



## **ÉVALUATION DE LA RECHARGE DES EAUX SOUTERRAINES DANS LE BASSIN VERSANT DE SIKKAK (NW ALGERIE) PAR L'UTILISATION DU MODELE ZYGOS**

### **USE OF THE ZYGOS MODEL FOR THE ESTIMATION OF GROUNDWATER RECHARGE IN SIKKAK WATERSHED (NORTHEN WEST OF ALGERIA)**

*BEMMOUSSAT A., ADJIM M., BENSAOULA F.*

Laboratoire Valorisation des ressources en eau, Département d'hydraulique,  
Faculté de Technologie, Université de Tlemcen, Algérie

#### **RÉSUMÉ**

Dans cette étude, nous utilisons le modèle hydrologique : pluie débit Zygus intégré dans le logiciel Hydrognomom, pour estimer la fraction de pluie alimentant les nappes souterraines. Ce logiciel comporte plusieurs paramètres qui représentent le processus d'infiltration et d'écoulement. Les données de sorties, à savoir la percolation et l'évaporation réelle, sont déduites après calage automatique entre le débit mesuré à l'exutoire et le débit calculé. L'estimation du paramètre d'entrée : pluviométrie moyenne mensuelle, a été effectuée de deux manières différentes : la première est celle des isohyètes, la deuxième est celle de la moyenne arithmétique. Les simulations numériques montrent que la première méthode donne un très bon résultat, par contre, la deuxième révèle un mauvais calage. Il en ressort que, pour un apport pluviométrique moyen annuel de 425.2 mm, la recharge ne représente que 10% des précipitations.

**Mots clés :** recharge, processus d'infiltration, évaporation réelle, écoulement, modèle zygus.

## **ABSTRACT**

In this study, we use the hydrological model: rain flow Zygos that is integrated in the Hydrognomom software. The aim is to estimate the fraction of rain supplying the groundwater. The latter is composed of several parameters that represent the infiltration and flow process. Data outputs, namely percolation and evaporation, are deduced after automatic calibration between the measured flow rate at the outlet and the calculated flow rate. The input parameter: “mean monthly rainfall estimate”, was carried out by two ways: the first is isohyets; the second is that of the arithmetic mean. Numerical simulations show that the first method gives a very good result. On the other side, the second reveals a bad timing. Finely, it is shown that, for an average annual rainfall of 425.2 mm intake, percolation represents only 10 % of the precipitation.

**Keywords:** percolation, infiltration process, real evaporation, runoff, zygos model.

## **INTRODUCTION**

L'accroissement des besoins en eau conjugué à la semi-aridité du climat de la région, nécessite l'élaboration d'un plan d'action susceptible d'améliorer la préservation des ressources en eau. Sur ce sujet la quantification de certains paramètres hydrologiques et hydrogéologiques est importante. Sous cette action, les administrations locales assureront une bonne planification de leur gestion prévisionnelle, ce qui leur permettra d'allouer des volumes d'eau pour l'alimentation en eau potable et agricole. Une estimation précise de la recharge des nappes est indispensable pour une gestion optimale des ressources en eaux souterraines (Baziei et al, 1995). Cette recharge est l'un des termes du bilan hydrique le plus difficile à estimer (Milville, 1991). Dans ce contexte, il est essentiel de se doter d'outils adéquats pour évaluer de façon efficace cette dernière. Dans notre étude, nous avons utilisé le logiciel hydrognomon pour l'évaluation temporelle de la percolation dans le bassin versant de Sikkak. Cet outil numérique dispose d'une interface simple, facile à manier avec une rapidité d'exécution de qualité, que nous jugeons très intéressante à utiliser par l'encadrement administratif. Le calage peut se faire d'une manière automatique, offrant une bonne optimisation des paramètres. Ce modèle se base sur le bilan hydrique simple qui utilise : les précipitations, l'évapotranspiration et le ruissellement.

