



Université d'Oran 2
Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers
MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Magister
En Sciences de la Terre
Option : Hydrogéologie

**ETUDE HYDROLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE
DU BASSIN VERSANT DE L'OUED SAIDA**

Présenté et soutenu publiquement par :
M^{elle} DAHMANI Meriem Nadia

Devant le jury composé de :

BENALI Abdelmadjid	Professeur	Université d'Oran 2	Président
SAFA Aissa	M.C.A.	Université d'Oran 2	Rapporteur
MANSOUR Hamidi	Professeur	Université d'Oran 2	Examineur
STAMBOUL Madani	Professeur	Université de Laghouat	Examineur

Année 2016

REMERCIEMENTS

Tout d'abord je tiens à remercier le bon dieu pour m'avoir donné le courage, la force et la volonté pour réussir et de m'avoir éclairci le chemin tout au long de ma vie.



À la mémoire de mes chers parents ;



Aucune dédicace ne serait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous.

Tous les mots du monde ne sauraient exprimer l'immense amour que je vous porte, ni la profonde gratitude que je vous témoigne pour tous les efforts et les sacrifices que vous n'avez jamais cessé de consentir pour mon instruction et mon bien-être.

Je vous dois ce que je suis aujourd'hui grâce à votre amour, à votre patience et vos innombrables sacrifices.

Que Dieu, le miséricordieux, vous accueille dans son éternel paradis.

Tous mes respects et ma reconnaissance vont à ma famille, source de ma motivation et de mes espoirs, je leur dédie mon travail.

Je remercie Monsieur A. SAFA, Doyen de la faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers de l'Université d'Oran II, d'avoir proposé le sujet et pour avoir encadré et suivi mon travail.

Je tiens à remercier Monsieur A. BENALI, Professeur à la faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers de l'Université d'Oran II, qui m'a fait l'honneur de présider le jury.

Mes sincères remerciements vont également à Mr H. MANSOUR et Mr M. STAMBOUL, qui mon fait grand Honneur d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Je remercie vivement Monsieur O. Dari, pour son aide précieuse qu'il m'a offerte.

A Tous Mes enseignants tout au long de mes études.

Je n'oublie pas non plus tous mes amis qui m'ont toujours encouragé.

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 !!



« Etude hydrologique et hydrogéologique du bassin versant de l’oued Saida »

Résumé :

Le bassin versant de l’Oued Saida (644 Km²) a fait l’objet d’une modélisation pluie-débit, par l’utilisation des modèles GR (Génie Rural) à pas de temps Annuel et mensuel.

Dans un premier temps, nous avons cherché à caractériser quelques facteurs en particulier physiques, géologiques et climatiques régissant l’écoulement. Ensuite une étude hydrologique basée sur le traitement des données hydrométriques relatives à une période de 23 ans a été utilisée. La dernière phase de ce travail consiste en l’élaboration des modèles pouvant rendre compte de la relation pluie-débit. A cet effet, nous avons essayé deux approches assez différentes : une empirique de type boîte noire sous la forme $débit = f(pluie)$ où f est déterminée par une régression effectuée sur les chroniques pluies-débites. L’autre conceptuelle globale représentée par le modèle du Génie Rural.

Les résultats obtenus par la simulation de la transformation de la pluie en débit par l’utilisation du modèle du Génie Rural GR1A et GR2M sont plus satisfaisants que la modélisation par approche corrélatoire. En effet le modèle GR prend en compte, d’une part, la succession chronologique des phénomènes et, d’autre part, l’influence des paramètres aussi bien climatiques (évapotranspiration) que celle physico-hydrogéologiques du bassin versant (humidité du sol et échanges externes).

Mots clés : Modélisation pluie-débit, Oued Saida, GR1A, GR2M .

« Hydrological and hydrogeological study of the watershed of Oued Saida »

Abstract :

The Oued Saida watershed (644 km²) was the purpose of a rainfall-discharge modeling, by the use of the GR (Genie Rural) models with two time intervals annual and Monthly.

At first, we tried to characterize some factors; in particular physical, geological and climatic; governing the flow. Then a hydrological study based on the processing of hydrometric data for a period of 23 years was used. The last phase of this work consists of the elaboration of the models that can take into account the rainfall-runoff relationship. For that purpose, we tried two quite different approaches: one empirical – black box type – in the form of $flow = f(rainfall)$ where f is determined by a regression done on rainfall-discharge history. The other represented by the Genie Rural comprehensive conceptual model.

The results obtained by simulating the transformation of rainfall into runoff by the use of the Genie Rural model GR1A GR2M and more satisfying than modeling by correlative approach. Indeed, on the one hand, the GR model takes into account the chronological succession of phenomena and, on the other hand, the influence of the climatic (evapotranspiration) as well as that of the watershed physical and hydrogeological (soil moisture and external exchanges) parameters.

Key words: rainfall-runoff modelling, Oued Saida, GR1A, GR2M.

" الدراسة الهيدرولوجية و الهيدروجيولوجية لحوض واد سعيدة "

الملخص:

إن الحوض الهيدروغرافي لواد سعيدة (644 كلم²) ، كان موضوع اهتمام لدراسة العلاقة الموجودة بين التساقط و التدفق باستعمال نموذج الهندسة الريفية.

في البداية، سعينا لتحديد خصائص عدة عوامل مادية، جيولوجية و مناخية التي تتحكم في التدفق. ثم استخدمت الدراسة الهيدرولوجية على أساس معالجة البيانات الهيدرومترية لمدة 23 عاما. المرحلة الأخيرة من هذا العمل هو تطوير النماذج التي يمكن أن تشكل العلاقة بين الأمطار و السيول. تحقيقا لهذه الغاية، حاولنا استخدام طريقتين مختلفتين نوعا ما : تجربة الصندوق الأسود من نوع تدفق = و (المطر) مستعملة على معطيات التساقط و التدفق. الطريقة الأخرى يمثلها النموذج المفاهيمي الشامل للهندسة الريفية. النتائج المحصل عليها من دراسة تحول المطر إلى تدفق من خلال استخدام نموذج من الهندسة الريفية GR1A و GR2M أكثر مرضية من نموذج العلبة السوداء.

بالفعل ، إن نموذج GR يأخذ بعين الاعتبار التسلسل الزمني للظواهر من جهة و تأثير العوامل المناخية (التبخر) و كذا العوامل الفيزيولوجية للحوض من جهة أخرى (رطوبة التربة و التبادلات الخارجية).

الكلمات المفتاحية : نموذج مطر- تدفق ، واد سعيدة ، GR1A،GR2M .

SOMMAIRE

Remerciements	
Résumé	
Sommaire	
Introduction générale	1

PREMIERE PARTIE PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Chapitre I Etude physico-géographique du Bassin de l'Oued Saida

I - Situation géographique de la zone d'étude	3
II - Présentation du bassin versant de l'oued Saida.....	5
III- Caractéristiques morphométriques du bassin versant.....	6
1- Caractéristiques de formes.....	6
1-1 Coefficient de compacité de Gravelius.....	6
1-2 Rectangle équivalent	6
2- Caractéristiques du relief.....	7
2-1 Courbe hypsométrique.....	8
2- 2 Altitudes caractéristiques.....	9
2-3 Indices de pente.....	10
a- Pente moyenne.....	10
b- Indice de pente globale I_g	11
c- Indice de pente de Roche I_p	11
d- Dénivelée spécifique.....	12
3- Réseau hydrographique.....	13
3-1 Hiérarchisation du réseau.....	13
3-2 Densité de drainage D_d	14
3-3 Fréquence des cours d'eau (F).....	15
3-4 Coefficient d'allongement (E).....	15
3-5 Rapport de confluence (R_c).....	15
3-6 Rapport de longueur.....	16
3-7 Coefficient de torrentialité.....	17
3-8 Temps de concentration.....	17
IV- Géomorphologie	18
1- Morphologie	18
a)- Zones montagneuses	18
b)- Zone platoïde	18
c)- Une vallée (Oued Saida).....	18
2- Topographie	18
3- Sols.....	19
4- Occupation de sol	19
V- Conclusion	21

Chapitre II

Géologie et hydrogéologie

I - ETUDE GEOLOGIQUE ET STRATIGRAPHIE	22
1) Introduction.....	22
2) Géologie et lithologie.....	22

3) Stratigraphie	24
3.1) Socle primaire.....	25
3.2) Mésozoïque.....	25
3.2.1) Trias	25
3.2.2) Le Jurassique.....	25
- Le Jurassique inférieur et moyen.....	25
- Le Jurassique moyen (Dogger).....	26
- le Callovo- Oxfordien et Lusitanien.....	26
- Le Kimméridgien.....	26
3.2.3) Crétacé.....	26
3.3) Cénozoïque.....	27
3.3.1) Le Néogène et le Quaternaire	27
4) Cadre structural et tectonique	27
4.1) Structure générale	27
4.2) Fissuration.....	28
5) Répartition lithologique et son influence sur l'écoulement.....	29
II- CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE	30
II-1 Réservoirs potentiels	30
II-2 Description des aquifères.....	30
A) Aquifère du Jurassique inférieur.....	30
B) Aquifère du Bajo-Bathonien.....	30
C) Aquifère du Callovo-Oxfordien.....	31
D) Aquifère du Lusitanien.....	31
E) Aquifère du Kimméridgien.....	31
F) Aquifères du Crétacé.....	31
1- Aquifère du Barrémien.....	31
2- Aquifère du Sénonien.....	31
G) Aquifères du Tertiaire et du Plio-Quaternaire.....	32
1) Aquifère du Tertiaire continental.....	32
2) Aquifères du Plio-Quaternaire.....	32
II-3 Principales nappes	34
A) Nappe superficielle	34
B) La nappe karstique	35
II-4 Phénomène de fissuration et de karstification	35
II-5 Conditions aux limites	36
a) Limites latérales	36
b) Limites verticales	36
II-6 Piézométrie	37
1- Campagnes piézométriques (Février, 1992 et Mars, 2001).....	37
2- Evolution de la piézométrie entre 1992 et 2001.....	38
III- POTENTIALITE DES AQUIFERES DU BASSIN VERSANT DE L'OUED SAIDA	40
A/Introduction.....	40
B/ Constitution d'une base de données pour la réalisation de la carte de potentialité des eaux souterraines.....	41
1. Réalisation des cartes thématiques de base.....	42
• Carte des pentes	42
• Carte de perméabilité	43
• Carte de densité de drainage	44
• Carte de la densité de fracturation	46
2. Réalisation de la carte de potentialité des eaux souterraines de la région d'étude	47
C/ Résultats et discussions.....	50
IV- Conclusion	51

Chapitre III Climatologie

I- INTRODUCTION.....	52
II- PARAMÈTRES CLIMATIQUES.....	52
1 - Etude des précipitations.....	53
1.1- Critique et homogénéisation des données pluviométriques.....	54
1.1.1 - Comblement des lacunes par extension des données : méthode de la régression linéaire.....	54
1.2- Ajustement des précipitations annuelles à une loi normale.....	58
1.3- Répartitions des précipitations moyennes annuelles.....	61
1.4- REPARTITION MENSUELLE DES PRECIPITATIONS.....	61
1.5- Précipitations saisonnières.....	62
1.6- Détermination de la lame d'eau précipitée.....	63
2-Vents.....	64
3- Humidité.....	65
4- Températures.....	66
5- Régime climatique.....	67
5.1- Courbe pluviothermiques.....	67
5.2- Indices de De Martonne.....	68
5.3- Indices de MORAL.....	69
6- Déficit d'écoulement.....	70
6.1- Méthode de TURC.....	70
6.2- Méthode de COUTAGNE.....	70
6.3- Méthode de P. VERDEIL.....	71
6.4- Méthode de WUNDT.....	72
6.5- Méthode de THORNTHWAITE.....	73
6.5.1- Evapotranspiration potentielle.....	73
6.5.2- Evapotranspiration réelle (E.T.R.).....	73
6.6- Discussion des résultats.....	74
III- Conclusion.....	76

DEUXIEME PARTIE HYDROLOGIE

Chapitre I Hydrologie

I . INTRODUCTION.....	77
II. ANALYSE DES DÉBITS.....	78
II.1. Débits mensuels.....	78
II.1.1 - Variation mensuelle des débits en fonction des précipitations.....	79
II.1.2 - Application de la méthode de corrélation linéaire.....	80
II.1.3 - Variations Saisonnières.....	81
A- Les régimes saisonniers et les coefficients mensuels des débits.....	81
B- Coefficient de variation.....	83
II.2. Les variations saisonnières des débits.....	84
II.3 DEBITS MOYENS ANNUELS.....	84
II.3.1 - Variation des débits annuels moyens bruts (m^3/s).....	85
II.3.2. Variations des débits annuels moyens spécifiques ($L/s/km^2$).....	89
II.3.3- L'irrégularité inter annuelle des modules et leur répartition statistique.....	89
II.3.3.1 - Hydraulicité de l'Oued Saïda.....	90
II.3.3.2 - Coefficient d'immodération (R).....	92

II.3.3.3 - Coefficient de variation (Cv).....	92
II.3.4 - Bilan moyen annuel de l'écoulement.....	92
II.2.5- Eude statistique des débits annuels.....	93
II.4 - Etude des débits maximums journaliers.....	95
II.4.1- Analyse fréquentielle des débits maximums journaliers.....	95
• Choix du type d'ajustement.....	96
III- RELATION PLUIE-DEBIT.....	98
1- Corrélation annuelle.....	98
2- Corrélation mensuelle.....	102
IV. CONCLUSION.....	104

Chapitre II

Modélisation hydrologique

I. Introduction.....	105
II. Historique des modèles pluie-débit.....	105
III. Objectif de la modélisation.....	108
IV. Paramètres des modèles globaux.....	108
V. Les modèles : classifications et exemples.....	109
a) modèle déterministe.....	110
b) modèle stochastique.....	110
c) Modèle à base physique.....	110
d) Modèles conceptuels et empiriques.....	110
e) Modèle global ou distribué.....	110
VI. Modèles génie-rural GR.....	110
1. Description.....	110
2. Principales caractéristiques des modèles GR.....	111
VII. Dimensions des variables P, ETP, et Q.....	112
1. Pluie (P).....	112
2. L'évapotranspiration potentielle (ETP).....	112
a)-Formule de Turc (1955).....	112
3. Débit (Q).....	112
VIII. Calage et validation d'un modèle.....	112
IX. Choix d'un critère de validation.....	113
X. Description du modèle pluie-débit annuel GR1A.....	113
1. Introduction.....	113
2. Description mathématique.....	114
XI. Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M.....	115
1. Introduction.....	115
2. Description mathématique.....	115
XII. Application du modèle GR.....	119
1. Modèle annuel GR1A.....	119
1.1. Calage du modèle.....	119
1.2. Validation du modèle.....	124
2. Modèle mensuel GR2M.....	126
2.1. Calage du modèle.....	126
2.2. Validation du modèle.....	134
3. Conclusion.....	136
CONCLUSION GENERALE.....	137
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	140
LISTE DES FIGURES.....	145
LISTE DES TABLEAUX.....	148
ANNEXES.....	151

Introduction Générale

Les ressources en eaux de surface et souterraines sont l'une des richesses capitales du pays. L'eau reste une ressource limitée et vulnérable qui est indispensable à la vie, au développement et à l'environnement. Sa protection et sa bonne gestion sont donc une nécessité.

Les pénuries d'eau, par exagération, ont été plus souvent associées à certains phénomènes naturels (désertifications, changements climatiques) qu'à des erreurs humaines comme le souligne un expert: « *il existe aujourd'hui une crise de l'eau mais cette crise n'est pas due à son insuffisance à satisfaire nos besoins ; elle résulte plutôt d'une si mauvaise gestion de cette ressource que des milliards de personnes-et l'environnement-en souffrent grandement* » (J. Burton, 2001 in S. AFFOUN, 2006).

L'importance de l'eau en tant que support de vie et de facteur régulateur du développement d'un pays est universellement reconnue. Aussi est-il nécessaire de la quantifier et de la gérer aussi rigoureusement que possible. Dans ce contexte, on comprend alors aisément la nécessité de mettre au point des outils d'aide à la gestion et à la décision. Parmi ces outils, les modèles hydrologiques qui ont vu le jour au cours des vingt dernières années, surtout en regard de la relation pluie - débit.

La simulation de la transformation de la pluie en débit du bassin versant par des modèles mathématiques est devenue très répandue grâce à l'accroissement des capacités de calcul et l'amélioration de l'outil informatique. Parmi le nombre de modèles existant, les modèles conceptuels ou empiriques globaux sont les plus performants, ils présentent le lien entre la pluie et le débit par des agencements variés de réservoirs.

Dans ce cadre, une étude intitulée " Etude hydrologique et hydrogéologique du bassin versant de l'oued Saida " nous a été confiée. Elle vise plusieurs objectifs qui sont :

- Caractériser le bassin versant de l'Oued Saida par l'analyse de quelques facteurs en particulier physiques, géologiques et climatiques régissant l'écoulement ;
- Une étude hydrologique basée sur le traitement des données hydrométriques ;

- Etablissement d'une modélisation corrélatrice et une modélisation à l'aide d'un modèle pluie-débit par la transformation de la pluie en débit à deux pas de temps Annuel et mensuel.

Le mémoire s'articule en cinq chapitres :

Le premier chapitre est basé sur l'étude morphologique à travers l'identification et la quantification des paramètres liés au bassin versant, en particulier le réseau hydrographique, le relief et leurs influences sur l'écoulement.

Le deuxième chapitre synthétisera la géologie et l'hydrogéologie de la région. Les descriptions lithostratigraphiques et structurales permettront de distinguer les différents réservoirs aquifères et de définir les aquifères les plus représentatives de la région.

Nous abordons en troisième chapitre, l'étude climatologique de la région ayant pour but de dégager les caractéristiques climatiques, d'établir le bilan hydrologique et d'estimer la part d'eau infiltrée pour alimenter les réservoirs souterrains.

Nous présenterons dans le quatrième chapitre une étude hydrologique basée sur le traitement des données hydrométriques.

Enfin, nous évoquerons dans le cinquième chapitre des généralités sur la modélisation, et application du modèle GR à pas de temps annuel et mensuel. Notre objectif principal est d'apprécier le fonctionnement d'un modèle de simulation des débits, celui du Génie Rural (GR1A, GR2M).

Enfin une conclusion générale sera donnée à la fin du travail.

PREMIERE PARTIE

Présentation de la zone d'étude

CHAPITRE I
ETUDE PHYSICO-GEOGRAPHIQUE
DU BASSIN DE L'OUED SAIDA

I - SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

La wilaya de Saïda occupe une position centrale dans l'Ouest de l'Algérie, elle est limitée (Fig. 1):

- au Nord, par la wilaya de Mascara,
- au Sud, par la wilaya d'El Bayadh,
- à l'Ouest, par la wilaya de Sidi Bel Abbès,
- à l'Est, par la wilaya de Tiaret.

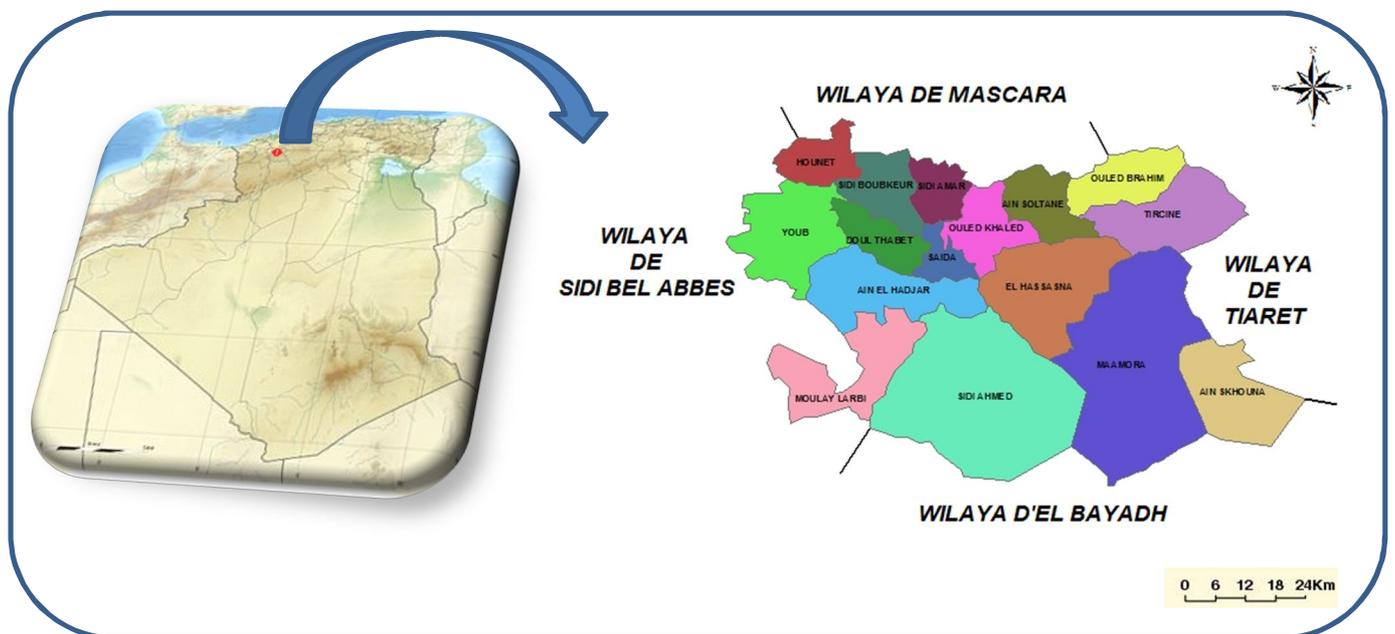


Fig. 1: Localisation de la wilaya de Saïda

Saïda est le chef-lieu d'une wilaya de 330 641 habitants (Recensement Général de la Population et de l'Habitat, RGPH 2008) composée de 16 communes regroupées en 06 daïras et d'une superficie de 6 631 Km². Elle est surnommée la ville des eaux, à cause de ses sources.

Le secteur d'étude est situé dans le sous-bassin du plateau de Saïda. Orienté Sud-Nord, en exceptant la partie la plus au Nord qui est de direction (SE-NW). Il constitue une limite naturelle entre les monts de Daïa et ceux de Saïda. C'est un domaine de hauts plateaux, formant l'avant-pays de la chaîne alpine d'Algérie.

D'une manière plus précise, la région étudiée est limitée (fig.2):

- au Nord, par l'oued Taria et la plaine de Ghriss,
- à l'Est, par les monts de Saïda et le djebel Sidi Youssef,
- à l'Ouest, par les monts de Daïa,
- au Sud, par la dépression de Chott Chergui.

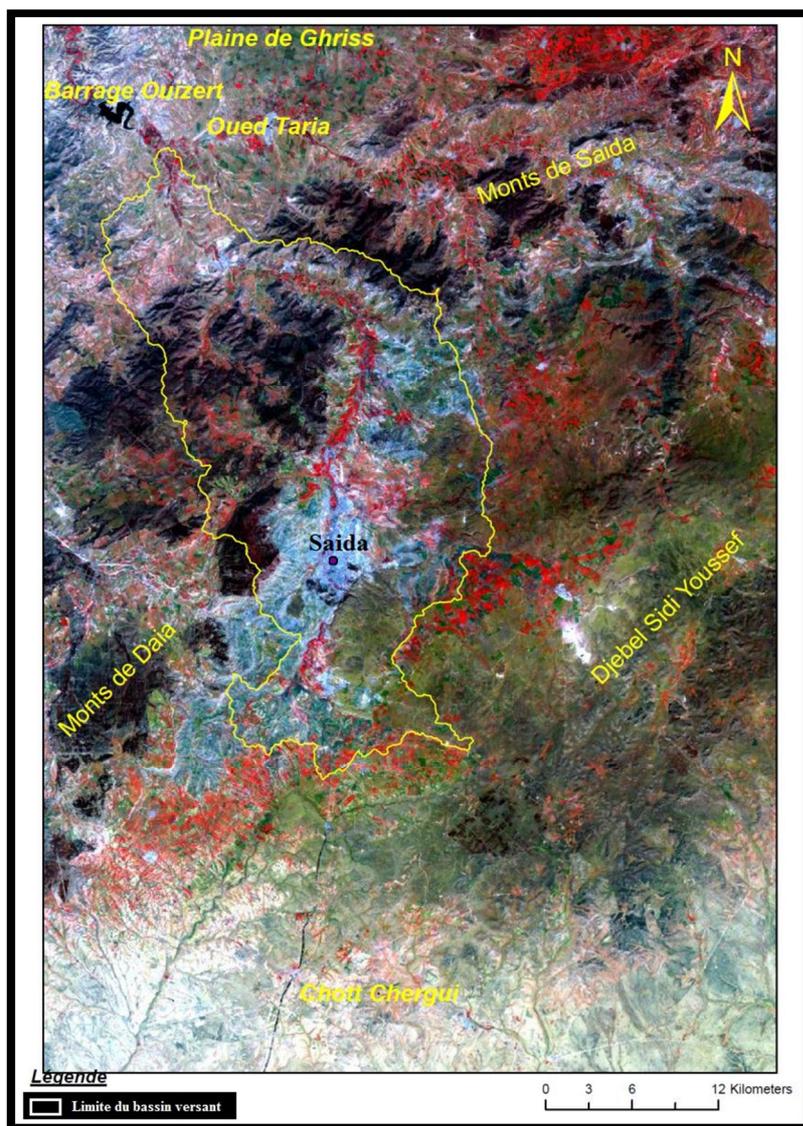


Fig. 2 : Localisation de la région d'étude (Image LANDSAT, prise en 2012) (Source CTS).

II - PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DE L'OUED SAIDA

Le bassin versant de l'Oued Saida (codé 11-11) qui appartient au grand bassin versant de la Macta, présente une superficie¹ de 644 km² pour un périmètre de 164,5 km.

Les affluents du bassin de la Macta (Melrir, Sefiou, Sahouat) prennent naissance au niveau des massifs calcaires des monts des Daia et de Saida, confluent en amont du barrage de Bouhanifia. Ils forment ensuite l'oued El Hammam qui traverse les basses plaines de Habra-Sig avant de se déverser à la mer (Fig. 3).

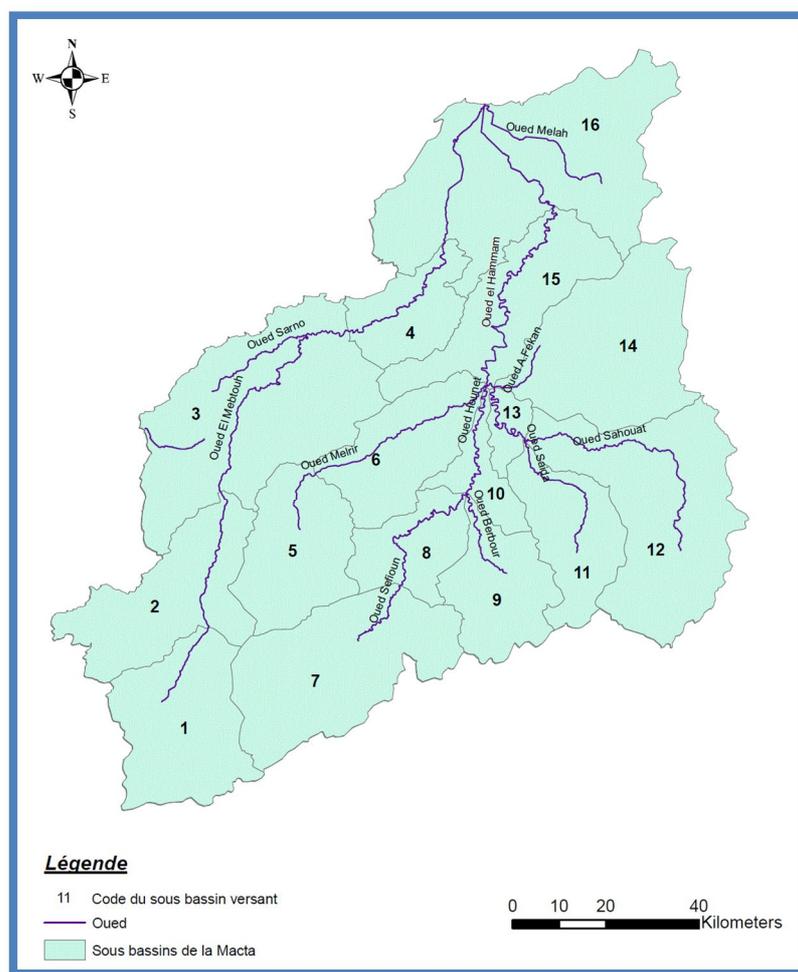


Fig. 3 : Carte des sous bassins de la Macta (Source ABH)

¹ La détermination de la surface du bassin versant ainsi que son périmètre ont été déterminé par la technique de digitalisation de quatre cartes topographiques (Oran NI-30-XXIV, Mostaganem NI-31-XIX, Telagh NI-30-XVIII, Saida NI-31-XIII) établit à l'échelle 1/200 000 à l'aide du logiciel ArcGIS 9.3.

III- Caractéristiques morphométriques du bassin versant

L'identification des caractéristiques morphométriques est nécessaire pour déterminer et analyser le comportement hydrologique d'un bassin versant (lame d'eau précipitée, débit, etc.). Leurs variations ont une influence sur le comportement hydrologique du bassin versant et leurs analyses permettent une meilleure compréhension des causes des variations des régimes hydrologiques.

Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé les images ASTER d'une résolution de 30 m (CTS), leur utilisation est nécessaire pour élaborer une mise à jour du chevelu hydrographique.

1- Caractéristiques de formes

1-1 Coefficient de compacité de Gravelius

La forme du bassin versant a une grande influence sur l'écoulement global et surtout sur l'allure de l'hydrogramme résultant d'une pluie donnée, cette caractéristique est donnée par l'indice de Gravelius (1914) appelé aussi le coefficient de compacité, il est défini par le rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même surface :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec :

$$\begin{aligned} P &: \text{périmètre du bassin versant} = 164,5 \text{ km.} \\ A &: \text{surface du bassin versant} = 644 \text{ km}^2. \end{aligned}$$

On obtient : $K_G = 1,81$ ($K_G > 1$)

D'après cette valeur de K_G , on peut dire que notre bassin est de forme allongée, ce qui favorise les faibles débits de pointe de crue, ceci en raison des temps d'acheminement de l'eau vers l'exutoire sur une distance plus importante.

1-2 Rectangle équivalent

C'est un modèle établi par ROCHE, il est défini comme un rectangle de longueur L et de largeur l qui a la même surface et le même périmètre que le bassin (Fig.4).

$$L = K_G \frac{\sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_G} \right)^2} \right] \Rightarrow L = 73,23 \text{ Km}$$

$$l = K_G \frac{\sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_G} \right)^2} \right] \Rightarrow l = 8,79 \text{ Km}$$

Avec :

L : longueur du rectangle (km),

l : largeur du rectangle (km),

K_G : coefficient de Gravelius,

A : aire du bassin versant (km²).

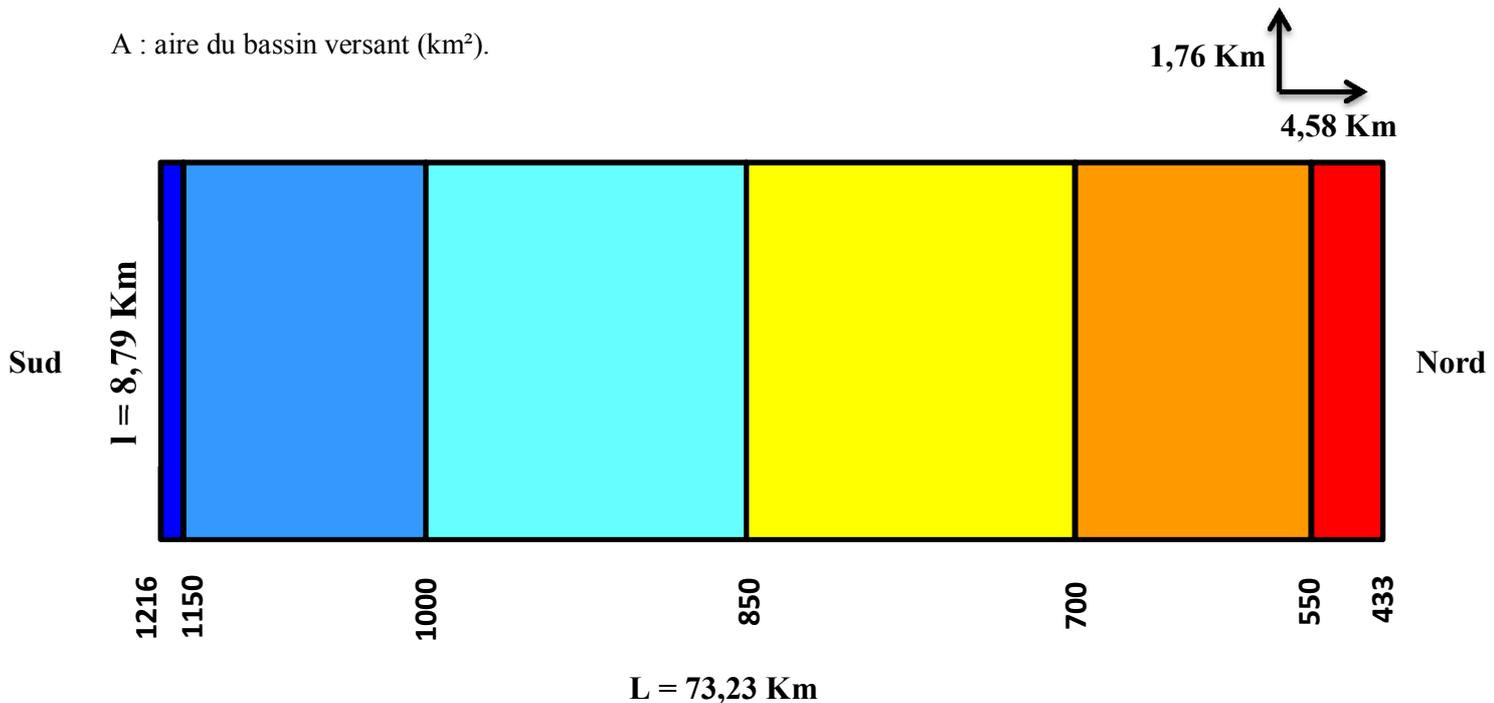


Fig. 4 : Rectangle équivalent du bassin versant de l'Oued Saïda.

2- Caractéristiques du relief

L'influence du relief sur l'écoulement se conçoit aisément, car de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient avec l'altitude (précipitations, températures, etc.) et la morphologie du bassin. En outre, la pente influe sur la vitesse d'écoulement. Le relief se détermine lui aussi au moyen d'indices ou de caractéristiques suivants :

2-1 Courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude (Fig. 5).

Tableau 1 : Répartition hypsométrique du bassin versant de l'Oued Saïda.

Tranches d'altitudes (m)	Surface (Km ²)	Surface cumulée (Km ²)	pourcentage de la surface du bassin (%)	pourcentage cumulé de la surface du bassin (%)
1216 – 1150	9,71	9,71	1,51	1,51
1150 – 1000	124,81	134,52	19,38	20,89
1000 – 850	170,82	305,34	26,52	47,41
850 – 700	171,10	476,44	26,57	73,98
700 – 550	127,72	604,16	19,83	93,81
550 – 433	39,84	644	6,19	100

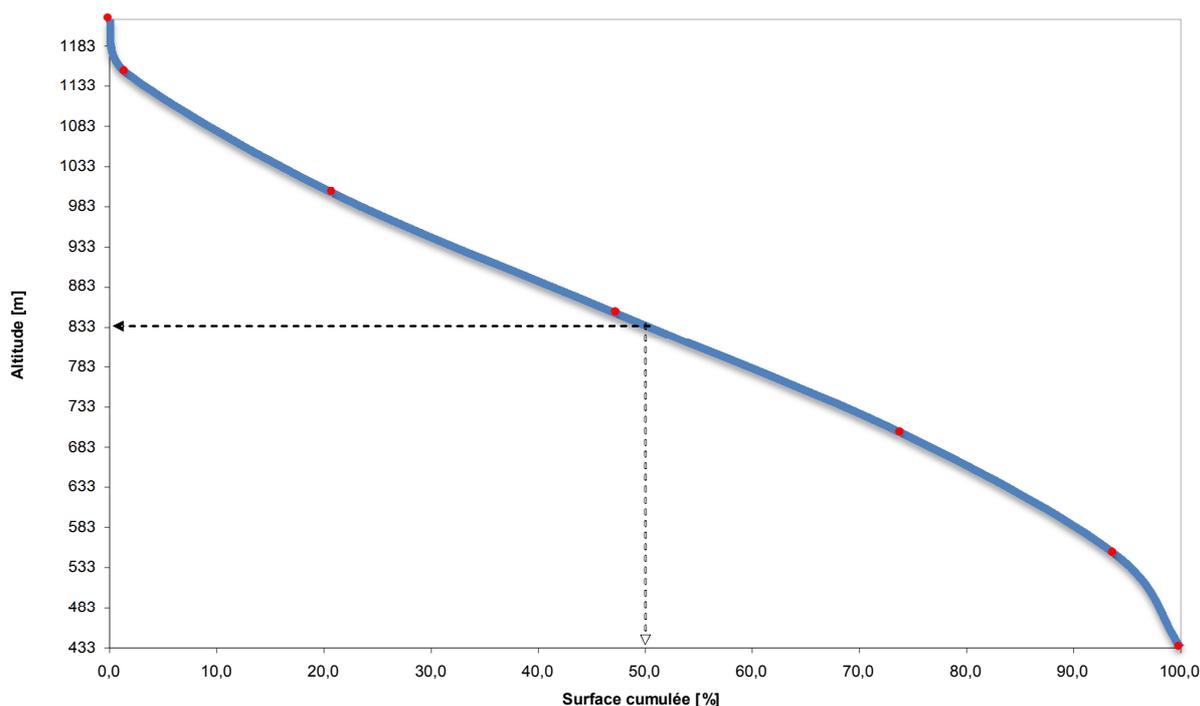


Fig. 5 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued Saïda

La concavité de la courbe hypsométrique montre que la forme du bassin présente un état de maturité (équilibre) où le potentiel érosif est moyen.

La figure 6 englobe le modèle numérique du terrain (M.N.T) du bassin versant de l'oued Saïda. Elle donne un aperçu quant à la répartition des altitudes dans le bassin et confirme par ailleurs les informations données par la courbe hypsométrique.

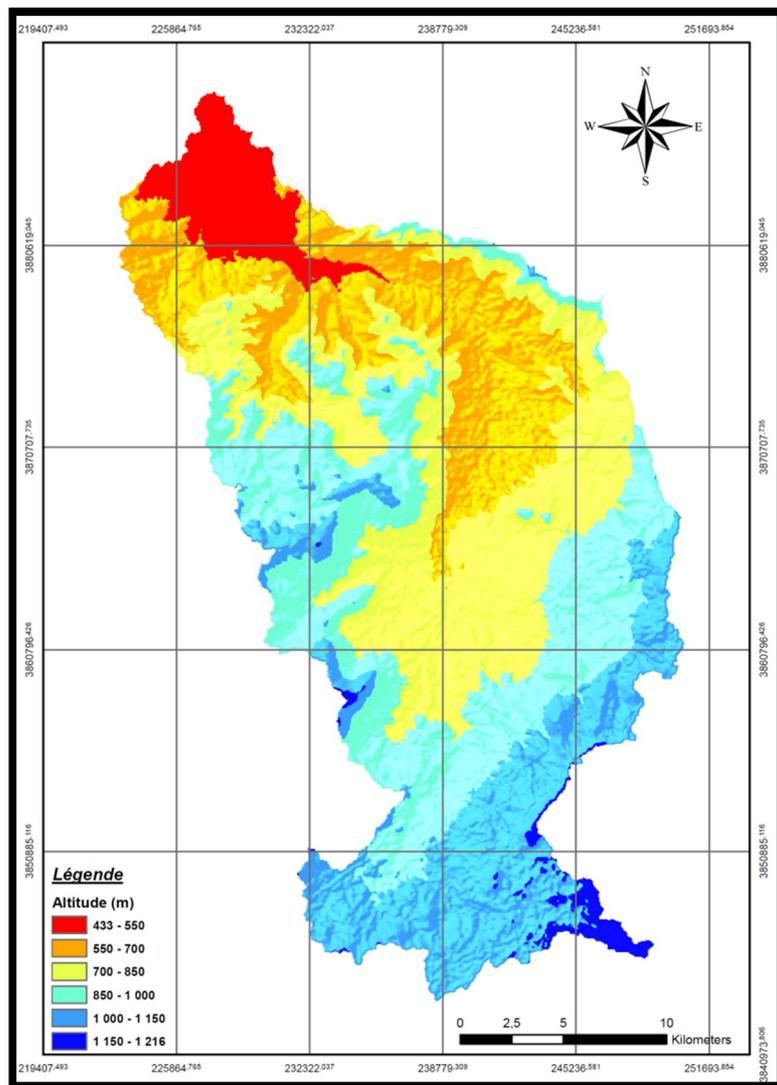


Fig. 6 : Modèle numérique du terrain (M.N.T) du bassin versant de l'Oued Saïda

2-2 Altitudes caractéristiques

A partir de la courbe hypsométrique, on peut déterminer les altitudes caractéristiques du bassin versant :

- **Altitude maximale** : correspond au point culminant du bassin versant.

$$H_{\max} = 1216 \text{ m}$$

- **Altitude minimale** : égale au point le plus bas du bassin versant.

$$H_{\min} = 433 \text{ m}$$

- **Altitude médiane**: correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique.

$$H_{\text{médiane}} = H_{50\%} = 833 \text{ m}$$

- **Altitude moyenne** : se déduit directement de la courbe hypsométrique. On peut la définir comme suit :

$$H_{\text{moy}} = \sum \frac{A_i h_i}{A}$$

Avec :

H_{moy} : altitude moyenne du bassin [m],

A_i : aire comprise entre deux courbes de niveau [km²],

h_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m],

A : superficie totale du bassin versant [km²].

Tableau 2 : Répartition altimétrique du bassin versant de l'Oued Saïda

Classe d'altitudes (m)	Altitudes moyennes (hi) (m)	Surface (Ai) (Km ²)	hi Ai
433 – 550	491,5	39,84	19581,36
550 – 700	625	127,72	79825
700 – 850	775	171,10	132602,5
850 – 1000	925	170,82	158008,5
1000 – 1150	1075	124,81	134170,75
1150 – 1216	1183	9,71	11486,93
		$\Sigma = 644$	$\Sigma = 535675,04$

$$\Rightarrow H_{\text{moy}} = 831,79 \text{ m}$$

2-3 Indices de pente

a- Pente moyenne

C'est le rapport entre la dénivelée totale et la longueur du rectangle équivalent

$$I_{\text{moy}} = \frac{D}{L} = 0,0106 \implies I_{\text{moy}} = 1,06 \%$$

Avec

D : Dénivelée totale du rectangle équivalent ($H_{\text{max}} - H_{\text{min}} = 1216 - 433 = 783 \text{ m}$) ;

L : Longueur du rectangle équivalent (73,23 Km)

b- Indice de pente globale I_g

Pour comprendre et mettre en évidence l'influence du relief sur le ruissèlement à l'intérieur d'un bassin versant, un Indice de pente globale (I_g) a été introduit.

$$I_g = \frac{D}{L} = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L} = \frac{1113 - 533}{73230} \implies I_g = 0,0079 = 0,79 \%$$

Avec

D : dénivelée entre les altitudes ayant 5% et 95% de la surface du bassin versant tirées à partir de la courbe hypsométrique (m),

L : longueur du rectangle équivalent (m)

D'après la classification d'O.R.S.T.O.M résumée dans le tableau ci-dessous, notre bassin se caractérise par un relief assez faible.

