00	0.00	0.00	657.10
1380	2.50	53.40	118.80	221.50	45.90	77.00	70.20	74.50	36.60	2.90	0.00	30.90	734.00
1381	2.20	41.90	32.50	70.50	130.80	45.90	41.70	29.50	78.50	3.30	0.00	2.50	635.10
1382	62.00	155.50	161.60	143.40	0.00	41.30	27.90	52.50	4.40	0.00	11.00	3.60	668.20
1383	0.00	13.30	70.40	57.70	112.30	49.10	47.70	47.60	50.40	17.00	8.70	0.00	594.20
1384	32.30	123.00	30.20	143.90	54.50	37.30	270.90	4.00	61.50	0.00	0.50	0.00	835.70
1385	45.70	53.20	63.80	56.90	66.10	20.30	217.80	52.00	4.50	32.00	0.50	5.00	715.80
1386	27.30	67.50	97.80	213.70	121.20	23.30	60.60	8.20	15.50	17.80	0.00	3.00	880.60
1387	10.70	47.10	92.10	49.20	55.40	56.60	66.40	77.10	50.20	16.10	0.00	0.00	520.90
1388	27.30	5.20	42.00	232.10	49.70	25.80	45.80	112.80	10.70	12.00	2.50	3.80	597.70
1389	15.50	38.00	40.90	36.00	62.60	0.00	64.50	52.50	107.00	3.50	26.70	0.00	475.60
1390	15.30	31.60	59.60	133.80	112.50	32.00	92.00	34.60	62.80	2.20	0.90	3.60	743.60
1391	44.10	97.50	35.70	18.00	113.80	35.60	94.10	182.40	72.40	27.80	7.60	0.00	729.00
1392	11.30	48.00	127.30	123.90	38.50	77.00	18.30	87.70	42.70	0.00	0.00	5.50	586.80
1393	74.20	38.40	80.00	130.10	65.40	61.10	2.50	51.00	1.50	0.00	0.00	10.00	514.20
1394	75.30	75.00	34.50	76.30	213.80	29.70	107.30	23.50	0.80	23.20	0.00	10.50	670.30
1395	13.30	28.90	24.70	38.20	128.00	99.20	57.40	104.60	66.80	38.30	4.40	7.70	702.20
1396	22.50	24.20	39.50	68.00	57.60	20.50	43.30	75.50	25.50	2.30	2.50	42.20	394.00
1397	120.10	82.60	164.50	62.10	47.90	0.00	47.70	83.20	135.70	2.00	0.00	0.70	936.60
1398	20.50	78.80	123.40	72.10	63.90	90.90	44.30	1.30	26.30	1.20	0.00	5.00	557.80
1399	43.30	16.90	71.10	131.00	10.60	3.30	7.70	32.50	38.50	0.00	0.00	0.00	414.70
2000	3.10	58.30	61.60	61.00	233.80	74.60	4.70	49.50	42.40	0.00	0.00	4.80	624.20
2001	37.10	2.20	34.50	44.40	78.40	27.10	40.10	58.60	30.50	3.50	5.90	24.00	392.50
2002	22.30	31.70	214.80	253.10	237.70	35.90	27.50	133.00	26.70	2.10	0.00	2.60	1106.90
2003	35.00	115.60	68.70	122.70	52.20	37.40	44.70	91.70	113.70	0.00	0.00	3.50	740.20
2004	25.30	48.00	100.00	177.00	172.20	38.10	23.70	30.60	1.90	0.00	0.00	0.00	716.90
2005	27.30	40.30	78.00	105.00	60.00	24.30	65.50	7.20	62.00	0.00	0.00	0.00	590.20
2006	72.70	19.90	13.20	173.20	2.70	52.70	248.10	180.50	57.40	2.80	19.10	13.90	859.20

Nom de la station : BAGHLIA VILLAGE

Code de la station : 022002

X : 603,65

Y : 390

Z : 30

Année	sept.	oct.	nov.	dec.	janv.	fév.	mars.	avril.	mai.	juin.	juil.	août.	annuel
1977	3.9C	17.6J	97.50	11.50	-3E.00	41.60	110.80	1E8.0	96.4C	1.3C	0.70	C.00	684.40
197E	2.4C	73.5J	71.60	53.40	59.60	192.30	88.80	34.40	12.0C	1.3C	2.40	4.30	62E.00
197E	93.5J	35.3J	-8E.30	45.30	-34.20	54.80	95.70	127.20	16.2C	0.4C	0.20	C.00	83E.20
198C	0.8C	52.1J	81.90	282.40	52.80	60.0	78.80	33.10	46.1C	5.7C	0.20	13.70	76E.50
1981	2.9C	48.7J	21.60	123.60	-8C.80	118.60	28.70	15.10	36.3C	7.6C	0.20	E.30	597.20
198E	4.2J	73.8J	227.10	132.20	3.20	75.60	63.80	17.60	12.8C	0.0C	4.40	37.40	68E.90
198E	3.4C	31.6J	71.40	71.70	82.80	123.80	38.20	23.50	88.8C	-0.1J	0.20	C.00	55C.30
1984	24.0J	105.7C	23.40	141.90	-24.30	37.90	217.80	11.80	116.3J	0.0C	0.20	C.00	80E.10
198E	78.3J	35.9J	-2E.20	54.70	72.90	108.40	171.10	53.90	4.6J	-2.8J	5.30	C.40	75C.10
198E	-4.2J	41.0J	75.50	201.70	-14.80	227.70	43.00	4.10	12.9C	33.0J	0.20	1.20	76E.10
1987	97.3J	45.7J	-1E.50	48.20	65.50	46.90	66.40	53.50	24.7C	2.4J	3.20	C.00	59E.30
198E	7.2J	4.20	93.00	255.20	45.70	25.70	37.50	35.70	6.0J	-7.1J	3.30	4.40	65E.60
198E	33.8J	24.1J	-0C.70	49.20	84.20	0.00	35.60	31.00	79.6C	-3.8J	42.00	C.00	52E.80
199C	1.8C	70.2J	55.50	203.20	91.50	143.40	64.50	53.00	38.5C	3.0C	0.20	E.50	72E.10
1991	-5.8J	190.3C	51.90	14.20	-57.30	52.50	90.20	1C2.60	57.9C	3.4J	2.30	C.00	76E.40
199E	6.0C	78.9J	-1E.30	164.60	35.50	92.00	23.90	1C5.30	39.2C	0.0C	0.20	E.90	66E.60
199E	29.4J	53.3J	83.40	133.00	94.20	64.30	0.00	55.60	4.8J	0.0C	0.20	C.00	51E.00
1994	68.9J	70.0J	23.30	121.70	21E.20	40.60	101.40	41.10	0.2J	-0.4J	0.20	33.90	734.70
199E	-7.7J	18.4J	17.10	80.30	-6E.20	22.20	46.20	143.60	34.2C	-2.6J	6.10	E.20	767.10
199E	30.3J	112.1C	57.60	70.20	47.80	16.00	24.60	1C0.90	14.0C	6.2C	1.30	13.60	49E.60
1997	6.0J	71.4J	-6C.50	144.90	55.90	91.50	62.40	110.50	269.2J	1.1C	0.20	1.80	1031.20
199E	44.1J	51.5J	-3E.40	111.60	-4E.30	103.20	83.00	32.50	21.7C	0.0C	0.20	2.40	737.70
199E	25.7J	22.4J	-6E.80	227.90	13.10	8.10	-5.30	42.60	33.1C	4.7C	0.20	C.00	567.70
200C	25.2J	75.7J	71.50	53.30	22E.70	86.70	1.50	43.30	30.9C	0.0C	0.20	7.80	62C.10
2001	-5.2J	0.00	-04.70	69.70	71.80	37.00	61.70	34.80	17.3C	2.7C	0.20	12.00	48E.90
200E	-8.1J	40.4J	22E.50	234.40	267.40	105.90	41.30	118.20	42.1C	0.0C	3.50	C.00	1093.80
200E	46.1J	39.9J	53.40	151.40	-1E.20	54.0	112.40	73.20	177.7J	0.5C	0.20	E.90	84E.80
2004	25.4J	44.9J	-1E.90	163.80	-3E.80	143.90	28.20	55.20	3.1J	0.0C	1.40	C.00	71E.60
200E	54.7J	51.8J	-02.80	103.60	-12.70	154.60	20.00	13.50	98.3C	2.2C	1.30	E.00	72E.10
200E	-9.6J	25.1J	4.40	261.00	15.40	51.30	232.10	212.0	20.8C	3.0C	5.30	32.60	88E.70