## MODÉLISATION DU BILAN HYDRIQUE À L'AIDE DU LOGICIEL HYDROGNOMOM

Le modèle Zygos est un outil de modélisation Pluie-Débit conceptuelle au moyen de réservoirs (Fig.1) représentant schématiquement le sol et le sous-sol. L'écoulement total a différentes sources : un écoulement direct à partir de la pluie, un écoulement issu du réservoir sol et un écoulement issu du réservoir souterrain (Sogreah, 2007). La simulation du sous bassin versant constitue une approche semblable du modèle de Thornthwaite (Equipe de recherche ITIA, 2010).

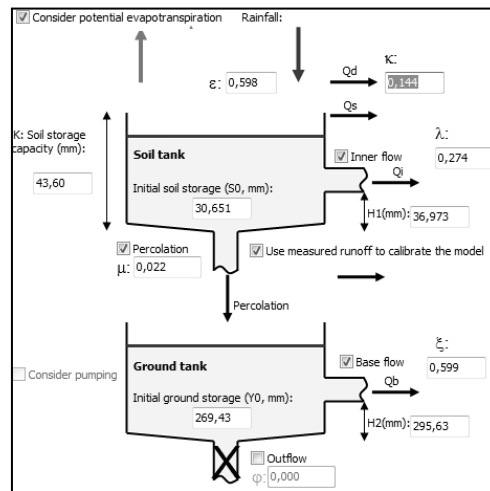


Figure 1 : Structure du modèle à réservoirs (Sogreah, 2007)

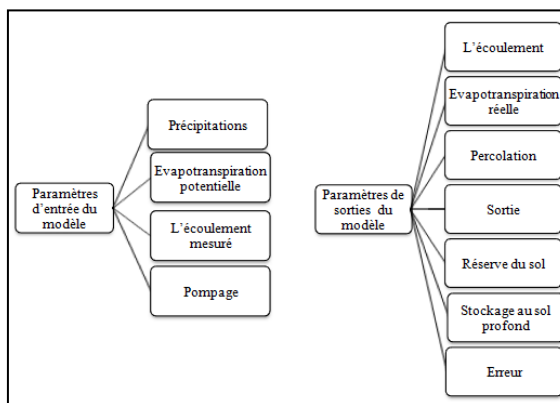


Figure 2 : Paramètres du modèle

Le modèle Zygos comporte de nombreux paramètres (Fig.2) pour définir la répartition des écoulements et l'infiltration (Fig.1).

Les paramètres de calages sont définis comme suit :

- $\varepsilon$  → Précipitations
- $h$  → Écoulement
- $\kappa$  → Réserve facilement utilisable
- $\lambda$  → Écoulement hypodermique
- $\gamma$  → Percolation
- $\xi$  → Écoulement de base
- $\Phi$  → Évaporation souterraine
- $S_0$  → Réserve initiale RFU
- $Y_0$  → Réserve initiale d'eau souterraine

### LOCALISATION DE LA ZONE D'ETUDE

Le bassin versant d'oued Sikkak (Fig.3) d'une superficie d'environ 241 Km<sup>2</sup>, se situe au Nord de la ville de Tlemcen et s'étend en grande partie dans les communes chefs lieu (Tlemcen, Mansourah, Chetouane et Henaya).