Tableau 3 : Classification du relief selon I_g par O.R.S.T.O.M

Relief très faible	$I_g < 0,002$
Relief faible	$0,002 < I_g < 0,005$
Relief assez faible	$0,005 < I_g < 0,01$
Relief modéré	$0,01 < I_g < 0,02$
Relief assez fort	$0,02 < I_g < 0,05$
Relief fort	$0,05 < I_g < 0,1$
Relief très fort	$0,1 < I_g$

c- Indice de pente de Roche I_p

Pour bien visualiser l'influence du facteur pente sur le ruissellement ROCHE a introduit un autre indice : « Indice de pente de roche », qui se calcule directement sur le rectangle équivalent en appliquant la relation.

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum \sqrt{a_i d_i}$$

Avec :

L : Longueur du rectangle équivalent,

a_i : Fraction en % de la surface A comprise entre deux courbes de niveau voisines distantes de d_i .

Tableau 4: Fractions des surfaces entre courbes de niveau

Classe d'altitude (m)	Surface (Km ²)	a_i	Différence d'altitude	$a_i d_i$	$\sqrt{a_i d_i}$
433 – 550	39,84	0,062	117	7,254	2,69
550 – 700	127,72	0,198	150	29,7	5,45
700 – 850	171,10	0,266	150	39,9	6,31
850 – 1000	170,82	0,265	150	39,75	6,30
1000 – 1150	124,81	0,194	150	29,1	5,39
1150 – 1216	9,71	0,015	66	0,99	0,99
	$\Sigma = 644$				$\Sigma = 27,13$

$$\Rightarrow I_p = 3,17 \%$$

d- Dénivelée spécifique

La dénivelée spécifique permet de se prononcer sur le relief suivant la classification de l'Office de Recherche Scientifique d'Outre-Mer (ORSTOM) (Tableau 5). La dénivelée spécifique du bassin versant de l'oued Saida est de 201,68 m (< 250 m), donc son relief est assez fort.

$$D_s = I_g \sqrt{A} \Rightarrow D_s = 201,68 \text{ m}$$

Avec :

I_g : indice de pente global

A : superficie du bassin versant

Tableau 5 : Classification du relief selon D_s .

Relief très faible	$D_s < 10 \text{ m}$
Relief faible	$10 \text{ m} < D_s < 25 \text{ m}$
Relief assez faible	$25 \text{ m} < D_s < 50 \text{ m}$
Relief modéré	$50 \text{ m} < D_s < 100 \text{ m}$
Relief assez fort	$100 \text{ m} < D_s < 250 \text{ m}$
Relief fort	$250 \text{ m} < D_s < 500 \text{ m}$
Relief très fort	$500 < D_s$

3- Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Le réseau hydrographique, est sans doute une des caractéristiques les plus importantes du bassin. Il peut donc prendre une multitude de formes. La différence du réseau hydrographique d'un bassin est due à quatre facteurs principaux.

- Géologie : La nature du substratum influence la forme du réseau hydrographique.
- Climat : Le réseau hydrographique est dense dans les régions montagneuses très humides et tend à disparaître dans les régions désertiques.
- Pente du terrain : Elle détermine si les cours d'eau sont en phase érosive ou sédimentaire.
- Cours d'eau : Dans les zones plus élevées, les cours d'eau participent souvent à l'érosion de la roche sur laquelle l'écoulement est présent. Contrairement, dans les plaines les cours d'eau s'écoulent sur un lit où la sédimentation prédomine.

3-1 Hiérarchisation du réseau

La classification topologique du réseau hydrographique (fig.7) est basée sur une méthode proposée initialement par HORTON en 1945 puis modifiée par STRAHLER en 1947. Elle est la plus utilisée aujourd'hui, son principe est comme suit.

- tout cours d'eau n'ayant pas d'affluent est dit d'ordre 1.
- au confluent de deux cours d'eau de même ordre n , le cours d'eau résultant est d'ordre $n + 1$
- un cours d'eau recevant un affluent d'ordre inférieur garde son ordre.

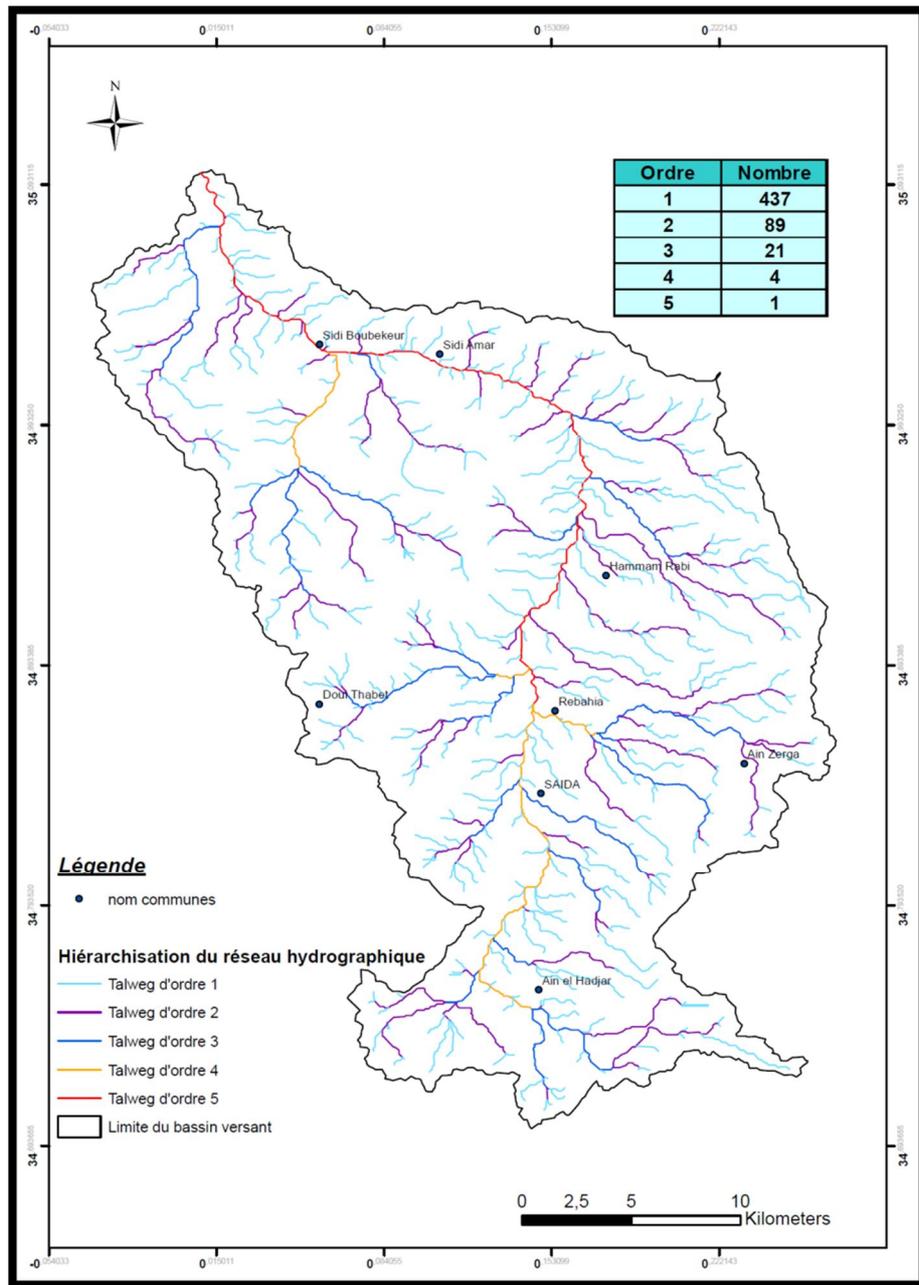


Fig. 7 : Classification du chevelu hydrographique du bassin versant de l'Oued Saïda.

3-2 Densité de drainage D_d

C'est le paramètre le plus important qui caractérise le chevelu hydrographique, il correspond au rapport entre la longueur totale des cours d'eau à la surface du bassin.

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A} \quad \Rightarrow \quad D_d = 1,19 \text{ Km/Km}^2$$

Avec : D_d : Densité de drainage (Km/Km^2),

L_i : Longueur cumulée des thalwegs (Km),

A : Surface du bassin versant (Km^2).

3-3 Fréquence des cours d'eau (F)

Représente le nombre de cours d'eau par unité de surface.

$$F = \frac{\sum N_n}{A} \implies F = 0,85 \text{ Km}^{-2}$$

Avec

N_n : nombre des cours d'eau (552) ;

A : la surface (Km²)

3-4 Coefficient d'allongement (E)

Il est donné par la relation suivante :

$$E = \frac{2\sqrt{A/\pi}}{L_0} \quad \text{et} \quad L_0 = \frac{\sum l}{n}$$

Avec :

A : Surface totale du bassin versant (Km²),

L_0 : Longueur axiale du bassin (Km),

n : Nombre d'ordre supérieur (n=5),

l : Longueur moyenne des thalwegs (Km).

$$\implies E = 2,67$$

3-5 Rapport de confluence (Rc)

C'est un nombre sans dimension exprimant le développement du réseau de drainage. Il est défini comme étant le quotient du nombre de thalwegs d'ordre n par celui des thalwegs d'ordre supérieur n+1 :

$$Rc = \frac{N_n}{N_{n+1}}$$

Tableau 6 : Rapport de confluence

Ordre (n)	1	2	3	4	5	Moyenne
Rc	4,91	4,24	5,25	4		4,6

$$\implies Rc = 4,6$$

3-6 Rapport de longueur

Il est défini comme le rapport entre la longueur moyenne des thalwegs d'ordre (n+1) par celui des thalwegs d'ordre (n) (Tableau 7).

$$R_l = \frac{L_{n+1}}{L_n}$$

Tableau 7 : Rapport de longueur

Ordre (n)	Nombre (N _n)	Longueur L _n (Km)	Longueur moy. (L _n /N _n)	Rapport de longueur (R _l)
1	437	397,88	0,91	2,50 2,02 1,58 5,26 Moy. = 2,84
2	89	203,65	2,28	
3	21	96,87	4,61	
4	4	29,20	7,3	
5	1	38,40	38,40	
	Σ = 552	Σ = 766		

⇒ R_l = 2,84

Détermination de R_C et de R_L graphiquement

La détermination graphiquement de R_C et de R_L se fait en portant l'ordre des cours d'eau en fonction du nombre de cours d'eau et de leurs longueurs moyennes sur un graphique semi-logarithmique. La pente moyenne de la droite, permet de déterminer la raison de la progression géométrique.

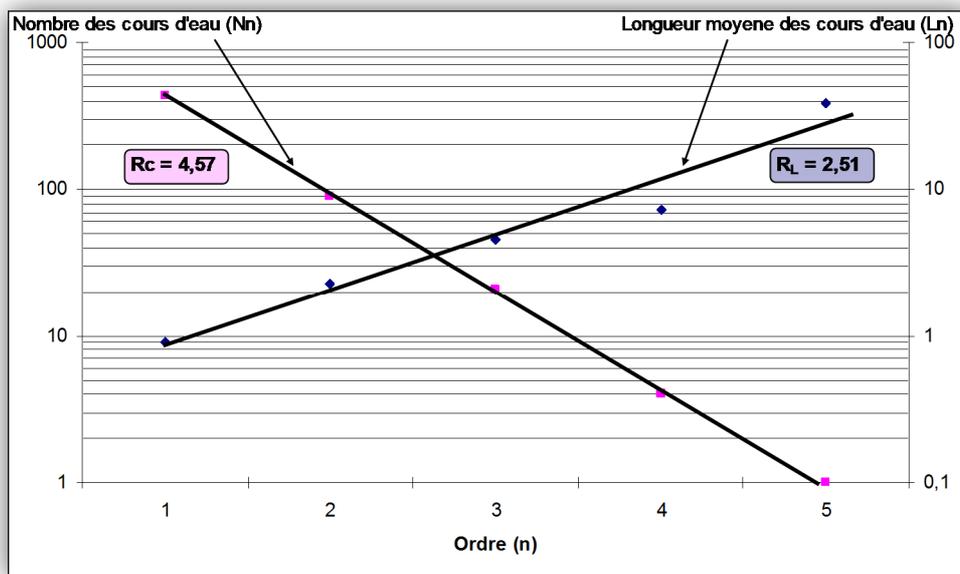


Fig. 8 : Droite d'ajustement de R_C et de R_L

3-7 Coefficient de torrentialité

C'est un coefficient qui tient compte à la fois de la densité de drainage et celle des thalwegs élémentaires d'ordre 1 :

$$C_T = F_1 \times D_d$$

Avec

D_d : densité de drainage ;

F_1 : La fréquence des talwegs d'ordre 1 ($F_1 = \frac{N_1}{A} = \frac{437}{644} = 0,68$)

$$\Rightarrow C_T = 0,81$$

Ce paramètre permet l'estimation de la grandeur de l'énergie érosive du cours d'eau.

3-8 Temps de concentration

C'est le temps que met la particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée pour arriver à l'exutoire, il se calcule par la formule de GIONDOTTI.

$$T_C = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{0,8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

Avec

T_c : temps de concentration (heure),

A : superficie du bassin (km²),

L : longueur du talweg principal (km),

H_{moy} : altitude moyenne (m),

H_{min} : altitude minimale (m).

$$\Rightarrow T_c = 12,35 \text{ heures}$$

IV- Géomorphologie

1- Morphologie

Le relief propose une diversité considérable. Il est à distinguer trois types de terrains d'après leur aspect géomorphologique.

a)- Zones montagneuses

Elles sont formées essentiellement par la chaîne de Djebel Sidi Youssef d'une altitude de 1338 m et d'orientation Sud-Ouest/Nord-Est, des versants gauches de la vallée de Saida (Djebel Abd El Krim, Djebel Kerroua), des versants droits de la même vallée (Djebel Hadjra El Baida, Djebel Kodjel) et du massif de Djebel Khenifer d'une altitude de 1246 m.

b)- Zone platoïde

Elle englobe les plateaux d'Ain Sultane, de Tidernatine, les plaines d'Oum-Djrane et de Tamesna.

c)- Une vallée (Oued Saida)

La vallée de l'Oued Saida est d'orientation Sud-Nord et d'une altitude de 800 m (hormis la partie la plus au Nord orientée Sud-Est / Nord-Ouest).

2- Topographie

La topographie générale de la région d'étude est relativement plane car les classes de pentes inférieures à 12 % occupent environ 84 % de la superficie totale de la région (Fig. 18). Le reste soit 16 % du territoire de la région ont une déclivité bien marquée avec néanmoins une classe intermédiaire 12 - 25 %.

3- Sols

Les sols sont dépendants de la morphologie topographique et se classent comme suit :

- **Versants** : occupés par des sols minéraux bruts comportant très peu d'éléments friables, à l'origine de sols bruns calcaires ou rouges fersialitiques ainsi que par des sols à dominance argileuse, peu calcaire et isohumiques sur les versants à formation argilo-gréseuse.
- **dépressions et cuvettes** : les sols calcimagnésiques dominant, caractérisés par une forte proportion de sable dans leur horizon superficiel.
- **plateaux** : sols assez diversifiés formant une mosaïque où se distinguent des sols calcimagnésiques, minéraux bruts, fersialitiques et bruns calcaires.
- **terrasses et plaines alluviales** : sols peu évolués d'apport alluvial ou colluvial, localement hydromorphes et des sols bruns calcaires (B. BENYAMINA, 2012).

4- Occupation de sol

La région de Saida est très majoritairement occupée par la steppe. En grande partie, cette steppe est composée de sols quasi nus. Elle se localise dans la partie sud de la région. L'alfa est des autres faciès de cette steppe. Elle est également présente de manière importante.

La forêt occupe une part non négligeable de la région. En effet, elle représente environ 26 % de la surface totale (Fig. 9).

Au centre de la région une importante zone d'agriculture, principalement céréalière. Elle occupe près de 34 % de la surface de la région.

Enfin, il faut souligner qu'une part non négligeable de la région est constituée par ces espaces naturels fragiles que sont les chotts.

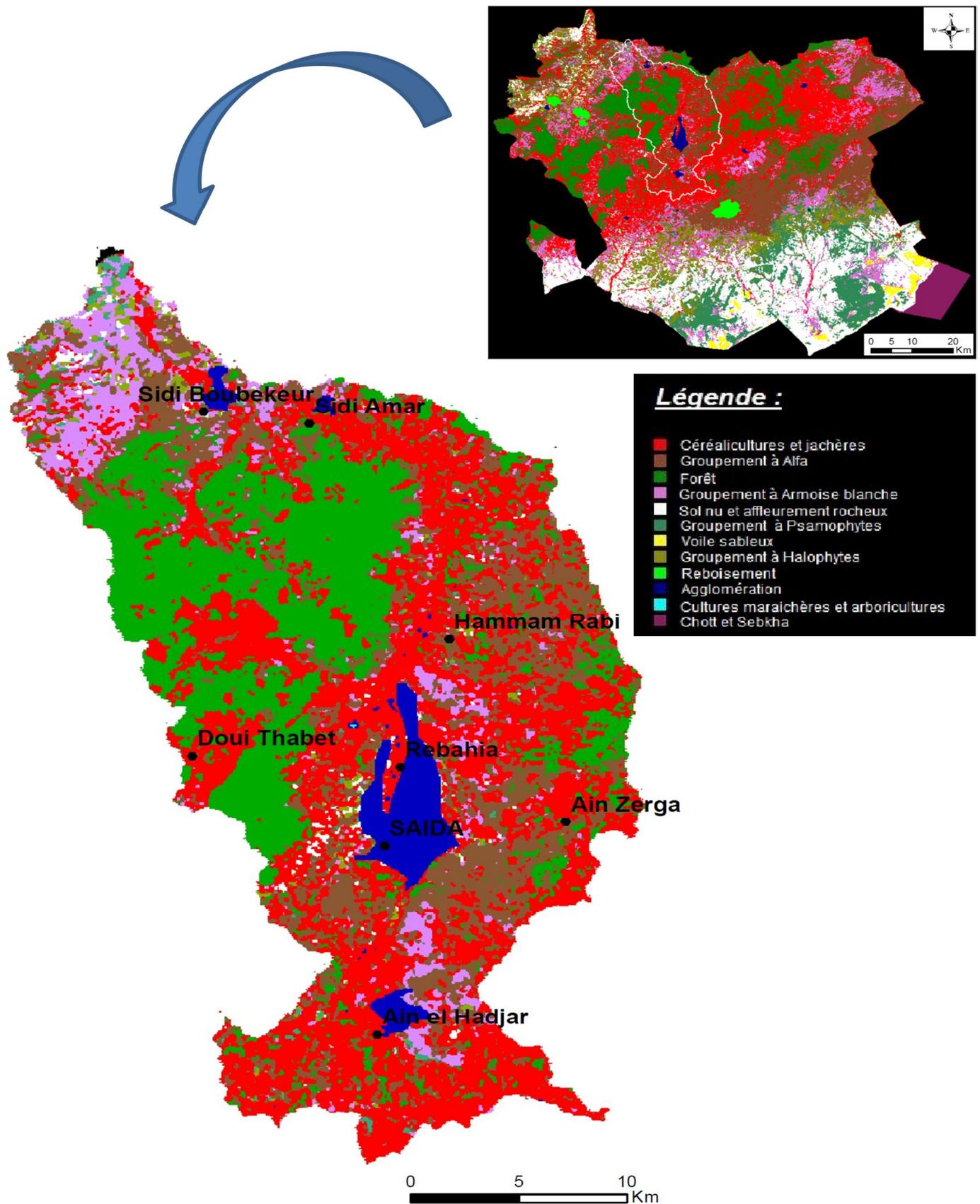


Fig. 9: Carte d'occupation du sol du bassin versant de l'Oued Saida (Source CTS).

V- Conclusion

L'étude morphométrique du bassin versant de l'oued Saida nous a permis de voir certaines caractéristiques de la région, qui avec une superficie totale de 644 Km² et un périmètre du bassin de 164,5 km, s'identifie par un relief assez diversifié composé de trois (03) grandes formations géomorphologiques :

- une zone montagneuse,
- une zone platoide,
- une vallée (Oued Saida).

Aussi, avec un coefficient de compacité $K_G = 1,81$, le bassin versant de l'oued Saida est de type modérément allongé. Cette valeur a une influence sur le temps de concentration. Selon l'indice de pente globale, le bassin versant se caractérise par un relief assez fort. La topographie est marquée par une altitude maximale de 1216 m et une altitude minimale de 433 m ce qui génère un ruissellement important.

La faible torrentialité est liée à une faible densité du chevelu hydrographique, avec un temps de concentration long favorisant :

- ✓ Soit l'infiltration des eaux, au niveau des formations géologiques perméables en présence d'un couvert végétal plus ou moins dense.
- ✓ Soit la stagnation des eaux, surtout sur une structure lithologique imperméable avec une pente faible comme à l'aval du bassin versant.

On peut conclure que le temps de concentration dépend de plusieurs facteurs : la forme du bassin, le couvert végétal, la lithologie et est conditionné par la superficie, la pente moyenne et la longueur du thalweg principal.

CHAPITRE II
GEOLOGIE ET
HYDROGEOLOGIE

I - ETUDE GEOLOGIQUE ET STRATIGRAPHIE

1) Introduction

Entre les Hauts Plateaux oranais au Sud et l'Atlas tellien au Nord, d'âge tertiaire, apparaît une unité géologique d'âge secondaire constituée par les Monts de Saida et qui s'étend jusqu'à la région d'Oum Djerane au Sud. Cette région est caractérisée par des roches paléozoïques constituant le socle de la plateforme épihercynienne et par des formations méso-cénozoïque constituant la couverture.

C'est à la faveur d'un bombement à très grand rayon de courbure que le substratum enfoui sous les terrains des hauts plateaux se relève pour constituer cette région et disparaître à nouveau au Nord sous l'Atlas tellien.

Ce vaste anticlinal d'âge secondaire est essentiellement constitué de terrains du Jurassique inférieur et moyen dolomitique reposant en biseau sur le Trias au niveau du môle primaire de Tiffrit-Ain Soltane. La tectonique cassante, qui a affecté ces terrains carbonatés est à l'origine des structures caractéristiques très particulières des régions karstiques (G. PITAUD, 1973).

Ces terrains dolomitiques sont partiellement recouverts de terrains plus récents, d'origine détritique du Jurassique supérieur et du Tertiaire. Des lambeaux de terrains quaternaires apparaissent dans le fond des vallées (Fig. 10).

L'impluvium des bassins versants est donc partagé entre des terrains dolomitiques plus ou moins karstifiés et des terrains plus récents appartenant au Jurassique supérieur, au Tertiaire et au Quaternaire. Ces différents terrains sont encaissés par les vallées de Tiffrit, Gernida et Oum Djerane (Hassasna) faisant apparaître des formations triasiques et paléozoïques altérées et très argileuses, respectivement volcano-détritiques et cristallines. Ces différents ensembles constituent plusieurs aquifères dont le plus important est de nature karstique correspondant aux roches carbonatées, plus ou moins dolomitiques ou calcaires du Jurassique inférieur et moyen (G. PITAUD, 1973).

2) Géologie et lithologie

La géologie joue un rôle primordial dans toutes les phases d'exécution d'un programme de mise en valeur des ressources en eaux. En effet, la lithologie des terrains, les structures géologiques et la tectonique sont parmi les facteurs qui conditionnent :

- le ruissellement de surface et l'écoulement,
- l'alimentation naturelle et la vidange de nappes,
- la constitution et le renouvellement des ressources en eaux souterraines,
- les possibilités d'implantation et l'exécution d'ouvrages hydrauliques.

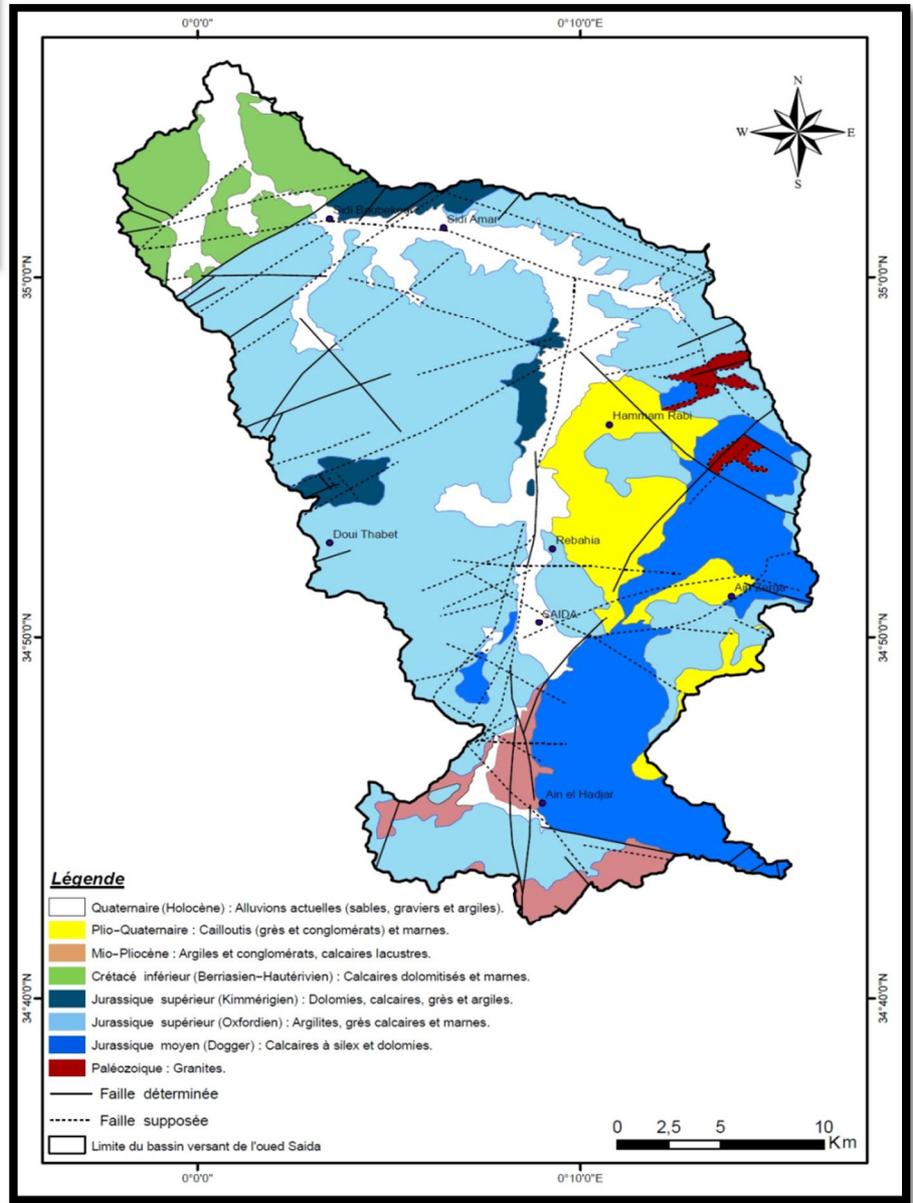
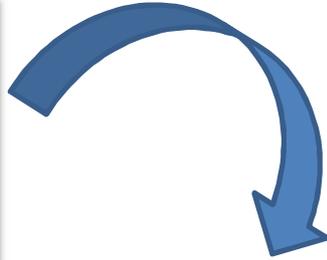
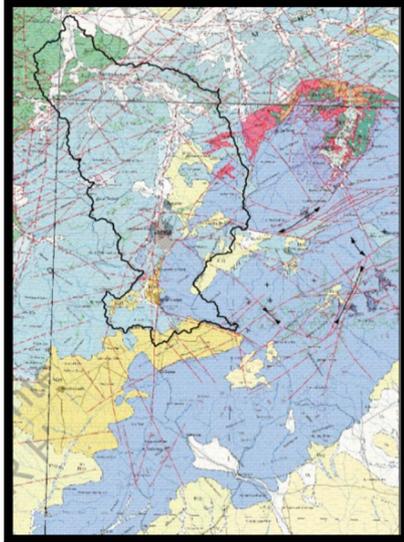


Fig. 10: Carte Géologique du bassin versant de l'oued Saïda (d'après la carte géologique de l'Algérie au 1/200 000 établie par l'ANRH, 2008).

3) Stratigraphie

La lithostratigraphie de la région de Saida se présente comme le montre la figure 11.

Épaisseur en mètre	Âge	Log	Descriptions géologiques
20	Quaternaire		Limons plus ou moins sableux et travertins.
75	Tertiaire		Argile brique sableuse ou gypseuse à intercalation de calcaire et de graviers, galets.
100	Sénonien		Calcaires gris clairs à pâte fine très altérés à la partie supérieure.
300	Barrémien		Grès de Youb (anciennement appelé Berthelot).
310	Kimméridgien		Dolomies de sidi Boubekeur (anciennement appelé Charrier), marno-calcaire de Raouraï, calcaire de Stah, antérieurement appelé dolomies de Tlemcen, enfin calcaires de Zarifet.
180	Lusitanien		Grès de sidi Amar anciennement appelé Franchetti, avec rares passées carbonatées et argiles sableuses. Les grès présentent une stratification entrecroisée.
250	Callovo-Oxfordien		Argiles de Saida: (puissante série argilo gréseuse).
150	Aaléno-Bajo-Bathonien		Dolomies cristallines et calcaires fissurées.
25	Toarcien		Marne d'Essafah (marno-calcaire et marnes).
30	Domérien		Dolomies cristallines bréchiques avec argile.
90	Trias		Argiles saline, grès argileux, basalte.
30	Primaire		Schistes, granites, rhyolites, diorites.

Fig. 11: Coupe lithostratigraphique de la région de Saida (d'après Clair, 1952 et Pitaud, 1973).

3.1) Socle primaire

Il affleure dans le môle de Tiffrit et à l'Est de Hammam Rabbi au djebel Modzbab. Il est représenté par des schistes et quartzites avec la présence d'intrusions granitiques et granulitiques et de coulées de laves basaltiques.

3.2) Mésozoïque

Les dépôts du Mésozoïque se rencontrent sur l'ensemble de la région et recouvrent les roches du Paléozoïque. Les formations du Secondaire sont représentées par un complexe de roches volcaniques et sédimentaires.

3.2.1) Trias

Reposant transgressivement sur une couche bigarrée du Paléozoïque, la série du Trias est recouverte par différents niveaux du Jurassique et des dépôts du Plio-Quaternaire. Il dessine le môle de Tiffrit.

L'ensemble du Trias est formé de trois membres dont deux sont sédimentaires et le troisième qui est le plus important est basaltique. Les formations à gypse sont relativement peu importantes. L'ensemble, de nature volcano-détritique est imperméable et a une épaisseur d'environ 100 m. (G. Pitaud, 1973)

Le Trias n'apparaît pas dans notre bassin versant.

3.2.2) Le Jurassique

Il est constitué de trois membres principaux successifs (G. Pitaud, 1973) :

- Groupe carbonaté inférieur constitué du Jurassique inférieur et moyen dolomitique.
- Groupe détritique intermédiaire constitué du Callovo-Oxfordien argileux gréseux et du Lusitanien gréseux.
- Groupe carbonaté supérieur constitué du Kimméridgien dolomitique.

- Le Jurassique inférieur et moyen

Il est largement répandu et constitue l'aquifère le plus important. Cette formation est mieux connue sous le nom de "dolomies de Tiffrit". Plusieurs membres peuvent être distingués (G. Pitaud, 1973) :

- ◆ Formation carbonatée de BOU LOUAL (Hétangien - Plienbachien)
- ◆ Formation des marnes d'ES SAFEH (Toarcien)
- ◆ Formation carbonatée d'AIN DEZ (Aalénien-Bajocien)
- ◆ Formation des argiles bigarrées de SIDI YOUSSEF (Bajocien)
- ◆ Formation carbonatée de ZERZOUR (Bathonien)
- ◆ Formation des marnes de MODZBAB (Bajo-Bathonien) qui se substitue progressivement par variation latérale de faciès aux deux dernières formations vers le Nord-Ouest.

- **Le Jurassique moyen (Dogger)** Il affleure dans la partie orientale de la région d'étude, où il couvre des superficies considérables aux environs des localités d'Ain Al Hadjar, Ain Zerga et Nazareg.

- le Callovo- Oxfordien et Lusitanien

Le Callovo-Oxfordien est constituée par les "argiles de SAIDA" qui comportent quelques bancs gréseux. Elle est très répandue dans les vallées et principalement dans celle de l'Oued Saïda. En outre, cette formation apparaît en reliefs mous plus ou moins isolés sur le plateau et les flancs des vallées.

Le Lusitanien est une formation de grès et d'argiles sableuses. Désignée sous le nom de «Franchetti» ou de «Sidi Amar», cette formation se présente en stratifications entrecroisées. Elle est considérée comme étant équivalente aux grès de Boumediene dans la région de Tlemcen (A. BENCHERKI, 2008).

- Le Kimméridgien

Il est très peu répandu au Nord-Ouest de la région, il affleure sous forme d'escarpements rocheux sur les versants des monts de Daïa.

La série est aussi appelée «dolomies de Sidi Boubekeur», elle est équivalente aux dolomies de Tlemcen (Ouest d'Algérie) (A. BENCHERKI, 2008).

3.2.3) Crétacé

Comparativement aux formations du Jurassique, les dépôts de cet étage ont un développement limité. Ils sont représentés par des calcaires cristallins, une alternance de marnes

et de calcaires argileux (A. BENTABET, 2008). Cet étage n'est représenté que dans la partie Nord-Ouest du bassin.

3.3) Cénozoïque

3.3.1) Le Néogène et le Quaternaire

Les dépôts du Néogène et du Quaternaire sont représentés par des conglomérats, d'argiles, de limons de croûtes calcaires remplissant les vallées des oueds de la région.

Les dépôts quaternaires continentaux apparaissent le long de l'oued Saïda constitués d'éléments grossiers ou limoneux.

4) Cadre structural et tectonique

4.1) Structure générale

Sur le plan structural, l'observation de la carte géologique de la région de Saïda révèle un nombre important de failles, dont les rejets peuvent atteindre parfois 150 m, mettant ainsi en évidence la tectonique cassante des terrains carbonatés avec constitution de blocs dolomitiques.

D'après Elmi et Benest (1978), les plissements de la chaîne tellienne qui forme le socle de la région de Saïda ont résulté de mouvements verticaux du socle, ce qui a provoqué d'importantes fractures. Ces mouvements tectoniques sont aussi responsables de la formation des dômes (le plus important est celui de Tiffrit) et des différents fossés d'effondrement. La surrection de môle a aussi provoqué la déformation de la couverture dolomitique du Jurassique alors qu'un fossé d'effondrement d'axe N-S s'est développé dans la vallée de Saïda.

Ces différents mouvements de surrection ont engendré une tectonique cassante à la région. Les directions privilégiées sont approximativement SW-NE à NNE-SSW. Les accidents tectoniques sont subverticaux pour la plupart (A. BENCHERKI, 2008) (Fig. 12).

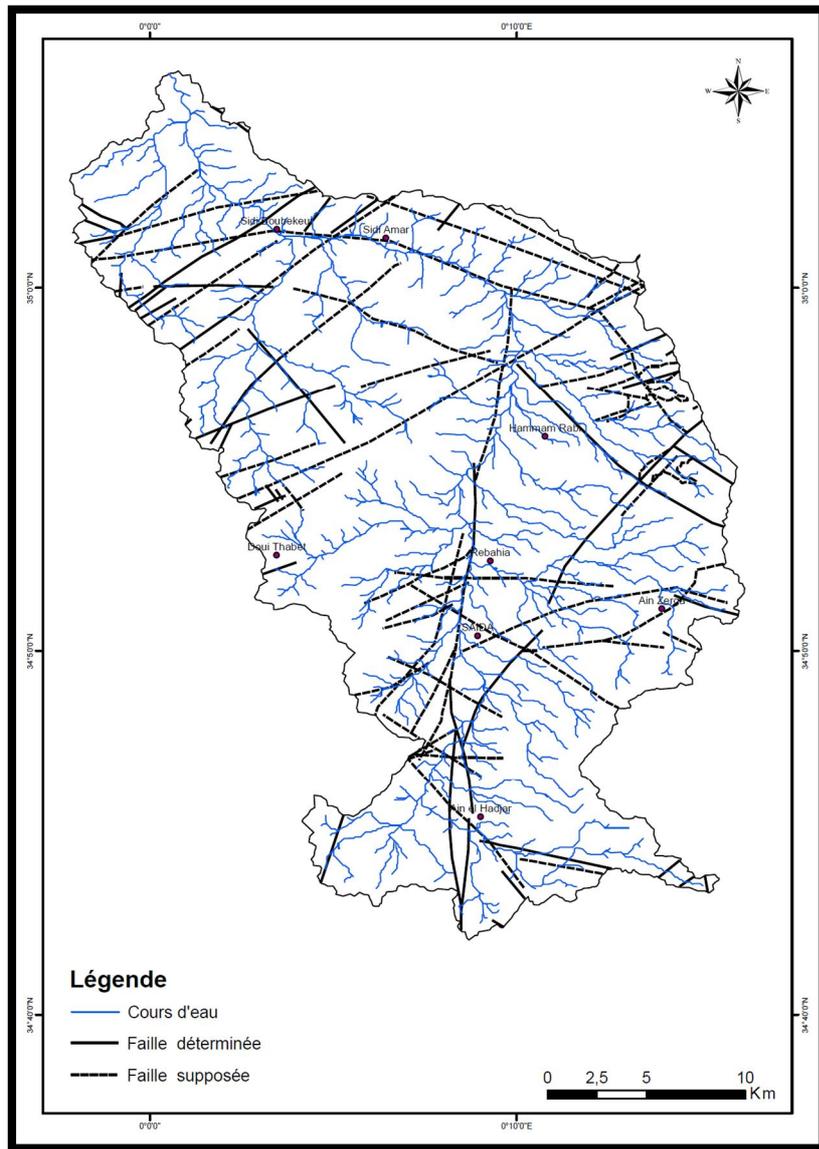


Fig. 12 : Carte structurale du bassin versant de l'oued Saïda (d'après la carte géologique de l'Algérie au 1/200 000 établie par l'ANRH, 2008).

4.2) Fissuration

La vallée de l'oued Saïda correspond à un vaste anticlinal faillé de direction atlasique (E-W à WSW-ENE) se noyant au Nord et au Sud. Un réseau de failles découpe la région en de nombreux panneaux parallélépipédiques, à la faveur d'accidents subparallèles orientés NNE-SSW.

Les roches du flanc sud-est de l'anticlinal des monts de Saïda sont affectées par un pendage très faible et vont s'enfoncer sous le Tertiaire de Chott Chergui (Elmi et Benest, 1978). Les roches du flanc nord-est de ce même anticlinal sont affectées par un pendage faible et des

accidents subverticaux d'orientation générale NE-SW, visibles de la vallée de l'oued Saïda et laissant apparaître les dolomies du Bajo-Bathonien.

Les plissements de la chaîne tellienne ont engendré aussi une tectonique cassante qui affecte les roches carbonatées. Elle a eu comme résultat la constitution de blocs dolomitiques de dimensions et de formes extrêmement variées. Certains de ces blocs se sont effondrés, alors que d'autres apparaissent sous forme de horst. La nappe karstique est libre au niveau des horsts et captive dans les vallées, sous les terrains de recouvrement plus récents.

Cette tectonique assez développée accentue le taux d'infiltration des eaux souterraines qui vont suivre ce réseau de cassures. Par ailleurs, le système de fracturation très développé est en grande partie à l'origine du développement du karst caractérisant la zone de Saïda. (A. BENCHERKI, 2008)

5) Répartition lithologique et son influence sur l'écoulement

Au niveau d'un bassin versant, la nature lithologique des formations géologiques a une influence sur l'écoulement superficiel. La densité de drainage est faible quand les terrains sont perméables favorisant ainsi l'infiltration des eaux de surface, inversement, les eaux ruissellent lorsque les formations sont faiblement perméables, induisant une densité de drainage élevée.

La zone d'étude est formée de trois types de formations lithologiques attribuées au Jurassique il s'agit :

- Des dolomies et calcaires du Dogger (Aalénien-Bajocien) localisés essentiellement en rive droite de l'Oued Saïda. Ces faciès favorisent l'infiltration de surface par rapport à l'écoulement des eaux là où ils sont karstifiés et fracturés.
- Des argiles, des marnes, des grès calcaires et des calcaires attribués au Dogger-Malm (Callovien-Oxfordien), localisés en rive gauche et droite de l'Oued Saïda. Ces formations faiblement perméables favorisent l'écoulement des eaux superficielles par rapport à leur infiltration. Ces faciès auront un comportement différent des dolomies et calcaires et seront plus sensibles aux phénomènes d'érosion et de transport en suspension.
- Des grès carbonatés, dolomies gréseuses, dolomies, grès quartzeux et calcaires du Malm (Kimméridgien), qui favorisent également l'infiltration de surface plutôt que l'écoulement là où les karsts sont bien développés.

II- CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

II-1 Réservoirs potentiels

D'après les études de Clair (1952) et de Pitaud (1973), huit réservoirs ont été mis en évidence, se trouvant le plus souvent dans des formations lithostratigraphiques homogènes (les grès du Lusitanien) ou s'intercalant dans une formation à lithologie différente (les bancs gréseux du Callovo-Oxfordien).

Mis à part la partie nord-ouest de la région étudiée, où la nature des réservoirs est gréseuse, l'ensemble du territoire est caractérisé par un réservoir généralement artésien. Les nappes souterraines sont à l'origine de plusieurs résurgences, dont les plus importantes sont Ain El Hadjar, Ain Sultane, Ain El Hallouf et Poirier.

II-2 Description des aquifères

À partir de la nature et de l'âge des roches composantes, il est possible de définir les aquifères suivants (fig.13):

A) Aquifère du Jurassique inférieur

Cet aquifère est un réservoir dolomitique très perméable. Le substratum schisteux subhorizontal constitue l'assise d'une nappe importante qui alimente de nombreuses sources telles: Ain Tiffrit (qui dessert les centres d'Oum Djerane), Djida, ainsi que Ain Manaa et Ain Sultane. Une partie de l'eau qui s'infiltré à travers les fissures réapparaît à Hammam Rabi. Le toit est constitué par les marnes d'Essafaah du Toarcien.