Nom station : AIT AICHA

Code station : 021509

X : 661,8

Y : 373,9

Z : 1000

Année	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	août	septel
-977	3,62	35,50	141,00	15,30	213,90	42,70	193,90	264,90	114,90	0,20	0,00	0,00	1029,90
-978	0,00	93,20	45,70	25,20	99,30	185,90	96,40	76,30	43,50	0,00	8,00	22,30	655,80
-979	69,50	82,30	157,40	45,90	125,40	109,60	178,10	175,20	55,60	0,00	0,00	3,50	966,50
-980	0,90	100,20	108,50	337,00	113,60	123,00	135,70	11,50	50,00	13,00	0,00	43,20	1136,60
-981	12,50	98,50	24,60	246,70	316,00	2,9,60	45,40	24,50	70,00	2,10	0,00	4,00	1063,90
-982	55,30	100,10	171,50	272,60	4,0	84,00	49,90	46,00	12,90	2,40	13,60	4,80	827,20
-983	6,90	56,90	118,90	110,80	0,00	274,80	93,80	117,90	143,10	15,70	3,00	1,90	943,70
-984	41,50	179,30	36,30	288,40	146,90	1,7,70	387,70	49,60	143,50	0,00	6,80	0,00	1397,50
-985	61,50	56,30	144,20	114,10	130,40	145,60	263,30	77,90	9,50	25,60	8,10	2,20	1049,50
-986	47,60	74,20	123,80	316,80	168,50	3,5,80	90,0	33,30	34,60	14,10	17,50	9,80	1246,10
-987	33,00	55,00	127,30	51,20	108,80	99,20	94,60	120,60	55,40	29,50	0,00	0,00	774,60
-988	67,50	2,40	73,80	235,00	84,40	45,90	58,20	193,10	11,20	24,20	4,50	23,90	824,10
-989	32,20	57,50	87,30	34,10	107,40	0,00	50,50	103,40	145,80	34,00	29,40	0,00	661,60
-990	15,70	72,80	87,20	290,60	84,60	153,20	148,70	80,00	53,40	0,90	0,00	7,90	1025,00
-991	48,00	162,00	83,10	21,30	121,60	52,0	127,80	199,70	53,80	35,50	1,10	0,00	916,00
-992	26,20	86,90	140,70	261,30	79,70	74,20	36,30	108,50	75,10	3,20	7,90	0,50	900,50
-993	82,40	76,60	128,00	143,10	128,00	97,50	2,30	69,70	25,90	2,00	0,00	2,50	758,00
-994	85,50	1,6,20	9,80	151,70	244,0	57,80	192,60	53,50	2,40	35,50	5,20	2,20	965,50
-995	22,50	54,80	56,30	102,30	179,30	390,20	87,30	163,20	70,50	43,70	3,70	7,30	1181,10
-996	57,10	87,40	129,40	111,20	82,50	18,70	31,70	118,20	26,80	20,00	1,60	32,30	716,90
-997	57,30	153,40	284,40	190,90	74,20	1,4,80	85,70	175,30	331,00	3,10	0,00	3,90	1534,00
-998	68,50	82,00	208,40	167,90	135,50	90,50	88,0	29,30	46,80	4,90	0,00	3,70	925,60
-999	37,70	13,30	138,20	337,80	7,70	11,30	18,40	71,80	39,90	8,60	0,00	0,00	654,70
2000	22,50	75,90	82,90	103,70	345,0	1,7,80	20,40	70,80	77,40	0,00	0,10	0,30	927,70
2001	47,50	2,20	78,50	71,90	107,70	62,0	74,50	95,30	54,40	1,50	46,30	44,10	716,00
2002	21,10	50,60	328,90	338,50	289,90	80,00	37,90	232,80	74,40	0,50	14,10	29,60	1498,30
2003	33,00	1,3,20	101,00	269,00	135,00	65,20	30,60	115,90	217,30	12,90	3,30	8,20	1104,60
2004	36,60	50,60	155,00	270,70	190,30	171,20	37,20	31,20	6,60	1,00	0,40	0,00	1230,80
2005	47,00	40,70	119,60	175,40	143,30	171,00	97,40	30,70	119,60	2,10	0,90	1,90	949,60
2006	28,70	3,70	27,10	156,20	20,50	95,90	370,20	31,20	41,10	20,00	6,00	3,10	1093,70

Nom de la station : AGHRIBS (Adrar)

Code de la station : 021601

X : 645,1

Y : 391,25

Z : 680

Année	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	août	annuel
1977	3.00	15.00	129.00	21.00	121.50	73.40	124.70	193.80	112.90	0.00	0.00	0.00	803.70
1978	5.30	163.00	126.50	52.50	93.40	181.30	103.00	114.70	8.00	1.20	15.30	22.70	827.30
1979	71.50	112.00	202.60	64.80	126.10	66.30	134.50	163.60	21.40	0.00	0.00	0.00	923.00
1980	0.00	94.40	153.90	453.40	72.70	109.70	82.90	75.30	36.40	8.20	0.00	38.50	1138.40
1981	2.50	62.60	36.90	153.50	240.20	164.10	64.50	37.0	44.40	2.40	0.00	8.50	816.70
1982	41.40	143.50	340.60	247.50	5.80	126.30	73.50	34.60	9.70	0.00	1.40	16.50	1041.60
1983	1.80	52.50	82.40	64.20	235.70	186.00	21.60	32.60	168.90	14.60	0.00	0.00	821.30
1984	22.00	182.40	26.30	233.60	163.00	96.10	402.80	35.60	74.20	0.00	2.10	2.50	1236.60
1985	71.90	52.10	183.10	103.80	153.60	138.30	307.70	42.30	11.50	18.70	15.90	2.10	1117.60
1986	27.30	81.10	175.10	343.20	232.00	347.10	97.50	37.0	22.20	12.00	0.00	9.20	1339.80
1987	30.80	22.70	172.50	62.10	76.30	84.40	100.70	77.0	45.70	25.40	1.50	0.00	710.50
1988	60.70	7.00	112.40	313.50	101.50	32.90	57.80	121.40	0.00	8.50	4.60	14.00	820.70
1989	22.50	54.50	69.80	22.90	120.00	0.00	59.80	105.80	129.90	7.30	24.60	0.00	621.10
1990	0.00	52.70	65.70	353.40	118.10	195.70	144.40	47.70	54.60	4.20	0.00	10.50	1053.00
1991	12.30	195.30	62.20	30.10	222.00	66.60	157.70	201.70	50.80	39.70	2.70	0.00	1044.10
1992	12.40	114.70	141.20	313.60	7.30	115.50	32.60	152.20	62.80	0.00	0.00	6.70	1030.00
1993	54.40	62.00	115.40	125.40	203.70	111.30	2.10	97.50	8.20	0.00	0.00	0.00	721.60
1994	117.60	82.10	25.80	130.20	384.20	81.50	163.40	42.40	1.20	19.00	0.00	19.50	1132.90
1995	12.50	22.90	44.50	100.10	178.30	338.30	92.50	253.20	71.30	1.90	3.40	7.00	1155.50
1996	72.60	103.00	104.60	62.90	111.50	21.30	51.10	127.10	32.80	5.10	0.00	14.40	722.60
1997	62.70	253.10	250.40	153.60	80.40	115.70	11.80	223.90	364.60	3.50	0.00	18.60	1656.50
1998	30.80	137.60	213.50	135.10	229.10	141.30	105.40	32.60	55.50	3.00	0.00	0.00	1140.40
1999	32.00	27.00	277.70	371.80	43.30	8.50	8.10	52.40	36.60	13.80	0.00	5.50	824.00
2000	22.40	77.60	83.70	102.60	440.00	102.50	19.50	74.00	52.20	0.00	0.00	17.50	922.00
2001	22.00	1.00	149.50	113.80	114.50	87.00	66.00	87.50	30.50	1.50	31.80	46.00	721.50
2002	22.70	42.80	348.60	310.80	408.10	106.50	43.70	304.00	30.00	4.20	0.00	0.00	1630.60
2003	52.0	87.90	82.40	233.60	200.50	67.30	50.10	190.20	187.90	6.30	0.00	0.00	1135.10
2004	24.40	32.90	186.50	230.00	215.70	21.80	78.70	52.30	8.30	0.00	0.00	0.00	1123.60
2005	52.30	42.30	112.90	152.90	196.10	276.40	53.40	32.40	127.20	2.60	2.20	0.00	1058.70
2006	22.80	12.10	5.70	223.40	20.40	75.60	41.70	415.70	27.90	26.90	5.70	1.50	1236.40