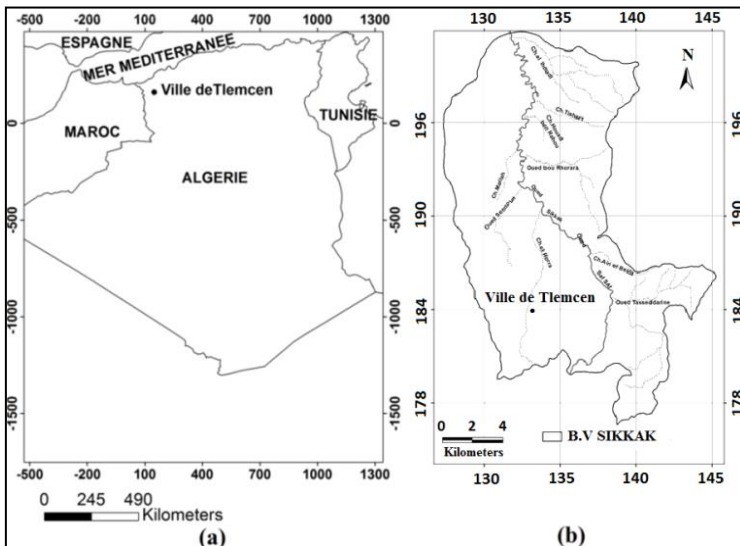


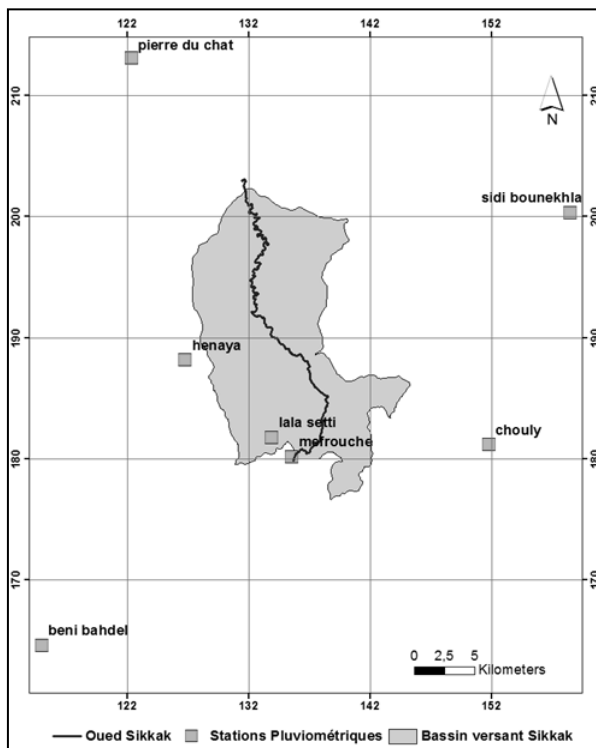
Figure 3 : (a) Localisation de la ville de Tlemcen (b) Localisation bassin versant d'oued Sikkak

## PARAMETRES D'ENTREES DU MODELE

Le modèle ZYGOS comporte de nombreux paramètres d'entrées intégrant l'écoulement de surface, la pluviométrie, l'ETP et les prélèvements éventuels dans les aquifères souterrains sous la forme de pompage.

### Précipitations

L'analyse de la variabilité des précipitations est réalisée sur la base des données de 07 postes d'observation (Tableau.1) selon leurs situations géographiques (Fig.4) et les besoins de l'étude. Toutes ces stations sont gérées par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH).



**Figure 4 : Localisation des stations Pluviométriques**

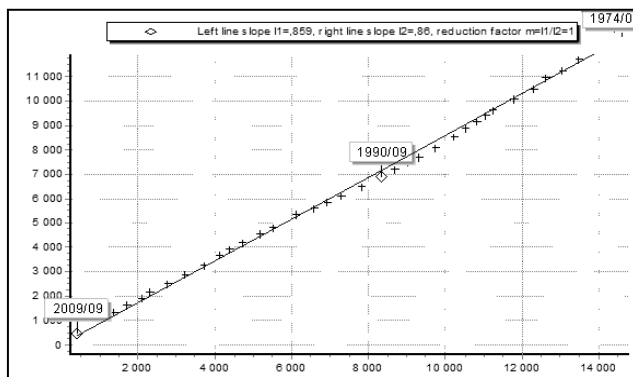
**Tableau 1 : Caractéristiques des stations Pluviométriques**

Code	Nom	X Lambert (m)	Y Lambert (m)	Altitude	Période d'observation
160403	Beni Bahdel	115	164,6	666	1971-2010
160610	Sidi Bounekhla	158,5	200,4	976	1974-2010
160516	Hennaya	126,8	188,2	515	1974-2010
160701	Mefrouche	135,6	180,2	1100	1971-2010
160705	Lala Setti	133,9	181,8	1007	1973-2010
160802	Pierre du chat	122,4	213,2	50	1971-2010
160601	Chouly	151,8	181,2	725	1971-2010