B) Aquifère du Bajo-Bathonien

Cet aquifère est karstique et constitue le réservoir essentiel d'eau pour la ville de Saida. Il est libre dans le plateau d'Oum Djerane et le Tidernatine à l'est de la ville, mais il devient captif lorsqu'il est surmonté par le Callovo-Oxfordien (argilo-gréseux) dont les roches constituent son toit. Le mur est représenté par les marno-calcaires du Toarcien, formant l'assise d'une nappe importante qui donne naissance à de nombreuses résurgences.

Pour G. Pitaud (1973), la source de Hammam Rabbi est alimentée par l'aquifère dolomitique du Hettangien-Pliensbachien. Au niveau de Hammam Rabbi, l'aquifère présente une émergence naturelle unique. Une partie des eaux de cet aquifère qui s'infiltrent cheminent à travers la zone fracturée de l'Ouest, et venant buter contre une faille, à l'Est du fossé d'effondrement de Saïda, réapparaissent à 7 km au Nord de Rebahia. Ces eaux chaudes remontent par l'intermédiaire d'une faille (fig.14) à travers le Jurassique moyen et sourdent dans les alluvions tertiaires et quaternaires.

C) Aquifère du Callovo-Oxfordien

Les bancs de grès formant ce réservoir, peu aquifères où les débits mobilisés n'excèdent pas 2 L/s, seuls les bancs en contact avec le Bajo-Bathonien qui sont près de la zone faillée offrent des débits intéressants.

D) Aquifère du Lusitanien

Il est représenté par des grès qui sont peu aquifères. La nappe est libre, le mur est constitué par les argiles de Saïda, du Callovo – Oxfordien.

E) Aquifère du Kimméridgien

Le réservoir associé à cet aquifère est dolomitique. On le retrouve à Sidi Boubekeur.

F) Aquifères du Crétacé

1) Aquifère du Barrémien

Le réservoir est gréseux. Tous les forages qui y ont été réalisés au nord-ouest de la ville de Saïda ont offert des débits excédant 30 L/s. (A. BENCHERKI, 2008)

2) Aquifère du Sénonien

Le réservoir de cet aquifère est calcaire. Il se trouve en trois lambeaux:

- Le niveau d'Ain Skhouna: ce lambeau important est capté par forage sur une puissance de 100 mètres. Il est alimenté par l'aquifère de l'Aaléno-Bathonien.
- Le niveau de la bande étroite: ce lambeau stérile longe l'axe des Guenatis Cheraga.

- Le prolongement de Rem El Halfa: il affleure au Nord-Est et renferme des réserves saisonnières.

G) Aquifères du Tertiaire et du Plio-Quaternaire:

1) Aquifère du Tertiaire continental

Il couvre la partie médiane de Chott Chergui. On trouve les formations suivantes:

- le niveau grossier de base constitué d'un aquifère important dans la zone d'Ain Skhouna. Il est parfois difficile de le distinguer de la partie supérieure très altérée des calcaires sénoniens.
- des calcaires lacustres très altérés et perméables, le plus souvent lenticulaires et ne communiquent que difficilement entre eux. Par ailleurs, ils affleurent au-dessus de la carapace calcaire recouvrant le tertiaire continental et alimentant les points bas des résurgences.
- les niveaux sableux ou conglomératiques, intercalés dans les argiles du remplissage du Tertiaire, peuvent être très perméables, s'ils ne sont pas isolés dans les argiles ou colmatés par un ciment marneux.
- La carapace calcaire qui recouvre presque toute la surface de remplissage tertiaire sauf dans la partie centrale de la dépression où sa surface est recouverte de petites daïas.

2) Aquifères du Plio-Quaternaire

Les atterrissements du Tertiaire et du Quaternaire qui comblent les dépressions, bien que d'origine très diverses, forment une seule unité hydrogéologique. Cet aquifère alimente, par son impluvium propre, des nappes importantes, en drainant parfois les eaux des massifs qui les bordent.

Épaisseur en mètre	Âge	Log	Formations géologiques	Caractéristique aquifère
75	Tertiaire et Plio Quaternaire		Alluvions	Perméabilité d'interstices et/ou de fissures
100	Sénonien		Calcaires	Perméabilité de fissures et cavitaires (karst)
300	Barrémien		Grès	Perméabilité d'interstices
310	Kimméridgien		Dolomies et calcaires	Perméabilité de fissures
180	Lusitanien		Grès à passages argileux	Perméabilité d'interstices
250	Callovo-Oxfordien		Alternances d'argiles et de grès	Perméabilité d'interstices et parfois de fissures (en zones faillées)
150	Aaléno-Bajo-Bathonien		Dolomies supérieures	Perméabilité de fissures et cavitaires (karst)
25	Toarcien		Marnes	Imperméable
30	Domérien		Dolomie inférieure	Perméabilité de fissures
90	Trias		Argiles, grès, basalte	Imperméable
30	Primaire		Terrains métamorphiques	Imperméable

Fig. 13: Coupe des caractéristiques hydrogéologiques de la région de Saïda.
(D'après Clair, (1952) et Pitaud, (1973)).

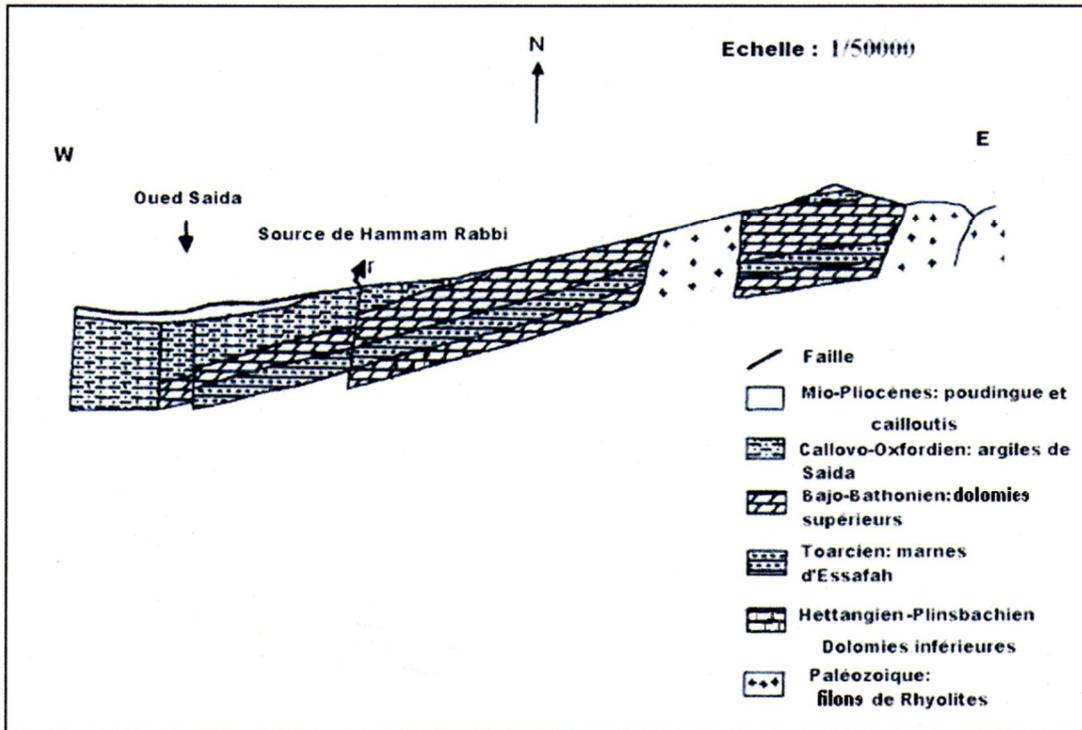


Fig. 14: Coupe lithostratigraphique de la région de Hammam Rabi
(PITAUD G., 1973).

II-3 Principales nappes

Du point de vue hydrogéologique la vallée de Saida est caractérisée par la présence de deux (2) grands types de nappes aquifères : la nappe superficielle et la nappe karstique.

A) Nappe superficielle

C'est une nappe localisée exclusivement dans la vallée du l'oued Saida dont l'aquifère est formé par les couches supérieures de la formation de Saida et leur couverture plio-quadernaire, avec altération de la partie supérieure (argilo-gréseuse) de cette formation constituant avec les dépôts récents du Plio-Quadernaire un réservoir commun, peu profond drainé par plusieurs exutoires sous forme de sources (Ain Bourached, Ain Sidi Ali, Abid Belabane). Elle est alimentée exclusivement par les précipitations sur toute sa surface découverte, certaines failles (celle de Hammam Rabi par exemple) la mettent en communication avec la nappe karstique, ce qui rend possible un déversement des eaux karstiques au réservoir superficiel.

La vidange quant à elle, s'effectue par de nombreuses sources telles que : Ain Tebouda, Ain Bourached et Ain Sidi Ali.

B) La nappe karstique

C'est la nappe la plus importante et la plus intéressante pour l'alimentation des agglomérations, de l'industrie et de l'agriculture. Elle est localisée dans les sédiments carbonatés du Jurassique inférieur et moyen (formation carbonatée de Nador principalement). Elle comporte une partie captive dans la vallée de Saida et une partie libre dans le reste de l'aquifère (Fig. 15). Elle présente aussi une discontinuité et une hétérogénéité dans son comportement géologique suite aux perturbations locales provoquées par la présence de couches argileuses et les nombreuses failles tectoniques, qui jouent un rôle important dans :

- Les effondrements profonds qui marquent les limites imperméables de la nappe à l'Ouest, Nord-Ouest et au Nord-Est,
- la création de lignes de partage des eaux souterraines à l'intérieur de l'aquifère,
- présence de lignes de décharge de la nappe auxquelles sont rattachées la plupart des sources.

II-4 Phénomène de fissuration et de karstification

De nombreuses campagnes de mesure et d'observations des fissurations dans les affleurements des dolomies et des calcaires des formations de Bouloual et de Nador ont montré une fissuration très intensive de 60-70 à 250-300 fissures par m² (S. BOUASSRIA, 1998).

Cette fissuration accompagnée de l'activité géologique des eaux souterraines a conduit à l'apparition du phénomène caractéristique des Monts de Saida : la karstification des calcaires et des dolomies qui se présente souvent sous forme de chenaux, cavernes, etc (photos en annexe), ce qui cause d'énormes pertes d'eau dans certains endroits tel que celui de Ghar Amira.

Le karst est décrit comme un milieu où «l'hétérogénéité atteint son paroxysme » (de Marsily, 1984). L'aquifère karstique est un aquifère particulièrement hétérogène, dans lequel les circulations d'eau ont créé des vides, dont la taille et la distribution sont organisées et hiérarchisées.

Mangin (1975) a proposé un schéma fonctionnel, composé de deux sous-systèmes :

- Le sous-système d'infiltration, qui correspond à la zone non saturée :
 - Près de la surface, l'existence d'un aquifère épikarstique, constitué d'une frange de roches altérées et fissurées, détermine l'infiltration retardée,
 - La zone d'infiltration sous-jacente, est le siège de deux types d'infiltration :

-L'infiltration rapide ou ruissellement souterrain, dans les grandes fractures, où l'écoulement est monophasique.

-L'infiltration retardée, dans les fissures de petite taille, où l'écoulement est diphasique.

- Le sous-système karst noyé, qui correspond à la zone saturée :

- A l'aval du système, les drains, qui assurent la fonction transmissive, sont reliés aux systèmes annexes au drainage, qui assurent la fonction capacitive. (K.DJIDI,2015)

II-5 Conditions aux limites

L'identification du comportement d'une nappe aquifère repose essentiellement sur une définition rigoureuse des conditions aux limites, les limites de la nappe karstique des Monts de Saida peuvent être définies comme suit :

a) Limites latérales

La nappe de Saida (karstique) est limitée, au Sud-Ouest par un contour imperméable engendré par deux failles perpendiculaires, à l'Ouest des failles à rejets importants forment une limite imperméable provoqué par une série de failles qui limite la nappe à sa partie Nord-Ouest. Au Nord, la nappe est limitée par une ligne de décharge le long du contact nappe socle triaso-paléozoïque et la bordure des plateaux d'Ain Soltane et d'Ain Balloul, et un contour imperméable dans la zone de Djebel Mozdbab avec une coupure de la nappe dans le secteur Nord du horst de Mozdbab par une faille. Au Nord-Est, la faille diagonale du flanc Est du môle de Tiffrit est une limite imperméable.

b) Limites verticales

Sauf la vallée de l'Oued Saida constituée géologiquement au Sud par les marnes du Callovo-Oxfordien et au Nord par celle du Bathonien (Mozdbab) et du Callovo-Oxfordien (Saida) où la nappe est captive, la nappe est libre dans toute sa surface et ne comportant pas de véritable toit.

Les marnes du Toarcien (Es Safeh) dans la partie sud et centrale du réservoir et le socle triaso-paléozoïque dans la partie nord forment le substratum de la nappe.

La recharge du système est assurée par la pluie dans la partie libre de l'aquifère. Par contre, dans la vallée et le plateau, les terrains de recouvrement imperméables constituent un obstacle à la percolation des eaux de pluies. Localement, cette alimentation est aussi assurée par les pertes. Les eaux thermales contribuent aussi à cette recharge. (K.DJIDI,2015)

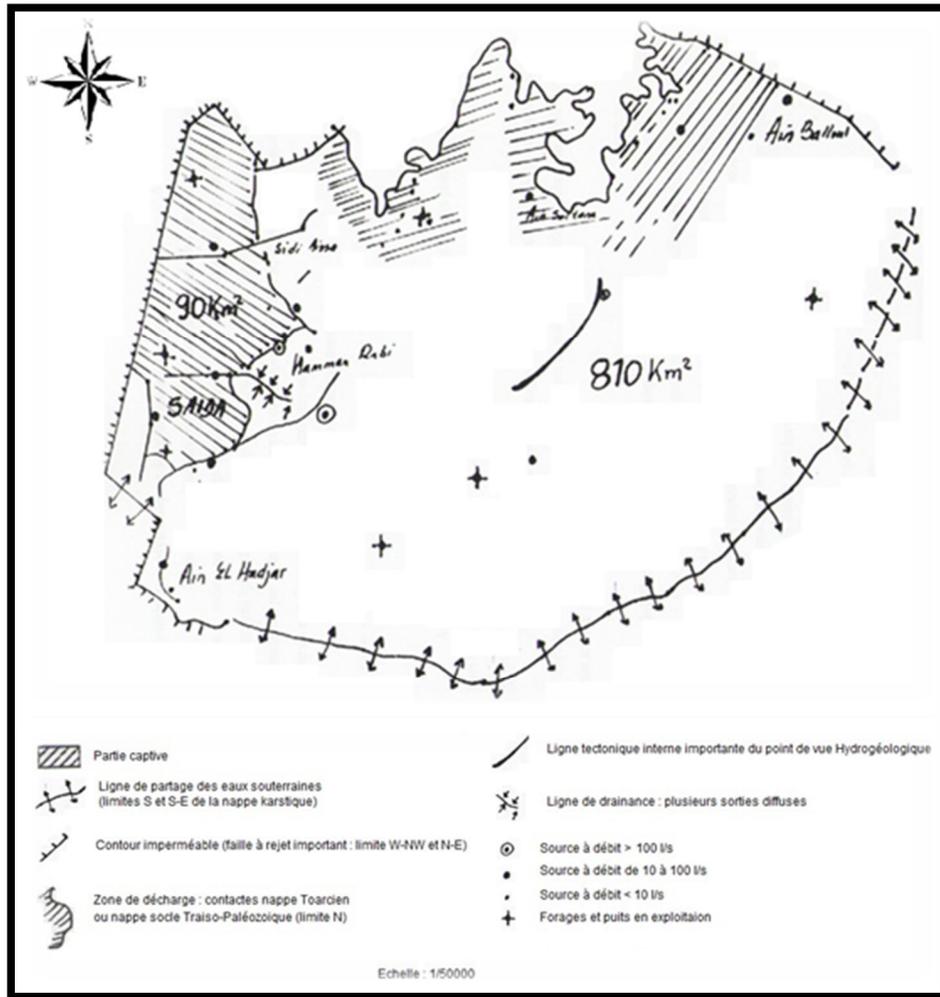


Fig. 15: Synthèse hydrogéologique de la nappe karstique des monts de Saida (DHW).

II-6 Piézométrie

L'étude de la piézométrie de la nappe est basée sur des données collectées auprès de :

- la direction de l'Hydraulique de la wilaya de Saida (inventaire des points d'eau établi au mois de Février 1992) ;
- l'A.N.R.H. (inventaire des points d'eau réalisé au mois de Mars 2001).

L'élaboration des cartes piézométriques par la technique d'interpolation d'ARCGIS nous a permis de marquer les grands axes d'écoulement et les zones d'alimentations latérales.

1- Campagnes piézométriques (Février, 1992 et Mars, 2001)

A l'aide des résultats des campagnes piézométriques, nous avons tracé deux cartes piézométriques (fig.16, 17).

La nappe garde presque la même structure et les mêmes sens d'écoulement mis à part la baisse générale de la surface piézométrique entre Février 1992 et mars 2001.

La surface isopiézométrique, présente un écoulement d'ensemble vers le Nord, c'est à dire vers l'exutoire, suivant la forme générale du relief avec un gradient variable compris entre 0,04% et 0,01%.

Les cartes en courbe isopièze montrent que l'écoulement se fait d'une manière générale du Sud-Est vers le Nord-Ouest suivant un axe de drainage correspondant aux thalwegs de l'Oued Saida. Les lignes de courant convergent en général vers les sources. Les courbes hydroisohypes ont leur concavité tournée vers l'aval. Toutes les eaux se rassemblent et sont drainées par l'Oued Saida.

Au Nord et à l'Ouest, les isopièzes sont assez espacées, tandis qu'au Sud et au Sud Est, elles se rapprochent pour donner des gradients hydrauliques plus importants surtout pour l'année 2001.

2- Evolution de la piézométrie entre 1992 et 2001

Nous avons tenté de faire une analyse comparative entre la piézométrie de Février 1992 et celle de Mars 2001 en période de hautes eaux. Cette comparaison fait ressortir :

- l'accroissement considérable du nombre de puits ayant pour conséquence une augmentation du débit de pompage.
- La diminution de la recharge par les précipitations due à la sécheresse.

Le nombre de forages, illustré dans la figure n° 17 indique une surexploitation de la nappe, d'une part et d'une mauvaise répartition de ces forages au niveau de la cuvette.

Tableau 8: Répartition des points d'eau (DHW Saida, 1992 / ANRH Alger, 2001)

	<i>1992</i>	<i>2001</i>
Puits	259	637
Forage	93	117
Source	136	124
Total	488	878

Chapitre II : Géologie et hydrogéologie

La densité de points d'eau en 2001 est de 2,85 points / Km² alors qu'elle n'était que de 1,58 points / Km² en 1992.

La multiplication des puits surtout le long de l'oued Saida ainsi que la sécheresse, accentuée par une évaporation intense, ont contribué à la diminution des niveaux statiques des puits (augmentation de l'exploitation) et au tarissement de certaines sources.

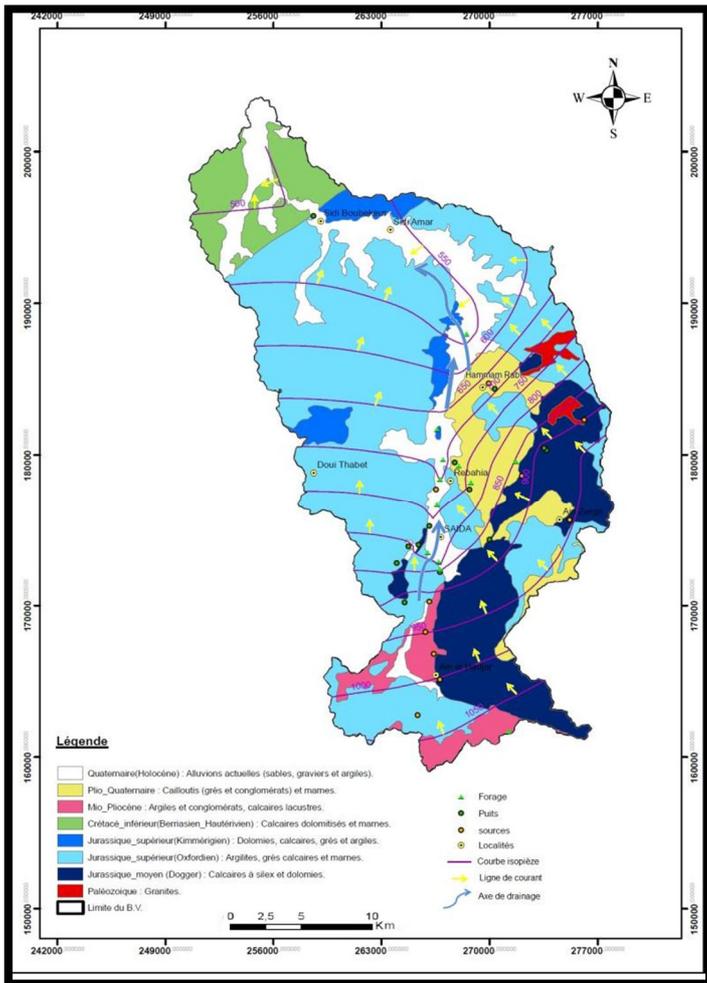


Fig. 16 : Carte piézométrique de la zone d'étude (Campagne Février, 1992)

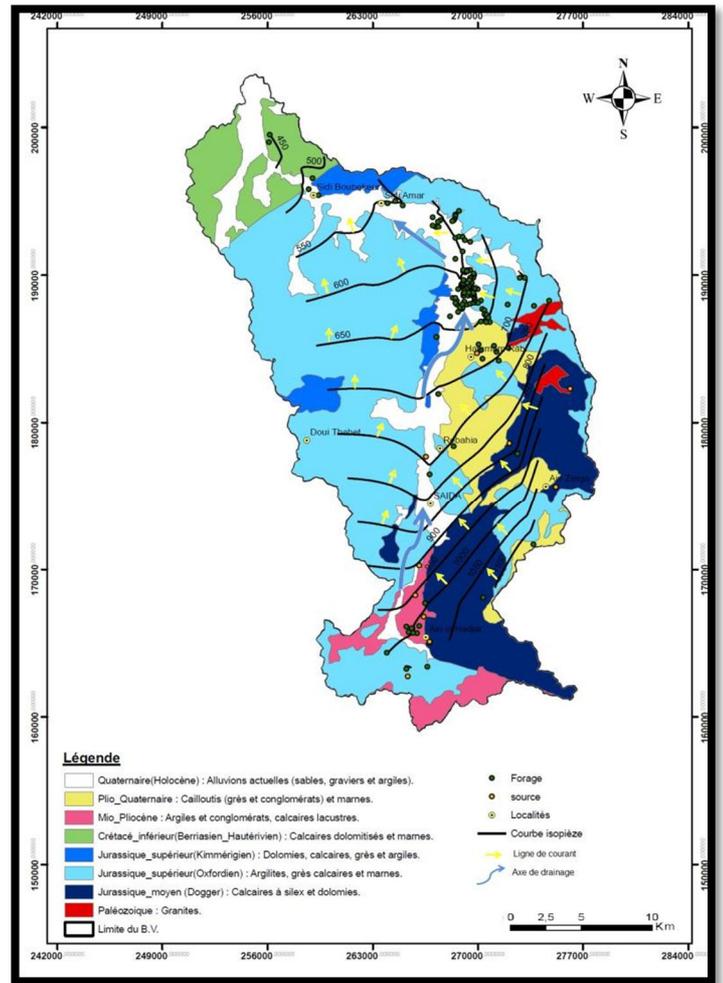


Fig. 17 : Carte piézométrique de la zone d'étude (Campagne Mars, 2001)

III- POTENTIALITE DES AQUIFERES DU BASSIN VERSANT DE L'OUED SAIDA.

A/Introduction

Depuis quelques années les techniques informatiques ont bouleversé non seulement nos possibilités d'expression cartographique, mais aussi notre conception même de la gestion des données. En effet les Systèmes d'Informations Géographiques (S.I.G.) présentaient des avantages précieux, car ils sont capables à la fois de mémoriser la totalité de l'information disponible et de faciliter la manipulation et l'interprétation des données. Les avantages des S.I.G. sont multiples surtout dans le domaine de planification et de la gestion des ressources naturelles telle que l'eau. Ils offrent la possibilité de description des organisations spatiales suivant des modèles qui peuvent évoluer avec les progrès des connaissances. Ils favorisent aussi la mise à jour des données, les changements d'échelles et la restitution des cartes thématiques.

Le SIG est considéré parmi les meilleurs outils les plus utilisés actuellement. En effet, le premier avantage de ce dernier c'est qu'il est capable de rassembler dans une même base de données des informations autrefois dispersées. Le secteur étudié (le bassin versant de l'oued Saida), présente une forte densité de puits dont la répartition n'est pas homogène dans l'espace. La majeure partie de ces puits se concentre dans la région de Hammam Rabi. L'utilisation des informations existantes (données géologiques, hydrologiques, et hydrogéologiques) est faite de manière à permettre une généralisation spatiale de l'information hydrogéologique existante. L'objectif final du modèle est de servir d'outil pour la planification de ces ressources à travers la réalisation d'une base de données thématiques et spatiales. La méthodologie proposée s'appuie, d'abord sur une approche d'évaluation puis de cartographie des eaux souterraines. Ceci à partir de l'analyse des facteurs majeurs régissant la potentialité des aquifères dans ces zones (L. KEBIR, 2009). Cette dernière s'est réalisée par l'utilisation d'un Système d'Informations Géographiques dans lequel nous avons introduit différentes couches d'informations décrivant les différents paramètres à savoir le réseau hydrographique superficiel, le Modèle numérique de terrain (MNT), la fracturation et la géologie.

B/ Constitution d'une base de données pour la réalisation de la carte de potentialité des eaux souterraines.

Depuis quelques années, les ressources en eau font l'objet d'un regain d'intérêt. Il est devenu nécessaire, de nos jours, de mieux prendre en compte la gestion de cette ressource vitale. La gestion de cette ressource qu'elle soit de surface ou souterraine suppose la connaissance de sa répartition spatiale dans l'espace. Cette base de données hydrogéologique vise le renforcement des capacités locales de gestion et de protection de la ressource en eau souterraine. Par ailleurs, elle vise une amélioration des connaissances sur cette ressource afin d'estimer ses potentialités d'exploitation. Cette base de données permet la mise en place d'un système d'information hydrogéologique. Ces outils sont indispensables pour la gestion et la compréhension du comportement hydrogéologique de l'aquifère (exploitation, suivi, protection).

Les données disponibles et collectées ont été intégrées au sein d'une base de données spatiale sur le logiciel ARCGIS. Ce dernier offre l'avantage de pouvoir traiter et exploiter les données tant vectorielles que raster, au sein d'un fichier unique, à la fois en tant que base de données relationnelles et en tant que système d'informations géographiques. Les nombreuses données spatiales disponibles, et que nous avons intégrées dans la géodatabase développée, concernent différents éléments caractérisant le milieu physique tels que :

- la topographie, avec notamment la réalisation d'un Modèle Numérique de Terrain (ou Digital Elevation Model - DEM) du bassin versant de l'oued Saida avec une résolution de 30 m,
- le réseau hydrographique hiérarchisé et les limites du bassin versant,
- la fracturation issue de l'image satellite optique,
- les formations géologiques rencontrées.

1. Réalisation des cartes thématiques de base

Le cheminement des eaux de surface vers les profondeurs découle de la perméabilité, de la nature du sol, donc de la connaissance du caractère lithologique ainsi que de la densité de fracturation. La forme ainsi que la densité du réseau hydrographique permettent de tirer des conclusions quant au ruissellement et à l'infiltration des eaux. Un réseau hydrographique complexe et développé implique généralement une faible infiltration. Enfin, une forte pente favorise les écoulements au dépend de l'infiltration. Donc les facteurs influençant la recharge seront étudiés indépendamment les uns des autres et par la suite, intégrés et compilés selon la méthodologie définie pour obtenir les zones de recharge potentielle.

Carte des pentes

L'inclinaison du terrain influence grandement la perméabilité et conditionne la vitesse du ruissellement et le rapport de l'écoulement sur l'infiltration (El Morjani, 2002). Plus la pente est forte, plus la durée de concentration des eaux de ruissellement dans les affluents et le cours principal est faible.

La pente est extraite du Modèle Numérique de Terrain (MNT). L'examen des valeurs de pentes a permis de déterminer quatre (04) classes (fig. 18), à savoir les pentes fortes, moyennes, faibles et très faibles.

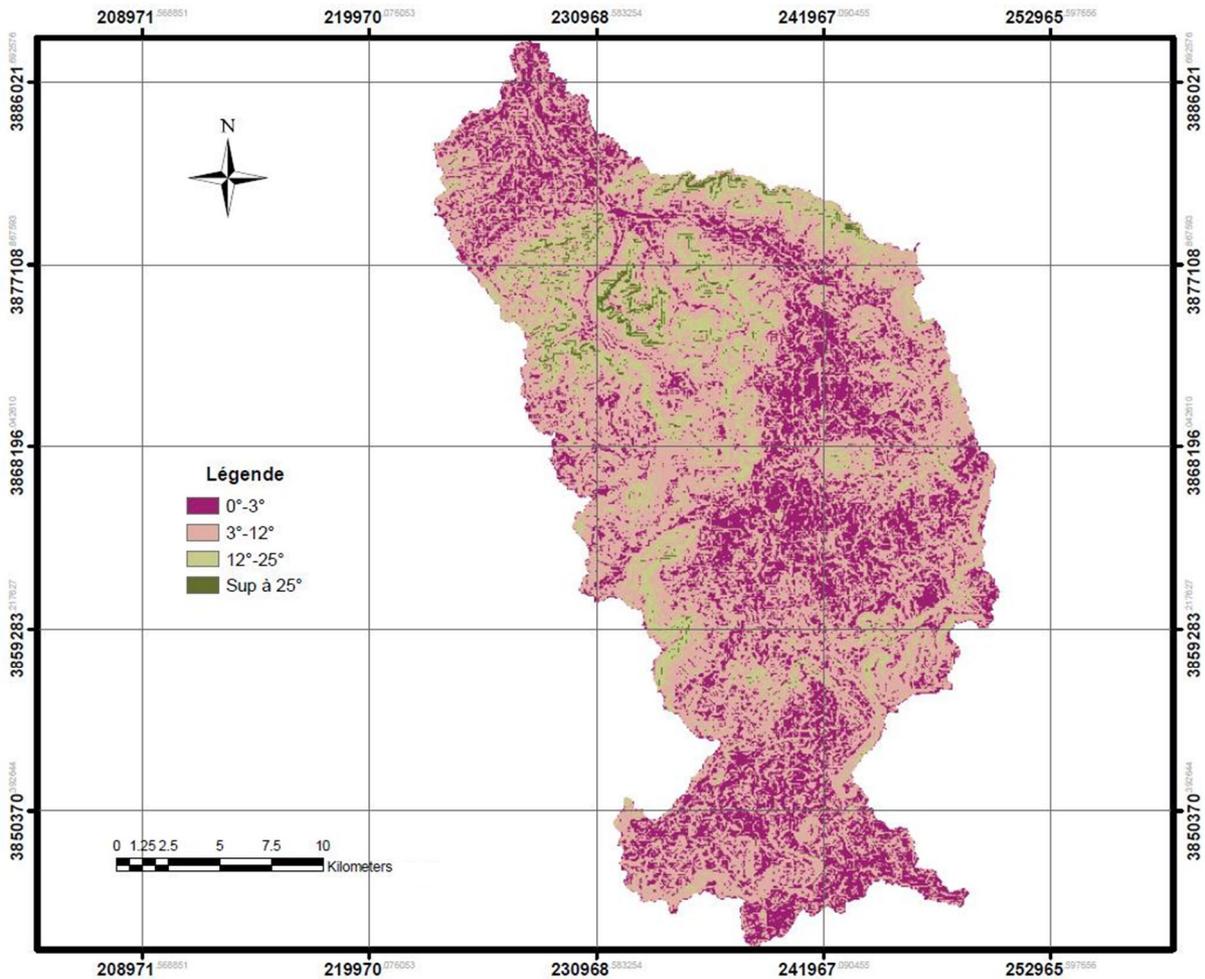


Fig. 18: Carte des pentes de la région d'étude.

Les pentes fortes, nous les retrouvons sur les zones montagneuses où le ruissellement serait très important, impliquant une infiltration presque nulle. Les pentes moyennes correspondent aux zones du piedmont. Les pentes faibles correspondent aux zones de rupture des pentes que nous retrouvons entre le piémont et la dépression. Enfin, les pentes très faibles se localisent au niveau des dépressions, cette zone occupe la totalité du bassin.

Carte de perméabilité

La carte de perméabilité est estimée à partir de la carte géologique en attribuant un coefficient de perméabilité pour chaque faciès lithologique figurant sur la carte géologique. Elle est destinée à visualiser les zones les plus perméables dans le secteur étudié.

Les lithologies rencontrées dans la zone d'étude ont été regroupées en 03 grandes classes, (fig. 19):

- Moyenne perméabilité,
- Faible perméabilité,
- Très faible perméabilité.

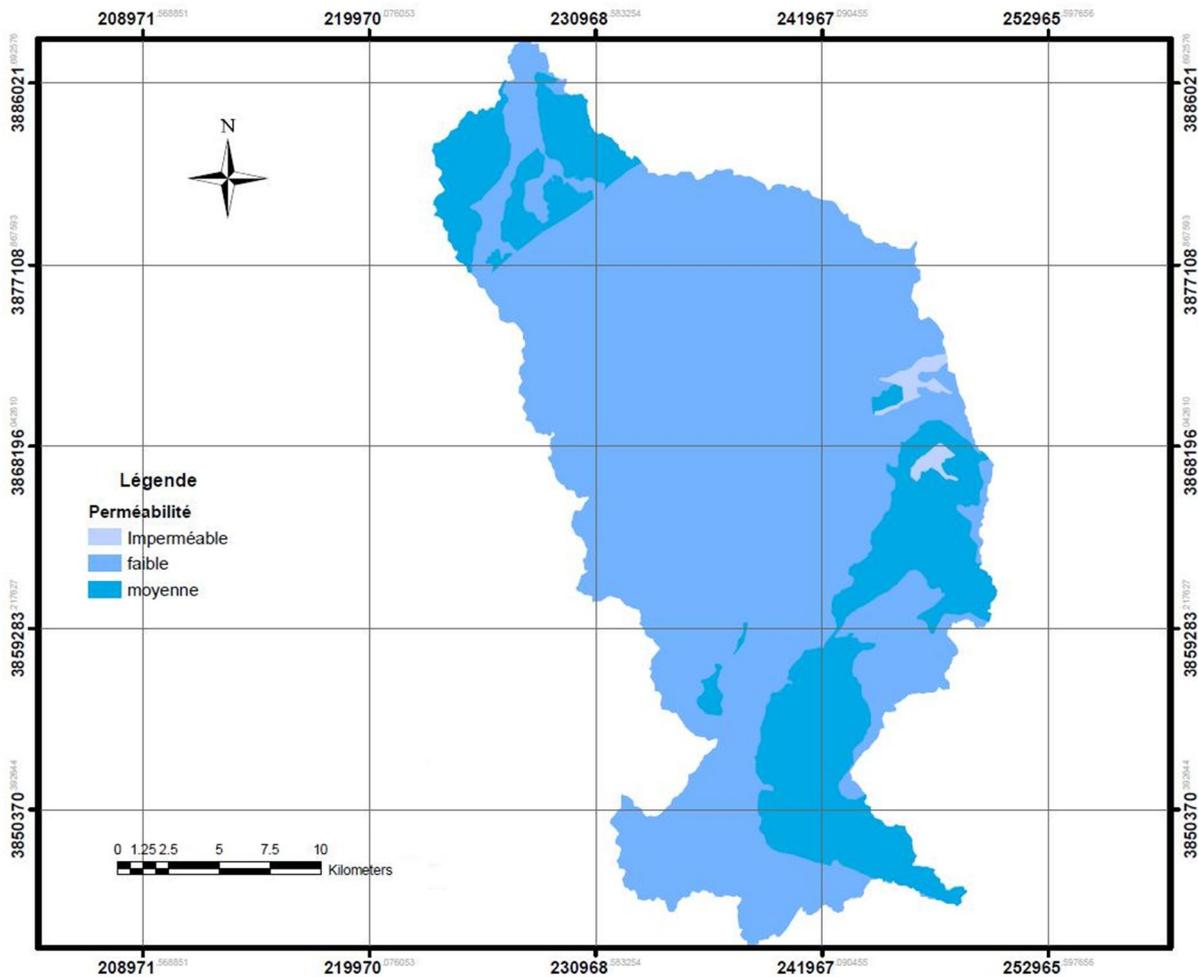


Fig. 19: Carte de perméabilité de la région d'étude

Carte de densité de drainage

L'établissement de la carte de densité de drainage repose sur la digitalisation, à partir de l'image satellite, de tous les cours d'eau et leur classement en fonction de leur ordre. La classification adoptée permet de distinguer quatre (04) classes suivant la densité de drainage (fig. 20, 21). Ces classes sont de forte, moyenne, faible et très faible densité de drainage.

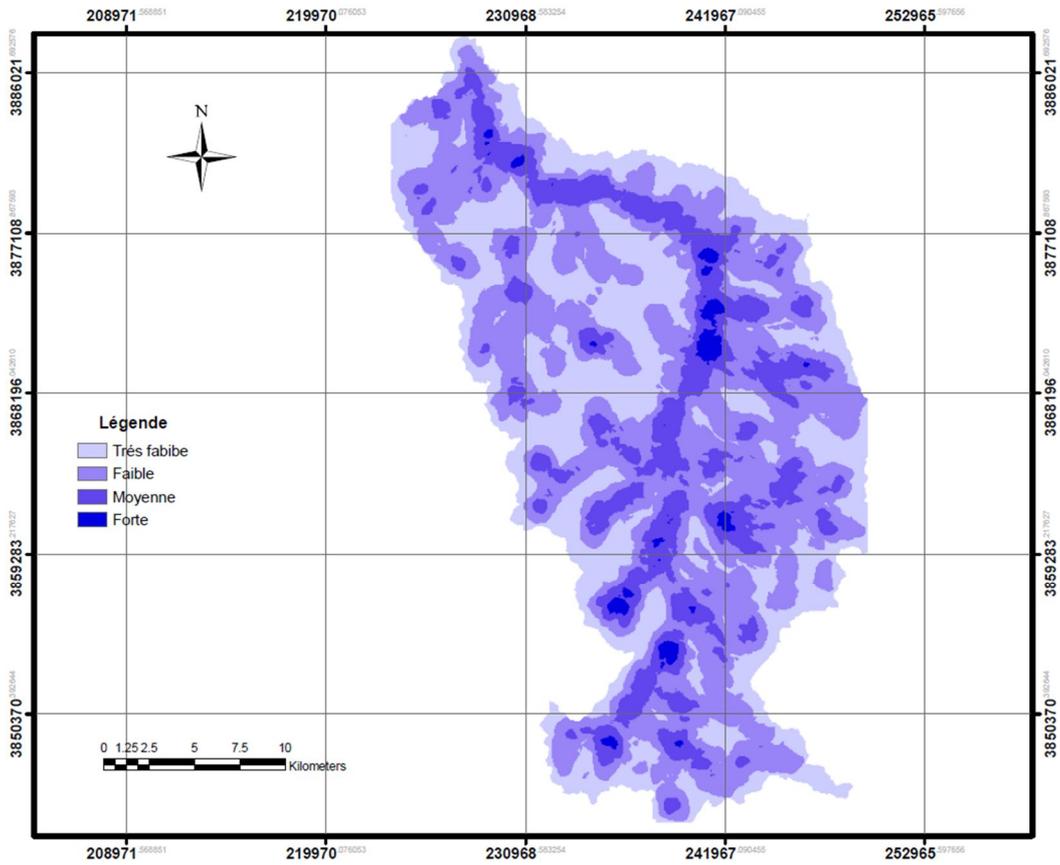


Fig. 20: Carte de la densité de drainage de la région d'étude.

L'écoulement et le drainage sont de forte densité au niveau des zones montagneuses. Nous retrouvons une densité moyenne au niveau des piedmonts et des zones de reliefs de moindre importance par rapport à la classe précédente. L'écoulement et le drainage commencent à diminuer au niveau des zones à faible pente correspondant aux régions où la densité de drainage est faible. Enfin, les densités de drainage très faibles concernent les zones de dépression où l'écoulement devient quasiment nul. C'est la zone la plus favorable à l'infiltration.

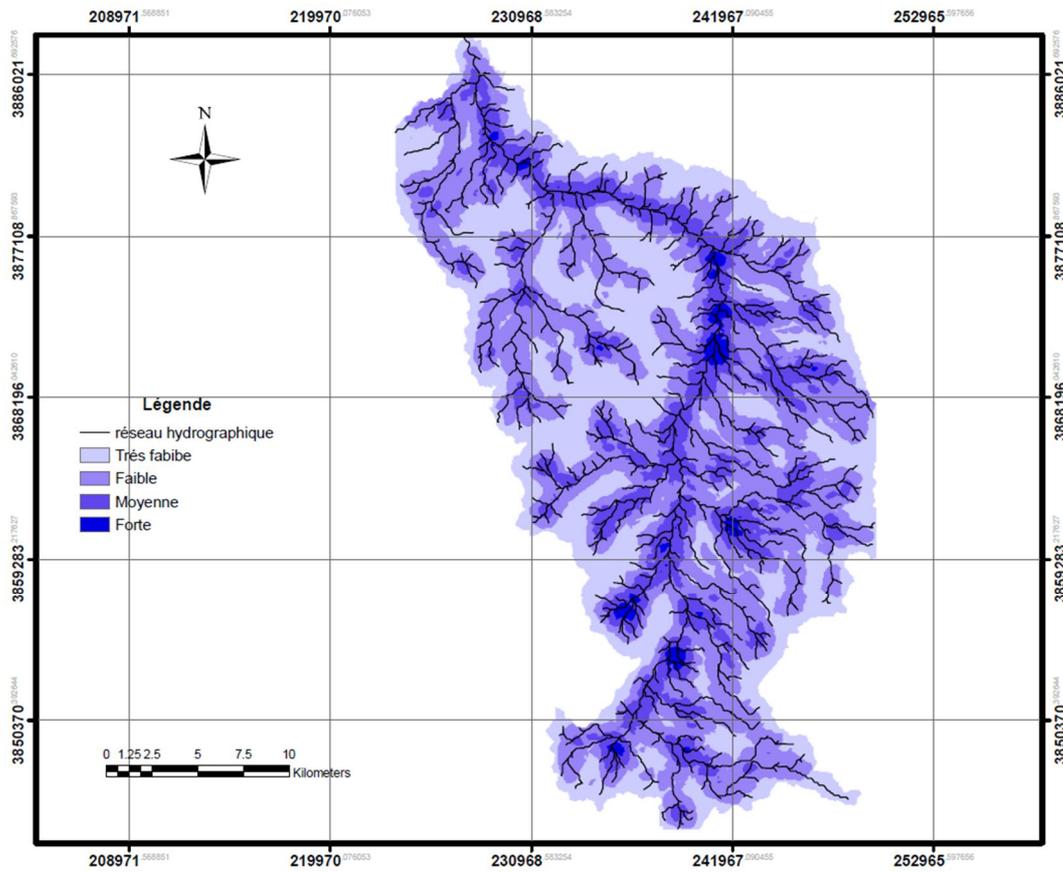


Fig. 21: Densité de drainage avec superposition du réseau hydrographique.