Nom de la station : FREHA

Code de la station : 021603

X : 641,9

Y : 383,5

Z : 140

Année	sept	oct	nov	dec	env	fév	mars	avril	mai	juin	juil	août	annuel
1977	2.60	20.30	129.20	14.40	111.10	57.10	124.70	153.70	81.10	1.80	0.00	0.00	722.00
1978	3.70	139.30	107.00	37.30	61.45	191.50	33.45	90.80	15.40	0.05	-0.95	14.00	734.05
1979	49.50	69.40	107.00	42.00	107.30	40.70	39.70	97.90	23.30	0.70	0.00	2.70	671.20
1980	0.00	64.20	33.50	304.20	50.20	100.70	77.10	60.40	31.00	15.70	0.00	31.00	832.00
1981	5.60	42.10	24.70	-14.30	275.00	136.00	38.00	20.20	40.60	1.50	0.00	4.00	733.00
1982	29.50	107.80	203.00	-65.20	2.90	66.70	45.90	40.60	9.10	0.00	0.20	23.00	684.90
1983	6.20	39.10	32.00	56.00	150.30	149.00	51.50	31.40	73.40	10.50	0.00	0.00	653.50
1984	33.50	150.10	22.50	-90.70	106.30	49.50	216.70	10.30	73.60	0.00	0.00	0.00	831.20
1985	47.10	5.70	102.50	80.00	79.30	90.30	103.10	30.10	4.30	25.30	4.00	4.40	712.40
1986	21.50	58.00	100.40	232.30	148.00	182.10	50.80	10.40	27.10	13.80	1.20	6.10	833.80
1987	27.30	58.20	106.50	48.00	61.70	65.30	32.20	50.80	17.00	17.80	4.50	0.00	533.30
1988	67.30	7.40	53.20	202.30	60.70	36.40	38.00	90.40	11.00	10.50	3.70	8.30	634.40
1989	20.40	23.30	53.80	20.10	79.80	0.00	32.40	60.50	98.20	7.90	-3.70	0.00	425.10
1990	2.60	42.10	43.30	230.40	63.70	128.00	54.60	40.00	47.60	0.00	0.70	7.50	631.70
1991	17.30	108.70	51.10	18.10	120.70	32.20	100.60	120.00	39.10	13.90	5.70	0.00	647.10
1992	5.60	7.80	70.80	241.70	70.70	54.40	19.60	107.10	22.40	0.00	0.00	3.40	637.70
1993	49.30	79.60	33.00	-08.00	69.80	85.00	0.00	57.80	5.00	0.00	0.00	0.00	553.10
1994	84.70	42.00	13.70	-08.40	250.60	42.30	106.50	40.70	0.00	13.30	0.00	24.40	752.60
1995	7.00	3.10	23.90	61.00	150.00	234.40	75.40	103.40	48.60	11.90	6.40	4.10	737.70
1996	50.10	80.10	51.80	61.10	63.40	-7.30	39.30	50.60	29.00	4.30	0.00	9.50	473.00
1997	55.10	101.20	103.60	95.00	02.70	110.00	71.20	70.20	220.20	4.30	0.00	4.00	943.70
1998	18.50	66.70	141.80	-06.40	117.70	87.70	57.80	17.40	40.00	23.70	0.00	0.00	673.70
1999	29.40	19.80	172.00	251.00	15.20	5.30	12.30	40.90	43.00	4.80	0.00	0.00	537.70
2000	9.20	39.70	55.90	70.70	233.90	76.30	19.50	40.00	33.00	0.00	0.00	6.00	634.30
2001	22.40	0.00	43.30	57.00	65.20	37.50	29.00	62.40	15.00	0.00	-4.00	20.00	307.70
2002	21.30	30.80	202.30	295.20	233.40	95.30	32.80	185.70	34.00	0.90	0.00	0.00	1102.30
2003	34.40	90.60	74.80	272.50	102.60	31.10	27.90	80.80	99.00	0.10	0.00	4.40	832.20
2004	34.40	9.60	113.80	-68.70	154.10	129.40	26.10	57.50	3.50	0.00	0.00	0.00	773.10
2005	20.30	34.10	71.40	-33.50	127.90	211.40	19.00	1.00	69.40	1.30	0.00	0.00	633.40
2006	20.30	5.30	4.40	-49.70	9.70	57.40	043.50	242.70	25.40	0.40	0.70	0.00	853.00

Nom de la station : LARBAA NATH IRATHEN

Code de la station : 021705

X : 634,9

Y : 370,8

Z : 980

Année	sept	oct	nov	déc	janv	fév	mars	avril	mai	juin	juil	écrit	annuel
1977	0.30	21.30	167.42	23.21	135.80	58.50	163.00	133.30	34.50	2.00	0.20	0.00	€47.70
1978	3.70	122.00	1.05.53	78.81	€7.70	€25.30	90.50	€1.70	31.10	2.40	4.10	1.60	€25.00
1979	36.20	73.60	162.32	67.41	121.40	56.10	104.40	133.00	37.50	4.60	0.20	0.00	€56.50
1980	0.20	74.50	133.73	374.33	72.70	106.40	123.00	123.20	37.10	€1.30	0.20	30.80	1272.20
1981	6.70	61.10	26.31	1.4.83	236.50	208.40	60.10	€1.70	31.50	2.10	0.20	2.50	€49.10
1982	53.70	143.10	237.12	187.83	1.30	33.80	63.30	€4.00	8.70	2.00	1.20	18.80	€13.40
1983	0.00	57.50	108.32	51.31	178.90	150.00	79.30	€1.80	142.30	14.30	0.20	0.00	€1.80
1984	38.80	113.30	27.51	246.42	130.70	37.30	313.10	44.10	36.10	2.00	0.30	0.00	1153.00
1985	73.60	31.20	90.61	83.11	€7.70	103.90	331.50	€1.80	8.30	27.80	3.20	5.40	€14.70
1986	35.40	41.40	1.2.32	2.5.12	144.50	250.00	65.50	€1.20	26.50	11.40	0.20	7.50	€18.20
1987	30.00	51.80	122.32	56.01	72.40	54.90	70.70	€7.60	49.10	21.30	7.50	0.00	€38.90
1988	45.20	3.70	63.81	157.02	€4.80	29.60	40.50	175.20	8.50	€1.20	8.30	17.70	€41.60
1989	38.40	27.40	108.12	33.91	€7.10	1.00	46.50	113.40	121.20	€1.90	22.90	0.00	€17.90
1990	10.20	61.60	72.11	20.1.83	€1.90	117.90	95.30	41.60	71.10	3.20	0.20	9.00	€31.20
1991	31.40	163.50	50.61	19.31	124.50	29.70	113.90	138.00	56.20	41.50	13.80	0.00	€21.40
1992	13.70	103.40	107.52	2.3.12	41.80	32.70	25.70	125.30	59.20	1.50	0.20	5.90	716.80
1993	34.00	57.80	1.3.32	128.72	128.80	31.30	7.10	€1.40	2.20	2.20	0.10	0.20	€17.70
1994	105.40	103.60	28.41	13.1.02	252.40	45.70	134.20	€7.60	2.20	€1.80	0.20	22.80	€19.90
1995	23.70	31.20	47.21	99.51	176.80	€70.60	83.70	173.90	72.10	€1.40	14.90	13.20	1100.90
1996	42.60	91.10	105.52	92.21	€2.00	19.60	29.30	135.70	22.70	11.00	0.20	58.90	€14.10
1997	77.40	113.90	227.32	149.42	71.90	138.40	52.30	155.90	301.20	3.20	0.20	6.60	1319.60
1998	31.40	101.70	176.42	102.72	144.60	39.90	84.20	24.70	70.70	27.20	0.30	5.60	€19.70
1999	48.80	21.40	137.32	248.52	€1.80	€1.50	14.20	42.10	56.70	5.80	0.30	3.00	€14.90
2000	7.20	61.90	68.01	64.51	237.20	39.60	9.20	€1.00	36.10	2.00	0.20	7.20	701.00
2001	16.20	2.00	50.11	47.51	71.50	57.80	76.20	€1.90	71.10	3.40	21.90	33.20	€22.70
2002	29.70	31.70	243.32	293.32	321.90	74.20	34.30	131.10	50.10	2.60	14.70	0.40	1255.00
2003	57.30	87.30	81.01	177.72	123.50	59.60	40.30	140.30	181.00	11.20	0.70	7.00	€18.90
2004	37.80	42.20	100.22	260.62	126.10	116.50	30.30	€1.10	7.10	2.00	0.20	2.60	€15.30
2005	43.40	61.10	82.41	1.4.42	120.60	110.60	46.20	41.00	122.30	1.90	0.20	1.90	€14.60
2006	52.80	17.80	20.31	136.32	17.60	38.40	251.30	247.70	35.10	2.60	11.10	9.20	€18.60