**Homogénéisation des données par la méthode des « doubles-cumuls »**

On peut vérifier l’homogénéité des séries par la méthode des « doubles-cumuls ».Le principe consiste à effectuer la vérification des proportionnalités des valeurs mesurées à deux stations. Nous traçons un graphe des quantités en abscisse  $X(t) = \sum_{i=0}^t \chi(i)$  (Valeurs cumulées de la station de référence supposée correcte) et en ordonnée  $Y(t) = \sum_{i=0}^t y(i)$  (Valeurs cumulées de la station à contrôler). Si les points forment une ligne droite, on peut conclure que les séries sont homogènes. Dans le cas contraire, on a des segments de droite de pentes différentes  $m_1$  et  $m_2$ .On effectue alors des modifications en multipliant les valeurs par le rapport  $m = (m_1/m_2$  ou  $m_2/m_1)$ .

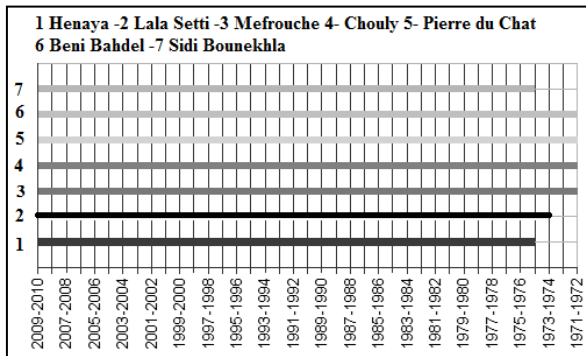
C’est la station pluviométrique de Beni Bahdel qui a été choisie comme station de référence. Ses données s’étalent sur une longue période (1971-2010). D’après l’analyse du graphe (Fig.5) on n’observe pas un changement de pente ou de valeurs très écartées des données (Idem pour les autres stations). On peut conclure que toutes les stations sont homogènes.



**Figure 5 : Homogénéisation de la station Sidi Bounekhla**

**Période de base des observations**

Pour le calcul des précipitations moyennes mensuelles, il est nécessaire si possible de choisir une période unique pour toutes les stations afin d'éviter les variations entre les périodes sèche et humide. En se référant au graphique à barre (Fig.6), il apparaît que la période optimale soit : 1974-2010.



**Figure 6 : Graphe représentant les périodes d'observation**

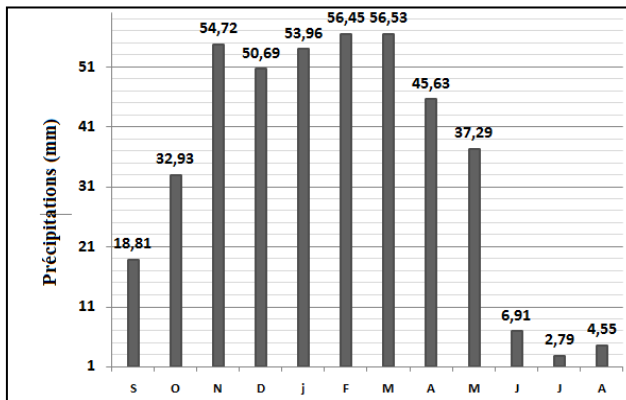
**Évaluation des précipitations mensuelles par méthode de la moyenne arithmétique**

$$P \text{ moyenne} = \sum P_i / n$$

Où ;