Carte de la densité de fracturation

Le cheminement des eaux de la surface vers les profondeurs dépend de plusieurs facteurs. Parmi ces paramètres nous avons la perméabilité, la compacité et la nature de la roche. La connaissance du caractère lithologique ainsi que de la densité de fracturation donne une idée assez précise sur la recharge de la nappe. Ce paramètre nous a permis de dégager quatre (04) classes (fig. 22).

- forte densité de fracturation,
- moyenne densité de fracturation,
- faible densité de fracturation,
- très faible densité de fracturation.

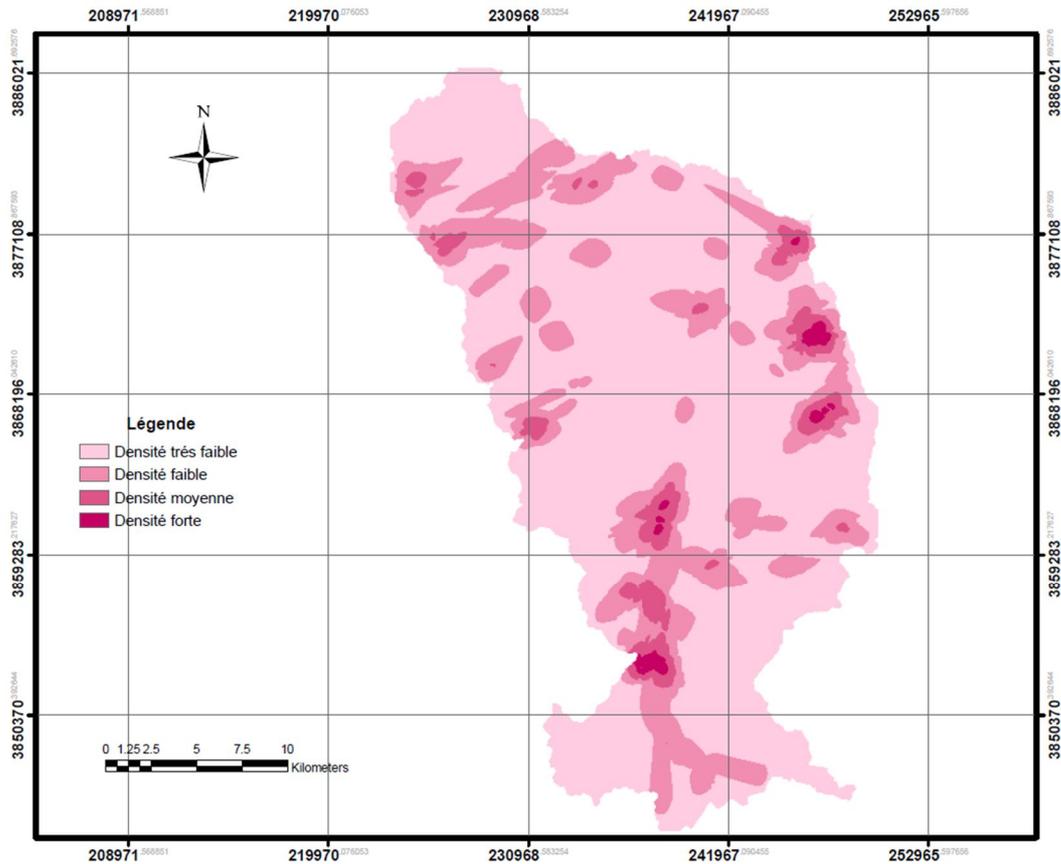


Fig. 22: Carte de la densité de fracturation de la région d'étude.

2. Réalisation de la carte de potentialité des eaux souterraines de la région d'étude

La cartographie des ressources en eau souterraine nécessite la conception et la mise en place d'une base de données hydrogéologiques de la zone d'étude. La méthodologie de conception d'une base de données hydrogéologique consiste à établir les cartes thématiques géologiques, de la fracturation, du réseau hydrographique et des pentes. Toutes ces couches d'informations sont regroupées et reconstituées dans la base de données hydrogéologique de la zone d'étude.

Nous avons identifié les principaux paramètres qui influent sur les potentialités en eaux souterraines et qui sont :

- La pente,
- Le réseau hydrographique,
- La fracturation,
- La perméabilité.

Chaque couche d'informations a été rangée selon plusieurs sous classes, auxquelles nous avons affecté des poids en fonction de la potentialité en eaux.

L'affectation de ces poids se fait selon l'importance que l'on donne à tel ou tel critère (Savané, 1997, Saley, 2003). Dans notre cas, le choix a porté sur les critères de la lithologie (d'où en découlera la carte de perméabilité), de la densité de la fracturation, la densité de drainage et de la pente.

La méthodologie utilisée est la pondération des critères, elle consiste à y affecter un poids dont la valeur dépend de son importance (critère) pour l'évaluation du résultat final. La somme de ces poids doit être égale à 1 (pour chaque critère) ce qui suppose que celui-ci est un chiffre compris entre 0 et 1.

Le nombre de classe est fixé à quatre pour une meilleure lisibilité et une bonne interprétation de la carte résultante.

Les différentes cartes décrivant les paramètres hydrogéologiques ont été intégrées puis combinées sous le logiciel ARCGIS 9.3 pour la production des cartes thématiques de base ainsi que la carte des potentialités en eaux. L'établissement de la carte des potentialités en eau souterraine nécessite la combinaison de tous les critères définis précédemment. Le résultat est représenté par quatre (04) classes de potentialité en eaux souterraines (fig. 23):

- Potentialité forte,
- Potentialité moyenne,
- Potentialité faible,
- Potentialité très faible.

Tableau 9: Classification des critères de Potentialité aquifère

Carte de thématiques de bases	Critères	Descriptions des classes	Poids	Total
Perméabilité	Perméabilité	impermeable	0	1
		Peu perméable	0.1	
		perméable	0.3	
		Très perméable	0.6	
Réseau linéaire	Densité de fracturation	Très faible	0	1
		faible	0.2	
		moyenne	0.3	
		forte	0.5	
Réseau de drainage	Densité de drainage	Très faible	0.05	1
		faible	0.15	
		moyenne	0.3	
		forte	0.5	
Pente	pente	Très faible	0.05	1
		faible	0.15	
		moyenne	0.25	
		forte	0.55	

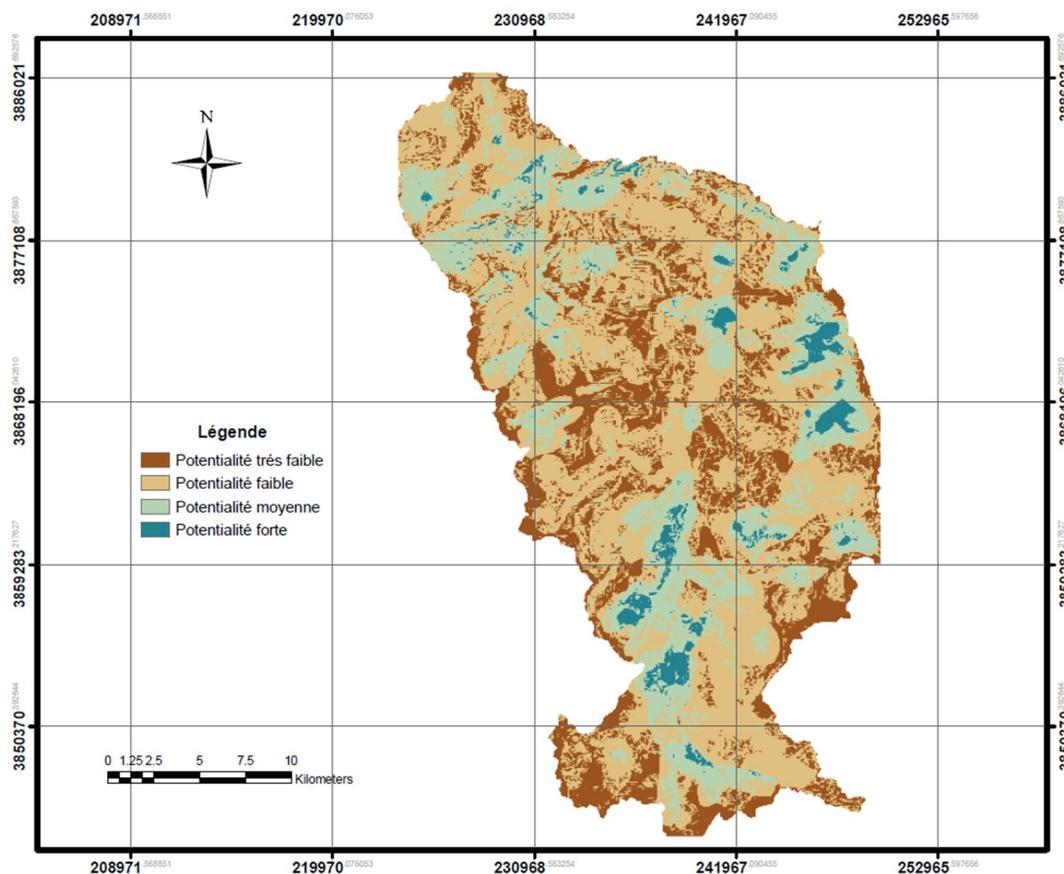


Fig. 23: Carte des potentialités des eaux souterraines.

C/ Résultats et discussions

Le document hydrogéologique réalisé permet de visualiser la variabilité spatiale des secteurs à potentialité aquifère de la zone d'étude. Ainsi, il se caractérise par la présence de quatre classes de potentiel hydrogéologique avec la classe forte qui est très faiblement représentée comparativement à la classe de potentialité faible, qui est la classe dominante et qui occupe la quasi-totalité du bassin versant de l'oued Saida.

La classe faible caractérise les zones de potentialités des ressources en eaux souterraines très défavorables à l'existence de réservoir. La classe forte se rencontre dans quelques poches qui sont entourées de la classe de potentialité Moyenne.

La carte du potentiel aquifère obtenue facilite les décisions, en montrant les zones susceptibles de faire l'objet d'une prospection hydrogéologique classique. Elle oriente les décideurs dans leurs prises de décision en ce qui a trait à l'implantation raisonnée de nouveaux forages à débits importants, dans une optique d'amélioration de l'approvisionnement en eau. Ce document représente donc un outil d'aide à la décision destiné aux pouvoirs publics, pour une meilleure gestion du bassin versant de l'oued Saida.

IV- Conclusion :

Géologiquement le bassin des Monts de Saida est caractérisé par l'échelle stratigraphique suivante :

- Le paléozoïque : qui constitue le socle (schiste, granite);
- Le Jurassique moyen : une formation carbonatée du Bajo-bathonien ;
- Le Callovo-oxfordien : formation détritique (argile, grès) ;
- Le Kimméridgien : formation carbonatée à dolomies calcaires ;
- Le Plio-quatenaire : dépôts continentaux.

Hydrogéologiquement, la région des Monts de Saida est caractérisée par la présence de deux types de nappes, une nappe superficielle localisée exclusivement dans la vallée de l'Oued Saida, et une autre, plus importante et plus intéressante située dans les sédiments carbonatés du Jurassique inférieur et moyen (formation des carbonates de Nador : l'Aaléno-Bathonien). Cette nappe comportant une partie captive dans la vallée de Saida et une autre libre dans le reste du réservoir est très influencée par le phénomène de fissuration et de karstification.

Le résultat du croisement des cartes thématiques est l'obtention d'une carte qui permet de visualiser la variabilité spatiale des secteurs à potentialité aquifère de la zone d'étude. Sur le bassin versant de l'oued Saida, le degré de potentialité hydrogéologique varie de « faible à fort » avec la classe « faible » la plus représentative et la classe forte la moins représentative. La classe faible occupe la quasi-totalité du bassin versant. La classe forte se rencontre dans quelques poches.

CHAPITRE III
CLIMATOLOGIE

I- INTRODUCTION

Les conditions climatiques d'un bassin versant jouent un rôle capital dans le comportement hydrologique des cours d'eau. Pour cela nous examinerons tous les paramètres climatiques et tenterons de dégager les principales caractéristiques qui s'intègrent dans l'évaluation de bilan hydrologique.

Les précipitations constituent les principales entrées des systèmes hydrologiques tels que les bassins versants. Elles sont vitales pour les êtres humains dans la mesure où elles assurent la recharge des ressources en eau et favorisent le développement des activités humaines (agriculture, pêche, production d'énergie,...). Mais, elles peuvent devenir aussi dangereuses, voire mortelles, en causant des inondations.

Toute étude climatique est basée sur la collecte des données. La quantité et la qualité de ces dernières conditionnent les résultats obtenus.

II- PARAMÈTRES CLIMATIQUES

La pluviométrie demeure le paramètre le plus important, elle conditionne l'écoulement saisonnier, le régime des cours d'eau et l'alimentation des nappes d'eau souterraines. Cinq stations font l'objet de notre étude (fig.24), pour les relevés des autres paramètres climatiques seule la station de Saida sera prise en compte.

Les données climatologiques ont été recueillies au niveau des services de l'A.N.R.H et l'O.N.M. Nous remarquons que ces données présentent des lacunes au niveau de la majorité des stations ce qui nécessite leur comblement.

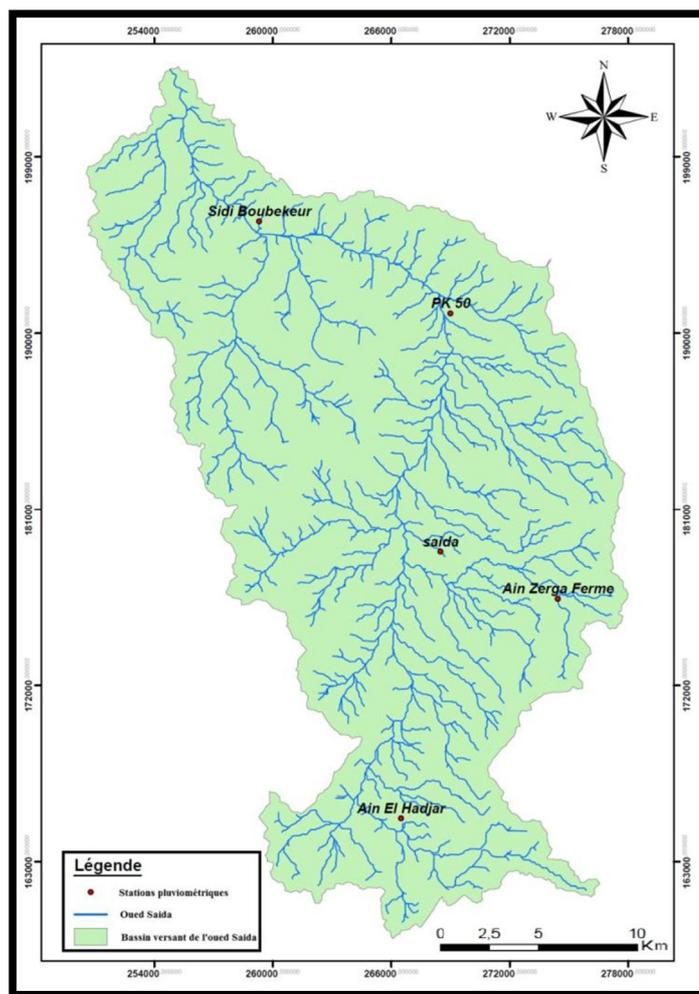


Fig. 24: Situation des stations pluviométriques.

1 - Etude des précipitations

L'analyse des pluies basée sur les relevés pluviométriques au niveau des stations permettra de déterminer la précipitation moyenne annuelle représentative de l'ensemble du bassin versant.

Tableau 10: Caractéristiques des stations pluviométriques.

Stations	Coordonnées Lambert		Altitude
	X (Km)	Y (Km)	Z (m)
Saida	268,5	178,8	750
Sidi Boubekeur	259,3	195,7	540
PK 50	269,0	191,0	630
Ain Zerga Ferme	274,45	176,4	980
Ain El Hadjar	266,5	165,2	1015

1.1- Critique et homogénéisation des données pluviométriques

L'existence des erreurs systématiques et des lacunes dans les séries pluviométriques exige l'apport de corrections. La tâche consiste à vérifier l'homogénéité et la détection des anomalies sur les totaux annuels et à définir une station de référence, c'est-à-dire celle qui possède la période la plus longue et qui dispose de données suffisantes en qualité. De ce fait, la station de Saïda présente une bonne homogénéité. Elle a été choisie au titre d'une série de 38 ans (1974/1975 - 2011/2012) pour sa continuité, fiabilité et longueur relative des observations. Elle servira de référence. Les autres stations présentent une certaine hétérogénéité due à l'absence de mesures sur plusieurs années.

1.1.1 - Comblement des lacunes par extension des données : méthode de la régression linéaire

L'extension des données manquantes est effectuée par la méthode de la régression linéaire avec le logiciel HYDROLAB, le but de cette méthode consiste à estimer les variables pluviométriques inconnues de certaines stations à partir des observations de la station de Saïda qui est prise comme référence.

Cette méthode permet :

- d'établir une relation mathématique pouvant exister entre deux séries de données pluviométriques (x et y),
- d'effectuer une extension d'une série courte (y) à l'aide d'une autre (x) plus longue dépourvue de lacunes,
- de déterminer, à partir de la méthode des moindres carrés, la droite de régression qui est de la forme : $y = a x + b$.

avec :

$$a = \frac{k \sum xy - \sum x \sum y}{k \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad \text{et} \quad b = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum x \sum xy}{k \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$r^2 = a \frac{k \sum xy - \sum x \sum y}{k \sum y^2 - (\sum y)^2}$$

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau 11: Résultats des corrélations par régressions linéaires.

Stations		a	b	r	Equation de la droite de régression
X	Y				
Saida	Ain Zerga	0,60	135,04	0,88	$Y = 0,60 X + 135,04$
Saida	PK 50	0,82	55,88	0,93	$Y = 0,82 X + 55,88$
Saida	Sidi Boubekeur	0,64	69,79	0,91	$Y = 0,64 X + 69,79$
Saida	Ain El Hadjar	0,98	10,64	0,94	$Y = 0,98 X + 10,64$

Les figures des corrélations par régression linéaires sont présentées dans les figures ci-dessous.

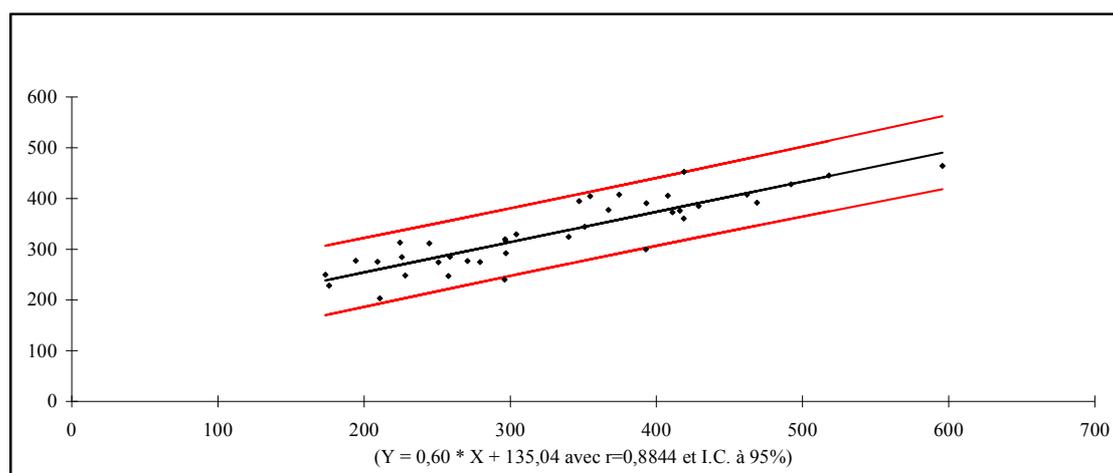


Fig.25: Droite de la régression linéaire des précipitations annuelles Saida-AinZerga Ferme (1974/1975 – 2011/2012).

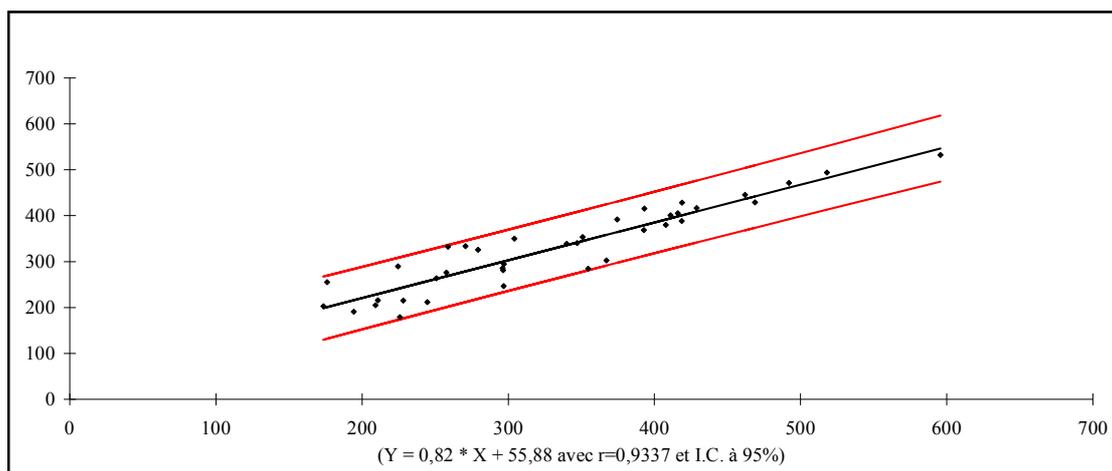


Fig.26: Droite de la régression linéaire des précipitations annuelles Saida-PK 50 (1974/1975 – 2011/2012).

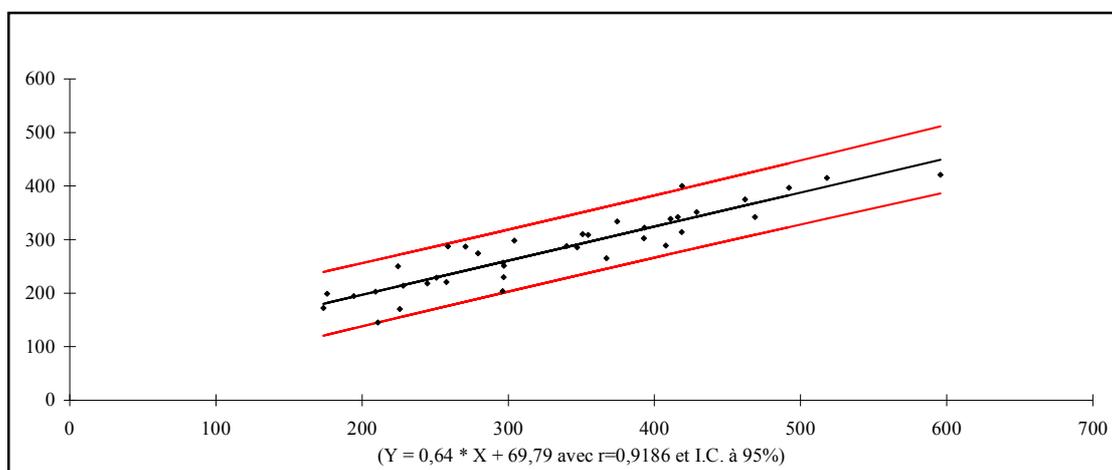


Fig.27: Droite de la régression linéaire des précipitations annuelles Saida-Sidi Boubekeur (1974/1975 – 2011/2012).

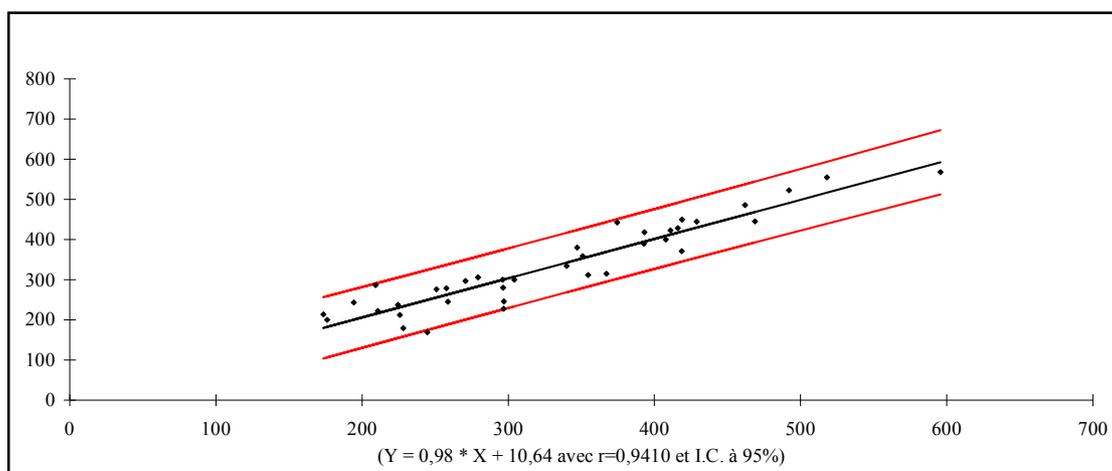


Fig.28: Droite de la régression linéaire des précipitations annuelles Saida-Ain El Hadjar (1974/1975 – 2011/2012).

Tableau 12: Présentation des données des précipitations moyennes annuelles des différentes stations (1974/1975 – 2011/2012) après comblement des lacunes.

Années	AIN ZERGA FERME	PK 50	SIDI BOUBEKEUR	AIN EL HADJAR	SAIDA
1974-1975	407,7	391,6	333,8	442,8	374,5
1975-1976	390,8	415,7	322,1	418	393,2
1976-1977	247,3	276,2	220,8	278,6	257,6
1977-1978	285,1	332,3	287,4	245,1	258,7
1978-1979	300	368,4	302,4	390	392,7
1979-1980	405,4	380	289	400	407,8
1980-1981	311,6	211,6	218,1	168,9	244,6
1981-1982	248,3	214,8	213,9	179,3	228,1
1982-1983	284,2	179	170,1	212,3	225,8
1983-1984	312,9	289,6	250	237,3	224,6
1984-1985	329,4	350	298,1	300	304,2
1985-1986	377,4	302,5	265	314,8	367,2
1986-1987	277,5	190,8	194,3	243,4	194,4
1987-1988	240	285,8	203,8	300	296,2
1988-1989	407,3	445,2	375,1	485,6	462,0
1989-1990	394,7	340,5	285,5	380	347,2
1990-1991	452,4	428,7	400	450	418,9
1991-1992	228,3	255,1	198,8	200	176
1992-1993	249,7	202,4	172,4	213,7	173,5
1993-1994	275,2	205	202,6	286,6	209,1
1994-1995	404,2	284,5	308,5	311,7	354,7
1995-1996	464,1	532,6	421	567,8	595,6
1996-1997	315,9	246,8	229,7	227,7	296,8
1997-1998	277	333,4	286,8	296,8	270,8
1998-1999	203,1	215,4	145,1	221,8	210,8
1999-2000	292,3	294,9	251,3	246	297
2000-2001	319,6	281,3	257	280,2	296,5
2001-2002	274,9	325,9	274,2	305,7	279,4
2002-2003	344,4	353,4	310,2	359	350,9
2003-2004	360,4	388,4	313,9	371,2	418,8
2004-2005	274,2	263,7	228,8	276	250,8
2005-2006	391,9	429,1	342,3	445,2	468,8
2006-2007	324,4	338,7	287,9	334,1	340
2007-2008	384,9	416,4	351,5	444,6	429
2008-2009	445,4	494,2	415,2	555,1	518
2009-2010	372,6	400,7	338,6	422,3	411
2010-2011	376	405,1	342,2	428,5	416
2011-2012	427,7	471,4	396,6	522,8	492
Moyenne annuelle (mm)	333,6	330,0	280,3	335,9	333,0

1.2- Ajustement des précipitations annuelles à une loi normale

L'ajustement a été réalisé à l'aide du logiciel Hydrolab (Laborde et Mouhous, 1998) qui utilise la loi normale, après avoir effectué le test d'adéquation χ^2 qui nous a permis de conclure que l'adéquation de la loi normale est acceptable et l'ajustement est satisfaisant¹.

Les données pluviométriques annuelles sont portées sur un diagramme de Gauss, sur lequel l'axe des abscisses représente les probabilités et l'axe des ordonnées des modules pluviométriques. On remarque que les distributions des précipitations pour les cinq stations fournissent un alignement de points (fig. 29, 30, 31, 32 et 33), les bornes supérieure et inférieure représentent les limites de l'intervalle de confiance à 95%. Nous avons ainsi obtenu une bonne qualité d'ajustement.

Tableau 13: Caractéristiques des pluies annuelles du bassin versant de l'Oued Saida (mm)

Station	Moyenne	Écart-type	Coefficient de variation
AIN ZERGA FERME	333,6	69,20	0,21
PK50	330,0	90,49	0,27
S. BOUBEKEUR	281,7	71,09	0,25
A. EL HADJAR	335,9	106,52	0,32
SAIDA	333,0	102,62	0,31

Par cette méthode, nous avons également évalué les fréquences au non dépassement et les temps de retour des précipitations dont les résultats sont illustrés dans le tableau 16.

¹ $\chi^2 = \sum \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}$; $np_i = \frac{\sum \text{observations}}{\text{Nombre de classes}}$; d.d.l. = k-p-1

Voir tableaux 14 et 15 en annexe.

d.d.l. = degré de liberté
k = nombre de classes
p = paramètres estimés

Tableau 16 : Pluies annuelles fréquentielles du bassin versant de l'Oued Saida (mm)

station	moyenne	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	1000 ans
AIN ZERGA FERME	333,6	422,3	447,5	475,8	494,7	547,5
PK50	330,0	446,0	478,9	515,9	540,6	609,7
S. BOUBEKEUR	281,7	372,8	398,6	427,7	447,1	501,4
A. EL HADJAR	335,9	472,4	511,1	554,7	583,7	665,1
SAIDA	333,0	464,5	501,8	543,8	571,8	650,1

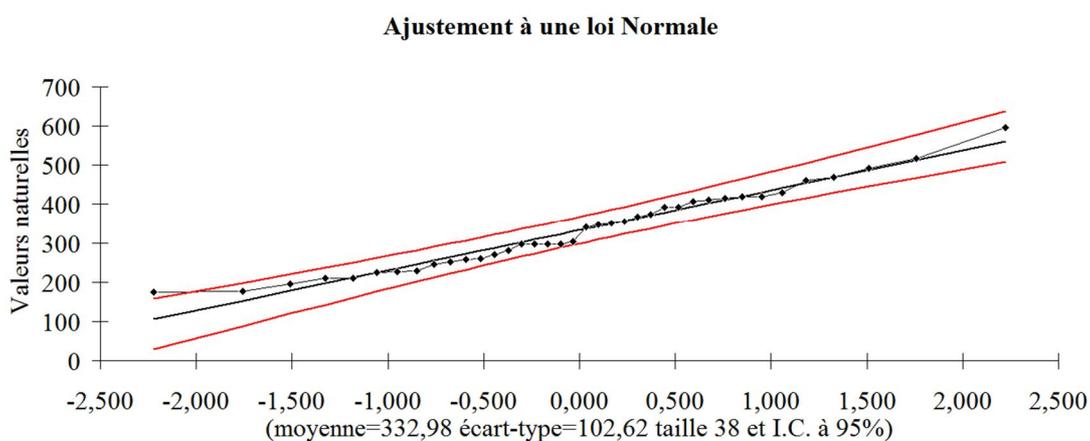


Fig.29: Ajustement des précipitations annuelles à une loi normale (station Saida 1974/1975 – 2011/2012)

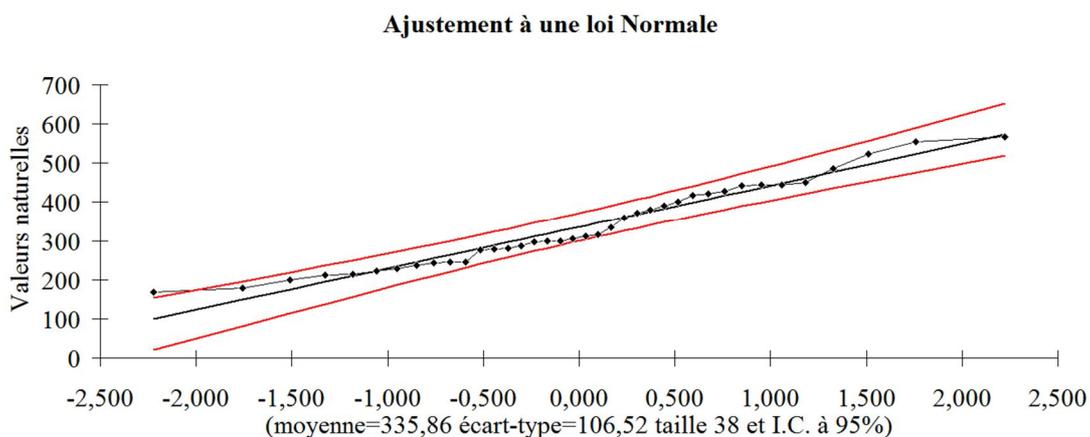


Fig.30: Ajustement des précipitations annuelles à une loi normale (station Ain El Hadjar 1974/1975 – 2011/2012)

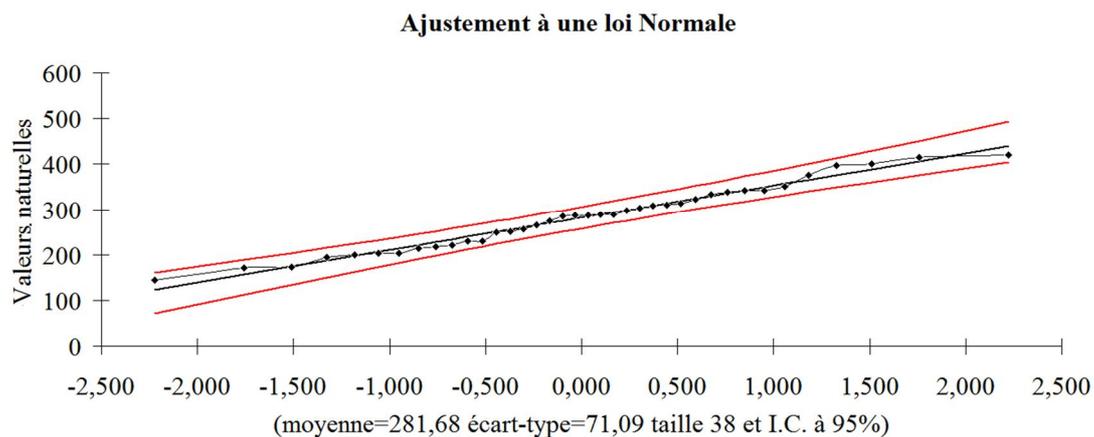


Fig.31: Ajustement des précipitations annuelles à une loi normale (station Sidi Boubekeur 1974/1975 – 2011/2012)

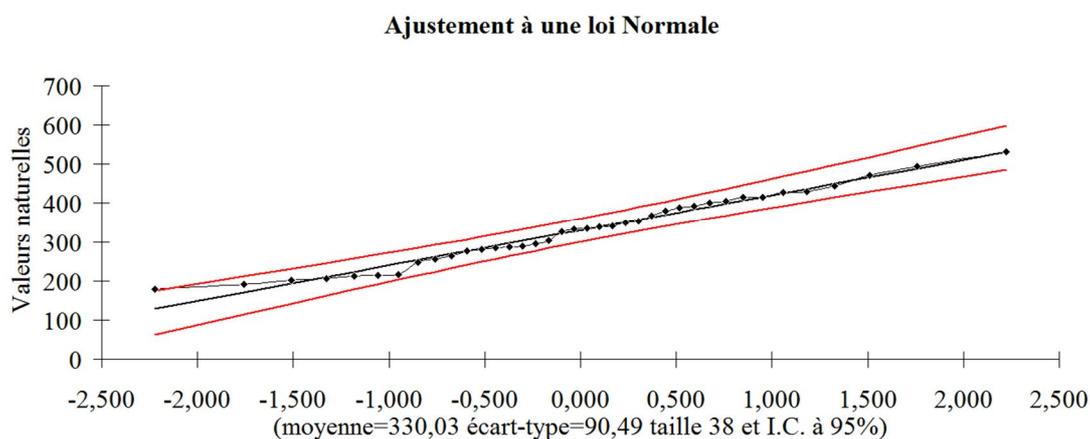


Fig.32: Ajustement des précipitations annuelles à une loi normale (station PK 50 1974/1975 – 2011/2012)

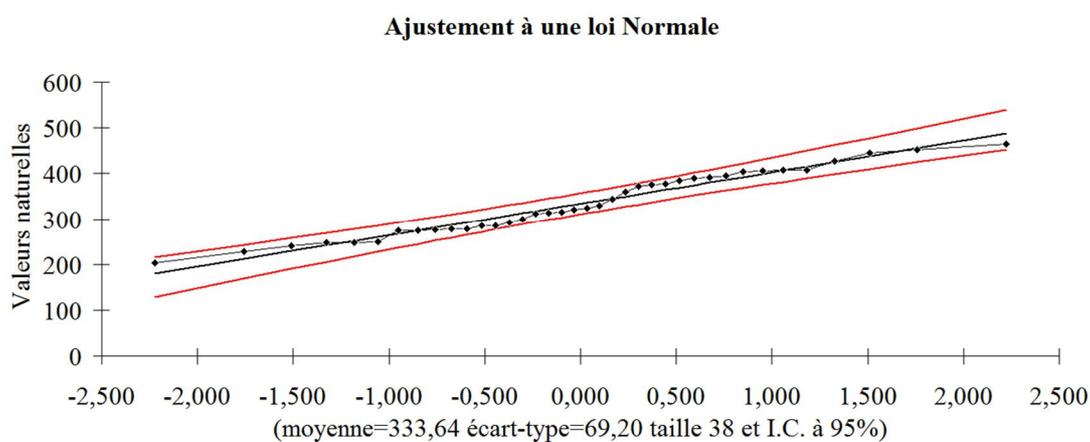


Fig.33: Ajustement des précipitations annuelles à une loi normale (station Ain Zerga Ferme 1974/1975 – 2011/2012)

1.3- Répartitions des précipitations moyennes annuelles

Le diagramme de la figure 34 illustre la distribution des précipitations moyennes annuelles aux différentes stations (période 1974/1975 – 2011/2012). On remarque sur les mêmes stations une grande irrégularité des moyennes annuelles en relation avec l'influence de plusieurs facteurs : Altitude, éloignement par rapport à la mer, pluviométrie exposée ou non aux vents humides.

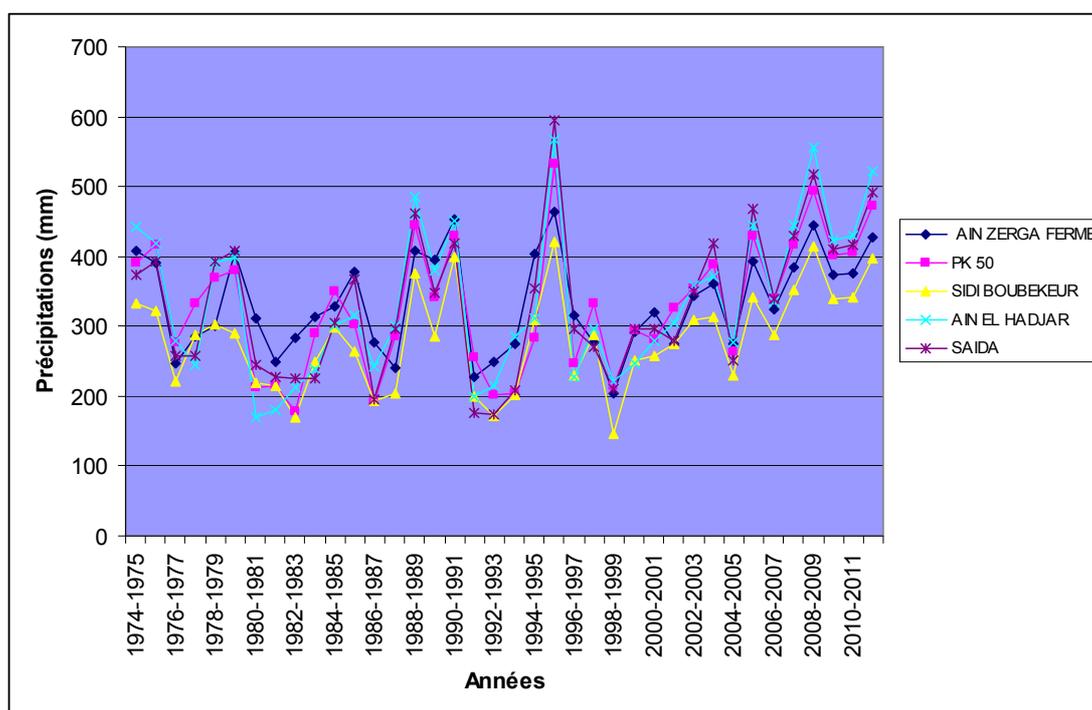


Fig.34: Variations des précipitations moyennes annuelles (période 1974/1975 – 2011/2012).

1.4- REPARTITION MENSUELLE DES PRECIPITATIONS

Pour mieux caractériser le régime climatique de la région, nous avons étudié la répartition des précipitations à l'échelle mensuelle sur une période allant de 1974/75 – 2005/06.

Par manque de données au niveau des stations, cette étude s'intéressera uniquement aux stations de Sidi Boubekeur, Ain El Hadjar et Saida.

Tableau 17 : Valeurs moyenne mensuelle des précipitations aux stations de Sidi Boubekeur, Ain El Hadjar et Saïda. (1974/75 – 2005/06).

STATION	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	An
SIDI BOUBEKEUR	14,0	27,4	42,8	28,4	31,7	32,3	29,3	26,0	23,3	5,8	3,3	3,5	267,9
AIN EL HADJAR	17,2	31,3	42,2	40,3	46,8	37,0	28,6	31,2	25,2	8,3	2,4	3,7	314,2
SAIDA	14,6	38,7	41,2	34,8	38,3	34,7	34,8	32,5	26,5	7,7	2,4	7,8	314,0

L'analyse de la variabilité moyenne mensuelle des précipitations (Fig.35) pour la période 1974/75-2005/06 montre l'existence d'une saison froide et humide s'étalant d'Octobre à Mai avec un maximum en Novembre à l'exception de la station d'Ain El Hadjar où le maximum s'observe au mois de Janvier et une saison sèche entre Juin et Septembre où les plus faibles précipitations sont enregistrées au mois de Juillet.