Nom de la station : BENI YENNI

Code de la station : 021712

X : 635

Y : 365,25

Z : 760

Année	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	août	annuel
1977	1 70	23 40	133 40	19 30	100 00	50 60	137 00	155 20	33 40	3 10	1 40	0 00	714 50
1978	3 20	97 60	108 90	42 40	65 00	131 50	34 90	95 40	20 20	0 00	0 00	2 60	660 10
1979	65 30	81 60	148 70	47 50	94 50	79 70	142 20	155 30	43 60	3 30	0 00	0 00	857 60
1980	6 60	71 70	122 00	367 40	74 50	104 90	129 70	87 60	45 10	7 30	0 00	30 30	928 10
1981	25 00	66 20	21 70	10 20	293 40	193 30	33 20	40 20	73 00	2 70	1 40	0 00	894 30
1982	71 30	122 30	232 70	184 00	2 40	73 70	32 30	51 60	13 70	1 40	4 30	15 70	828 80
1983	2 60	49 20	92 60	51 30	170 10	231 70	30 50	63 20	125 80	4 30	4 00	0 00	885 60
1984	0 00	131 30	24 50	253 90	85 50	70 50	310 90	42 20	33 20	2 70	0 00	0 00	990 60
1985	75 20	39 60	89 50	34 80	71 30	83 20	314 90	64 00	10 90	3 60	1 70	0 00	868 50
1986	42 40	74 20	94 70	230 30	150 60	284 70	37 30	31 00	23 10	6 60	3 20	7 60	1047 50
1987	15 40	51 10	161 70	51 70	84 30	82 90	37 20	82 30	51 20	26 20	12 30	0 20	72 00
1988	45 30	4 50	79 90	235 20	64 30	47 30	33 40	145 20	11 20	33 00	4 30	15 70	764 00
1989	30 20	30 60	100 80	28 30	87 30	0 00	43 50	92 00	51 40	27 60	25 40	0 60	522 40
1990	8 60	54 60	82 00	222 90	95 10	160 00	101 50	35 70	31 60	9 50	1 40	6 60	842 80
1991	15 10	120 00	40 50	18 20	128 20	30 50	33 40	165 30	33 80	36 70	4 40	0 00	725 60
1992	31 30	92 60	113 70	188 80	52 20	68 50	25 70	79 20	42 20	2 50	0 10	3 40	702 00
1993	65 30	84 20	87 20	110 40	105 30	8 10	0 40	72 60	4 20	3 50	0 00	0 60	618 90
1994	97 00	132 30	34 70	10 60	298 20	54 40	121 70	29 60	0 70	3 50	0 00	20 20	922 50
1995	15 30	38 60	32 10	73 60	162 60	216 80	70 10	145 30	75 40	26 30	11 20	15 40	890 80
1996	35 30	79 60	66 30	36 50	41 00	20 20	27 70	100 70	20 90	10 80	0 60	34 30	505 50
1997	65 30	125 30	192 60	146 50	55 10	115 30	47 90	155 70	273 20	3 80	0 00	6 30	1192 30
1998	37 30	96 20	165 70	31 70	116 60	7 40	35 20	23 10	34 00	4 70	0 20	11 30	768 40
1999	45 00	17 60	109 50	258 40	15 30	7 60	17 10	50 20	33 80	1 10	0 30	0 00	624 20
2000	61 30	77 60	57 10	37 30	319 30	60 10	8 50	79 70	45 20	0 00	0 30	7 60	785 30
2001	32 00	3 30	33 30	43 00	87 70	6 60	75 30	49 20	37 30	1 30	17 30	37 20	479 60
2002	15 00	38 60	233 70	298 70	289 40	102 10	35 30	272 70	32 40	2 50	10 30	3 10	1366 50
2003	31 30	96 20	58 70	200 00	125 60	54 20	43 50	102 20	157 60	7 70	7 10	13 30	903 60
2004	34 30	45 70	152 90	226 30	134 40	163 10	35 40	72 70	8 00	1 20	1 10	3 40	879 50
2005	35 30	35 10	70 80	123 70	133 00	165 40	40 40	27 70	106 90	5 70	2 40	3 60	754 20
2006	47 30	11 10	15 20	142 60	12 00	64 00	311 20	27 60	45 40	3 70	2 50	14 30	698 20
2007	47 30	11 10	15 20	142 60	12 00	64 00	311 20	27 60	45 40	3 70	2 50	14 30	698 20

Nom station : LARBAA MAKOUDA

Code station : 021805

X : 622,65

Y : 390,15

Z : 520

Année	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	août	annuel
1377	3.20	4.00	7.80	6.00	55.10	16.90	87.90	8.30	0.00	5.40	0.00	0.00	277.60
1378	8.00	126.00	100.80	43.60	33.80	235.40	116.70	70.50	10.60	0.00	0.00	7.70	803.00
1379	94.60	80.30	150.10	37.60	137.20	32.30	143.00	121.70	21.00	0.00	0.00	2.50	819.90
1380	0.00	62.10	102.90	410.10	74.00	87.80	85.30	90.00	37.40	0.00	0.00	31.40	981.00
1381	3.50	59.90	49.80	147.60	226.20	164.60	62.50	17.00	32.00	4.50	0.00	4.90	769.50
1382	90.60	76.50	274.00	213.20	8.70	66.90	66.90	29.20	16.50	0.00	0.00	18.50	860.90
1383	11.60	36.60	96.10	104.80	181.30	190.90	64.40	44.50	120.40	12.20	0.00	0.00	863.00
1384	25.60	124.80	3.70	169.60	107.10	73.70	339.40	14.90	85.00	0.00	0.60	0.00	1002.40
1385	73.10	62.40	175.80	83.60	106.70	81.40	223.70	43.80	1.30	12.80	5.10	0.30	869.70
1386	22.60	70.30	127.60	268.00	166.30	2.8.50	54.90	14.10	7.30	11.90	0.00	4.00	961.80
1387	39.60	26.20	92.30	43.20	41.30	56.00	91.00	60.30	20.50	26.70	21.10	0.00	521.00
1388	37.60	6.00	93.80	268.20	70.00	33.10	41.30	82.50	1.00	13.20	0.50	13.30	660.80
1389	42.40	25.20	48.50	75.60	36.20	0.00	45.00	74.40	84.50	4.00	26.40	0.00	525.00
1390	1.20	50.30	45.90	267.90	126.40	171.00	97.40	46.20	10.00	1.80	0.00	14.80	831.90
1391	3.70	159.60	4.40	17.40	191.20	98.10	91.10	163.90	58.20	24.40	4.30	0.00	853.30
1392	6.20	82.90	101.10	269.60	53.60	104.70	27.40	120.40	37.40	0.00	0.00	7.10	810.30
1393	54.20	34.40	49.90	113.20	126.30	70.40	0.00	68.00	5.00	0.00	0.00	7.20	528.90
1394	79.00	70.10	24.10	129.50	356.50	69.60	136.20	32.90	3.00	16.40	0.00	29.30	943.60
1395	15.60	20.30	20.80	61.00	157.20	261.80	62.40	144.80	46.60	20.60	6.00	7.80	825.20
1396	34.20	89.10	58.70	65.70	34.90	17.20	20.70	93.30	17.10	4.10	1.70	10.90	477.60
1397	61.60	135.00	129.90	112.50	30.30	149.20	83.90	83.80	202.00	1.00	0.00	1.80	1027.40
1398	38.40	51.80	147.80	121.10	132.40	136.60	64.60	20.70	31.40	0.00	0.00	0.00	744.80
1399	22.70	21.50	172.80	263.40	27.50	3.80	7.10	37.50	43.80	5.20	0.40	1.10	606.80
2100	16.60	31.20	73.60	33.60	306.30	76.10	21.10	39.90	34.40	0.00	0.00	23.50	665.00
2101	26.10	1.00	90.90	83.10	32.40	48.40	53.20	44.80	19.10	0.30	16.10	11.60	492.00
2102	25.00	56.00	202.50	260.10	326.30	73.30	54.90	238.50	29.90	0.00	0.00	0.00	1266.00
2103	35.00	65.30	54.20	145.90	177.40	35.40	59.70	115.20	108.50	2.80	0.00	2.60	802.00
2104	45.40	26.10	107.00	173.00	146.30	129.20	32.10	69.20	1.30	0.00	1.10	0.50	730.70
2105	30.60	49.80	77.70	142.40	166.50	221.10	29.50	20.70	62.90	1.80	2.70	2.20	810.20
2106	32.60	32.60	4.50	175.20	12.80	45.40	285.10	213.90	18.50	8.90	4.20	1.40	835.00