P<sub>i</sub> : Pluviométrie moyenne mensuelles de chaque station en mm

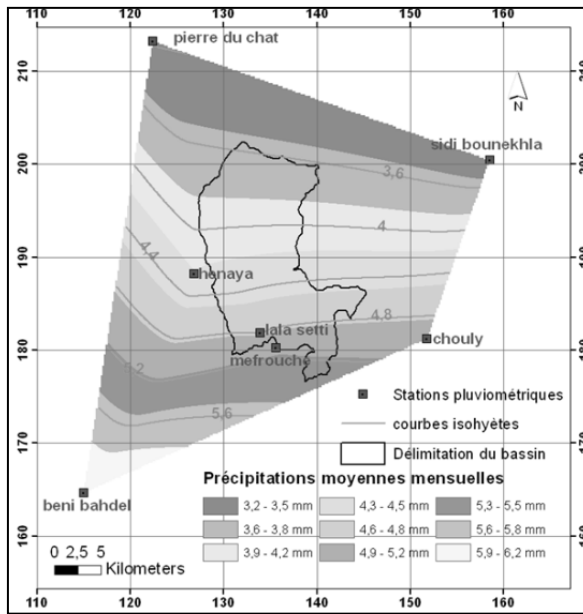
n : Nombre de station utilisées



**Figure 7 : Précipitations moyennes mensuelles (moyenne arithmétique)**

**Évaluation des précipitations mensuelles par la méthode des isohyètes**

Cette méthode donne d'excellents résultats sur la base des superficies comprises entre les courbes d'isovaleurs des modules pluviométriques (exemple ; (Fig.8) pour le mois d'août).



**Figure 8 : carte d'isohyètes mois d'août.**

$$P \text{ moyenne} = \sum P_i A_i / A$$

Où ;

$A_i$  : Superficies comprises entre deux isohyètes (Km<sup>2</sup>)

$P_i$  : Pluviométrie inter isohyètes (mm)

$A$  : Surface totale du bassin versant (Km<sup>2</sup>)

On a effectué les mêmes calculs pour les autres mois de l'année (Fig.9).un minimum est observé au mois de juillet et le maximum au mois de mars.



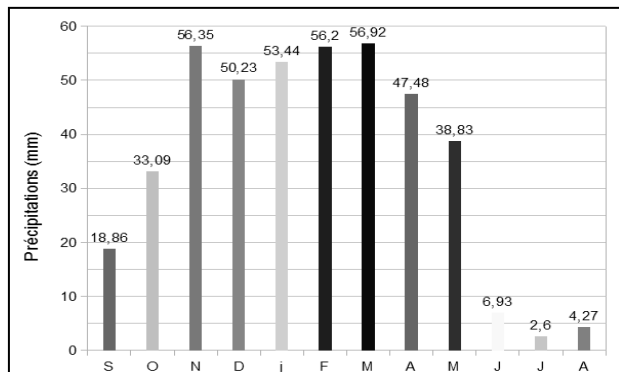


Figure 9 : Précipitations moyennes mensuelles (méthode des isohyètes)

### Évapotranspiration potentielle

Les calculs sont faits automatiquement par le logiciel *Hydrognomon* avec la formule de Thornthwaite. En raison de sa simplicité, c'est une des formules les plus utilisées pour le calcul de l'évapotranspiration (Charles Allegrini et al, 1995).

### Température

Pour l'étude de la température du bassin versant de Sikkak, nous avons pu disposer des températures minimales, maximales et moyennes de la station météorologique de Zenata pour la période 1981-2010 (Fig.10).

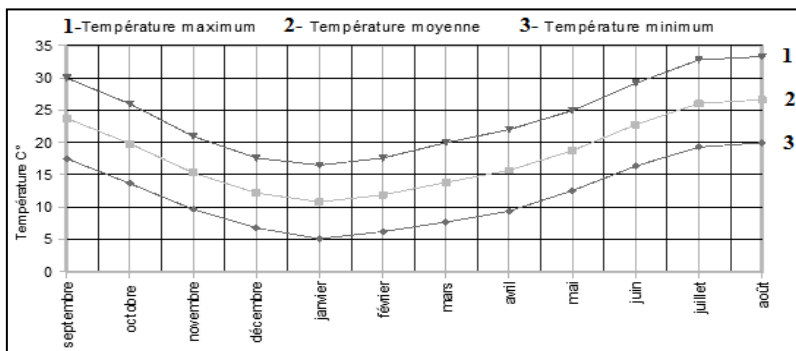


Figure 10 : Températures moyennes mensuelles (1981-2010, Zenata).