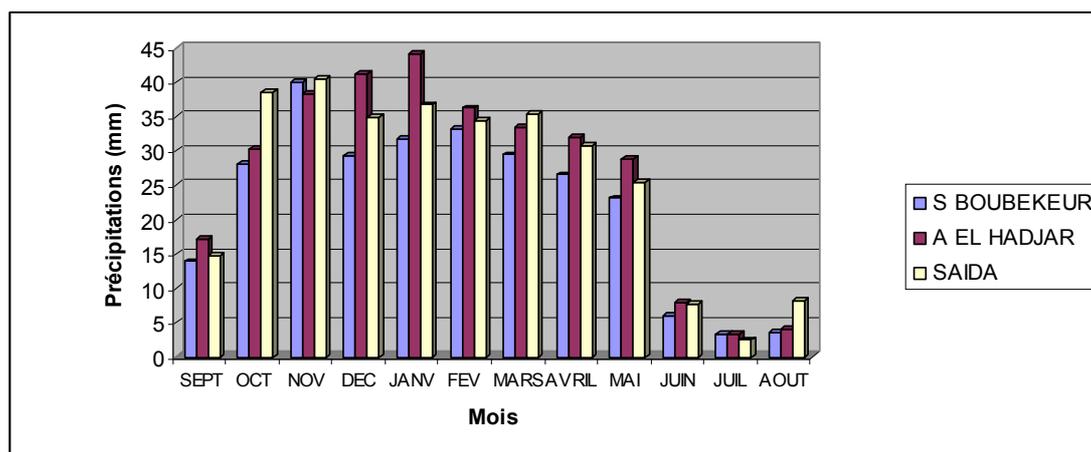


Fig.35 : Histogramme des précipitations mensuelles pour la période 1974/75-2005/06 aux stations de Sidi Boubekeur, Ain El Hadjar et de Saïda.

1.5- Précipitations saisonnières

Le report de la distribution des précipitations saisonnières sur la figure 36 montre que, malgré la grande variabilité des précipitations, les pluies d'hiver sont toujours les plus importantes (tableau 18).

Tableau 18: Répartition saisonnière des précipitations

Stations	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Année	Indice Saisonnier
	Automne(A)		Hiver (H)		Printemps (P)		Été (E)							
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%		
SIDI BOUBEKEUR	84,2	31,4	92,4	34,5	78,7	29,4	12,5	4,7	267,9		H.A.P.E.			
AIN EL HADJAR	90,7	28,8	124,2	39,5	85,0	27,1	14,4	4,6	314,2		H.A.P.E.			
SAIDA	94,5	30,1	107,8	34,3	93,8	29,9	17,9	5,7	314,0		H.A.P.E.			

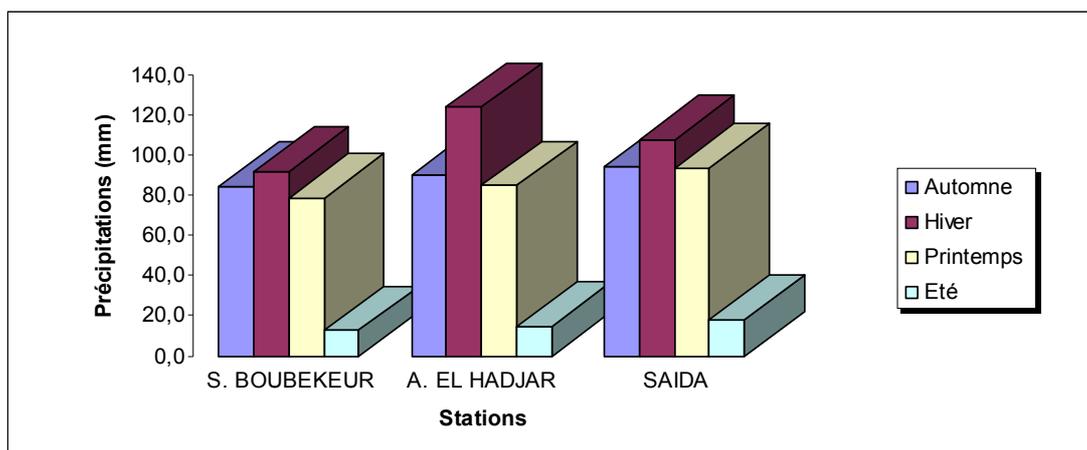


Fig.36 : Variations saisonnières des précipitations pour la période 1974/75-2005/06 aux stations de Sidi Boubekeur, Ain El Hadjar et de Saïda.

1.6- Détermination de la lame d'eau précipitée (fig. 37 & fig. 38)

Trois méthodes d'estimation de la lame d'eau précipitée ont été employées : La méthode de la moyenne arithmétique, la méthode des polygones de Thiessen et la méthode des isohyètes (tabl. 19, 20 & 21) en annexe.

Les résultats obtenus, après calcul, sont résumés au tableau suivant :

Tableau 22: Lame d'eau écoulee estimée par différentes méthodes. (Période 1974/1975 - 2011/2012)

Méthode d'estimation	Lame d'eau moyenne (mm)
Moyenne arithmétique	322,8
Thiessen	320,6
isohyètes	320,1

Les trois méthodes utilisées donnent des résultats assez voisins. Nous pouvons admettre que la lame d'eau tombée serait de l'ordre de **321,2 mm / an**.

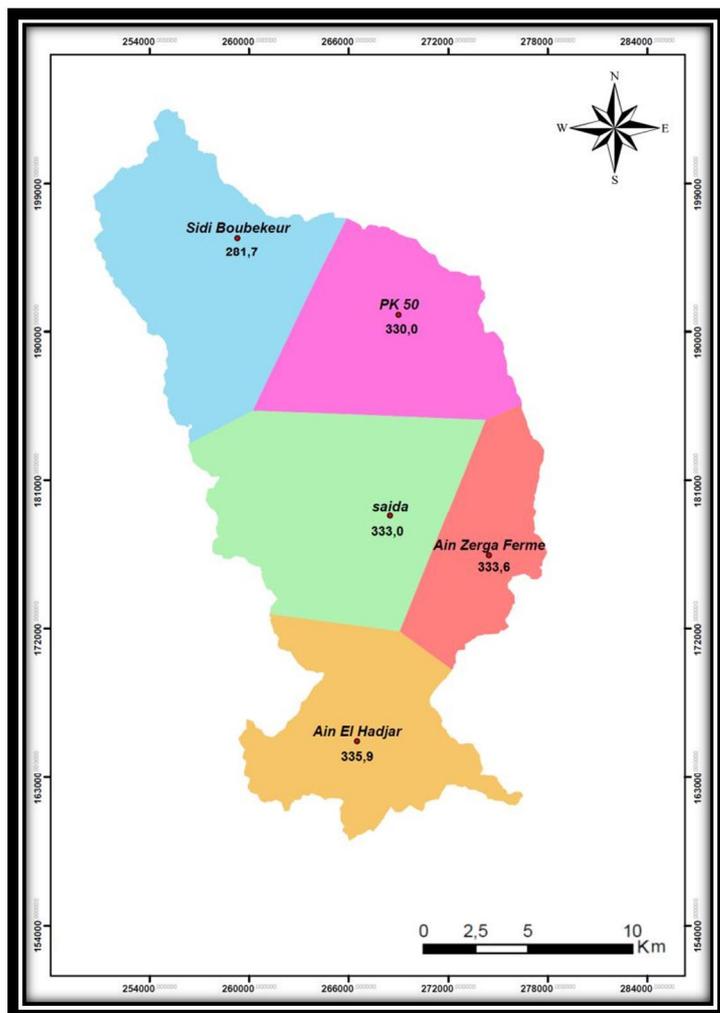


Fig. 37 : Polygone de THEISSEN.

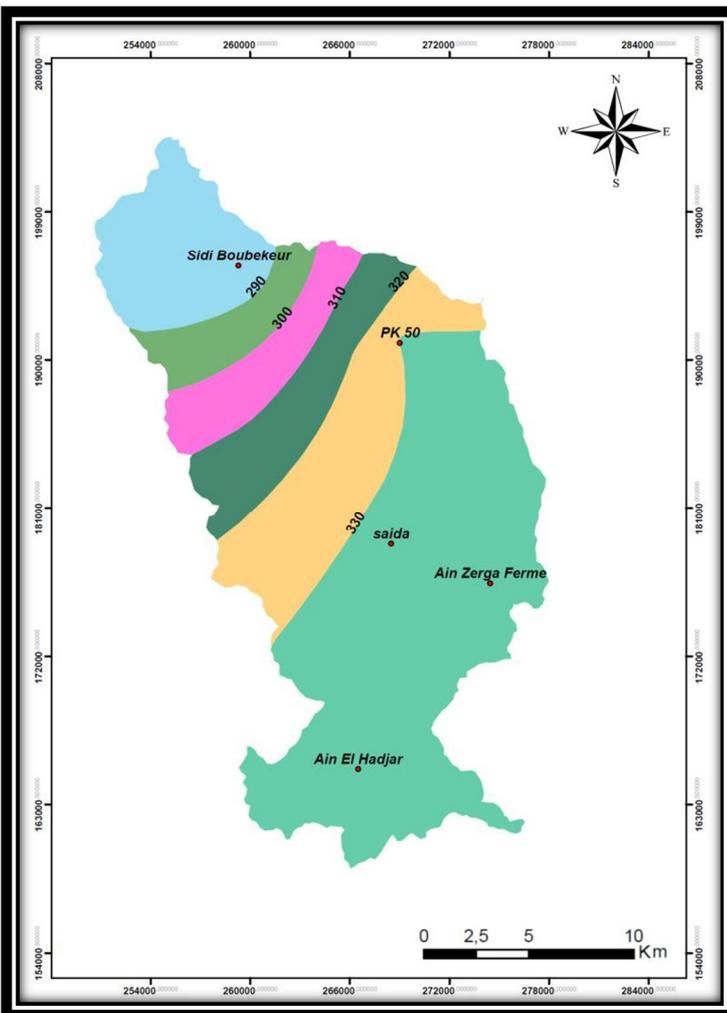


Fig. 38 : Carte en courbes isoyètes du bassin versant de l'oued Saïda

2-Vents

La région de Saida, comme toutes les régions de l'Ouest de l'Algérie en général et les hauts plateaux en particulier, est une région ventée surtout pendant la saison hivernale, durant laquelle les vents dominants sont ceux qui soufflent du Nord et Nord-Ouest (tableau 23).

Tableau 23: Fréquence du vent (%).

Direction	NORD	NORD EST	EST	SUD EST	SUD	SUD OUEST	OUEST	NORD OUEST
Fréquence [%]	14,7	2,2	1,4	2,9	10,6	3,2	7,2	8,9

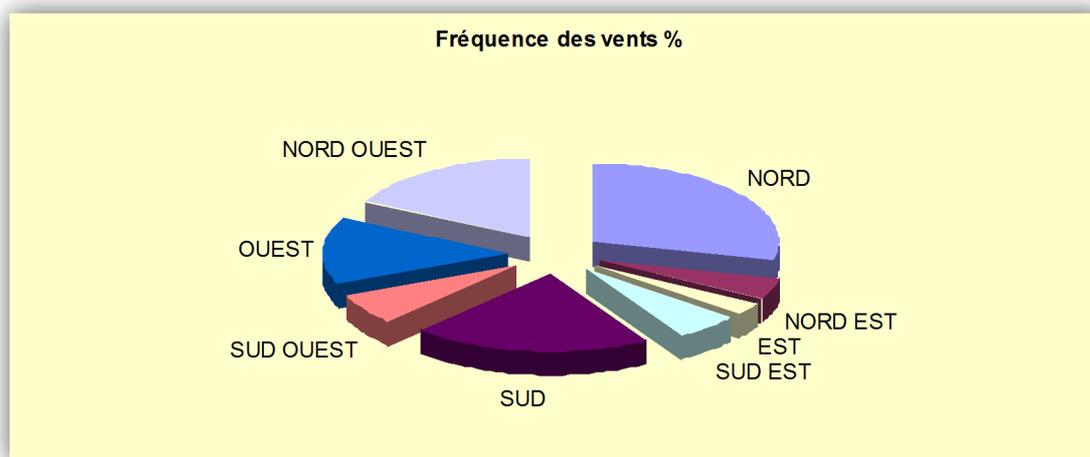


Fig. 39 : Fréquence des vents (%)

Ces types de vents ne sont pas nuisibles, contrairement au Sirocco qui souffle du Sud, chargé de poussières et qui provoque des dégâts considérables sur les rendements des cultures, surtout en période printanière et d'été (tableau 24).

Tableau 24: Nombre de jours de sirocco moyen. Station de Saida (1983–2012)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
Nombre de jours sirocco moyen	1	2	0	0	0	0	1	1	2	3	3	3

Le tableau 25, représente la variation de la vitesse moyenne mensuelle en m/s des vents dans la région de Saida durant la période 1983-2012.

Tableau 25: Vitesse moyenne mensuelle du vent (m/s). Station de Saida (1983–2012)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
Vent moyen [m/s]	2,3	2,3	2,6	2,6	2,8	2,8	2,8	3,0	2,8	2,8	2,6	2,6

3- Humidité

L'humidité dans la région étudiée, est généralement élevée en début d'hiver et au printemps, elle oscille entre 39 % et 71 % (tableau 26 et fig.40), ceci traduit un caractère de sécheresse estivale.

Tableau 26: Humidité moyenne mensuelle en (%) Station de Saida (1983–2012)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
Humidité moyenne [%]	53	60	67	71	69	67	64	61	58	47	39	41

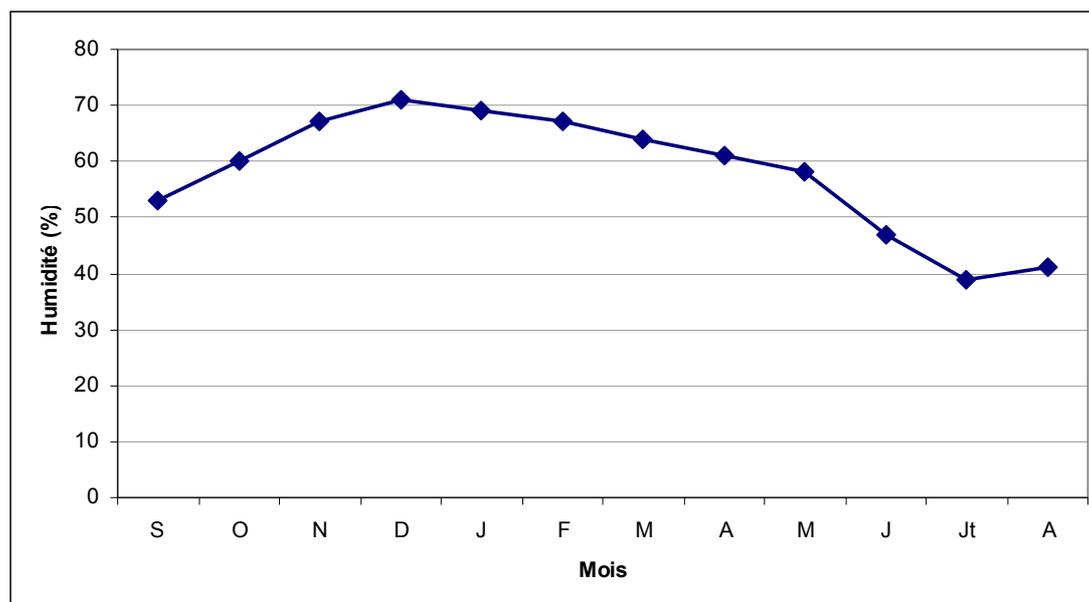


Fig.40: Humidité relative de l'air (%).

4- Températures

La région de Saida se caractérise principalement par deux périodes bien distinctes (tableau 27 - Fig.41) :

- Une période froide et humide durant laquelle la température moyenne est de 8,5°C et une humidité relative moyenne de 69 % (tableau 26).
- Une seconde période chaude et sèche avec une température moyenne de 27,5°C et une humidité relative moyenne de 41 %.

Tableau 27: Moyennes mensuelles et annuelles des températures

Mois T(°C)	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Année
Tmin[°c]	15	12	7	4	3	3	5	7	10	15	18	19	9,83
Tmax [°c]	30	25	18	15	14	15	18	21	26	32	36	36	23,83
Tmoy [°c]	22,5	18,5	12,5	9,5	8,5	9	11,5	14	18	23,5	27	27,5	16,83

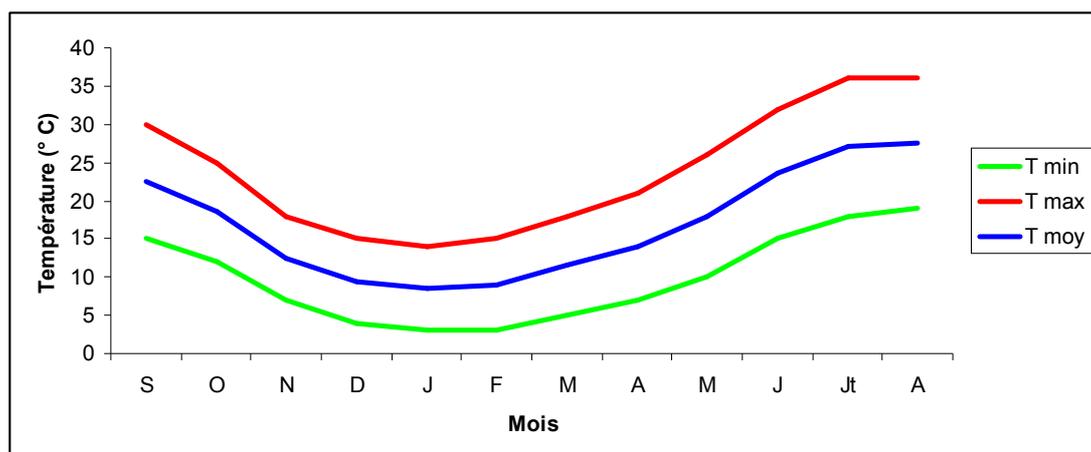


Fig.41 : Variation des températures moyennes mensuelle à la station de Saida (1983-2012)

5- Régime climatique

5.1- Courbe pluviothermiques

Pour GAUSSEN et BAGNOULS, un mois sec est celui où la moyenne mensuelle des précipitations est inférieure ou égale au double de la température. Cette relation $P = 2T$ permet d'établir des diagrammes pluviothermiques sur lesquels les températures sont portées sur une échelle double de celle des précipitations.

Tableau 28: Moyennes mensuelles des précipitations et des températures (1983-2012)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
P (mm)	19,8	42,1	44,2	33,2	42	34,9	36,6	38,3	31,4	8,8	3,5	9,7
T[°c]	22,5	18,5	12,5	9,5	8,5	9	11,5	14	18	23,5	27	27,5

On observe que pour la station de Saida la courbe des températures passe au-dessus de celle des précipitations de Mai à Septembre définissant ainsi la période sèche et déficitaire, tandis que la période humide et excédentaire occupe les autres mois de l'année.

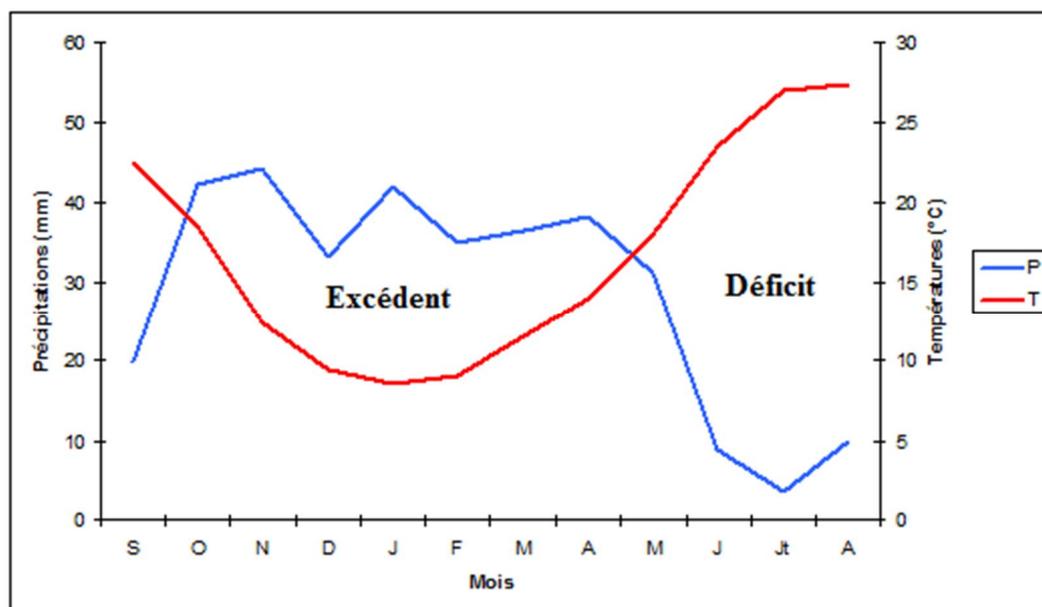


Fig.42: Courbe pluvio-thermique de la station de Saida (1983-2012)

5.2- Indices de De Martonne

L'indice d'aridité de De Martonne ²(**I=12,84**) témoigne d'un climat semi-aride (fig. 43) avec une variabilité mensuelle telle que rapportée dans le tableau 30.

Tableau 30: Indice d'aridité mensuel à la station de Saida.

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
i	7,31	17,73	23,57	20,43	27,24	22,04	20,43	19,15	13,46	3,15	1,14	3,10

²Pour $20 < I < 30 \rightarrow$ climat tempéré, $10 < I < 20 \rightarrow$ climat semi-aride.

$5 < I < 10 \rightarrow$ climat désertique, $I < 5 \rightarrow$ climat hyper-aride.

Voir tableau 29 en annexe.

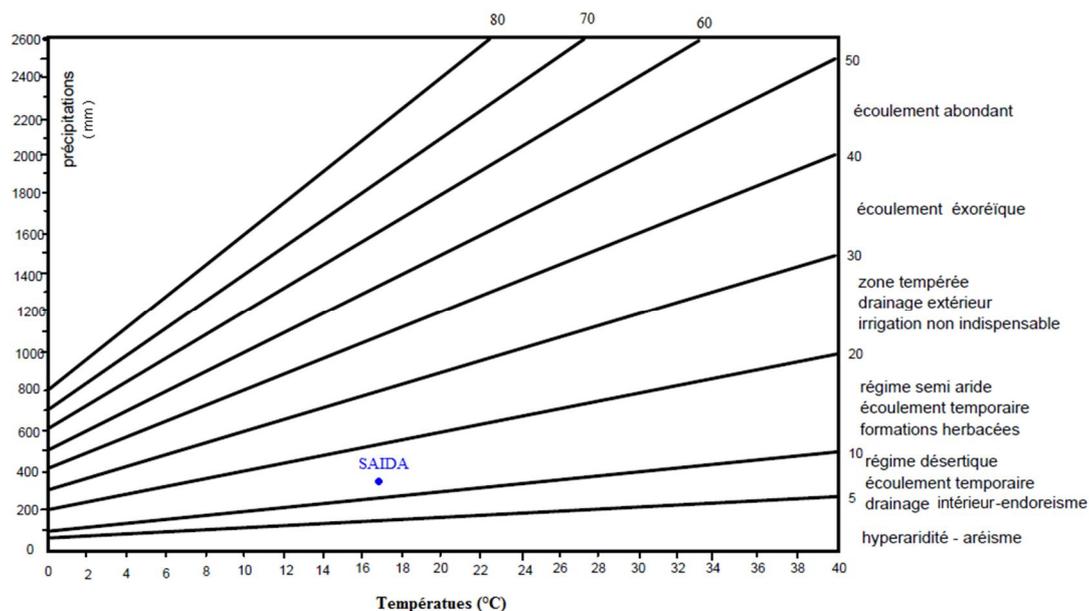


Fig.43: Abaque d'indice d'aridité de DE MARTONNE.

5.3- Indices de MORAL

Quant à l'indice pluviométrique, la méthode de Moral³ permet de dresser dans le tableau 31 les indices qui révèlent 5 mois de sécheresse et 7 mois humides :

Tableau 31: Valeurs des indices pluviométriques mensuels de MORAL

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Annuel	
P (mm)	19,8	42,1	44,2	33,2	42	34,9	36,6	38,3	31,4	8,8	3,5	9,7	344,5	
T (°C)	22,5	18,5	12,5	9,5	8,5	9	11,5	14	18	23,5	27	27,5	16,83	
Iam	0,41	1,18	1,91	1,70	2,24	1,83	1,68	1,50	0,91	0,17	0,05	0,14	-	
Catégorie	s	h	h	h	h	h	h	h	s	a	a	a	-	
Im	0	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0	-1	-1	-1	+4

Tableau 32: Indices de MORAL

Station	P (mm)	T (°C)	Ia	Im
Saida	344,5	16,83	1,09	+ 4 (0-7-2-3) (p-h-s-a)

Les différentes indices utilisés nous conduisent à un résultat parfaitement concordant la région étudiée est soumise globalement à un régime semi-aride à hiver humide.

³La classification en mois secs et humides n'était pas suffisante pour préciser les caractères climatiques. MORAL proposa de distinguer quatre types de mois définis par des relations (I). Chaque mois est alors affecté d'un certain poids en fonction de son type (II). Voir tableau 29 en annexe.

6- Déficit d'écoulement

Facteur fondamental du bilan hydrique, il est représenté essentiellement par l'évapotranspiration définie comme étant la quantité d'eau évaporée (du sol et de la surface d'eau libre) et transpirée par les plantes.

Le calcul de l'évapotranspiration réelle ou déficit d'écoulement peut être effectué par diverses méthodes.

6.1- Méthode de TURC

L'évapotranspiration réelle est calculée à partir de la formule suivante :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Avec

P = Précipitations moyennes annuelles (mm).

T = Température moyenne annuelle (°C).

$$L = 300 + 25T + 0,05T^3$$

Nous obtenons les résultats suivants :

Tableau 33: Evapotranspiration réelle d'après TURC.

	P (mm)	T (°C)	E.T.R. (mm)	E.T.R. % Précipitations
Station de Saida	344,5	16,83	339,40	98,52

6.2- Méthode de COUTAGNE

Le déficit d'écoulement est calculé à partir de la relation :

$$D = P - \lambda P^2$$

D : déficit d'écoulement (m/an).

P : précipitations moyennes annuelles (m/an).

T : température moyenne annuelle (°C).

Le paramètre λ a pour expression : $\lambda = \frac{1}{0,8+0,14T}$

Cette formule n'est applicable que pour

$$\frac{1}{8\lambda} \leq P \leq \frac{1}{2\lambda}$$

On a :

$$\lambda = 0,317 \quad \frac{1}{8\lambda} = 0,394 \quad \frac{1}{2\lambda} = 1,577$$

Pour la station de Saida la méthode n'est pas applicable car $P < \frac{1}{8\lambda}$ donc le déficit d'écoulement est égal aux précipitations.

6.3- Méthode de P. VERDEIL

Le report des précipitations annuelles sur l'abaque représentatif du phénomène en Algérie (fig.44) donne les valeurs suivantes : **D = 320 mm** soit 93 % des précipitations et un écoulement de **24,5 mm** (ruissellement + infiltration).

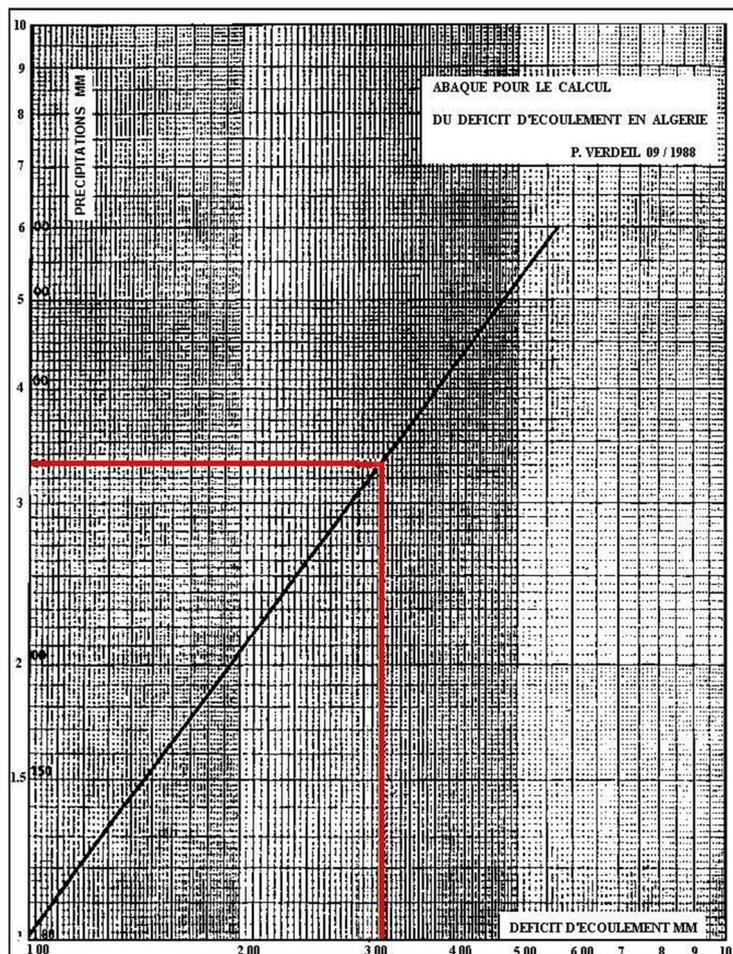


Fig.44: Abaque de P. VERDEIL.

6.4- Méthode de WUNDT

WUNDT a établi un abaque permettant d'obtenir une valeur du déficit d'écoulement en fonction de la température moyenne annuelle et des précipitations. Son application (fig.45) nous a donné un déficit de **330 mm/an** soit 96 % des précipitations.

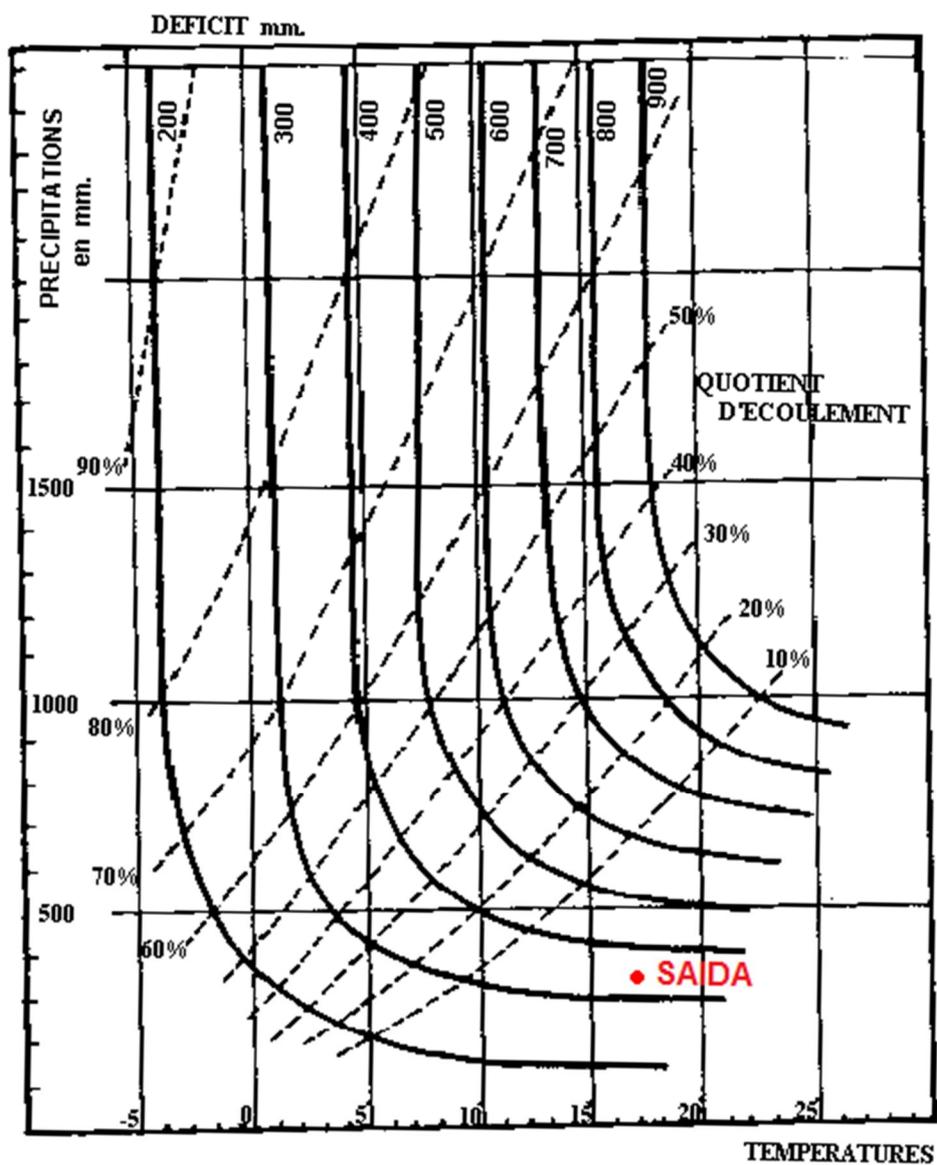


Fig.45: Abaque de WUNDT modifiée par COUTAGNE.

6.5- Méthode de THORNTHWAITE ⁴

6.5.1- Evapotranspiration potentielle

Les valeurs de l'évapotranspiration potentielle (ETP) relatives aux 12 mois de l'année sont consignées au tableau suivant :

Tableau 37: Valeurs de l'ETP à la station de Saida (1983/2012)

	T (°C)	i	E.T.P. non corrigées (cm)	coefficient de correction	E.T.P. corrigées (cm)
Septembre	22,5	9,75	10,02	1,03	10,32
Octobre	18,5	7,25	7,08	0,97	6,87
Novembre	12,5	4,00	3,53	0,87	3,07
Décembre	9,5	2,64	2,17	0,86	1,87
Janvier	8,5	2,23	1,78	0,88	1,57
Février	9	2,43	1,97	0,85	1,68
Mars	11,5	3,53	3,05	1,03	3,14
Avril	14	4,75	4,32	1,09	4,71
Mai	18	6,95	6,74	1,2	8,09
Juin	23,5	10,41	10,82	1,2	12,99
Juillet	27	12,85	13,85	1,22	16,89
Août	27,5	13,21	14,31	1,16	16,59
Annuel	16,83	80,02			87,79

L'évapotranspiration potentielle ainsi calculée et corrigée par la formule de Thornthwaite donne une valeur de **877,9 mm**, Elle montre un maximum en Juillet et un minimum en Janvier.

6.5.2- Evapotranspiration réelle (E.T.R.)

Le bilan de THORNTHWAITE fait intervenir d'une part l'E.T.R. et d'autre part les précipitations.

Pour le calcul de l'E.T.R., deux cas sont considérés :

- Si les précipitations du mois sont supérieures à l'E.T.P, l'E.T.R. est égale à l'E.T.P.

- Si les précipitations mensuelles sont inférieures à l'E.T.P, l'E.T.R. sera égale à l'E.T.P. aussi longtemps que les réserves en eau du sol seront capables d'équilibrer la balance. Au-delà, il y a déficit.

⁴ Voir tableaux 34, 35 et 36 en annexe.

Tableau 38: Bilan de THORNTHWAITE (Station de Saida).

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Annuel
P (mm)	19,8	42,1	44,2	33,2	42	34,9	36,6	38,3	31,4	8,8	3,5	9,7	344,5
ETP (mm)	103,2	68,7	30,7	18,7	15,7	16,8	31,4	47,1	80,9	129,9	168,9	165,9	877,9
RFU (mm)	0	0	13,5	28	54,3	72,4	77,6	68,8	19,3	0	0	0	
ETR (mm)	19,8	42,1	30,7	18,7	15,7	16,8	31,4	47,1	80,9	28,1	3,5	9,7	344,5
Déficit agricole (mm)	83,4	26,6	0	0	0	0	0	0	0	101,8	165,4	156,2	533,4
Excédent (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

RFU = 100 mm

Pour la station de Saida, l'E.T.R. annuelle est de **344,5mm**. Le déficit agricole est de **533,4 mm** allant de Juin à Octobre avec un maximum en Juillet. La réserve utile se constitue de Novembre à Mai. De ce fait aucun excédent n'est dégagé.

6.6- Discussion des résultats

Les valeurs de l'évapotranspiration potentielle et réelle obtenues par les différentes méthodes sont résumées dans le tableau 39.

Tableau 39: Résultats de l'E.T.R. d'après les différentes méthodes.

Paramètre	Méthode	Valeur (mm)	% précipitations
E.T.P.	Thornthwaite	877,9	/
E.T.R.	Turc	339,40	98,52
	Coutagne	344,5	100
	Wundt	330	96
	Verdeil	320	93
	Thornthwaite	344,5	100

Les valeurs de l'évapotranspiration réelle sont très proches, nous retiendrons la valeur de Verdeil qui est de l'ordre de **320 mm**, pour calculer le bilan hydrologique.

Afin d'établir le bilan hydrique du bassin nous avons estimé le facteur évapotranspiration par plusieurs méthodes empiriques et le ruissellement par la formule de TIXERONT-BERKALOFF⁵. L'infiltration ne peut être que déduite de l'équation du bilan hydrique (tableau 40).

Tableau 40: Bilan hydrique du bassin versant de Saida.

Méthodes	P (mm)	ETR (mm)	P-ETR = R+I	R (mm)	I (mm)
Thornthwaite	344,5	344,5	0	0	0
Turc	344,5	339,40	-	0	0
Coutagne	344,5	344,5	0	0	0
Wundt	344,5	330	-	0	0
Verdeil	344,5	320 Soit 92,88 %	24,5	14,17 Soit 4,11 %	10,33 Soit 2,99 %

Ces résultats restent sommaires et loin de représenter la réalité que présente le terrain. Toutefois, ils nous donnent une idée sur l'importance des quantités reprises par l'évaporation. Son inconvénient principal concerne essentiellement l'estimation de la lame infiltrée.

⁵ $R = \frac{P^3}{3E^2}$ (m). P = Précipitations moyennes annuelles (m). E = Evapotranspiration potentielle (m).

III - CONCLUSION

D'après les résultats climatiques, on peut dire que le bassin versant de l'oued Saïda est caractérisé par un climat semi-aride qui se traduit par un hiver relativement froid et pluvieux et un été très chaud et sec, la saison humide s'étale depuis le mois d'octobre jusqu'à Avril et la saison sèche s'étend sur le restant de l'année. La lame d'eau précipitée sur l'ensemble du bassin versant a été estimée à 321,2 mm et Les températures moyennes mensuelles présentent une valeur minimale en janvier (8,5°C) et une valeur maximale en Août (27,5°C) et ce pour la période 1983-2012.

Nous avons adopté la valeur de la pluviométrie moyenne obtenue par le dépouillement des chroniques des mesures pluviométriques soit la valeur de 344,5 mm. La plus grande partie de cette eau retourne à l'atmosphère sous forme d'évapotranspiration.

L'analyse des résultats du bilan hydrologique au niveau de la station de Saïda, montre que 92,88 % des précipitations retournent à l'atmosphère, 4,11 % constitue la lame ruisselée et 2,99 % s'infiltrent pour la recharge des aquifères.

DEUXIEME PARTIE
HYDROLOGIE

CHAPITRE I

HYDROLOGIE

I. INTRODUCTION

L'écoulement des Oueds, dépend essentiellement du régime des précipitations qui dépendent du climat de la région, on notera une variation importante des régimes d'écoulement, mensuels, saisonniers, et interannuels.

Le bassin de l'Oued Saida est caractérisé par des précipitations très irrégulières, ceci va engendrer des écoulements très irréguliers.

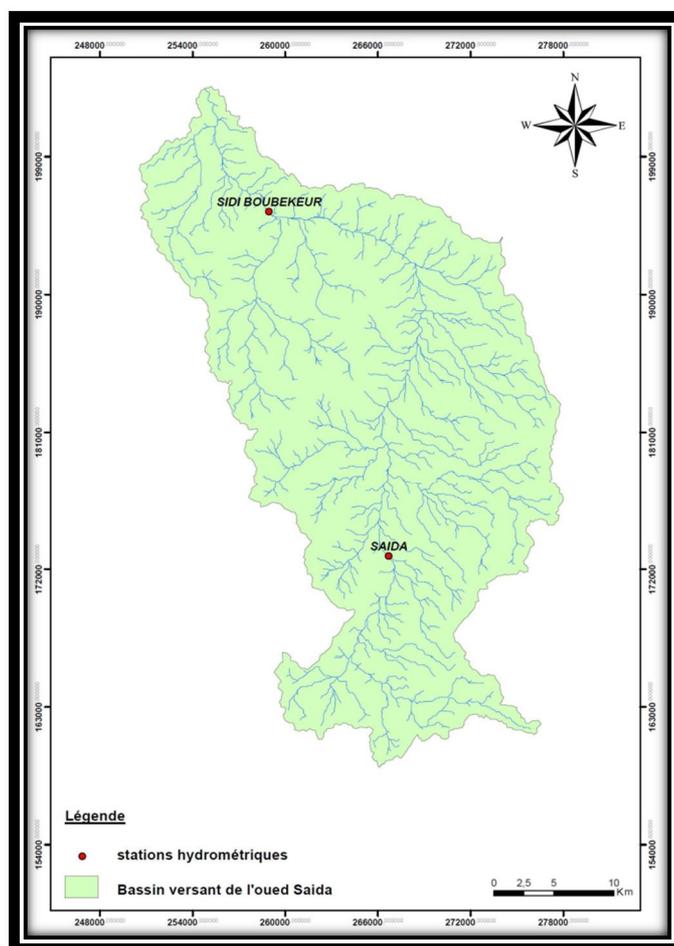
En ce qui concerne notre région d'étude nous allons essayer d'analyser les débits de l'oued Saida pour avoir une idée globale sur les capacités du bassin en eau de surface. Nous nous sommes basés sur les données de deux stations se trouvant le long de l'oued Saida (Fig. 46). Ces données hydrométriques proviennent de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

Les caractéristiques de ces stations hydrométriques sont consignées au tableau 41.

Tableau 41: Caractéristiques des stations hydrométriques

Stations	Code	Coordonnées Lambert		Altitude
		X (Km)	Y(Km)	Z (m)
Saida	111127	266,70	172,85	800
Sidi Boubekeur	111129	258,95	195,40	520

Fig. 46 : Situation des stations hydrométriques sur le bassin versant de l'Oued Saïda.



II. ANALYSE DES DÉBITS

II.1. Débits mensuels

Les débits sont généralement variables (Tab. 42, Fig.47), avec un régime très irrégulier au cours de l'année, ils commencent à augmenter à partir du mois de Septembre.