Nom de la station : BOGHNI

Code de la station : 021903

X : 612,55

Y : 361,15

Z : 250

Année	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	jun	jul	août	annue
1977	2.20	29.0	101.50	12.85	-05.70	45.00	105.55	147.65	82.70	0.20	5.00	0.00	632.30
1978	0.00	89.80	105.40	30.15	49.90	-53.50	100.40	71.30	-2.90	4.70	4.50	4.70	639.20
1979	55.40	71.0	110.30	40.15	-16.60	61.60	115.65	105.75	34.10	1.50	5.00	2.00	720.00
1980	1.00	55.60	110.20	27.00	36.70	79.30	34.80	70.20	40.70	6.50	5.20	51.70	845.00
1981	9.30	30.70	33.50	84.55	220.90	-26.70	56.40	-8.40	23.20	3.80	1.70	0.00	609.10
1982	48.60	101.40	168.10	108.40	1.60	53.40	38.00	48.60	4.80	0.90	5.10	6.80	585.70
1983	0.00	23.00	56.60	47.40	-12.20	-6.80	31.00	49.10	99.70	-6.40	7.50	0.00	634.70
1984	38.70	97.90	37.00	149.30	77.10	38.00	223.65	20.30	88.50	0.60	3.30	1.30	775.60
1985	69.90	40.80	90.50	52.40	49.00	75.50	190.75	37.30	-0.60	33.50	2.00	3.90	665.90
1986	25.00	73.20	96.30	204.40	-56.40	219.20	75.60	-3.70	-5.50	-4.00	14.30	5.00	92.60
1987	4.00	35.90	82.90	51.40	59.10	66.40	70.40	71.60	31.40	-7.80	5.40	0.00	496.30
1988	35.40	7.60	52.20	257.00	52.50	36.50	52.40	131.05	4.70	32.70	5.60	17.20	685.60
1989	-8.10	31.00	83.50	20.25	82.80	0.00	46.50	45.20	104.30	-0.30	36.90	0.20	487.00
1990	-4.10	50.90	53.00	166.50	88.80	-23.90	78.20	38.90	73.60	2.30	5.40	8.60	699.60
1991	29.20	66.70	30.50	10.40	99.80	35.40	73.60	160.25	70.80	22.80	19.10	0.00	623.50
1992	-0.90	52.60	133.70	194.30	43.40	60.90	17.30	89.60	28.90	1.70	5.20	9.00	642.50
1993	78.10	33.0	86.90	82.95	73.60	84.40	4.20	61.20	1.40	0.00	5.00	0.00	505.80
1994	132.60	78.80	30.70	74.15	275.90	31.70	38.30	-4.40	1.00	23.90	5.40	12.00	773.80
1995	-4.50	27.60	26.80	40.65	-35.10	219.20	30.30	181.15	57.40	-6.00	3.50	13.80	807.30
1996	20.10	25.90	45.20	67.40	40.70	20.50	22.90	80.20	-9.70	7.90	5.30	16.40	372.20
1997	133.40	59.50	141.10	105.00	35.70	98.70	42.10	91.60	178.30	5.80	5.00	1.00	892.20
1998	37.60	91.0	115.30	60.75	80.20	96.40	39.20	-8.10	50.50	-6.50	5.00	1.00	642.60
1999	50.70	18.20	67.40	186.70	24.80	7.50	5.70	36.40	62.10	2.50	5.00	0.00	462.00
2000	1.90	106.60	4.80	52.85	324.90	77.30	2.70	40.80	49.10	0.00	5.00	4.60	702.50
2001	42.40	4.20	30.60	20.40	81.20	13.00	37.30	31.50	42.00	0.80	15.10	24.30	351.80
2002	-0.90	26.40	184.10	230.40	228.40	-53.20	21.30	173.85	29.70	1.70	3.10	7.00	1073.05
2003	-7.00	42.80	68.80	136.70	94.10	17.10	70.90	96.70	144.30	5.70	5.00	14.50	708.60
2004	-7.00	46.70	101.30	206.00	-83.70	-12.00	21.80	48.40	1.90	6.90	5.00	0.00	746.30
2005	-5.20	46.30	56.70	90.35	-04.30	-27.70	28.10	-1.00	73.10	6.70	5.00	9.70	574.10
2006	34.30	4.50	3.20	110.50	6.90	47.40	230.85	216.65	30.50	2.40	3.50	3.80	700.40

Nom de la station : BOUASSEM M. F.

Code de la station : 021801

X : 620

Y : 371,5

Z : 600

Année	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	jun	juil	août	annuel
1977	1.00	18.50	137.30	-9.70	-23.80	41.10	133.70	173.90	94.30	0.80	0.00	0.00	751.60
1978	7.60	64.90	111.20	57.20	53.40	207.80	121.80	84.30	2.70	5.40	11.60	6.00	777.90
1979	35.40	71.10	110.30	46.10	-16.60	61.60	115.60	105.70	34.10	1.50	0.00	2.00	722.00
1980	2.10	69.80	121.60	404.30	52.40	83.50	98.20	92.50	32.30	7.70	0.00	43.10	993.00
1981	5.50	79.60	44.60	96.30	229.20	166.50	64.00	46.70	73.40	2.00	0.00	8.20	802.00
1982	109.00	104.50	214.00	205.90	6.60	94.20	62.60	42.40	2.60	0.00	0.00	28.50	853.60
1983	0.30	29.30	97.60	37.40	-16.10	157.60	79.20	46.80	120.60	13.80	1.30	0.00	697.00
1984	27.40	122.40	31.40	234.90	-20.40	71.60	307.00	31.70	99.30	2.50	1.10	0.00	1050.00
1985	34.10	42.80	112.70	65.10	71.20	113.40	250.30	60.20	10.40	23.60	8.20	3.30	821.30
1986	19.90	72.70	102.60	241.90	-78.90	286.00	79.00	26.10	3.30	11.70	0.20	2.70	1049.50
1987	7.40	35.90	135.80	61.50	83.20	59.10	78.00	86.40	49.30	23.40	16.10	0.00	642.40
1988	36.20	7.30	80.60	246.80	63.20	53.50	61.10	134.30	9.40	24.20	2.30	15.80	765.30
1989	33.10	33.70	116.00	38.40	85.00	0.00	60.90	66.70	130.00	13.20	24.40	0.00	613.40
1990	13.10	65.40	75.00	250.00	-05.40	134.20	108.70	36.80	64.20	2.20	1.40	8.90	863.30
1991	35.60	110.60	17.60	-7.10	-61.20	45.00	102.30	183.10	76.40	31.50	5.20	0.00	781.60
1992	15.60	64.70	116.80	215.20	43.90	78.90	32.00	115.90	40.30	0.10	0.00	8.50	740.50
1993	73.60	44.20	87.70	118.30	93.50	70.50	1.10	56.30	3.70	1.50	0.00	0.00	553.40
1994	136.50	61.80	22.50	109.30	267.10	48.10	111.30	20.00	0.00	21.10	0.90	20.10	843.70
1995	1.60	22.10	50.30	94.50	-62.20	304.20	60.90	193.10	67.30	24.70	8.50	10.90	993.60
1996	36.30	114.30	69.00	96.40	43.70	23.20	27.40	96.20	34.30	7.00	4.30	22.20	583.80
1997	48.30	125.80	206.30	128.70	57.40	151.00	74.50	103.90	262.40	5.70	0.00	0.80	1169.80
1998	13.80	66.20	126.50	95.80	-38.10	98.60	100.60	26.80	35.20	8.70	0.00	1.10	742.40
1999	39.80	15.70	136.70	243.80	21.90	8.70	7.60	36.00	83.30	1.70	0.00	0.00	592.50
2000	6.60	69.70	73.60	71.80	306.90	89.30	0.90	56.60	54.30	0.00	0.00	2.20	724.50
2001	4.60	3.70	47.40	56.50	83.50	56.90	65.30	56.30	49.10	4.20	18.60	29.90	503.00
2002	26.10	36.20	236.90	318.00	363.50	104.60	30.00	213.00	49.30	2.50	14.80	0.60	1370.20
2003	39.70	76.20	64.50	183.60	-24.40	57.00	41.40	112.10	153.10	7.00	4.10	2.50	895.60
2004	29.50	44.10	106.00	233.60	-65.80	136.10	29.20	62.80	2.60	0.00	3.80	0.00	793.40
2005	23.40	49.70	78.70	120.20	-63.20	197.90	67.90	26.90	84.20	1.50	0.00	6.60	780.20
2006	24.00	12.20	13.00	192.80	12.30	72.40	273.20	227.60	19.10	4.10	4.50	7.50	862.70