On remarque que l'écart entre le maximum et le minimum est presque constant. Notre région est caractérisée par un été chaud et sec et un hiver relativement doux. Le mois le plus froid est celui de janvier avec une température moyenne de 10,8°C. Le mois le plus chaud est celui d'août avec une température moyenne de 26,6°C.

### Calcul de l'évapotranspiration potentielle par la formule de Thornthwaite

$$ETP = 16 \left( \frac{10T}{I} \right)^a \cdot K \quad (\text{mm})$$

$$a = 1,6 \left( \frac{I}{100} \right) + 0,5$$

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

$$i = (t / 5)^{1,514}$$

Où ;

T : Température moyenne du mois en °C

K : Coefficient correctif qui dépend de la latitude du bassin versant

I : Indice thermique annuel

i : Indice thermique mensuel

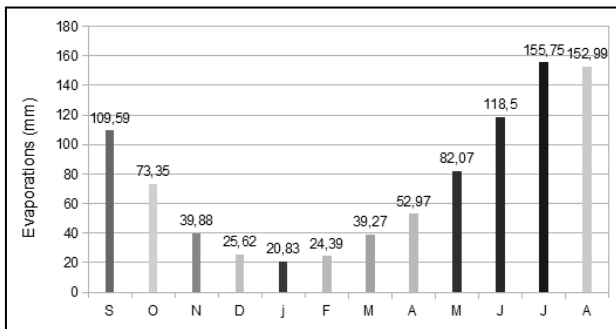


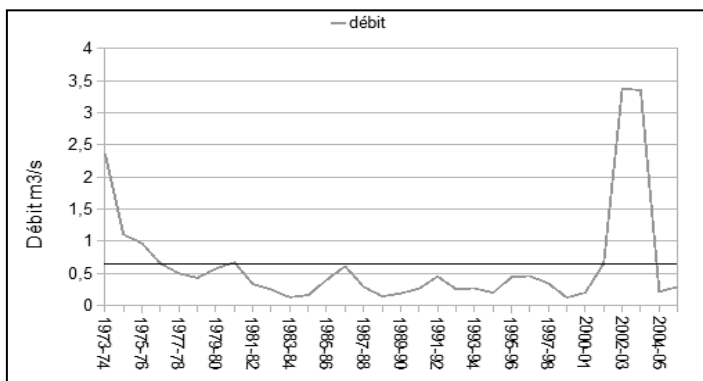
Figure 11 : Variations de l'évapotranspiration potentielle du bassin versant de Sikkak.

### L'écoulement mesuré

En ce qui concerne l'étude du débit nous avons fait référence aux données des stations hydrométriques d'Ain Youcef (1972-1990) et Sidi Moussa (1991-

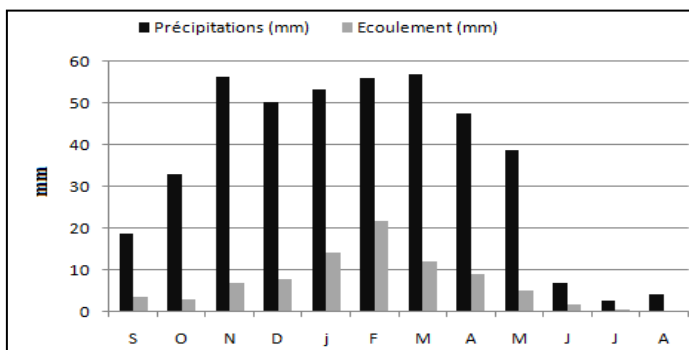
2006). Ces stations sont gérées par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH).