Ces variations mensuelles des débits varient de l'amont vers l'aval, en effet plus on se dirige vers l'aval du bassin de Saida plus les débits mensuelles augmentent.

Tableau 42: Moyennes mensuelles interannuelles des débits (m³/s) (1989-2012).

Mois Stations	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	An
	Saida	0,13	0,17	0,24	0,27	0,32	0,40	0,54	0,39	0,22	0,16	0,11	0,13
Sidi Boubekeur	0,39	1,18	0,74	0,69	0,87	0,70	0,98	0,59	0,40	0,22	0,09	0,13	0,58

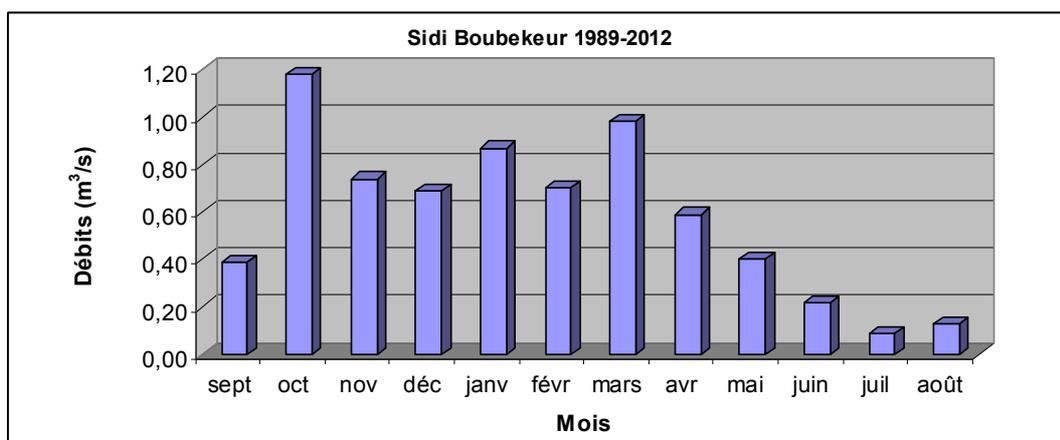
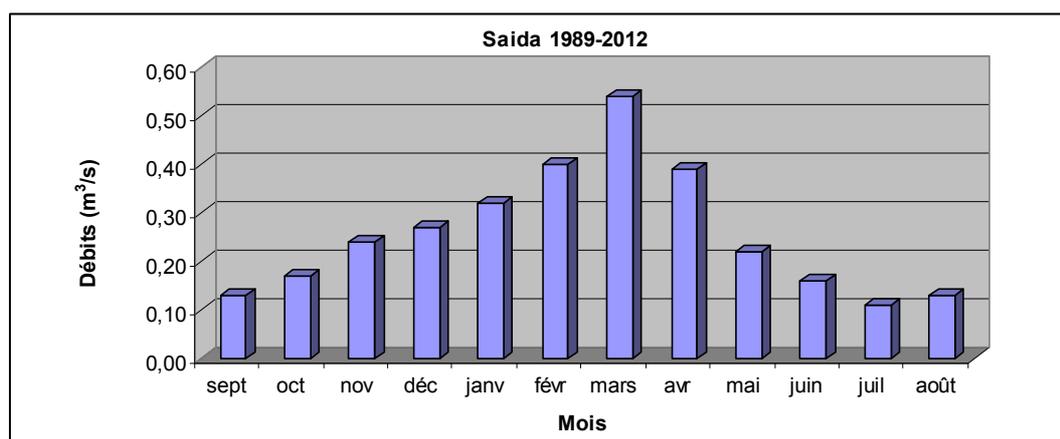


Fig. 47 : Histogrammes des débits moyens mensuels interannuels

II.1.1 - Variation mensuelle des débits en fonction des précipitations

D'après cette analyse, on constate une étroite relation entre les précipitations et le régime des débits, car les faibles débits enregistrés correspondent à la saison sèche à « faibles précipitations » et les forts débits correspondent à la saison pluvieuse à « fortes précipitations ». La représentation graphique des débits en fonction des précipitations exprime une évolution parallèle entre ces deux paramètres (débits et précipitations) durant toute l'année (Fig. 48 et 49).

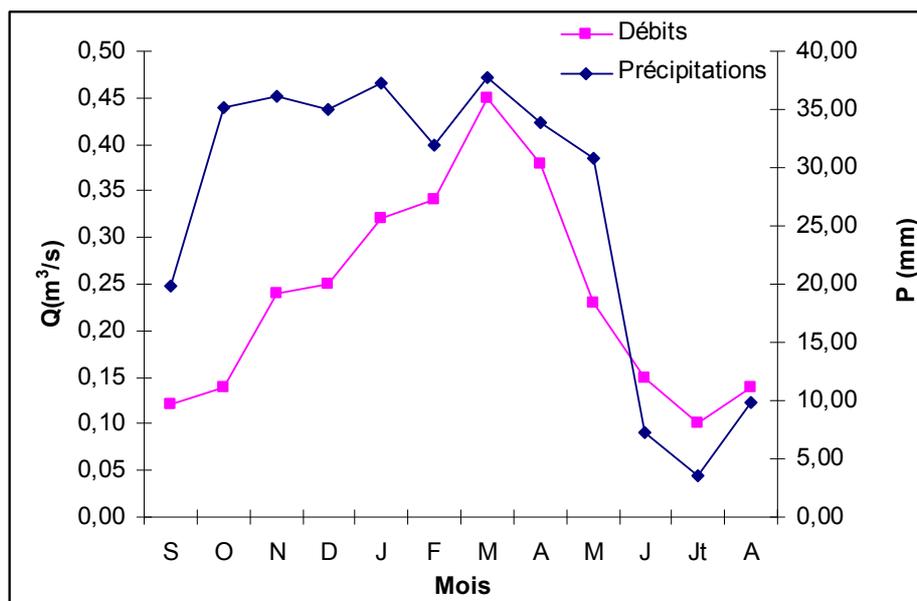


Fig. 48 : Variation mensuelle des débits en fonction des précipitations à la station de Saida (1989/1990-2005/2006).

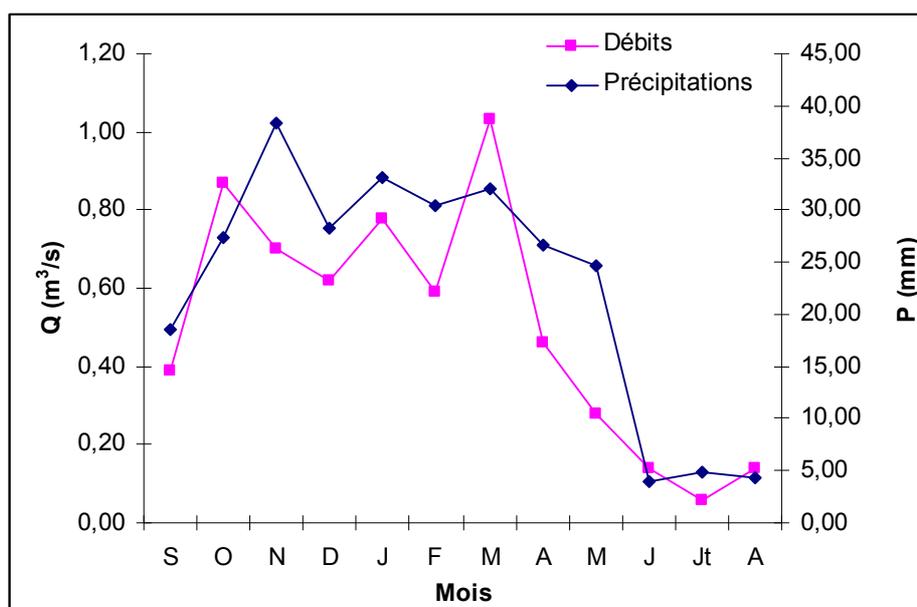


Fig. 49 : Variation mensuelle des débits en fonction des précipitations à la station de Sidi Boubekeur (1989/1990-2005/2006).

A partir du mois de Septembre, on a une croissance des deux courbes, le fort débit au niveau des deux stations est enregistré au mois de Mars avec une moyenne mensuelle de $0,45 \text{ m}^3 / \text{s}$ à Saida, ce débit est doublement plus fort à la station de Sidi Boubekeur il atteint un maximum de $1,03 \text{ m}^3 / \text{s}$ (tab. 43 en annexe).

II.1.2 - Application de la méthode de corrélation linéaire

Un essai de corrélation linéaire entre les débits et la pluviométrie (Fig.50.a et b), permet de déduire une bonne relation linéaire mensuelle avec des coefficients de corrélation supérieurs à 0,70 pour les deux stations témoignant d'une étroite dépendance saisonnière.

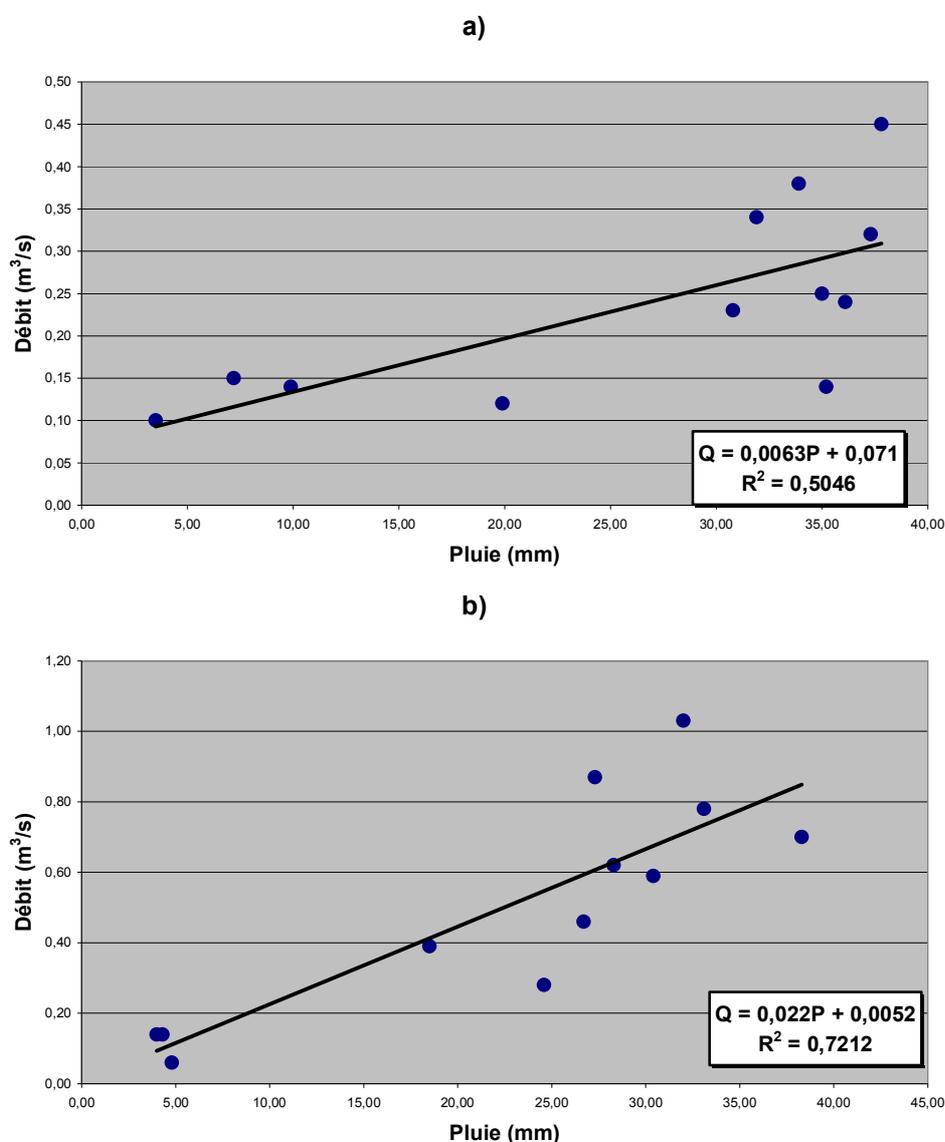


Fig. 50 : Corrélation linéaire entre les pluies moyennes mensuelles et les débits moyens mensuels. Stations : a) Saida, b) Sidi Boubekeur.

La variation mensuelle est donc semblable à celle des précipitations, montrant une bonne corrélation entre les deux variables.

II.1.3 - Variations Saisonnières

L'analyse de la variabilité saisonnière des débits constitue le critère le plus simple pour définir le régime d'un cours d'eau. Cette étude peut être mise en évidence par l'étude des coefficients mensuels de débits et les coefficients de variation.

A- Les régimes saisonniers et les coefficients mensuels des débits

Le régime d'un cours d'eau est défini par les coefficients moyens des débits, c'est-à-dire les rapports des débits moyens mensuels au module de la période considérée. Les CMD inférieurs à l'unité correspondent aux mois de basses eaux et les CMD supérieures à l'unité représentent les mois de hautes eaux (tableaux 43).

Tableau 43 : Répartitions des débits mensuels.

	<i>sept</i>	<i>oct</i>	<i>nov</i>	<i>déc</i>	<i>janv</i>	<i>févr</i>	<i>mars</i>	<i>avr</i>	<i>mai</i>	<i>juin</i>	<i>juil</i>	<i>août</i>
Sidi Boubekeur (1989-2012)												
M	0,39	1,18	0,74	0,69	0,87	0,70	0,98	0,59	0,40	0,22	0,09	0,13
CMD	0,67	2,03	1,28	1,19	1,50	1,21	1,69	1,02	0,69	0,38	0,16	0,22
Max	202,00	520,00	140,18	202,00	108,00	94,80	170,40	358,46	49,08	94,80	102,90	62,40
Min	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
σ	0,52	1,60	0,48	0,42	0,83	0,49	1,56	0,65	0,43	0,30	0,11	0,20
Cv	1,33	1,36	0,65	0,61	0,95	0,69	1,59	1,10	1,07	1,34	1,27	1,52
Saida (1989-2012)												
M	0,13	0,17	0,24	0,27	0,32	0,40	0,54	0,39	0,22	0,16	0,11	0,13
CMD	0,51	0,66	0,94	1,05	1,25	1,56	2,10	1,52	0,86	0,62	0,43	0,51
Max	15,50	95,52	25,30	16,48	15,50	10,70	25,30	70,02	15,5	22,85	0,30	20,40
Min	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,00	0,07
σ	0,07	0,13	0,16	0,16	0,29	0,44	0,69	0,43	0,28	0,14	0,08	0,14
Cv	0,54	0,74	0,66	0,60	0,92	1,11	1,28	1,11	1,25	0,90	0,70	1,07

M : débit moyen (m³/s), *CMD* : coefficient mensuel de débit, *Max* : débit maximum du mois,
Min : débit minimum du mois, σ : écart type, *Cv* : coefficient de variation

Les régimes moyens de ces sous bassins à alimentation essentiellement pluviale comportent généralement des hautes eaux de saison froide, de Décembre à Avril pour Saida et d'Octobre à Avril pour Sidi Boubekeur, et des basses eaux de saison chaude, de Mai à Novembre pour Saida et de mai à septembre pour Sidi Boubekeur.

Le maximum mensuel correspond au mois de Mars pour Saida et d'Octobre pour Sidi Boubekeur. Quant au CMD du mois de Juillet représente le minimum mensuel d'écoulement.

La période des basses eaux est plus précoce encore, puisqu'elle commence à partir de Mai. Ceci peut s'expliquer a priori par les variations saisonnières de précipitations, et aux effets importants de la température de la région de Saida, qui accentue l'évapotranspiration (ETP).

Aujourd'hui, il apparaît clairement que les régimes hydrologiques dépendent en grande partie des précipitations, et des températures (évaporation).

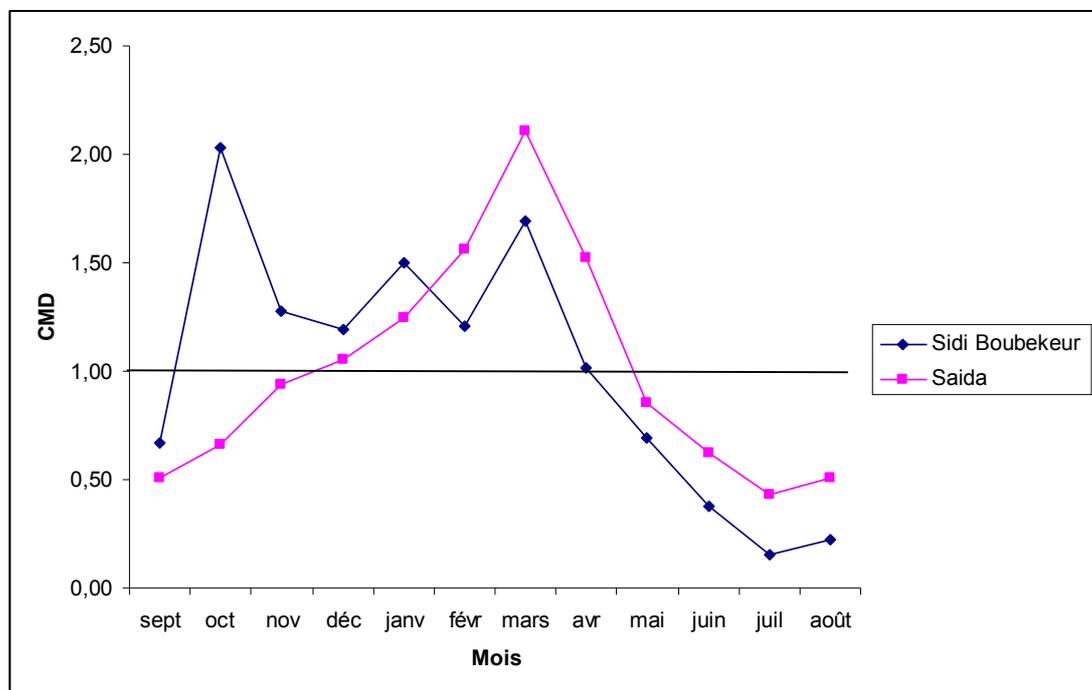


Fig. 51 : Courbes des coefficients mensuelles des débits à la station de Saida et Sidi Boubekeur (1989/1990-2011/2012)

B- Coefficient de variation

L'irrégularité mensuelle et saisonnière des débits (tableaux 43) ressort parfaitement des valeurs calculées du Cv pour les deux stations et pour les différents mois de l'année. Il apparaît en effet que l'écoulement mensuel est extrêmement variable, pour certains mois le coefficient de variation dépasse largement l'unité et est compris entre 0,54 et 1,28 pour Saida, entre 0,61 et 1,59 pour Sidi Boubekeur (Fig. 52).

La variabilité inter mensuelle des débits est accentuée dans l'ensemble, ceci à cause vraisemblablement de la faiblesse des précipitations de ces 20 dernières années et de leur caractère très aléatoire. Ces données attestent d'une variabilité du régime encore plus marquée qu'à l'échelle annuelle.

Contrairement aux précipitations, la plus forte variabilité de l'écoulement fluvial concerne la période de saison froide ou de hautes eaux (mars), ceci s'explique par l'importance et la fréquence élevée des crues en saison froide. Au contraire, la variabilité relativement modérée des basses eaux peut être justifiée par la fréquence limitée des crues en saison chaude ainsi que par le rôle prépondérant des eaux souterraines alimentant les cours d'eau en périodes d'étiages.

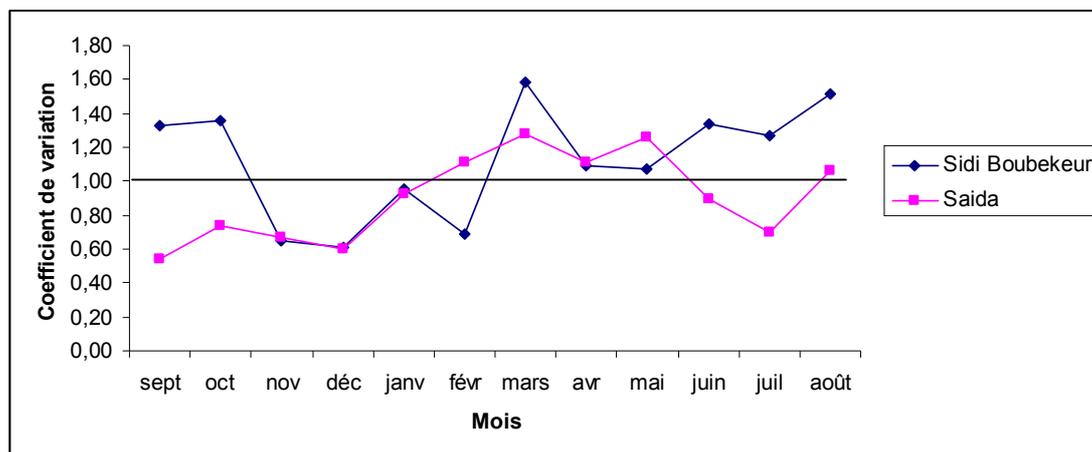


Fig. 52 : Courbes des coefficients de variations mensuelles des débits à la station de Saida et Sidi Boubekeur (1989/1990-2011/2012)

II.2. Les variations saisonnières des débits

Le tableau 44, montre la répartition saisonnière des débits durant la période 1989/1990-2011/2012

Tableau 44 : variation saisonnière des débits (1989/1990-2011/2012)

Sidi Boubekeur				
Saison	Automne	Hiver	Printemps	Eté
Débit	2,31	2,26	1,97	0,44
Saida				
Débit	0,54	0,99	1,15	0,40

La distribution saisonnière des débits (Fig. 53) montre, que c'est au printemps, hiver et en automne que s'effectuent l'essentiel des écoulements. Le maximum est enregistré au printemps pour Saida et en automne pour Sidi Boubekeur, cela explique la présence des pluies orageuses durant ces saisons.

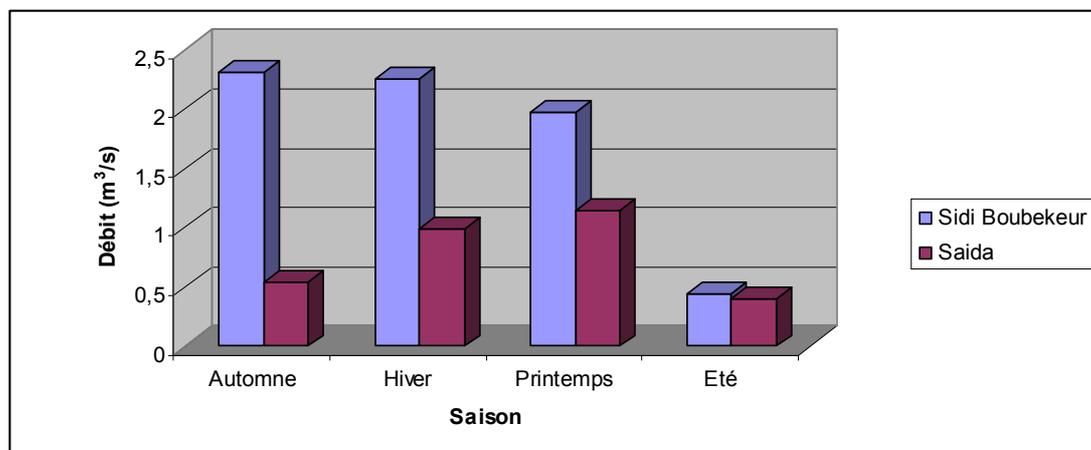


Fig. 53 : Variation saisonnière des débits moyens mensuels de l'Oued Saida (1989/1990-2011/2012)

II.3 DEBITS MOYENS ANNUELS

L'écoulement moyen annuel est considéré comme le volume d'eau écoulé en une année à l'exutoire d'un bassin, le module brut ou absolu est généralement exprimé en m^3/s et le module spécifique se traduit en $L.s^{-1}km^{-2}$.

Nous disposons de séries de données hydrométriques représentant 23ans d'observation (tableau 45).

II.3.1 - Variation des débits annuels moyens bruts (m³/s)

Le régime annuel est très irrégulier d'une année à l'autre (Fig. 54), il apparaît que, durant plusieurs années la majeure partie des débits moyens annuels est inférieure au débit moyen interannuel pour les deux stations. Les variations annuelles des modules portées dans les tableaux 45 et 46, montrent que le débit moyen au niveau de la station de Saïda est de l'ordre de 0,26 m³/s, débit relativement faible qui peut s'expliquer par son emplacement à l'amont du bassin de Saïda. La station de Sidi Boubekeur enregistre de débit moyen de 0,58 m³/s ; on a une augmentation de débit de l'amont vers l'aval.

Tableau 45 : Débits moyens annuels d'oued Saida à Sidi Boubekeur et Saida.

Stations	Sidi Boubekeur		Saïda	
	Q (m ³ /s)	q (l/s/km ²)	Q (m ³ /s)	q (l/s/km ²)
1989 - 1990	0,57	0,89	0,21	1,44
1990 - 1991	0,93	1,44	0,33	2,26
1991 - 1992	0,24	0,37	0,08	0,55
1992 - 1993	0,16	0,24	0,07	0,48
1993 - 1994	0,31	0,49	0,21	1,44
1994 - 1995	0,61	0,94	0,30	2,05
1995 - 1996	1,34	2,08	0,94	6,44
1996 - 1997	0,30	0,47	0,23	1,58
1997 - 1998	0,31	0,49	0,18	1,23
1998 - 1999	0,21	0,33	0,09	0,62
1999 - 2000	0,46	0,71	0,13	0,89
2000 - 2001	0,69	1,07	0,14	0,96
2001 - 2002	0,39	0,61	0,10	0,68
2002 - 2003	0,42	0,66	0,28	1,92
2003 - 2004	0,69	1,07	0,32	2,19
2004 - 2005	0,47	0,73	0,11	0,75
2005 - 2006	0,50	0,77	0,35	2,40
2006 - 2007	0,47	0,73	0,12	0,82
2007 - 2008	0,77	1,20	0,10	0,68
2008 - 2009	1,33	2,06	0,61	4,18
2009 - 2010	0,65	1,00	0,30	2,05
2010 - 2011	0,73	1,14	0,31	2,12
2011 - 2012	0,82	1,27	0,40	2,74
Moyenne	0,58	0,90	0,26	1,76
Ecart type	0,31	0,49	0,20	1,36
Cv	0,54	0,54	0,77	0,77

Tableau 46: Valeurs caractéristiques des modules au niveau du bassin versant de l'oued Saida

Stations	Moyenne (m ³ /s)	Max (m ³ /s) (année)	Min (m ³ /s) (année)	Nbre d'années > moyenne	Coeff. Immodération R = QM/Qm	Coefficient Variation
Saida	0,26	0,94 (1995-1996)	0,07 (1992-1993)	10 sur 23	13,43	0,77
Sidi Boubekeur	0,58	1,34 (1995-1996)	0,16 (1992-1993)	10 sur 23	8,38	0,54

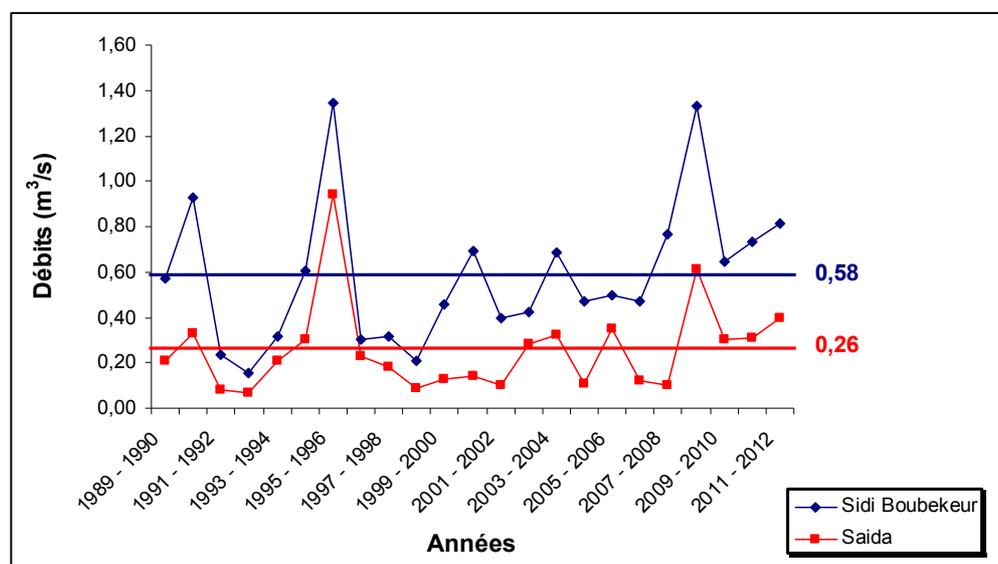


Fig. 54: Variations des débits moyens annuels aux deux stations.

Pour s'assurer de l'homogénéité des débits et la cohérence de l'information qu'ils présentent, on a eu recours à des essais de corrélation linéaire entre débits/débits afin de mieux juger les relations liant les deux stations hydrométriques. Ces essais consistent à examiner la tendance d'un nuage de points à s'aligner selon une droite oblique (Fig. 55). Les corrélations moyennes annuelles débits/débits (Tableau 47) sont bonnes ; ce qui témoigne d'une importante liaison hydrologique entre les cours d'eau.

Tableau 47: Coefficients de corrélation des débits annuels d'oued Saida.

Stations	Saida	Sidi Boubekeur
Saida	1	
Sidi Boubekeur	0,82	1

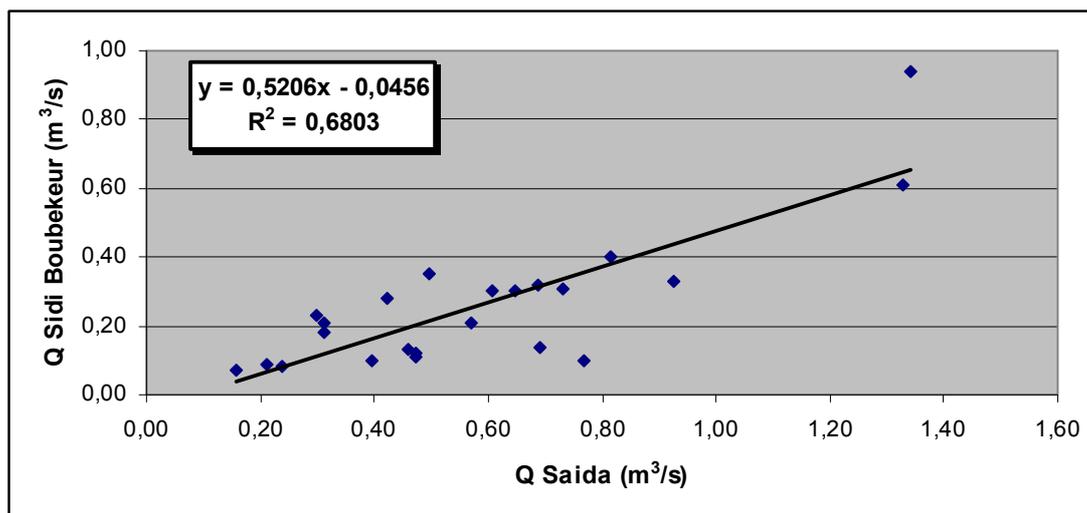


Fig.55: Corrélation linéaire entre les débits moyens annuels de Sidi Boubekeur et les débits moyens annuels de Saida.

Pour déterminer la relation entre les précipitations moyennes annuelles et les débits moyens annuels des cours d'eau, la figure 56, montre une bonne relation linéaire Pour les deux stations avec un coefficient de corrélation linéaire $r = 0,82$ pour la station de Saida et 0.87 pour la station de Sidi Boubekeur.

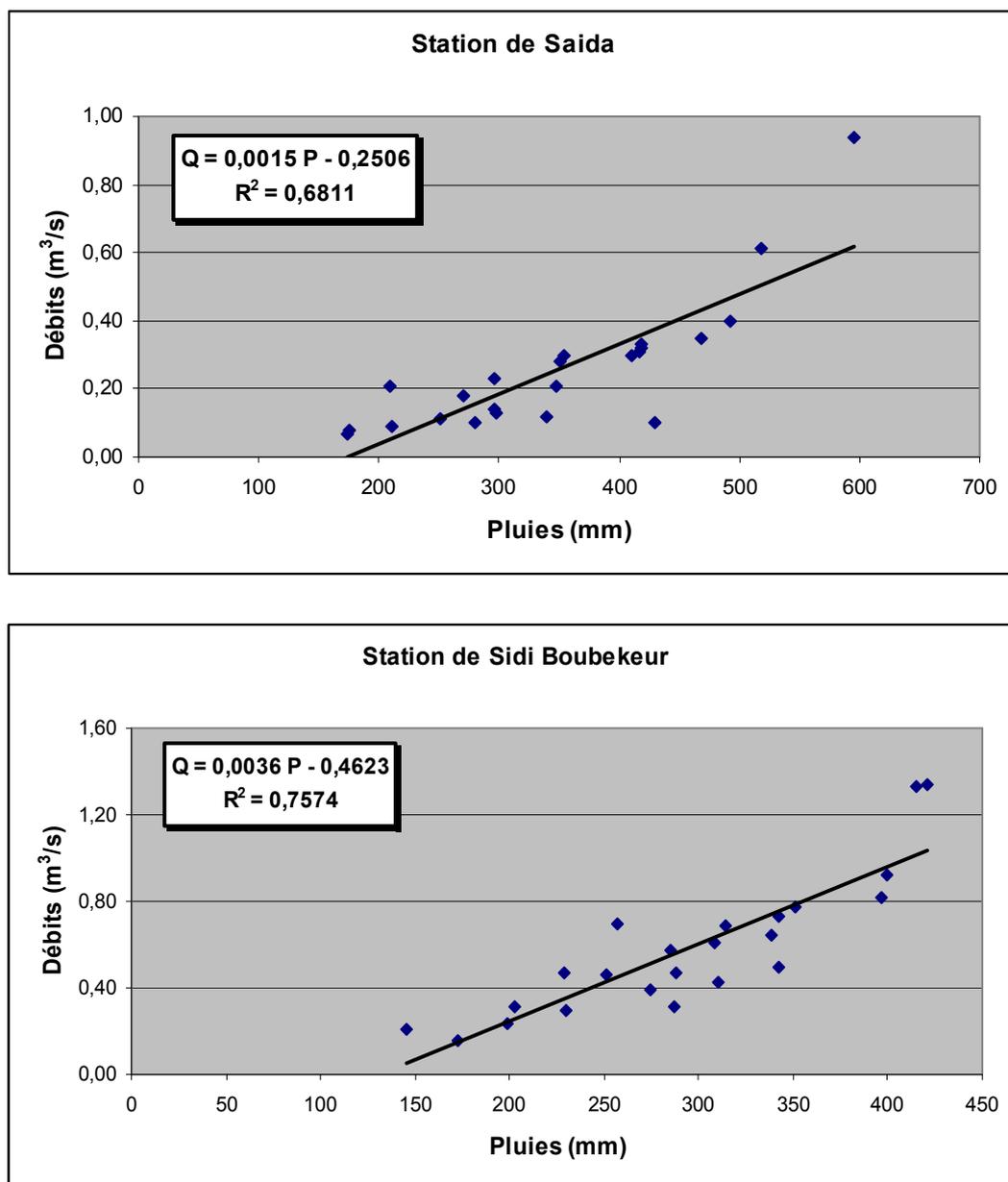


Fig.56: Corrélation linéaire entre les pluies moyennes annuelles et les débits moyens annuels des stations étudiées.

En général, on peut dire qu'il existe une liaison saisonnière et annuelle étroite entre les précipitations et les régimes des cours d'eau, puisque les précipitations sont évidemment le facteur essentiel qui conditionne les régimes hydrologiques et qu'elles constituent la matière première des débits du cours d'eau.

II.3.2. Variations des débits annuels moyens spécifiques (L/s/km²)

Les modules spécifiques sont l'outil le plus adapté pour mieux cerner la variation de l'écoulement dans le bassin versant, car l'abondance spécifique (tab. 48) varie d'une part en fonction de la distribution des précipitations et d'autre part en fonction des caractéristiques physiographiques de chaque sous bassin, à savoir la lithologie et le couvert végétal. C'est donc un élément purement géographique.

Tableau 48 : Débits spécifiques et lames d'eau écoulées

Stations		Q (m ³ /s)	q (L/s/km ²)	E (mm/an)
Oued	Lieu			
Saïda	Saïda	0,26	1,76	55,5
Saïda	Sidi Boubekeur	0,58	0,90	28,4

Q : module annuel (m³/s), q : débit spécifique (L/s/km²), E : lame d'eau écoulée (mm/an)

$$\text{Avec : } E \text{ (mm)} = 31,536 * q$$

Le sous bassin de Saïda, s'étend sur 146 km², il reçoit plus de précipitations. Son débit spécifique est de 1,76 l/s/km² correspondant à une lame d'eau écoulée de 55,5 mm.

Le sous bassin de Sidi Boubekeur, reçoit moins de précipitations. Son débit spécifique est de 0,90 l/s/km², soit une lame d'eau écoulée de 28,4 mm.

Ces faibles valeurs du débit et débit spécifique peuvent s'expliquer par l'infiltration des eaux, vu la nature géologique des bassins ainsi que leur topographie.

II.3.3- L'irrégularité inter annuelle des modules et leur répartition statistique

L'irrégularité inter annuelle de l'écoulement peut être mesurée par les variations de l'hydraulicité, c'est à dire le rapport du débit d'une année particulière Qi au débit moyen d'une longue série d'observation (Qmoy). Elle peut être complétée par d'autres critères statistiques simples tels que le coefficient de variation, ainsi que le coefficient d'immodération (R) donné par le rapport des modules extrêmes (R = QM/Qm).

II.3.3.1 - Hydraulicité de l'Oued Saïda

L'étude de la variation des débits moyens annuels et la distinction entre les différents régimes des cours d'eau s'effectue par l'évaluation d'un coefficient k_i appelé coefficient de débit. Il correspond au rapport débit moyen annuel en m^3/s au débit moyen inter-annuel.

Ce coefficient k_i appelé aussi coefficient d'hydraulicité peut avoir les valeurs suivantes :

$k_i > 1$ pour caractériser une année humide.

$k_i = 1$ pour caractériser une année moyenne.

$k_i < 1$ pour caractériser une année sèche.

Dans le tableau 49, nous avons présenté les valeurs de l'hydraulicité calculée durant les 23 dernières années. L'analyse de ce tableau, montre que les années de faible hydraulicité (Q_i/Q_{moy}) sont les plus prépondérantes. En effet, plus de 50% des années hydrologiques sont déficitaires.

L'évolution de l'hydraulicité mise en évidence par le graphique correspondant (fig. 57) montre des fluctuations des débits d'une année à l'autre, ce qui témoigne de l'irrégularité de l'écoulement, qui est liée à l'alimentation essentiellement pluviale irrégulière des cours d'eau.

Nous remarquons une forte hydraulicité en 1995/1996 pour les deux stations hydrométriques dû à des excédents pluviométriques relativement remarquables. L'année de faible hydraulicité est 1992/1993, avec un $C_h = 0,27$ pour les deux stations.

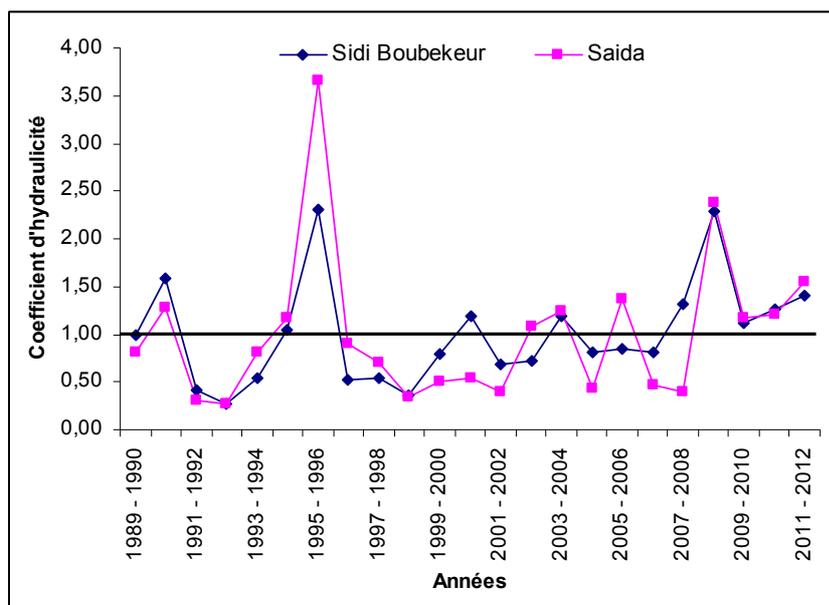


Fig.57: Evolution du coefficient d'hydraulicité pour les deux stations de l'Oued Saida

Tableau 49: Hydraulicité de l'oued Saida (1989-2012).

Station	Saida		Sidi Boubekeur	
	Coef. De débit $k_i = Q_i/Q_m$	Variations annuelles	Coef. De débit $k_i = Q_i/Q_m$	Variations annuelles
1989 - 1990	0,82	SECHE	0,98	SECHE
1990 - 1991	1,28	HUMIDE	1,59	HUMIDE
1991 - 1992	0,31	SECHE	0,41	SECHE
1992 - 1993	0,27	SECHE	0,27	SECHE
1993 - 1994	0,82	SECHE	0,54	SECHE
1994 - 1995	1,17	HUMIDE	1,04	HUMIDE
1995 - 1996	3,66	HUMIDE	2,31	HUMIDE
1996 - 1997	0,90	SECHE	0,52	SECHE
1997 - 1998	0,70	SECHE	0,54	SECHE
1998 - 1999	0,35	SECHE	0,36	SECHE
1999 - 2000	0,51	SECHE	0,79	SECHE
2000 - 2001	0,54	SECHE	1,19	HUMIDE
2001 - 2002	0,39	SECHE	0,68	SECHE
2002 - 2003	1,09	HUMIDE	0,73	SECHE
2003 - 2004	1,25	HUMIDE	1,18	HUMIDE
2004 - 2005	0,43	SECHE	0,81	SECHE
2005 - 2006	1,36	HUMIDE	0,86	SECHE
2006 - 2007	0,47	SECHE	0,81	SECHE
2007 - 2008	0,39	SECHE	1,32	HUMIDE
2008 - 2009	2,37	HUMIDE	2,29	HUMIDE
2009 - 2010	1,17	HUMIDE	1,11	HUMIDE
2010 - 2011	1,21	HUMIDE	1,26	HUMIDE
2011 - 2012	1,56	HUMIDE	1,40	HUMIDE

II.3.3.2 - Coefficient d'immodération (R)

Le coefficient d'immodération est faible au niveau de la station de Sidi Boubekeur (tableau 46) ce qui explique la faible fluctuation des modules et les valeurs de l'hydraulicité durant ces vingt-trois dernières années. Par contre pour la station de Saida le coefficient d'immodération est relativement élevé ce qui est confirmé par l'irrégularité inter annuelle.