Nom de la station : DRAA BEN KHEDDA

Code de la station : 021804

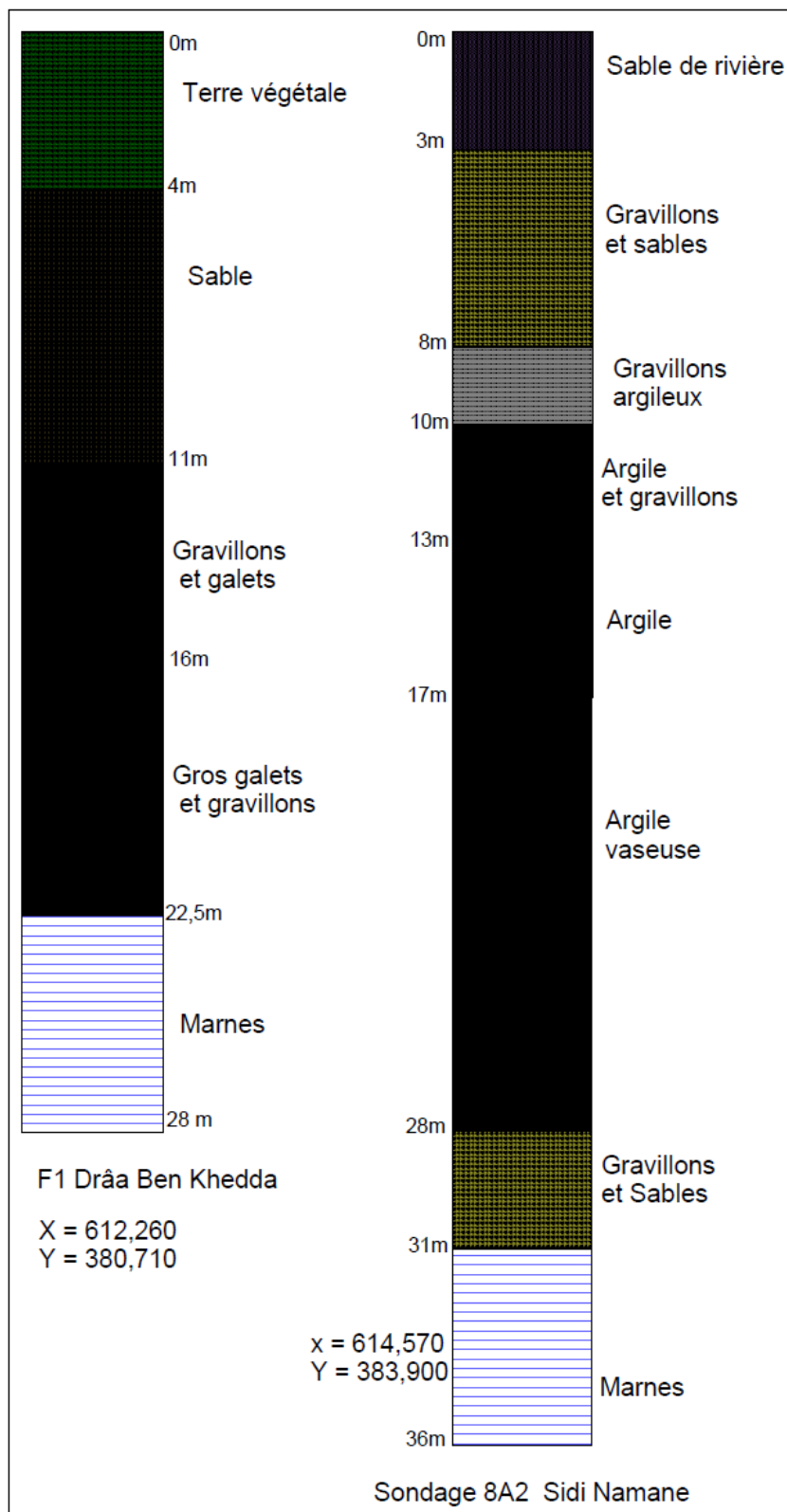
X : 615,2

Y : 382,45

Z : 90

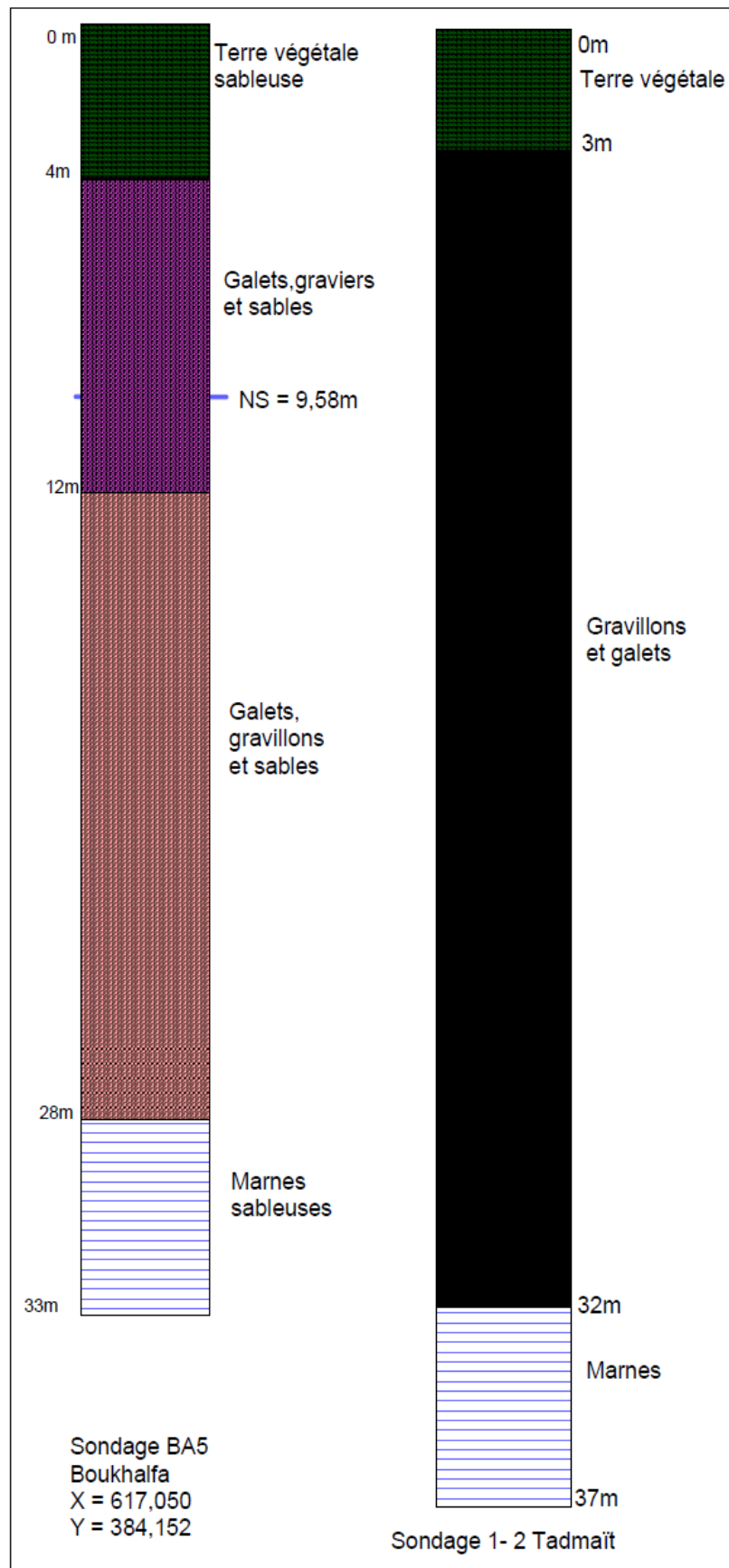
Année	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	août	annuel
1977	1.50	17.90	94.40	13.50	114.60	36.30	97.30	123.60	89.40	2.30	0.00	2.40	594.60
1978	3.80	70.70	77.60	33.10	47.30	61.50	98.00	59.90	77.40	3.30	7.00	2.10	585.30
1979	94.50	80.30	150.10	37.50	137.20	32.30	143.00	121.70	27.00	2.00	0.00	2.50	819.90
1980	2.00	52.70	82.30	267.20	35.50	65.70	97.30	73.50	37.20	2.00	0.00	44.30	751.80
1981	2.30	52.20	25.30	116.20	224.90	52.20	29.50	20.00	43.00	7.00	0.00	2.60	675.60
1982	135.00	96.00	207.20	161.50	2.00	62.90	44.90	12.40	77.50	2.00	0.00	32.70	7807.0
1983	0.50	38.40	77.60	53.00	123.50	38.10	78.00	31.70	85.80	2.00	0.00	2.00	629.60
1984	48.50	108.80	26.70	160.50	118.50	33.50	24.40	11.30	70.40	2.00	3.00	2.00	842.70
1985	37.20	76.00	70.50	63.50	81.40	10.30	112.20	49.70	2.00	18.30	4.60	3.10	6297.0
1986	11.80	41.00	26.80	224.70	183.50	213.20	687.0	3.20	77.90	5.50	0.10	3.60	799.40
1987	31.00	49.80	113.60	47.00	46.30	56.10	72.90	60.10	70.10	29.30	25.00	2.00	541.70
1988	54.40	8.60	74.40	261.30	46.70	37.90	15.70	107.00	2.60	13.30	5.20	3.20	637.90
1989	21.70	20.00	74.20	33.70	65.70	0.00	33.30	55.30	68.70	21.30	26.80	2.00	421.20
1990	6.20	55.00	43.30	167.50	103.90	30.50	67.30	38.80	20.00	2.70	0.00	1.50	636.80
1991	4.80	131.70	36.70	13.70	143.80	51.40	86.50	133.40	52.10	22.70	2.90	2.00	684.70
1992	2.80	58.00	117.30	160.20	37.30	34.40	20.20	103.00	47.60	2.00	0.20	5.00	581.80
1993	57.30	35.60	63.20	93.50	99.50	70.20	3.80	46.90	7.30	2.00	0.00	20.10	497.80
1994	77.30	77.20	29.40	121.10	251.20	56.20	98.20	33.40	1.20	16.50	0.20	25.40	787.30
1995	10.50	27.10	36.60	63.20	174.10	200.70	62.40	140.00	46.30	19.20	6.40	3.50	796.40
1996	34.40	97.00	54.40	51.40	38.10	14.20	26.00	79.90	27.70	4.00	0.00	10.70	432.40
1997	45.60	79.70	215.80	127.30	43.30	29.50	647.0	103.70	243.80	2.30	0.00	3.00	1057.20
1998	22.70	76.50	113.10	83.50	116.60	102.30	757.0	16.70	24.00	2.10	0.00	1.50	637.60
1999	22.70	21.20	147.10	235.50	78.30	7.10	5.40	29.50	32.30	7.00	0.00	2.00	520.70
2000	5.90	71.70	83.50	53.00	252.40	74.80	2.50	31.70	30.00	2.00	0.00	1.70	610.80
2001	16.30	1.60	257.0	57.70	76.30	26.80	42.00	54.00	35.30	1.20	0.00	19.20	3567.0
2002	13.00	33.40	192.30	259.70	271.70	90.20	55.40	123.00	32.40	2.00	0.00	2.00	1068.90
2003	18.70	46.50	72.30	161.20	115.30	48.90	96.90	74.00	134.70	3.70	1.30	7.30	803.60
2004	357.0	30.80	86.90	167.20	140.10	15.30	23.60	54.80	1.80	2.00	0.00	2.50	657.00
2005	16.80	52.90	717.0	94.50	121.00	68.30	317.0	20.00	67.60	2.70	1.50	2.70	644.50
2006	36.80	27.00	6.30	166.30	73.20	55.60	283.30	195.20	27.20	4.00	2.60	2.50	8137.0