Le bassin versant de Sikkak ne draine en moyenne que 0,674 m<sup>3</sup>/s (Fig.12). Il est relativement faible. Ceci s'explique par la présence du barrage du Mefrouche ainsi que le caractère karstique prépondérant des formations géologiques en amont (Bouanani, 2004).



**Figure 12 : Variations interannuelles du module d'oued Sikkak.**

On remarque (Fig.13) un accroissement de la lame d'eau écoulée du mois de septembre jusqu'au mois de février et une diminution à partir du mois de mars, avec un retard de la réponse hydrologique. Ceci s'explique par les formations karstiques de la région, qui favorisent l'infiltration. Lorsque le niveau piézométrique augmente, le ruissellement devient plus important.



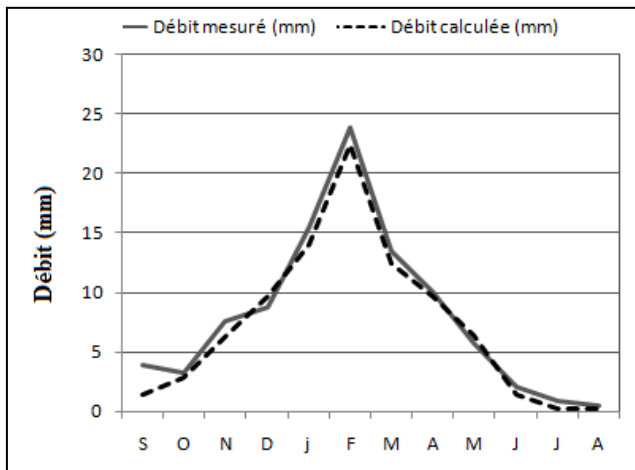
**Figure 13 : Variations mensuelles de la lame d'eau écoulée et précipitée.**

**Tableau 2 : Résumé des paramètres d'entrées du modèle.**

Mois	ETP (mm)	P (mm) moyenne arithmétique	P (mm) isohyètes	Écoulement Mesuré (mm)
S	159,13	18,81	18,86	3,61
O	135,34	32,93	33,09	2,98
N	105,13	54,72	56,35	6,94
D	93,72	50,69	50,23	7,95
j	91,33	53,96	53,44	14,12
F	92,55	56,45	56,2	21,8
M	119,71	56,53	56,92	12,26
A	134,8	45,63	47,48	9,15
M	163,29	37,29	38,83	5,24
J	181,94	6,91	6,93	1,84
J	200,65	2,79	2,6	0,75
A	191,7	4,55	4,27	0,43

### PARAMETRES DE SORTIE DU MODELE

Le calage automatique effectué par le logiciel avec un pas mensuels, montre un bon synchronisme entre la courbe de débit simulée et mesurée en utilisant la pluviométrie moyenne mensuelle par la méthode des isohyètes (Fig.14). Par contre un mauvais calage avec la moyenne arithmétique (Fig.15).



**Figure 14 : Comparaison entre les apports observés et les apports obtenus lors de l'exercice de calage (méthode des isohyètes).**

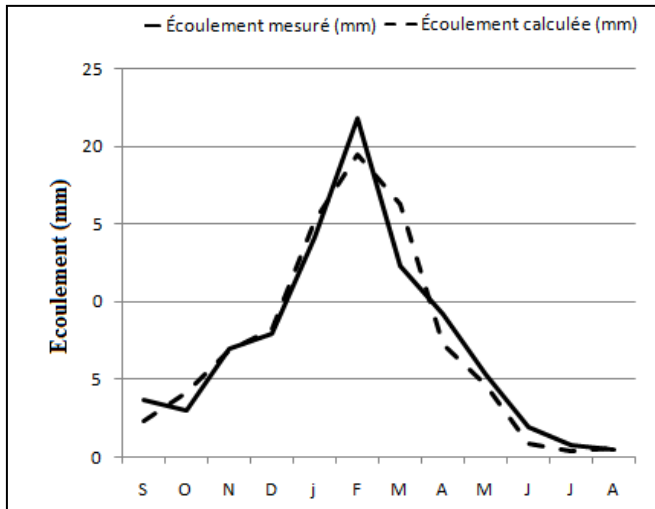


Figure 15 : Comparaison entre les apports observés et les apports obtenus lors de l'exercice de calage (méthode moyenne arithmétique).