II.3.3.3 - Coefficient de variation (Cv)

La variation inter annuelle peut être aussi précisée par le coefficient de variation (tableau 46). La valeur du coefficient de variation est élevée au niveau de la station de Saida (0,77) et moyennes pour la station de Sidi Boubekeur (0,54). Cette variabilité entre l'amont et l'aval est liée à l'alimentation pluviale irrégulière des cours d'eau.

II.3.4 - Bilan moyen annuel de l'écoulement

Le bilan moyen annuel de l'écoulement est exprimé par la hauteur d'eau (P) précipitée dans le bassin en (mm) et par la lame d'eau écoulée équivalente (E) (mm). La différence de ces deux notions P-E donne le déficit moyen annuel de l'écoulement (D) en (mm). Le rapport E / P correspond au coefficient moyen annuel de l'écoulement (C).

Tableau 50: Bilan moyen annuel de l'écoulement

	P (mm)	E (mm)	D (mm)	C (%)
Saida	348,77	55,5	293,27	15,91
Sidi Boubekeur	293,92	28,4	265,52	9,66

L'étude du déficit montre le terme du bilan hydrologique $D = P - E$. Cette différence correspond à la hauteur d'eau reçue par le bassin en période considérée et l'écoulement dans l'oued de ce même bassin pendant cette même période.

Les sous bassins caractérisant le bassin versant de l'oued Saida présentent une lame d'eau écoulee faible par rapport à la hauteur pluviométrique moyenne, qui se traduit par une forte évaporation.

Le déficit moyen annuel de l'écoulement enregistré au niveau des deux stations reste relativement élevé (265,52 et 293,27 mm) (tableau 50). Le coefficient moyen annuel de l'écoulement C, ne représente que 15,91% et 9,66 % d'eau précipitée respectifs de Saida et Sidi Boubekour, le reste est repris par l'évapotranspiration E. Les déficits calculés par les méthodes de Turc, Wundt, Verdeil et Thornthwaite, pour le bassin étudié, sont en général proches de ceux des bilans hydrologiques.

Par conséquent, le régime hydrologique du bassin de l'Oued Saïda est influencé à la fois par deux facteurs essentiels : l'évaporation importante et la perméabilité élevée des terrains jurassiques fracturées par endroits et karstifiées en d'autres qui occupent une grande partie dans le bassin.

II.2.5- Etude statistique des débits annuels

L'analyse fréquentielle des débits annuels, présente un grand intérêt dans l'élaboration des projets d'aménagements hydrauliques. Dans ce travail, nous essayons de trouver une loi d'ajustement de la distribution des débits annuels. La variabilité des débits sur la période considérée, mise en évidence par les coefficients de variation ($C_v > 0,5$), nous laisse penser à un ajustement de type Log-normal. Pour vérifier cette adéquation, nous passons à l'ajustement graphique puis au test du χ^2 .

Le test graphique figure 58, montre que les débits moyens annuels s'ajustent bien à la loi Log-normal à un seuil de probabilité égale à 0.05.

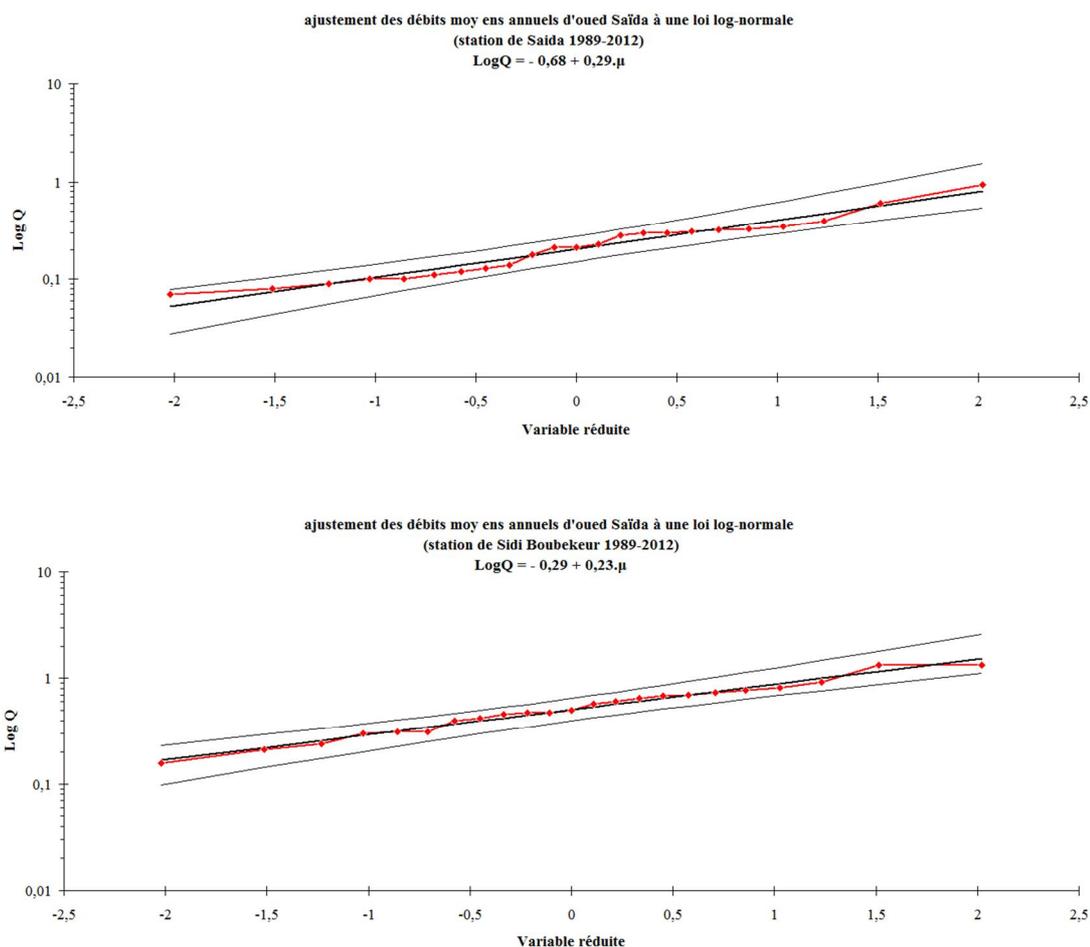


Fig.58: Ajustement des débits moyens annuels à une loi log normale pour les deux stations d'étude.

L'ajustement des débits moyens annuels de nos séries à la loi log normale¹ (fig. 58) nous a donné les résultats suivants (tableau 55) qui nous ont permis d'estimer les principaux modules fréquentiels (tableau 56).

Tableau 55: Ajustement à une loi log normale des modules annuels

Stations Paramètres	Saïda	Sidi Boubekeur
MoyLogQ	-0,68	-0,29
σ_{LogQ}	0,29	0,23
Equation de la droite $\text{LogQ} = \text{Log } \bar{Q} + U\sigma_{\text{LogQ}}$	$\text{LogQ} = -0,68 + 0,29U$	$\text{LogQ} = -0,29 + 0,23U$

Log Q= logarithme des débits moyens, σ_{LogQ} = écart type des logarithmes, U = variable réduite.

¹ N.B. L'adéquation à la loi log normale a été testée par le test du χ^2 (tableaux 51 à54 en annexe).

Tableau 56: Modules caractéristiques pour des périodes de récurrences données en m^3/s .

Période	T=02 ans F=0,50 U=0,000	T=05 ans F=0,80 U=0,841	T=10 ans F=0,90 U=1,282	T=20 ans F=0,95 U=1,645	T=50 ans F=0,98 U=2,054	T=100 ans F=0,99 U=2,327	T=1000 ans F=0,999 U=3,091
Saida	0,20	0,36	0,49	0,62	0,82	0,99	1,65
Sidi Boubekeur	0,51	0,80	1,02	1,25	1,57	1,82	2,77

II.4 - Etude des débits maximums journaliers

Dans cette étude nous nous baserons sur les débits journaliers max disponibles au niveau de la station hydrométrique de Saïda. Le choix de cette station est motivé par la disponibilité d'une série de données hydrométriques traitée sur une période représentative allant de 1974/1975 et 2011/2012.

II.4.1- Analyse fréquentielle des débits maximums journaliers

L'analyse fréquentielle fournit un outil remarquable d'aide à la prévision. Elle est considérée comme l'approche la plus appropriée de la prédétermination du débit maximum de crue. Ceci permettra de dimensionner les ouvrages.

En analyse fréquentielle des crues, trois phases principales sont généralement distinguées.

- La définition de la variable : le débit de pointe, c'est-à-dire la plus forte valeur du débit atteinte par la crue,
- La sélection de la plus forte valeur du débit de pointe observée pendant l'année hydrologique,
- L'ajustement à une loi de probabilité permettant de définir la fréquence théorique de chaque événement souvent exprimé en termes de période de retour T.

De l'analyse du tableau 57, il ressort deux crues importantes: celle de la saison 1996/1997 et celle de la saison 2000/2001. Les crues enregistrées en cette période ont causées des inondations importantes dans l'Ouest algérien.

Tableau 57: Débits annuels maxima pour la station de Saïda (1974-2012)

Année	Q_{max} (m^3/s)	Mois d'apparition	Année	Q_{max} (m^3/s)	Mois d'apparition
1974 - 1975	17,46	Avril	1993 - 1994	5,36	Septembre
1975 - 1976	2,97	Février	1994 - 1995	3,89	Mars
1976 - 1977	20,89	Octobre	1995 - 1996	22,85	Juin
1977 - 1978	3,89	Novembre	1996 - 1997	70,02	Avril
1978 - 1979	12,14	Juin	1997 - 1998	3,89	Août
1979 - 1980	11,66	Octobre	1998 - 1999	2,08	Mars
1980 - 1981	2,664	Décembre	1999 - 2000	15,50	octobre
1981 - 1982	40,06	Avril	2000 - 2001	95,52	Octobre
1982 - 1983	7,52	Novembre	2001 - 2002	10,70	octobre
1983 - 1984	0,065	Mars	2002 - 2003	8,36	Octobre
1984 - 1985	2,22	Novembre	2003 - 2004	32,65	Octobre
1985 - 1986	1,38	Mars	2004 - 2005	3,12	Mars
1986 - 1987	40,06	Octobre	2005 - 2006	15,50	Avril
1987 - 1988	4,76	Janvier	2006 - 2007	10,70	Novembre
1988 - 1989	32,65	Août	2007 - 2008	6,26	Octobre
1989 - 1990	15,50	Mai	2008 - 2009	15,50	Septembre
1990 - 1991	25,30	Mars	2009 - 2010	15,50	Août
1991 - 1992	3,89	Août	2010 - 2011	10,70	Avril
1992 - 1993	20,40	Août	2011 - 2012	10,70	Avril

- **Choix du type d'ajustement**

En Algérie du Nord, les débits maximaux annuels s'ajustent généralement mieux à la loi de Gumbel, la loi Log Normale surestime les valeurs des débits de crues à partir de 1000 ans. De ce fait, nous allons ajuster les valeurs des débits maximums enregistrés à la station de Saïda à la loi de probabilité de Gumbel.

Tableau 58: Paramètres statistiques de la série et droite d'ajustement obtenus par la loi de Gumbel.

	Moyenne (m^3/s)	Max (m^3/s)	Min (m^3/s)	Ecart type	Coefficient de variation	Equation d'ajustement
Gumbel	16,43	95,52	0,065	19,23	1,17	$Q = 15,00u + 7,77$

Tableau 59 : Débits de crues fréquentiels déterminés par la loi de Gumbel à la station de Saïda (m³/s).

Période de retour (ans)	2	10	20	50	100	1000
Fréquence au non dépassement	0,5	0,90	0,95	0,98	0,99	0,999
U Gumbel	0,367	2,250	2,970	3,902	4,600	6,907
Débits (m ³ /s)	13,27	41,53	52,33	66,31	76,78	111,40

Les analyses portées sur le tableau ci-dessus mettent en évidence les valeurs obtenues par la loi de Gumbel. L'analyse statistique de la série étudiée montre que la valeur la plus élevée est de 95,52 m³/s, par contre Gumbel fournit une crue centennale de 76,78 m³/s.

Le graphe ci-dessous montre que la loi de Gumbel s'adapte aux débits journaliers maximums de la station de Saïda.

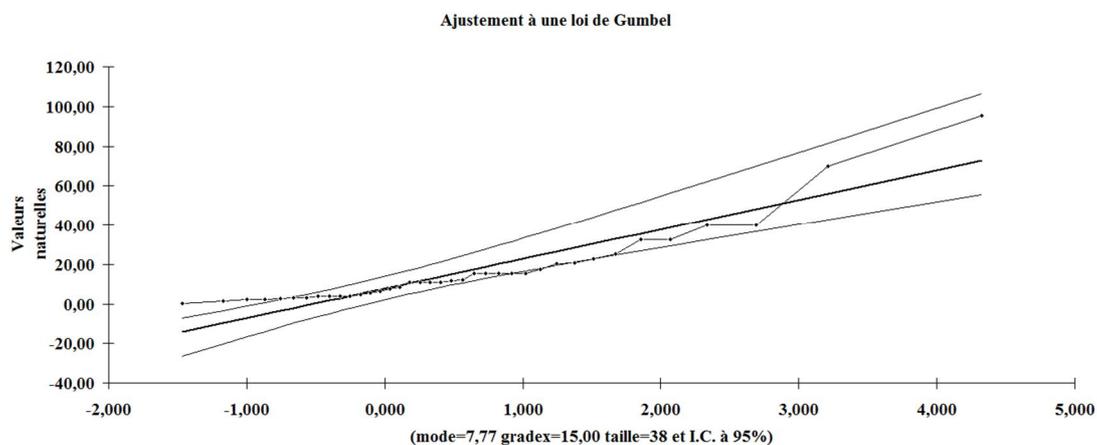


Fig.59: Ajustement des débits journaliers maximums à la station de Saïda.

III- RELATION PLUIE-DEBIT

1- Corrélation annuelle

Nous avons essayé une corrélation simple entre les précipitations et les lames d'eau écoulées des deux stations du bassin versant d'Oued Saïda.

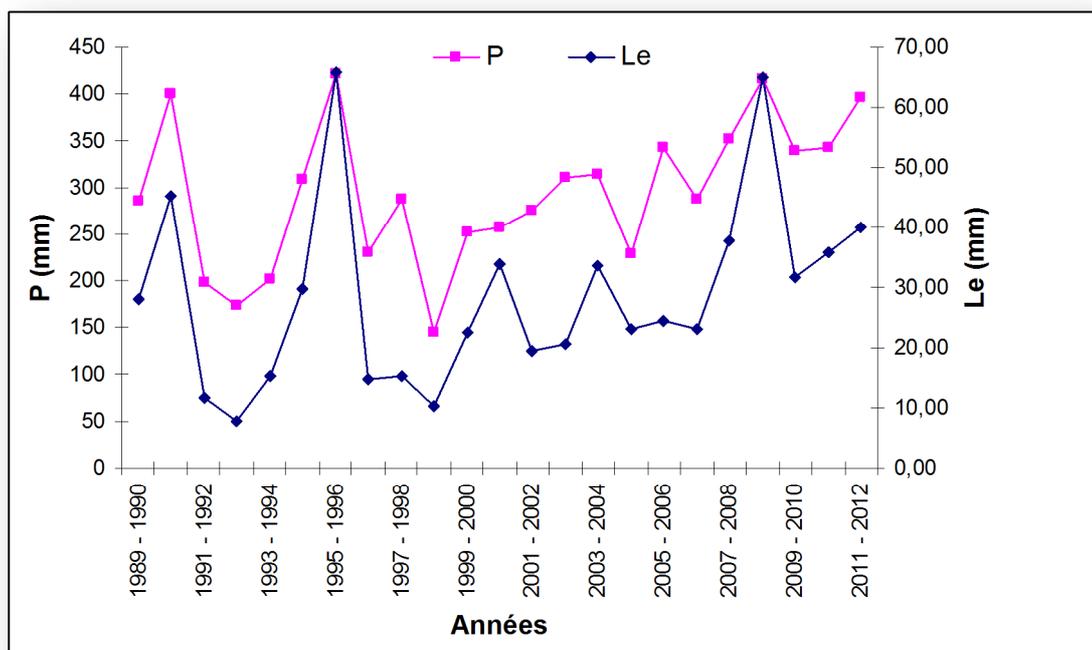


Fig.60: Variation interannuelle des hauteurs des pluies moyennes et des lames d'eau écoulées (Station de Sidi Boubekeur).

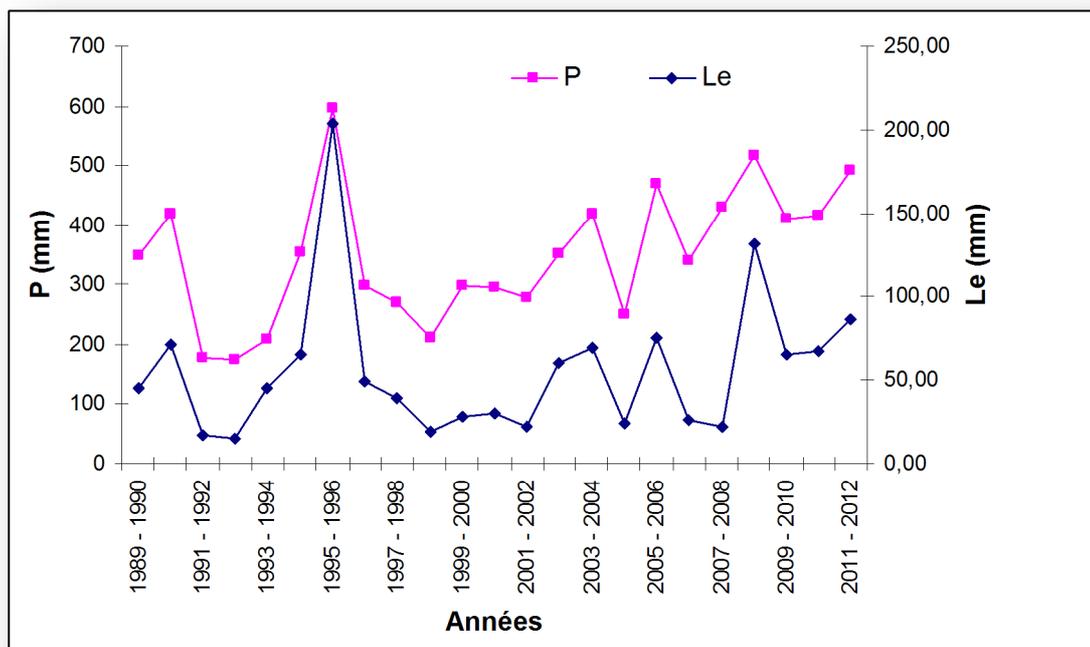


Fig.61: Variation interannuelle des hauteurs des pluies moyennes et des lames d'eau écoulées (Station de Saida).

Le tableau 60, montre les différents résultats du coefficient de détermination et les modèles qui relient les paramètres pluie – lame d'eau écoulée.

Tableau 60: Résultats des différentes corrélations entre les deux paramètres pluie et la lame d'eau écoulée annuelle

Station	Linéaire	Exponentielle	Logarithmique	Polynomiale	puissance
Saida	$Le = 0,315P - 54,301$ $R^2 = 0,6809$	$Le = 7,5324e^{0,0051P}$ $R^2 = 0,7122$	$Le = 94,406\ln(P) - 492,18$ $R^2 = 0,5576$	$Le = 0,0012P^2 - 0,5902P + 95,026$ $R^2 = 0,852$	$Le = 0,0034P^{1,6331}$ $R^2 = 0,6711$
Sidi Boubekeur	$Le = 0,1741P - 22,696$ $R^2 = 0,7573$	$Le = 3,7166e^{0,0065P}$ $R^2 = 0,8143$	$Le = 44,78\ln(P) - 224,4$ $R^2 = 0,6778$	$Le = 0,0006P^2 - 0,1941P + 27,312$ $R^2 = 0,8268$	$Le = 0,0013P^{1,7405}$ $R^2 = 0,8003$

La modélisation par corrélation des données annuelles donne des bons coefficients de corrélation quelque soit le type de relation choisi (Fig. 62 et 63). Les corrélations admissibles sont les tendances polynomiales et exponentielles pour les deux stations.

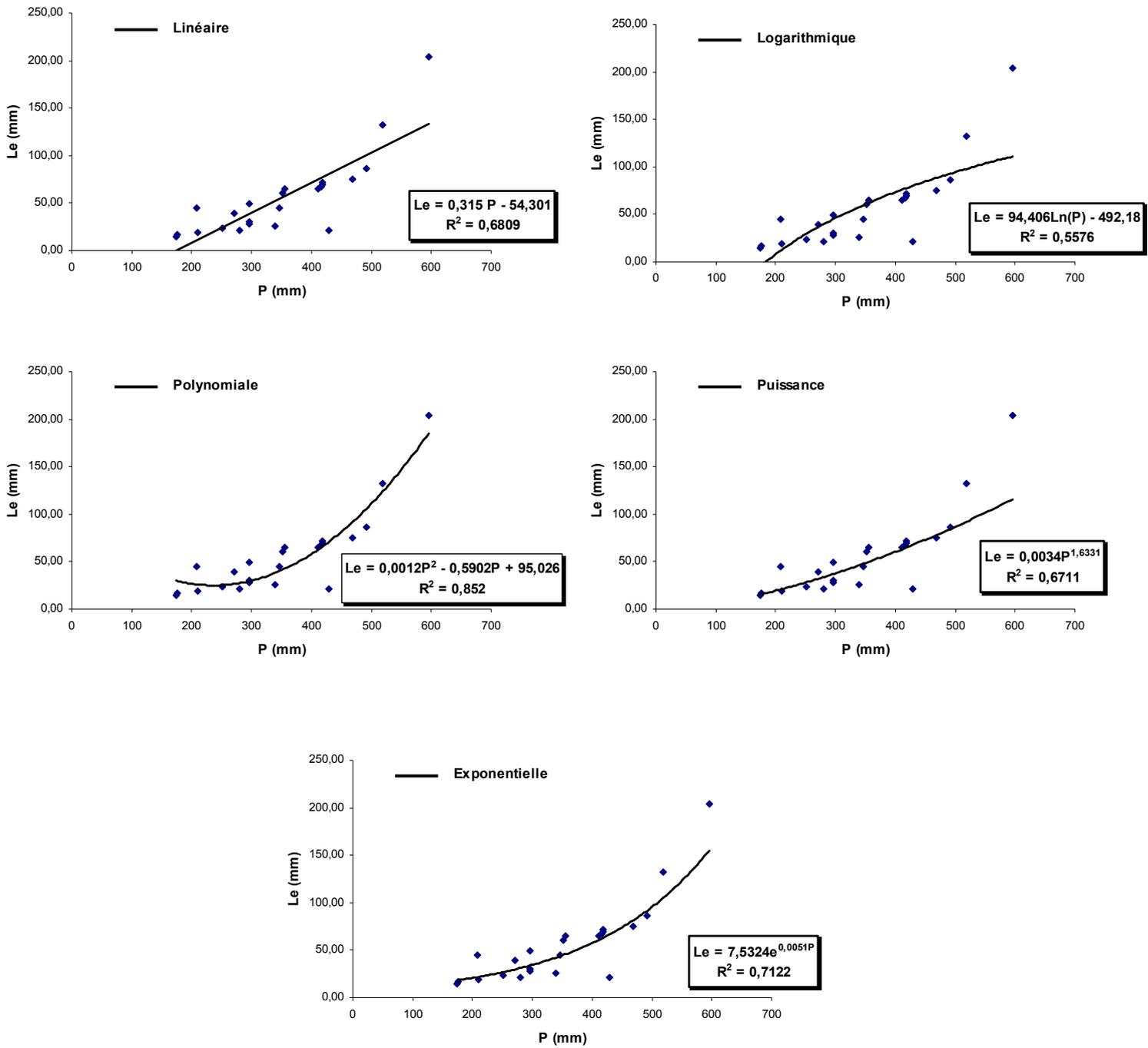


Fig.62: Corrélation Pluie-Lame d'eau écoulee annuel (Station de Saida).

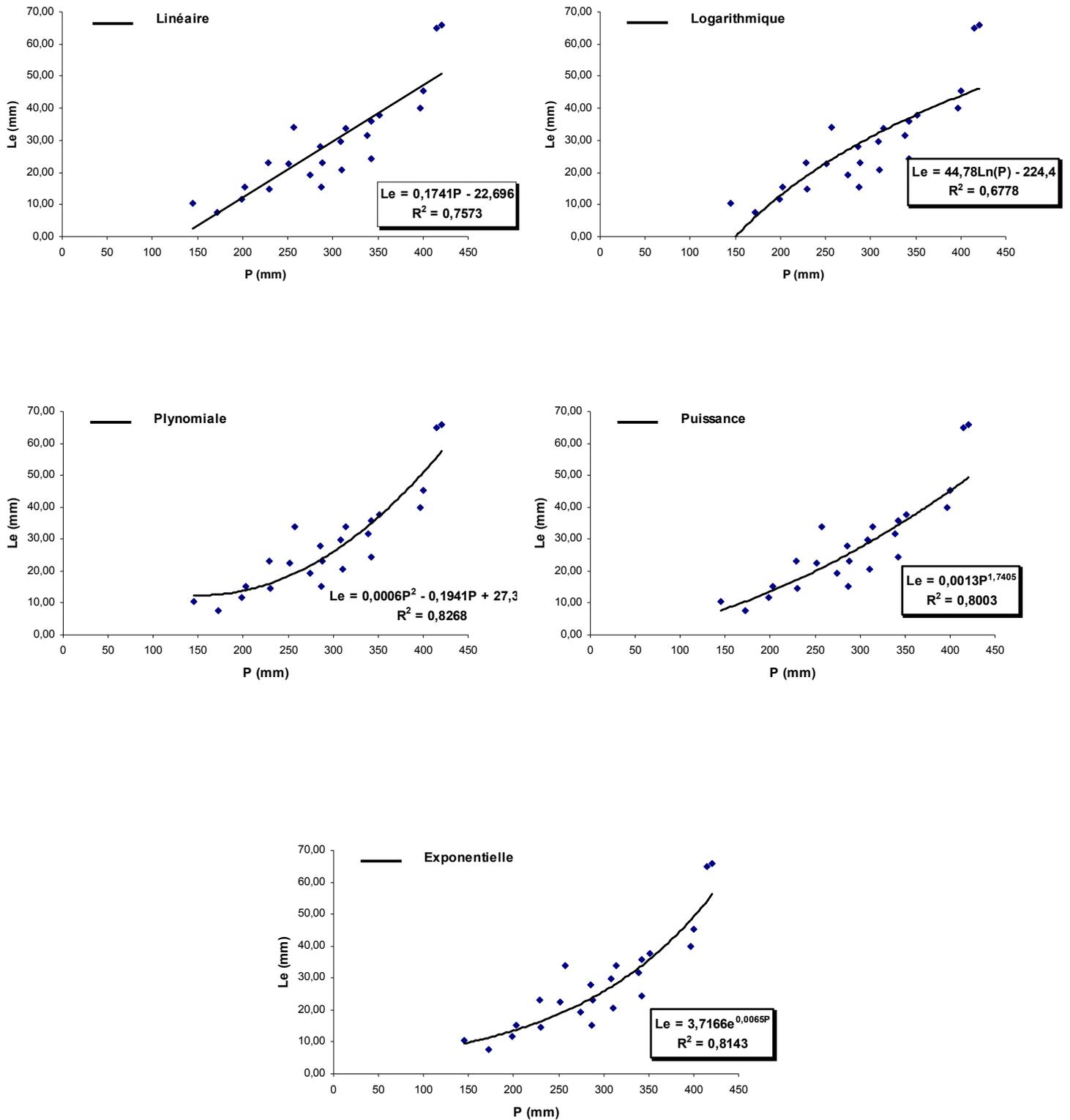


Fig.63 : Corrélation Pluie-Lame d'eau écoulee annuel (Station de Sidi Boubekeur).

2- Corrélation mensuelle

Tableau 61 : Représentation des différents types de régression.

Station	Linéaire	Exponentielle	Logarithmique	Polynomiale	puissance
Saida	$Le = 0,1134P + 1,268$ $R^2 = 0,5118$	$Le = 1,7523e^{0,0296P}$ $R^2 = 0,6018$	$Le = 1,688Ln(P) - 0,9092$ $R^2 = 0,4367$	$Le = 0,0052P^2 - 0,1093P + 2,7094$ $R^2 = 0,5614$	$Le = ,9579P^{0,4522}$ $R^2 = 0,5409$
Sidi Boubekeur	$Le = 0,0897P + 0,0254$ $R^2 = 0,6972$	$Le = 0,3492e^{0,0662P}$ $R^2 = 0,8266$	$Le = 1,2049Ln(P) - 1,402$ $R^2 = 0,6488$	$Le = 0,0002P^2 + 0,0828P + 0,064$ $R^2 = 0,6974$	$Le = 0,1115P^{0,9202}$ $R^2 = 0,8232$

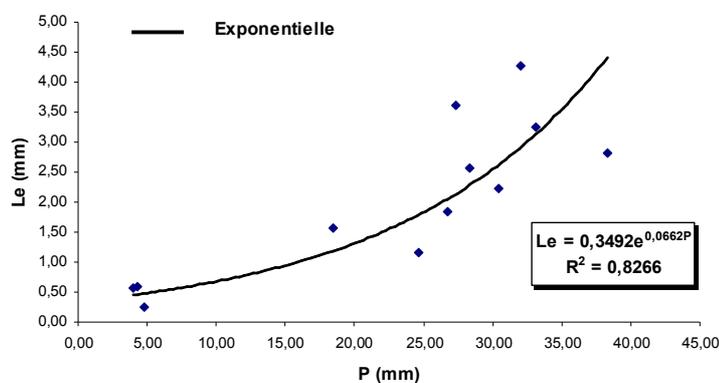
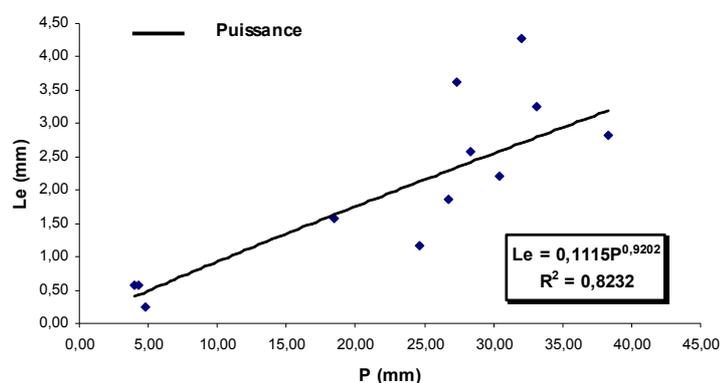
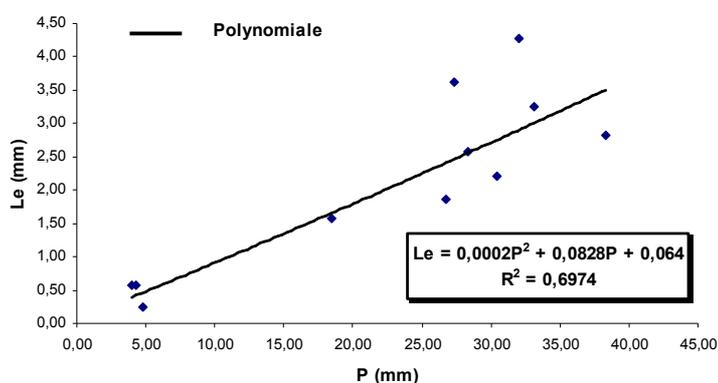
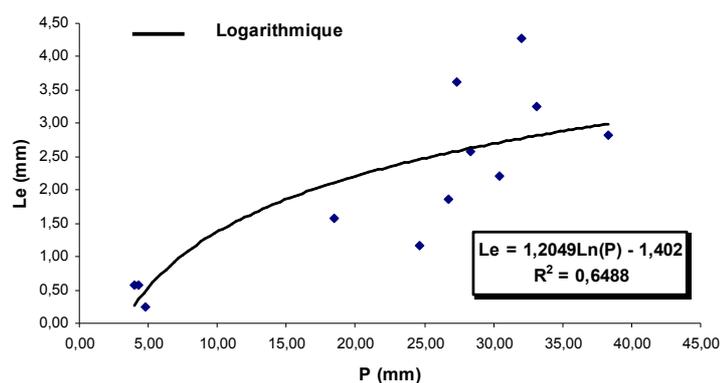
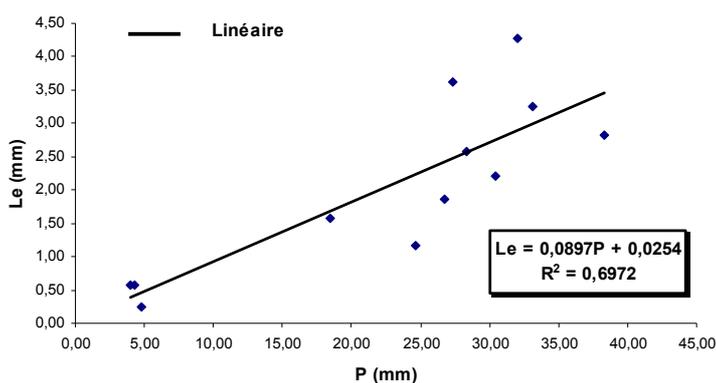


Fig.64: Les Corrélations entre les lames d'eau écoulées et les pluies mensuelles (Station de Sidi Boubekeur).

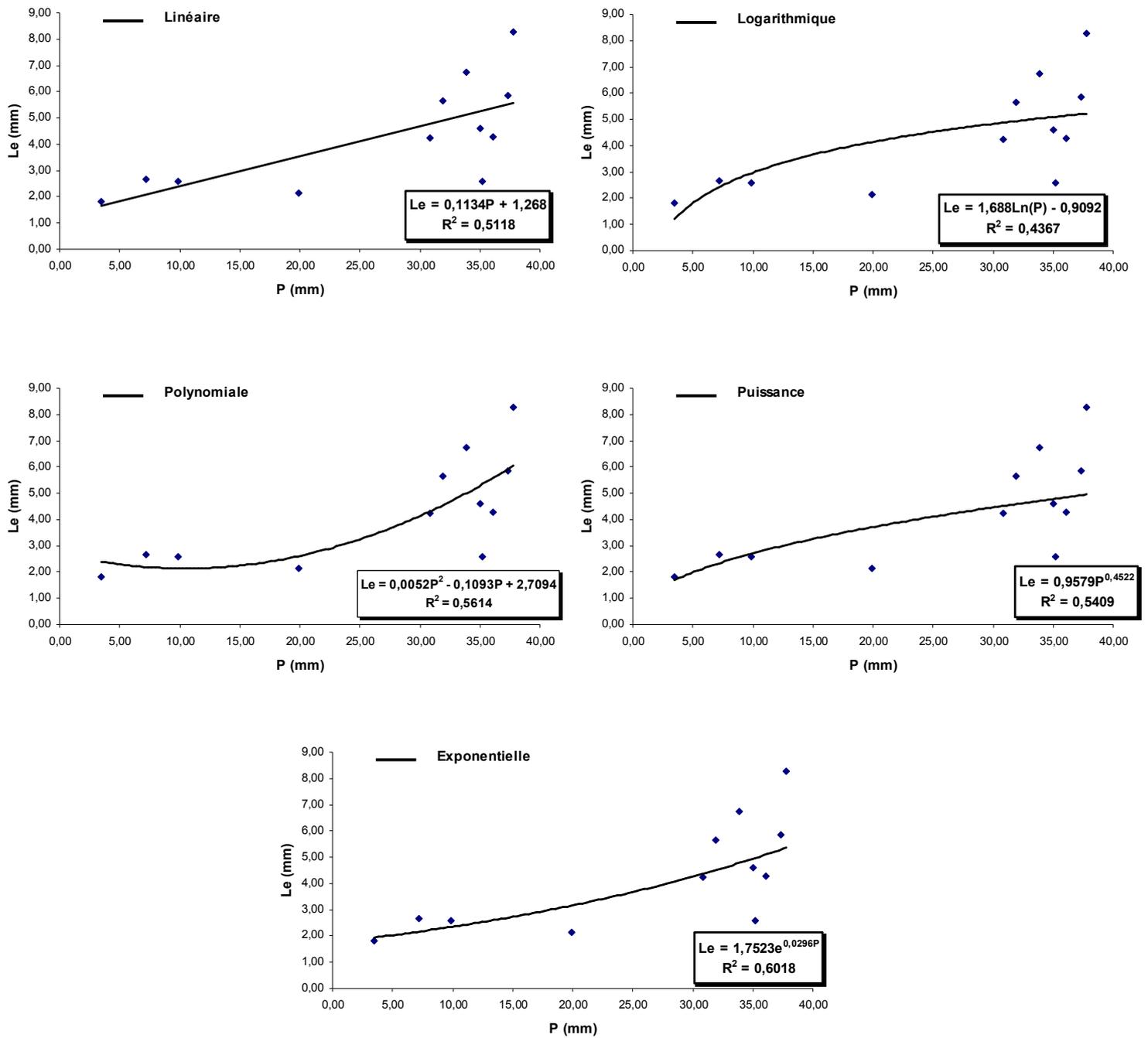


Fig.65: Les Corrélations entre les lames d'eau écoulées et les pluies mensuelles (Station de Saïda).

Les Corrélations entre les lames d'eau écoulées et les pluies montrent de bonnes relations mensuelles. Les lames d'eau écoulées sont bien ajustés à des lois de type exponentiel ou puissance pour Sidi Boubekeur et exponentiel ou polynomiale pour Saida.

Nous obtenons de meilleures corrélations au niveau du sous bassin de Sidi Boubekeur que le sous bassin de Saida. Le caractère karstique, les pertes et transferts souterrains vers d'autres bassins versants peuvent constituer la principale cause.

IV. CONCLUSION

Le régime des oueds est très irrégulier durant l'année, les débits commencent à augmenter à partir du mois de Septembre.

Les variations mensuelles des débits varient de l'amont vers l'aval, en effet plus on se dirige vers l'aval du bassin de Saida plus les débits mensuelles augmentent

Les corrélations débits/débits sont bonnes, c'est-à-dire une importante liaison hydrologique entre les oueds.

Les corrélations débits/pluies montrent la liaison saisonnière et annuelle étroite entre les précipitations et les régimes des oueds, avec un décalage dans le temps, qui constitue le temps de réponse.

Les données annuelles présentent de meilleures corrélations, en effet la compensation et la régulation de l'écoulement dans le temps, améliorent la correspondance avec les précipitations.

Ces modèles sont trop simples et ne tiennent pas compte d'autres paramètres qui régissent l'écoulement en particulier les échanges avec l'atmosphère et les réservoirs - souterrains. Aussi et dans la suite du travail, nous proposons d'utiliser un modèle qui prendra compte de ces échanges.

CHAPITRE II
MODELISATION HYDROLOGIQUE

MODELISATION PLUIE – DEBIT

I. Introduction

L'aménagement de ponts et de barrages sur des oueds ou l'exploitation des cours d'eau pour l'irrigation supposent une bonne connaissance de leurs crues et de leurs étiages. Ainsi, l'analyse et la caractérisation précise de la variabilité des ressources en eau de surface constituent un domaine de recherche indispensable, en ce sens qu'il doit déboucher sur l'élaboration de scénarios permettant la prévision et la gestion de ces ressources.

Le développement de l'informatique et des études sur les systèmes complexes naturels à l'image des bassins versants, ont provoqué ces dernières décennies, une prolifération de modèles mathématiques en hydrologie, qui aident à comprendre, gérer et réduire la complexité des différents phénomènes hydrologiques. La transformation des pluies incidentes en débits à l'exutoire d'un bassin, représente le processus le plus complexe à modéliser. En Algérie, les périodes de sécheresse qui ont sévi ces dernières années ont fait diminuer les réserves en eau, et l'introduction de méthodes d'optimisation de ces ressources s'est révélée utile et indispensable. Cela passe par la maîtrise de la modélisation de la relation pluie-débit. (Benkaci, 2001 in F.Yles, 2012).

II. Historique des modèles pluie-débit

La modélisation pluie-débit est une discipline des sciences hydrologiques qui s'intéresse principalement au cycle hydrologique afin d'aboutir à un outil de travail exploitable dans différents domaines. Le souci de la modélisation pluie-débit est de mettre à la disposition des ingénieurs un outil permettant l'estimation ou la prévision des débits pour une étude d'aménagement désirée (barrages, lacs, ponts...).

Les premiers modèles de simulation pluie-débit ont été proposés à la fin des années 50, est de nombreux modèles ont été développés depuis, selon des approches très variées. Bien que la représentation du comportement hydrologique d'un bassin soit apparemment un problème très ordinaire, aucune solution satisfaisante n'existe à l'heure actuelle pour décrire le mécanisme de la transformation de la pluie en débit. Une forte demande existe cependant, autant dans les domaines de recherche liés à l'étude des hydro-systèmes que de la part des gestionnaires de la ressource en eau. Dans un modèle hydrologique dit à réservoir la transformation de la pluie en débit est

décomposée en différentes composantes. Les équations qui les décrivent comportent des paramètres qui ne peuvent être mesurés et qui doivent être obtenus par calage (Fouchier, 2010 in F. Yles, 2012).

Parmi, les modèles à réservoir nous citons, TOPMODEL (Topography-based-hydrological Model), initié par Beven and Kirkby (1979) à l'université de Leeds. Le modèle se caractérise par la prise en compte la variabilité spatiale du bassin pour évaluer le paramètre topographique (son application est bien adaptée au SIG), l'utilisation des paramètres mesurés sur le terrain et la considération de zones saturées variables.

Le modèle HEC (Hydrological Engineer Center), développé par US Army corps of Engineers. La première version de ce logiciel est apparue en 1995. Il s'agit d'un modèle pluie-débit, constitué par un ensemble de modèles hydrologiques qui permettent de décrire le fonctionnement d'un bassin de manière spatialisée. La géométrie du bassin versant peut-être conceptualisée par un ensemble de sous unités hydrologiques liées entre elles par des éléments hydrauliques. Chacune des unités hydrologiques ainsi que chacun de ces éléments de liaison sont caractérisés par de multiples modèles de simulations hydrologiques. On peut citer, les modèles de pertes par infiltration, les modèles de ruissellement, les modèles des écoulements souterrains et les modèles d'hydrologie fluviale.

Les modèles de type boîte noire, propose un schéma sans lien direct avec la réalité. Il ne fait appel qu'aux seuls variables d'entrée et de sortie d'un bassin sans faire intervenir ses paramètres physiques. Il fournit une description purement mathématique et globale de la transformation pluie-débit et sont représentés principalement par les modèles linéaires d'analyse de séries temporelles Box et al, (1976) et les réseaux de neurones Anctil et al, (2004).