Annexe 2 : Coupes lithologiques de quelques forages

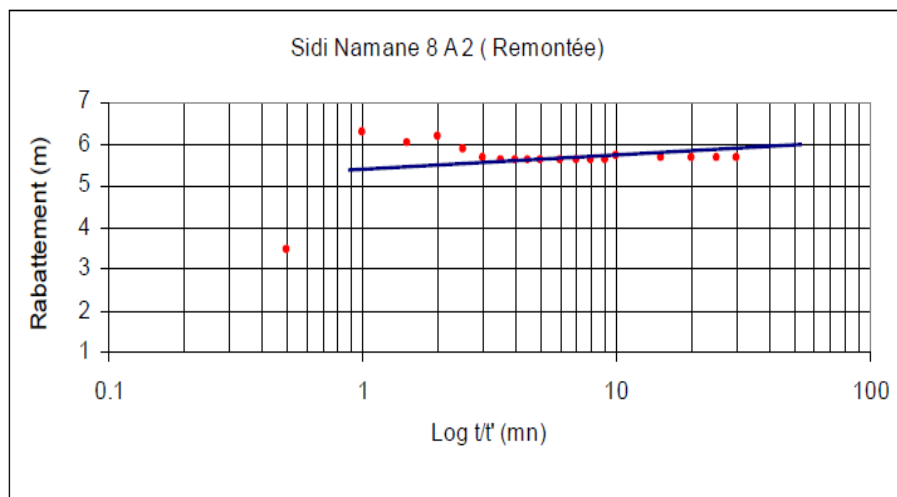
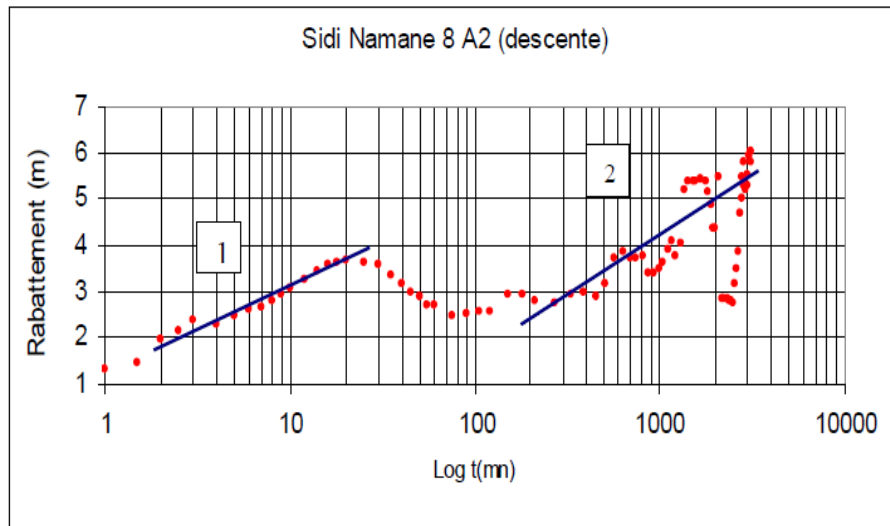


Coupe lithologique Sondage F1 et 8A2 sidi Namane (Moyen Sébaou).

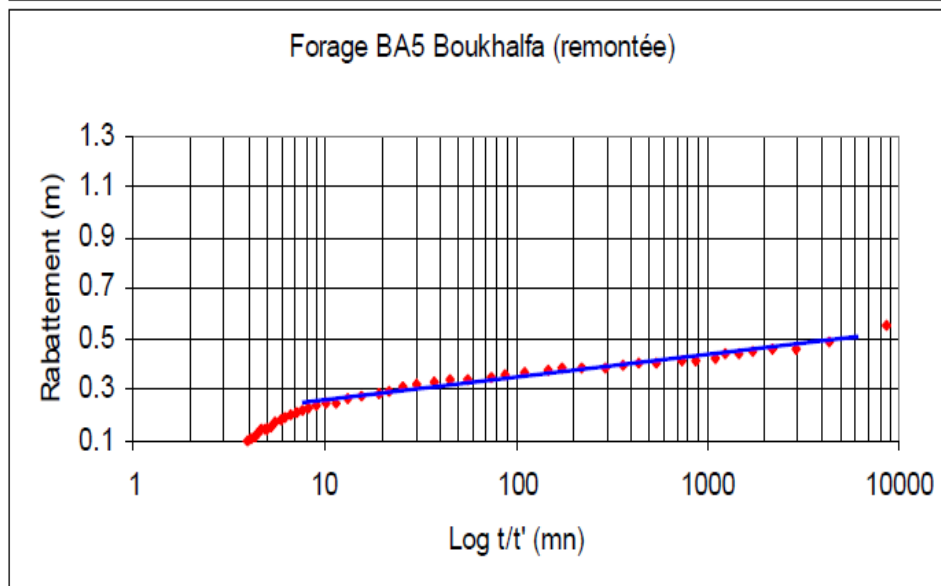
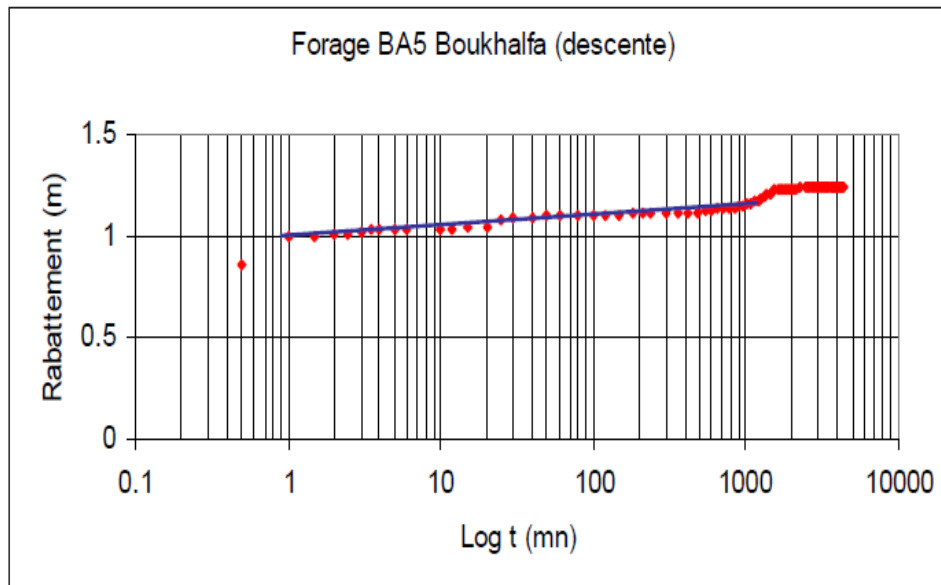




Coupe lithologique du Sondage BA5 et 1-2 Tadmaït (Moyen Sébaou).