Les données de sorties (Tableau.3) sont générées en fonction des paramètres du modèle (Fig.2) après simulation.

Tableau 3 : Paramètres de sorties après calage.

Mois	Écoulement calculée (mm)	Evapotranspiration réelle (mm)	Recharge (mm)
S	2,29	14,4	0,26
O	4,02	24,37	0,73
N	6,85	34,88	2,05
D	7,97	25,62	3,98
J	14,25	20,83	7,62
F	21,96	24,39	8,51
M	12,4	39,12	8,25
A	9,22	47,72	6,59
M	5,23	49,64	3,68
J	0,84	19,6	1,05
J	0,32	4,52	0,15
A	0,52	3,69	0,06
<b>Total</b>	<b>85,87</b>	<b>308,78</b>	<b>42,93</b>

## **EQUATION DU BILAN HYDRIQUE**

L'équation du bilan hydrologique au cours d'une période peut s'écrire de la façon suivante :

$$P=R+ETR+E-DS$$

Où ;

P : précipitations (mm)

R : recharge (mm)

ETR : évapotranspiration réelle (mm)

E : écoulement mesuré (mm)

DS : variation du stock (mm)

Nous constatons que pour une pluviométrie moyenne annuelle de 425.2 mm avec une variation de stock de 13.6, la recharge représente 10% des précipitations.

## **CONCLUSION**

L'application a été testée avec succès, elle démontre un très bon calage entre les débits mesurés et calculés par pas mensuel avec une rapidité d'exécution très intéressante. La méthode d'optimisation des paramètres est de grande qualité (evolutionary annealing simplex algorithm) (Sogreah, 2007). Cela exprime la bonne performance du modèle zygos.

La lame d'eau moyenne annuelle précipitée sur l'ensemble du bassin versant est estimée à 424,5 mm pour la période 1974-2010, l'évapotranspiration représente 72% des précipitations, une quantité importante qui est probablement due à la sur irrigation, au couvert végétal important et à la température régional. La recharge est relativement faible ceci s'explique par la valeur importante des quantités d'eau évaporé et les faibles pluviométries enregistrées.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- BAZIE P., DIENG B. ET ACKERER P. (1995) : Bilan des transferts verticaux d'eau en zone non-saturée sous climat soudano-sahélien .application à l'estimation de la recharge des nappes. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, vol. 8, n° 2, 1995, p. 237-260.
- BAZIÉ P. (1993). Etude expérimentale et modélisation des transferts verticaux d'eau en milieu poreux non-saturé : application à la recharge des nappes de socle en climat soudano-sahélien. Thèse de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg (F), 173 p.
- BOUANANI A. (2004) : Hydrologie, transport solide et modélisation etude de quelques sous- bassins de la Tafna (nw – algérie), Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen.
- ALLEGRI C. ET BASTIEN Y. (2011) : Vocabulaire forestier : écologie, gestion et conservation des espaces boisés. Institut pour le développement forestier Paris.
- EQUIPE DE RECHERCHE ITIA. (2010) : documentation théorique pour logiciel hydrognomon. Université nationale technique d'Athènes.
- MILVILLE F. (1990). Contribution à l'étude des mécanismes de la recharge naturelle des aquifères par les pluies en climat semi aride. Application au site de Barogo au Burkina Faso. Thèse Université P. et Marie Curie, Paris VI.
- NAMA CONSULTING ENGINEERS.AND PLANNERS S.A. (2007): integrated management of hydrosystems in conjunction with an advanced information system odysseus project .Université nationale technique d'Athènes.
- SOGREAH. (2007): integrated management of hydrosystems in conjunction with an advanced information system: odysseus project Athènes.