Courbes caractéristiques des essais de pompage dans le forage 8A2 Sidi Namane.



**Courbes caractéristiques des essais de pompage dans le forage BA5 (Boukhalfa).**

## Annexe 3 : Piézométrie de la vallée de Sébaou mesuré sur terrain

Tableau de piézométrie de l'année 2000

Point	X (m)	Y (m)	Piézométrie (m)
1	604552	398090	2
2	605103	395439	3
3	604676	393758	6
4	604807	391844	10
5	604998	389910	12
6	604820	388844	15
7	605255	388556	17
8	605409	388054	21
9	605728	387428	27.5
10	606169	386766	33
11	606261	386427	34
12	606537	386037	35.3
13	609116	384504	38.9
14	611891	383839	43
15	613939	383650	48
16	615943	384150	53

Tableau de piézométrie de l'année 2004

Point d'eau	HE 2004	BE 2004
F5	55.99	53.93
P7	40.18	39.16
P34	36.95	36.01
P141	22.14	21.66
P157	26.24	25
F149	15.99	15
P206	9.38	7.01
P218	5.14	2.98
P253	1.05	0.48
P221	1.81	0.12

**Tableau de piézométrie de l'année 2005**

Point d'eau	HE 2005	BE 2005
F5	54.69	53.74
P7	49.63	48.22
P34	35.46	35.3
P141	20.07	19.8
P157	25.45	24.2
F149	15.07	15.54
P206	9.28	8.38
P218	2.99	1.63
P253	1.18	1.57
P221	2.13	1.58

**Tableau de piézométrie de l'année 2006**

Point d'eau	HE 2006	BE 2006
F5	55.99	53.69
P7	50.94	47.79
P34	41.73	40.85
P141	19.83	19.1
P157	26.51	25.2
F149	14.4	14
P206	8.58	6.85
P218	2.97	2.5
P253	1.77	1.27
P221	1.62	0.12

Annexe 4 : Tableau des différents débits extrait de la nappe de Sébaou.

Point d'eau	X (km)	Y (km)	Débit (m <sup>3</sup> /j)
F5/B	618.166	385.274	1814.4
P7/B	616.125	384.939	2056.32
F7/B	616.845	383.714	3110.4
P16/B	615.3	384.725	2592
F23/B	614.166	384.046	2747.52
F24/B	614.861	383.958	3335.04
F31/B	613.67	384.44	4190.4
F34/B	611.45	383.665	4821.12
F51/B	616.123	383.88	3473.28
P56/B	615.465	383.102	3317.76
F67/B	614.65	382.32	2280.96
F82/B	613.875	383.01	1935.36
F89/B	612.835	383.22	4777.92
FP97/B	612	383.15	4207.68
F122/B	609.23	383.92	3628.8
F125/B	607.875	383.9	2885.76
F128/B	610.938	383.926	2548.8
F141/B	606.9	385.6	3075.84
F149/B	603.79	389.35	2808
F152/B	604.73	389.35	2871.04
F156/B	605.052	387.746	3438.72
F157/B	609	385.5	2885.76
P157/B	605.897	387.131	2419.2
F167/B	602.98	390.71	4533.6
F170/B	604.489	393.945	3110.4
F174/B	603.11	394.06	2028
P177/B	604.42	396.48	2160
P182/B	604.489	397.645	2367.36
P187/B	603.475	398.96	1755.2
P198/B	602.901	400.154	1892.16
P206/B	603.52	392.46	2306.88
F209/B	604.919	393.935	1900.8
F213/B	604.89	395.5	2419.2
P218/B	604.93	397.095	3672
P221/B	604.605	398.571	2678.4
P222/B	604.852	398.49	2246.68
P224/B	603.616	399.142	1486.08
P231/B	603.278	400.095	1805.76
P241/B	603.372	400.581	1984.8
P253/B	602.852	400.72	1382.4
F1	612.26	380.71	1382.4
8A2	614.57	383.9	1382.4
F1-2	608.7	384.4	4968
F3-2	611.78	378.41	3801.6
6-1bis	616.67	383.73	6134.4

---

## Résumé

La nappe alluviale de Sébaou fait partie des aquifères du nord de l'Algérie. Face aux besoins des populations, des industries et de l'agriculture des deux wilayas à savoir Tizi Ouzou et Boumerdès, la nappe a subi une exploitation intensive ces dernières années ce qui engendre un abaissement considérable de son niveau piézométrique ainsi que la menace du biseau salé aux endroits plus proches à la mer méditerranéenne. Une gestion par un modèle mathématique devient nécessaire. Le traitement des données hydroclimatiques, hydrodynamiques et géométriques de l'aquifère nous a permis de réaliser la répartition spatiale de ces paramètres. Après une représentation du fonctionnement global du système aquifère, l'utilisation du modèle mathématique sous le logiciel Modflow en régime permanent conduit au calage de ces paramètres. La seconde simulation en régime transitoire conduit à connaître la variation des niveaux piézométriques de la nappe en fonction du temps et de déterminer l'impact des débits prélevés sur la nappe. L'exploitation du modèle a permis aussi de simuler la réponse de la nappe sur la recharge artificielle par injection de l'eau à travers des puits avec différents débits.

**Mots clés :** Bassin de Sébaou, Modélisation numérique, Modflow, calage, surexploitation, bilan de la nappe, gestion.

## Abstract

The alluvial layer of Sebaou belongs to the aquifers of the north Algeria. In front of population, industry, and agriculture needs of the two cities which are Tizi Ouzou and Boumerdes, the layer has known an intensive exploitation these last years. This is what leads to a considerable degradation of its water level and the threat of salty bevel in the closer places to the Mediterranean sea. A management by mathematical model is necessary. The processing of hydroclimatic data, hydrodynamic and geometric parameters of the aquifer has allowed us to realise the spatial division of these parameters. After a presentation of the overall functioning of the aquifer system, the use of the mathematical model under Modflow software with permanent regime improves the knowledge of hydraulic characteristics of the aquifer and the evaluation of a complet hydrologic balance. The second simulation with transitory system leads to know the variation of water levels of the layer according to time and to determine the impact of the flows set apart from (deducted on) the layer. The exploitation of the model has also allowed to simulate the response of the layer on the artificial refill by injecting water through wells with different flows (forfeits).

**Keywords:** Basin of Sébaou, Modeling digital technology, Modflow, wedging, overexploitation, balance (assessment) of the layer, management.

## ملخص

تعد الخزانات الغرينية لسيباو ضمن المياه الجوفية لشمال الجزائر. و أمام احتياجات السكان و الصناعات والزراعة لكل من الولايتين المتمثلتين في تيزي وزو و بومرداس. وقد تعرضت المياه الجوفية لاستغلال بشكل كبير في السنوات الأخيرة. و هذا ما سبب انخفاضاً معتبراً لمستواها المعصاري و تهديد الحد المائل المملح لأماكن أقرب إلى البحر الأبيض المتوسط. و يصبح من الضروري الإدارة من خلال نموذج رياضي. وقد سمحت لنا معالجة البيانات الهيدرولوغيا و المؤشرات الهيدروديناميكية و الهندسية للمياه الجوفية بانجاز التقسيم الفضائي لهذه المؤشرات. بعد تقديم الأداء العام لنظام طبقة المياه الجوفية باستخدام نموذج رياضي Modflow بنظام منتظم يحسن من معرفة المميزات الهيدروليكية لمحتوى الماء و تقدير حصيلة هيدرولوجية كاملة. و تقود المحاكاة الثانية بتنظيم عابر إلى معرفة تغير مستويات المعصارية لمحتوى الماء بعامل الوقت، و تحديد تأثير النسب المقطوعة من طبقة المياه الجوفية. كما سمح استغلال النموذج بتصوير إجابة المياه الجوفية على التعبئة الاصطناعية الثانية و ذلك بضم المياه عبر آبار بمختلف نسب التدفقات.

---