Au début des années 80, Claude Michel (1983) a engagé au Cemagref une réflexion sur la modélisation pluie-débit à partir du modèle CREC, un modèle à neuf paramètres développé au Laboratoire d'Hydrologie de l'Université de Montpellier (Cormary et Guilbot, 1973). Partant de cette structure, des simplifications ont été faites, dans le but d'obtenir un modèle à peu de paramètres, sans amoindrir les performances du modèle initial en termes de simulation des débits. Une structure simple à deux réservoirs a ainsi été proposée, avec un seul paramètre correspondant à une capacité maximale identique de ces deux réservoirs.

De façon générale, ce premier modèle était un modèle à deux paramètres, GR2, avec un paramètre pour chaque capacité de réservoir. Utilisé par Loumagne (1988) et Devred (1989), ce modèle a ensuite été repris par Edijatno (1987, 1991) qui a, par une démarche résolument empirique, amélioré sa structure en modifiant notamment la fonction de production et en ajoutant un troisième paramètre, constante de temps d'un hydrogramme unitaire. Le nouveau modèle journalier GR3 (Edijatno et Michel, 1989) fut testé sur un échantillon de 110 bassins versants et donna des résultats satisfaisants en comparaison avec quelques modèles plus complexes. Des relations sommaires entre descripteurs climatiques du bassin et valeurs des paramètres du modèle ont aussi pu être établies.

Dans une perspective de constante amélioration de cette structure, Nascimento (1991, 1995) a isolé des bassins intermittents pour lesquels le modèle avait du mal à fournir des résultats corrects, et a introduit dans le modèle un quatrième paramètre gouvernant des échanges souterrains pour répondre aux exigences de bonne reproduction des débits. Le nouveau modèle GR4 a fourni sur un échantillon de 120 bassins de meilleures performances que la version antérieure à trois paramètres. Parallèlement aux travaux de Nascimento (1995), Makhoulf (1994) a mené des recherches sur l'explication des paramètres du modèle GR4J sur quelques bassins versants et a également donné quelques voies pour le traitement du modèle GR4J.

Quelques années plus-tard, Edijatno et al. (1999) ont proposé une nouvelle version à trois paramètres du modèle journalier. Cette version, dans laquelle la capacité du réservoir de production est fixe, est très similaire à la version proposée par Nascimento (1995) avec des fonctions de production et d'échange légèrement modifiées. Enfin, Perrin (2000) et Perrin et al. (2003) ont proposé une version améliorée de ce modèle journalier, comportant quatre paramètres et permettant notamment d'améliorer la simulation des étiages avec l'introduction d'une percolation issue du réservoir de production du modèle.

Des premiers essais de modélisation à pas de temps mensuel avec un modèle pluie-débit simple avaient été effectués par Rifaat (1980). Par la suite, Kabouya (1990) a mis au point un modèle mensuel GR3M, à trois paramètres, pour l'appliquer à des problèmes d'évaluation de la ressource en eau en Algérie septentrionale (Kabouya et Michel, 1991). Makhoulf (1994) a également travaillé sur un modèle mensuel en proposant une version à deux paramètres, le modèle GR2M (Makhoulf et Michel, 1994), qui a par la suite été amélioré par Mouelhi (2003).

Au pas de temps annuel, les travaux de Bouabdallah (1997), ont permis de jeter les premières bases d'un modèle pluie-débit annuel, avec deux versions, à un paramètre (GR1A) et deux paramètres (GR2A).

Par la suite, Mouelhi (2006-a) et (2006-b) a repris la chaîne de modélisation à pas de temps mensuel, annuel et pluriannuel, en essayant d'identifier l'adaptation des structures des modèles au pas de temps de fonctionnement, et en recherchant les cohérences de structures entre ces différents pas de temps. Il a ainsi pu proposer un modèle mensuel (GR2M) à deux paramètres, un modèle annuel (GR1A) à un paramètre et un modèle interannuel sans paramètres à caler.

III. Objectif de la modélisation

Pouvoir simuler le comportement hydrologique d'un bassin versant est un enjeu majeur de l'hydrologie moderne, auquel tente de répondre la modélisation pluie-débit. Il s'agit, à partir de la connaissance de la pluie tombée sur le bassin, de reproduire la réponse en débit du bassin, à l'aide d'un modèle. Parmi les objectifs de ces modèles on peut citer :

- Prévision des crues et des étiages, il s'agit en fait d'évaluer à l'avance des débits de crues susceptibles de présenter des risques d'inondation.
- Simulation des débits, pour des sites non jaugés ou le comblement de lacunes dans des séries de données.
- Prédétermination des débits de crues ou d'étiage, ceci permet le dimensionnement d'ouvrages ou d'aménagement dans le lit du cours d'eau.
- Délimitation des zones inondables.

IV. Paramètres des modèles globaux

Les paramètres utilisés correspondent soit à des grandeurs physiques (quantifiables sur le terrain), soit à une valeur déterminée par une optimisation (non quantifiable sur le terrain). Les paramètres des modèles globaux n'ont généralement pas de signification physique et ne peuvent pas être, par conséquent, mesurés sur le terrain. Ils doivent être déterminés mathématiquement par un processus d'optimisation ou de calage. Le choix d'une telle méthode repose sur son efficacité c'est à dire sa capacité à fournir des jeux de paramètres permettant au modèle de donner des simulations satisfaisantes. Perrin (2000).

V. Les modèles : classifications et exemples

Les classifications de modèles que l'on trouve dans la littérature sont nombreuses et peuvent être fonction de plusieurs caractéristiques Oudin (2004). Dans le tableau 62, nous avons représenté les différents types de modèles selon leurs caractéristiques Clarke (1973), Ambroise (1998), Perrin (2000) et Oudin (2004). La relation entre les différents modèles établis par Gaumme (2000) est représentée dans la figure 66 (F. Yles, 2012).

Tableau 62 : Exemple de caractéristiques des modèles pluie-débit.

Caractéristique	Type de modèle
Selon la nature de la variable	- Modèle déterministe (variables non aléatoires) - Modèle stochastique (variables aléatoires)
Traitement de l'espace (homogénéité du bassin)	- Modèle global - Modèle semi-distribué ou (semi-global) - Modèle spatialisé
Fondement théorique et approche de développement	- Modèle empirique - Modèle conceptuel - Modèle à base physique

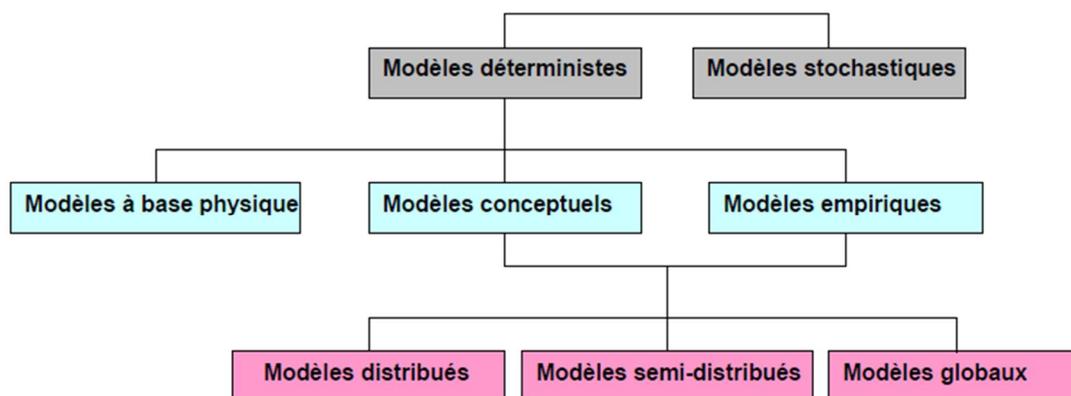


Fig. 66 : Relation entre les modèles pluie-débit. Gaumme (2000).

a) modèle déterministe.

Ce modèle s'appuie sur la description du bassin versant et prend en compte une ou plusieurs caractéristiques physiques, tels que la pente, la superficie et le type de sol. Ces modèles sont utilisés pour la prévision hydrologique, la gestion des ouvrages hydrauliques, la prévision des crues et pour la délimitation des zones inondables.

b) modèle stochastique.

Représente la nature aléatoire des phénomènes hydrométéorologiques à l'aide de distributions statistiques. Il permet la simulation de longues séries de précipitations grâce à la connaissance de lois de probabilité décrivant les phénomènes pluvieux (durée et nombre des averses, intensité, débit...)

c) Modèle à base physique.

C'est un modèle qui s'appuie sur des paramètres physiques mesurables, comme la conductivité hydraulique des sols à saturation, qui ne nécessitent pas en théorie d'être calibrés.

d) Modèles conceptuels et empiriques.

Ils sont fondés sur la physique, suivant les relations utilisées pour modéliser la transformation de la pluie en débit et suivant la représentation du système modélisé.

e) Modèle global ou distribué.

Dans ce type de modèles, les caractéristiques physiques et les grandeurs météorologiques sont considérées comme uniforme à l'échelle du bassin versant assimilé à une unité ponctuelle. Il s'agit de valeurs moyennes applicables à tout le bassin versant. Les processus hydrologiques sont simulés pour l'ensemble du bassin versant.

VI. Modèles génie-rural GR

1. Description

Les modèles génie-rural, sont apparentés à des modèles conceptuels du fait de leur structure à réservoirs. Ce sont en fait des modèles empiriques, leur construction s'est faite sur la base de grands jeux de données et en découvrant progressivement la

structure permettant de reproduire au mieux le comportement hydrologique du bassin versant.

2. Principales caractéristiques des modèles GR.

Comme tout modèle hydrologique, les modèles GR opèrent une triple globalisation du système bassin versant.

- Au niveau des processus, les modèles GR proposent des relations simples à l'échelle du bassin, mises au point empiriquement et sans liens directs avec la physique des processus à petite échelle et pouvant représenter une moyenne de plusieurs processus.

- Au niveau de l'espace, les modèles GR sont globaux, c'est-à-dire que, tout en reconnaissant l'hétérogénéité de tout bassin, ils considèrent le bassin versant comme un tout.

- Au niveau du temps, les modèles GR ont été développés pour des pas de temps de fonctionnement spécifiques, annuel (GR1A), mensuel (GR2M) et journalier (GR4J). Les différents modèles travaillent sur des moyennes temporelles.

Les modèles GR ont été testés sur de larges échantillons de plusieurs centaines de bassins, en France mais également aux Etats-Unis, en Australie et en Algérie. Ces modèles n'ont besoin pour fonctionner que de données continues de pluie et d'évapotranspiration potentielle. Ils ont un faible nombre de paramètres, ce qui permet de limiter les problèmes de surparamétrisation et leur confère une bonne robustesse Perrin et al, (2001).

VII. Dimensions des variables P, ETP, et Q.

1. Pluie (P).

La pluviométrie consiste toujours à mesurer une hauteur de précipitations pendant un intervalle de temps. On a l'habitude d'exprimer les précipitations journalières, mensuelles ou annuelles en millimètre par jour, par mois ou par an. Dans notre cas la pluviométrie est exprimée en mm/mois, mm/an ou mm/j. Elle représente une hauteur d'eau tombée sur le bassin versant considéré et intégrant la distribution spatio-temporelle.

2. L'évapotranspiration potentielle (ETP).

L'évapotranspiration potentielle ETP est la quantité d'eau susceptible d'être évaporée par une surface d'eau libre ou par un couvert végétal dont l'alimentation en eau n'est pas le facteur limitant. La valeur de l'évapotranspiration potentielle est fonction de l'énergie disponible. Elle est mesurée soit par un évaporomètre ou déduite par des formules empiriques telles que Turc, Thornthwaite, Blannay cridle, Penman etc...L'unité de l'évapotranspiration est le millimètre.

a)-Formule de Turc (1955).

La formule de Turc est donnée par la relation suivante :

$$ETP = 0,4 (I_g + 50). K. T / (T + 15)$$

ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle (mm d'eau)

T : Température moyenne mensuelle de l'air (°C).

I_g : Radiation globale moyenne mensuelle reçue au sol (calorie/cm²/jour).

$$I_g = I_gA (0,18 + 0,62 h_r / H)$$

I_gA : Radiation globale théorique

H : Durée théorique des jours du mois en heures.

K : Coefficient égal à 1, si l'humidité relative h_r est supérieur à 50%.

Le calcul de l'ETP d'après la méthode de Turc est établi par un logiciel existant Bennada (2000).

3. Débit (Q)

Il se traduit par une circulation, directe ou indirecte, de l'eau à travers le sol ou le sous-sol en passant par les cours d'eau secondaires puis principaux, et finisse à l'exutoire du bassin versant. A l'échelle globale du bassin versant, le débit à l'exutoire traduit la réaction de tout le bassin suite à une pluie. Il est mesuré par différentes techniques hydrométriques, par exemple : le jaugeage par moulinet, le débit est exprimé en m³/s. Pour répondre aux objectifs de la présente étude, il convient d'uniformiser les dimensions des différentes variables en (mm).

VIII. Calage et validation d'un modèle

Caler un modèle consiste à rapprocher le plus possible le comportement du modèle de celui du bassin modélisé, c'est-à-dire, reproduire au mieux le

comportement hydrologique du bassin. Le critère utilisé est le critère des moindres carrés des erreurs, présenté sous la forme adimensionnelle du critère de Nash borné. Le calage consiste donc à trouver des valeurs des paramètres du modèle qui minimisent l'erreur de modélisation sur la période considérée.

La validation consiste à appliquer sur le modèle des données qui n'ont pas été utilisées lors du calage.

IX. Choix d'un critère de validation

La qualité de la méthode de calage est appréciée en évaluant les simulations du modèle, effectuée dans la phase de contrôle, avec le critère classique de Nash-Sutcliffe (1970). Le critère classique est de la forme suivante :

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{calc_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

Q_{obs_i} : Débit observé au pas de temps i

Q_{calc_i} : Débit calculé au pas de temps i

$\overline{Q_{obs}}$: Moyenne des débits observés sur la période considérée.

Le critère de Nash, varie dans l'intervalle, $]-\infty ; 1]$ a l'avantage d'être d'interprétation facile. Un critère de valeur 1 signifie que l'erreur du modèle est nulle (modèle parfait), on pratique on estime que le calage est acceptable à partir d'une valeur du critère de Nash supérieur à 70%.

X. Description du modèle pluie-débit annuel GR1A

1. Introduction

Le modèle GR1A (modèle du Génie Rural à 1 paramètre Annuel) est un modèle pluie-débit global à un seul paramètre. Il a été initié au Cemagref à la fin des années 1990. La principale version, présenté ici, est celle proposée par Mouelhi (2003) et Mouelhi et al (2006 a).

2. Description mathématique

La structure mathématique du modèle est simple puisqu'elle se résume à une simple équation. Le débit Q_k de l'année K étant proportionnel à la pluie P_k de la même année, avec un coefficient d'écoulement dépendant de P_k , de la pluie P_{k-1} et de l'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne E_k .

$$Q_k = P_k \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{0.7P_k + 0.3P_{k-1}}{X.E_k} \right)^2 \right]^{0.5}} \right\}$$

Où :

- Q_k : Débit simulé de l'année k (mm)
- P_k : Pluie observée de l'année k (mm)
- P_{k-1} : Pluie observée de l'année $k-1$ (mm)
- E_k : Evapotranspiration potentielle de l'année k (mm)
- X : Paramètre du modèle à caler (mm)

Le paramètre X , traduit l'influence d'une ouverture du bassin sur l'extérieur non atmosphérique (échanges avec des nappes profondes ou avec des bassins adjacents).

Si $X > 1$: Le système perd de l'eau

Si $X < 1$: Le système gagne de l'eau

Ce paramètre apparait comme un coefficient modulateur de l'évapotranspiration potentielle sur un large échantillon de bassins versants. Les valeurs trouvées sont données dans le tableau 63.

Tableau 63 : Valeurs des paramètres du modèle GR1A obtenues sur un large échantillon de bassins versants.

Paramètres	Médiane	Intervalle de confiance à 90%
X (mm)	0,7	0,13 – 3,5

XI. Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M

1. Introduction

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) est un modèle pluie-débit global à deux paramètres. Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1980. Ce modèle a des objectifs d'applications dans le domaine des ressources en eau. Sa structure associe un réservoir de production et un réservoir de routage ainsi qu'une ouverture sur l'extérieur autre que le milieu atmosphérique. Ces trois fonctions permettent de simuler le comportement hydrologique du bassin. La version présentée dans ce travail est la version Mouelhi et al (2006b).

2. Description mathématique

Dans cette structure mathématique (figure 67), les paramètres de forçage sont représentés par P_k qui est la pluie mensuelle du mois K et E représente l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même mois. Ces équations se caractérisent par une fonction de production et une fonction de routage.

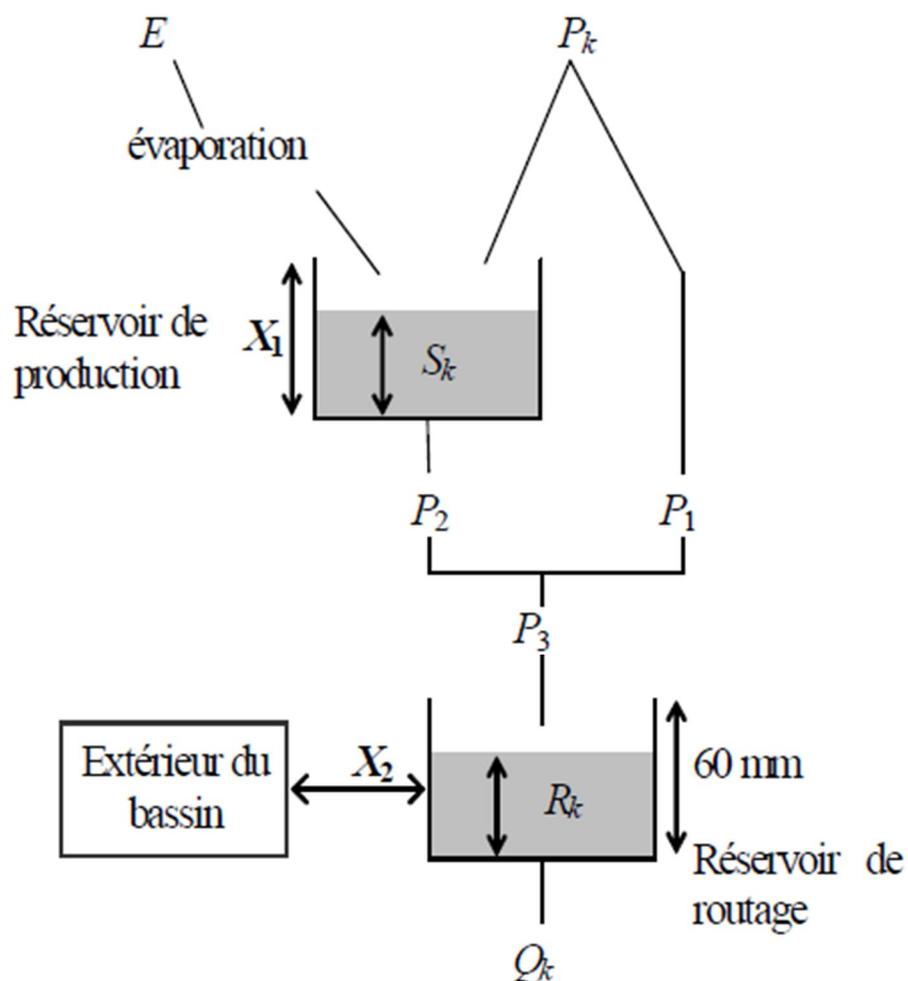


Fig. 67 : Schéma de la structure du modèle GR2M

. Production

La fonction de production du modèle repose sur un réservoir de suivi d'humidité du sol. Une partie P_s de la pluie P_k va être ajoutée au contenu S_k dans le réservoir en début de pas de temps.

$$P_s = \frac{X_1 \cdot \left(1 - \left(\frac{S_k}{X_1} \right)^2 \right) \cdot \tanh \left(\frac{P_k}{X_1} \right)}{1 + \frac{S}{X_1} \cdot \tanh \left(\frac{P_k}{X_1} \right)}$$

Le paramètre X_1 , capacité du réservoir, est positif et exprimé en mm. La pluie en excès, P_1 , est donnée par l'équation suivante :

$$P_1 = P - P_S'$$

Le contenu du réservoir est alors déterminé par :

$$S' = S_k + P_S$$

Sous l'effet de l'évapotranspiration, une quantité E_s est prélevée du réservoir :

$$E_s = \frac{S' \left(2 - \frac{S'}{X_1} \right) \cdot \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S'}{X_1} \right) \cdot \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)}$$

E représente l'évapotranspiration potentielle moyenne du mois considéré. Le niveau S' devient S'' :

$$S'' = S' - E_s$$

• Percolation

Le réservoir de suivi d'humidité du sol se vidange ensuite selon une percolation P_2 :

$$P_2 = S'' \cdot \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{S''}{X_1} \right)^3 \right]^{-1/3} \right\}$$

Son niveau S_{k+1} , prêt pour les calculs du mois suivant, est alors donné par :

$$S_{k+1} = S'' - P_2$$

.Routage

La quantité d'eau totale P3 qui atteint le réservoir de routage est donnée par :

$$P_3 = P_1 + P_2$$

Le niveau Rk dans le réservoir devient alors R' :

$$R' = R_k + P_3$$

Le paramètre X2 est positif et adimensionnel. Le niveau dans le réservoir devient :

$$R'' = X_2 \cdot R'$$

Le réservoir, de capacité fixe égale à 60 mm, se vidange pour donner le débit Qk selon l'équation suivante :

$$Q_k = \frac{R''^2}{R'' + 60}$$

Le contenu du réservoir est enfin donnée par :

$$R_{k+1} = R'' - Q_k$$

3. Paramètres

Le modèle a deux paramètres optimisables :

X1 : capacité du réservoir de production en (mm)

X2 : capacité d'échanges souterrains (-)

L'étude sur un large échantillon de bassins versants a donné les valeurs suivantes (Tableau 64).

Tableau 64 : Valeur des paramètres du modèle GR2M.

Paramètre	Médiane	Intervalle de confiance à 90 %
X ₁ (mm)	380	140 – 2640
X ₂ (-)	0,92	0,21 – 1,31

XII. Application du modèle GR

L'évaluation d'un modèle consiste à comparer les valeurs simulées aux valeurs observées. Des critères statistiques sont utilisés pour caractériser la qualité de la simulation. Dans ce travail, nous avons utilisé les critères classiques en hydrologie à savoir, bilan, corrélation et critère de Nash. Le modèle GR a été appliqué sur des données annuelles des pluies mesurées à la station de Saida et Sidi-boubekeur et la lame d'eau précipitée sur tout le bassin (calculé par la méthode de Thiessen) (voir Tab. 65 en annexe) et des lames d'eau écoulées mesurées à chaque station.

1. Modèle annuel (GR1A)

Dans cette étude, pour prédire le débit à une année donnée, on utilise à l'entrée du modèle des valeurs des pluies annuelles observées (mm), des ETP calculées par la méthode de Thornthwaite et celle de Turc en mm et des débits annuels (exprimés en lames d'eau écoulées) observés au niveau de la station de Saida, Sidi Boubekeur, qui se trouve en aval du bassin versant d'Oued Saida (Tab. 66, 67 et 68 en annexe).

1.1. Calage du modèle

Le calage du modèle a été réalisé après le passage par un certain nombre de simulations. Nous avons procédé au calage du paramètre X du modèle en appliquant des changements sur ce dernier en commençant comme point de départ par une valeur fixée à 0,13 et la faisant accroître successivement avec un intervalle de 0,01 jusqu'à la valeur supérieure limite donnée par le modèle 3,5 et jusqu'à l'obtention d'un critère de Nash optimum égale ou supérieur à 70% (sachant qu'un bon critère de Nash-Sutcliffe a une valeur proche de 1) et un coefficient de corrélation entre les débits simulés et les débits observés plus acceptable. Les résultats du calage sont présentés dans le Tableau ci-dessous.

La validation du calage est effectuée en appliquant le test de performance du modèle de coefficient de détermination R^2 Tableau 69.

Tableau 69: Résultat du calage du modèle GR1A

Données annuelles	ETP (Thorntwaite)				ETP (Turc)			
	X	Nash	Bilan	Coeff. de corr. (R ²)	X	Nash	Bilan	Coeff. de corr. (R ²)
Saida (P Saida-Q Saida)	0,60	90,5	99,4	0,90	0,54	89,7	100,4	0,89
Sidi Boubekeur (P SB-Q SB)	0,76	76,2	93,6	0,79	0,68	76,6	94,5	0,79
BV de l'Oued Saida (P moy Thiessen - Q SB)	0,93	77,3	90,0	0,85	0,84	79,1	91,3	0,85

X : Coefficient de correction de l'ETP (mm)

D'après ces résultats et la superposition des deux graphes, des débits simulés et calculés pour les stations de Saida (fig. 68 et 69), Sidi Boubekeur (fig. 70 et 71) et le bassin versant de l'Oued Saida (fig. 72 et 73), nous pouvons dire que les modèles sont calés, l'évapotranspiration résultante de la formule de Thorntwaite et celle de Turc est assez équilibrée pour l'ensemble des sous bassins.

Selon le coefficient de correction de l'évapotranspiration X, nous remarquons que ce paramètre augmente de l'amont vers l'aval tout au long du bassin de l'Oued Saida. Le paramètre X traduit l'influence d'une ouverture du bassin sur l'extérieur non atmosphérique et montre que pour la valeur de X qui varie entre 0,60 à 0,93 (Thorntwaite) et entre 0,54 à 0,84 (Turc) le bassin reçoit de l'eau en profondeur. En effet, le caractère karstique de notre bassin nous laisse penser qu'il existe des échanges tout au long de l'oued.

En plus le paramètre $X < 1$ traduit que notre bassin gagne de l'eau. En effet le système globale « aquifère-Oued » du bassin de l'Oued Saida est matérialisé par une alimentation de l'oued principal par la nappe tout le long de son parcours. L'alimentation de la nappe est assurée, en plus de son impluvium, par les eaux provenant des bassins versants voisins.

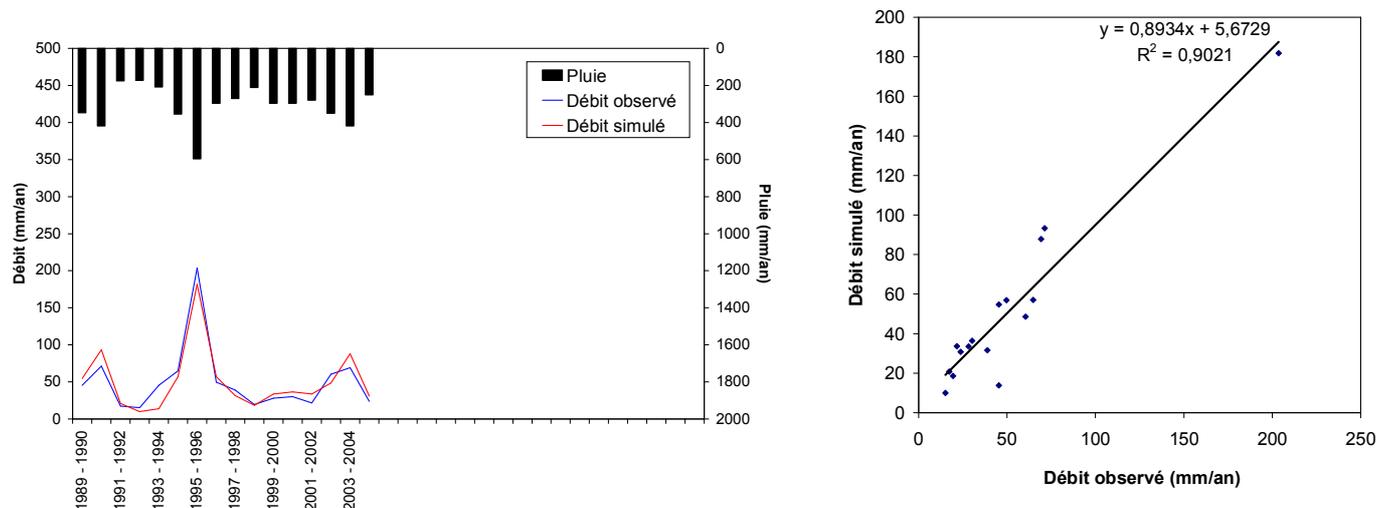


Fig. 68: Résultat obtenu par le calage du modèle GR1A pour le sous bassin de Saida avec l'ETP de Thornthwaite (1989/1990-2004/2005)

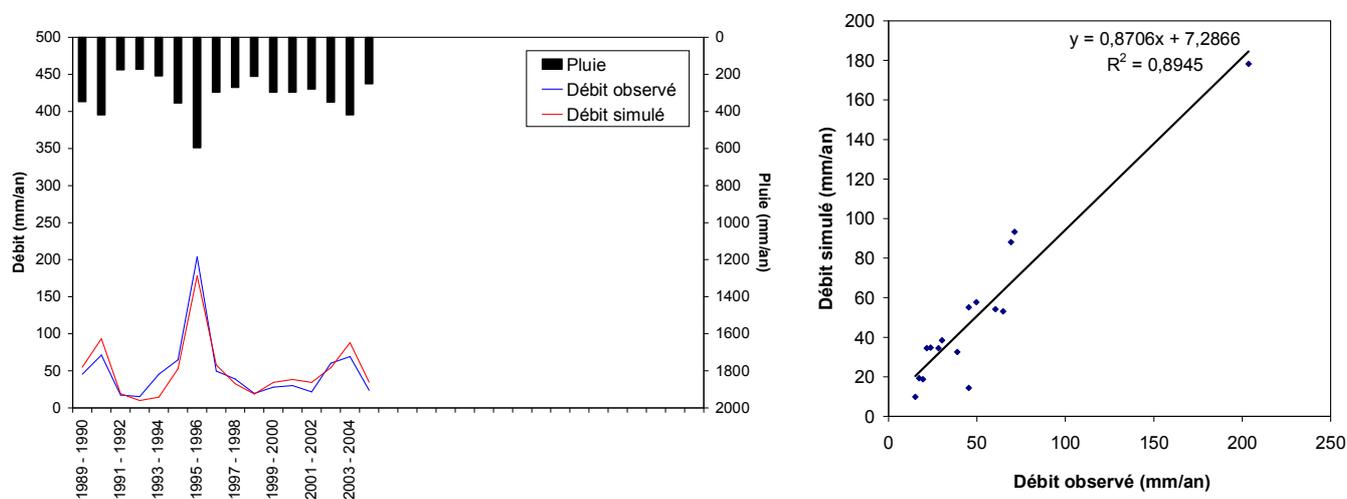


Fig. 69: Résultat obtenu par le calage du modèle GR1A pour le sous bassin de Saida avec l'ETP de Turc (1989/1990-2004/2005)

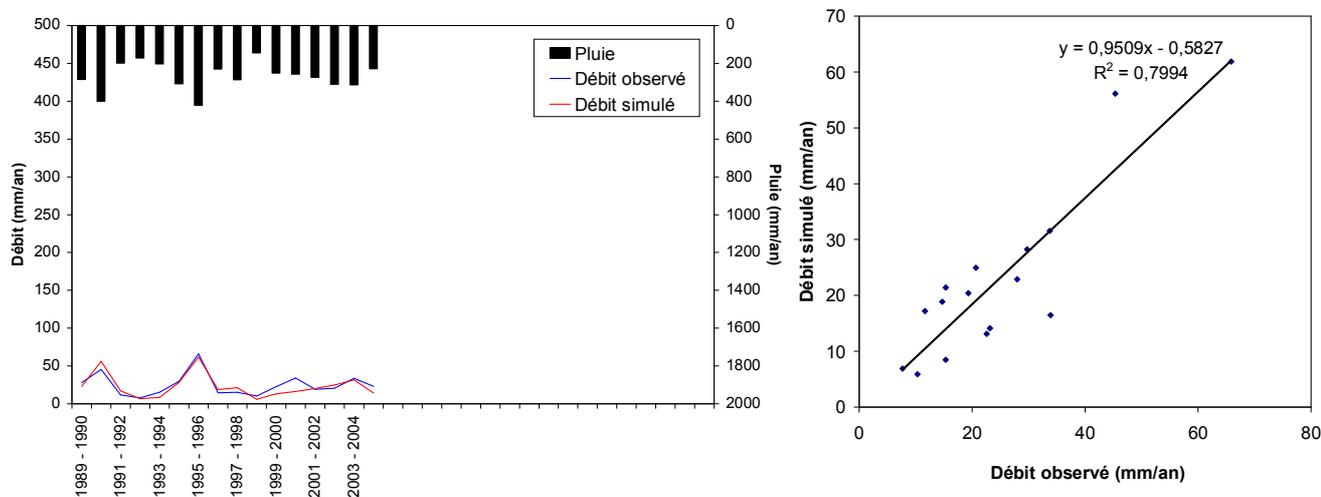


Fig. 70: Résultat obtenu par le calage du modèle GR1A pour le sous bassin de Sidi Boubekeur avec l'ETP de Thornthwaite (1989/1990-2004/2005)

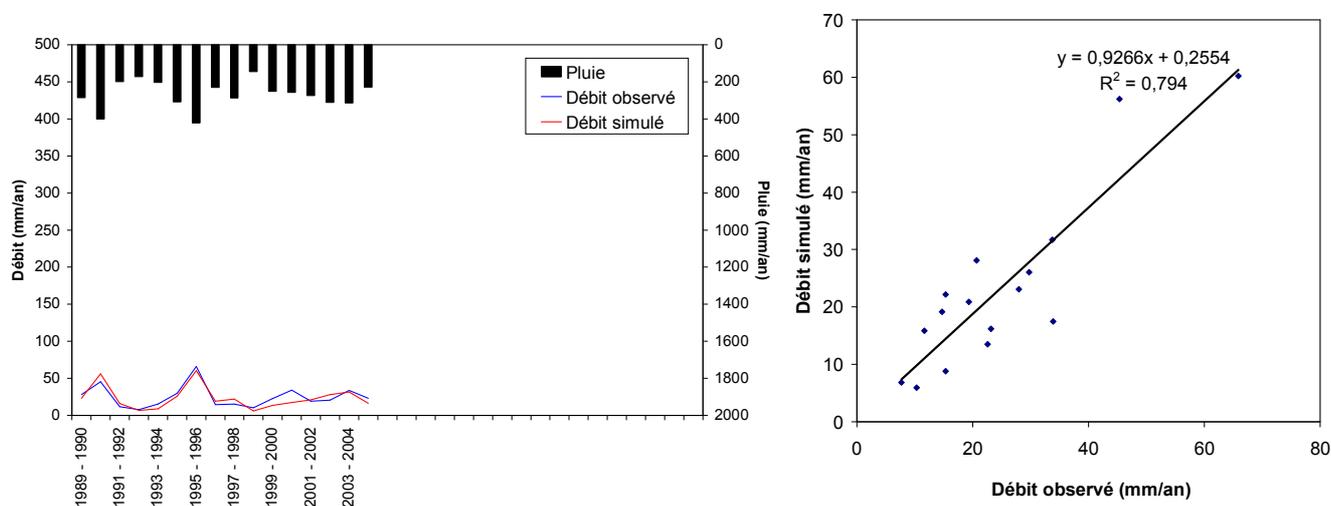


Fig. 71: Résultat obtenu par le calage du modèle GR1A pour le sous bassin de Sidi Boubekeur avec l'ETP de Turc (1989/1990-2004/2005)

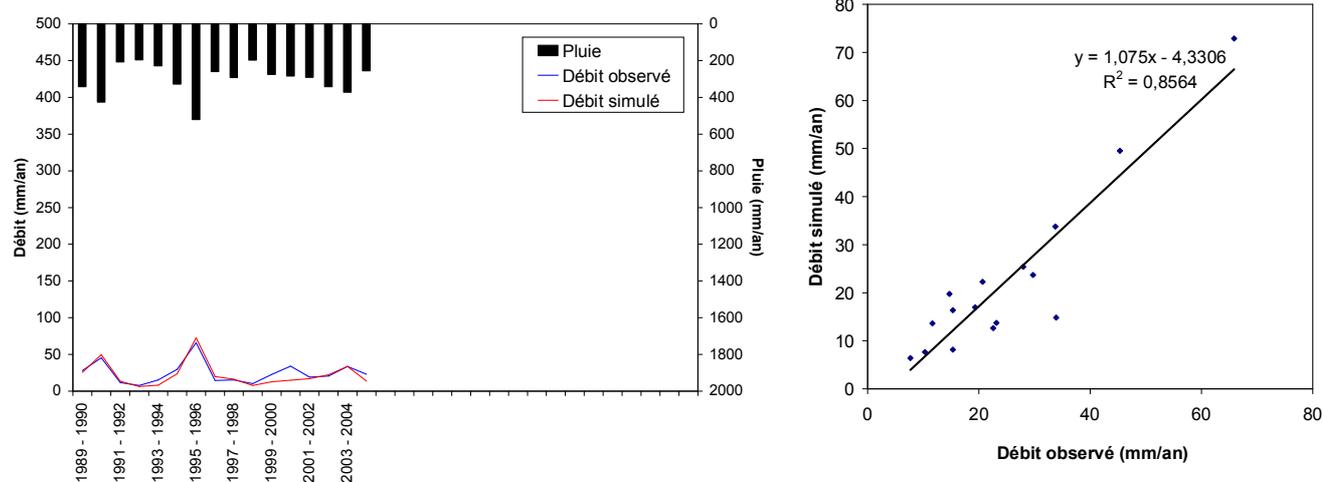


Fig. 72: Résultat obtenu par le calage du modèle GR1A pour le bassin versant de l'Oued Saida avec l'ETP de Thornthwaite (1989/1990-2004/2005)

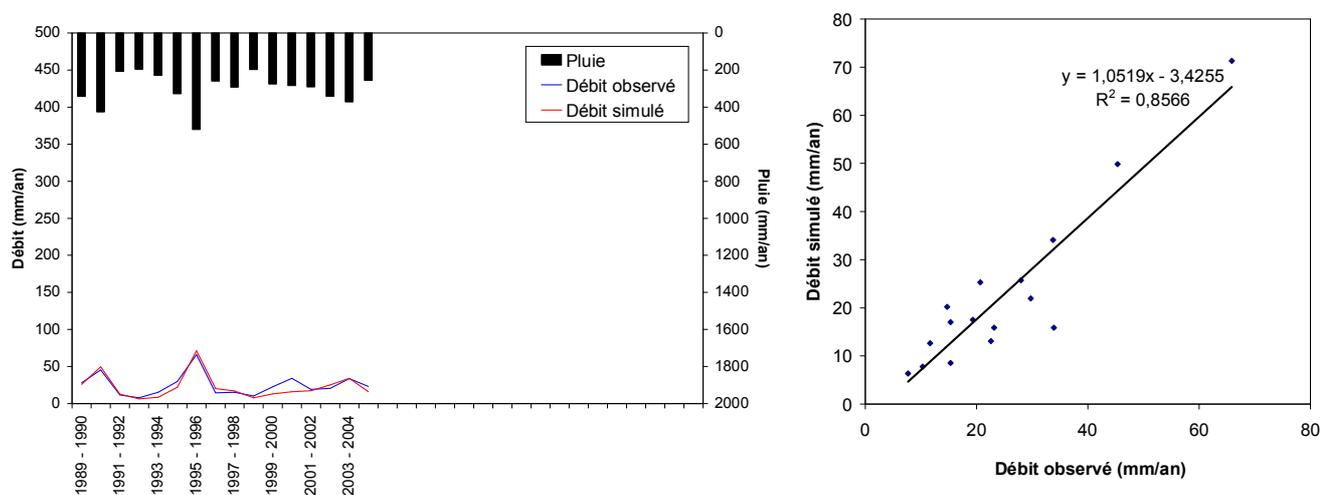


Fig. 73: Résultat obtenu par le calage du modèle GR1A pour le bassin versant de l'Oued Saida avec l'ETP de Turc (1989/1990-2004/2005)

1.2. Validation du modèle

La validation porte sur l'application des modèles sur une série de données qui n'ont pas été utilisées lors du calage, elle est relative à la période (2005/06-2011/12).

Le tableau 70, donne les variations du coefficient de corrélation Q simulé et Q observé relatives à la période de validation avec l'utilisation des deux méthodes (Turc et Thornthwaite) pour l'évapotranspiration.

Tableau 70: Variations des coefficients de corrélation de la validation du modèle GR1A

Bassin	Coefficient de corrélation (R ²)	
	ETP (Thornthwaite)	ETP (Turc)
Saida	0,79	0,78
Sidi Boubekeur	0,89	0,80
BV de l'Oued Saida	0,86	0,77

A partir des résultats obtenus (Tab. 70), nous remarquons que la validation du modèle GR1A, obtenue par l'utilisation des ETP de Turc et Thornthwaite donne des coefficients de corrélation $R^2 > 0,7$ qui indiquent que les modèles sont bien calés.

Selon ces coefficients de corrélation qui sont obtenus à partir des débits simulés en fonction des débits observés (figures 74, 75 et 76), nous constatons que la modélisation pluie-débit élaborée par l'utilisation de GR1A, donne des résultats très acceptables.

Nous avons jugé utile de représenter la répartition des points selon la droite $y=x$ pour mieux apprécier la qualité des résultats de la validation.

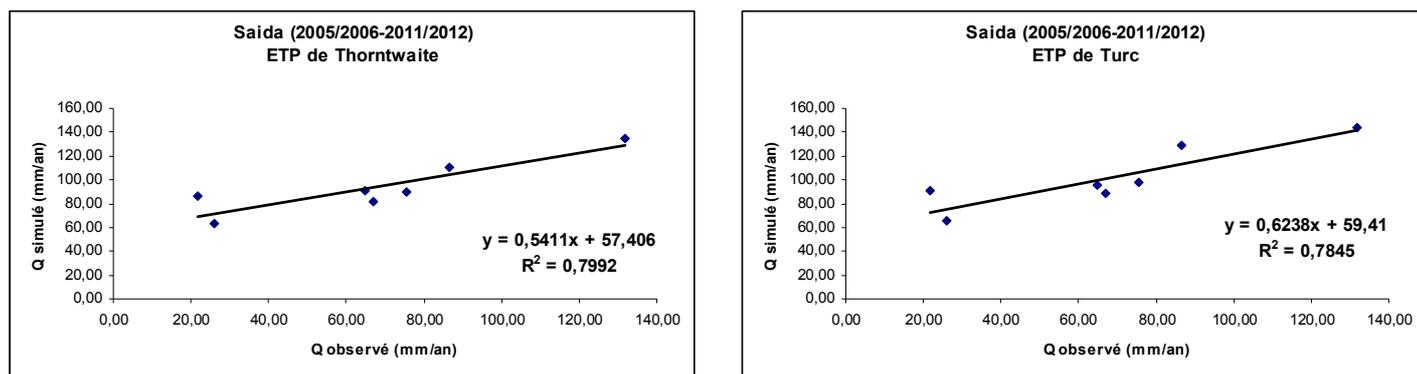


Fig. 74: Validation du modèle GR1A pour le sous bassin de Saida selon l'ETP de Turc et Thornthwaite (2005/2006-2011/2012)

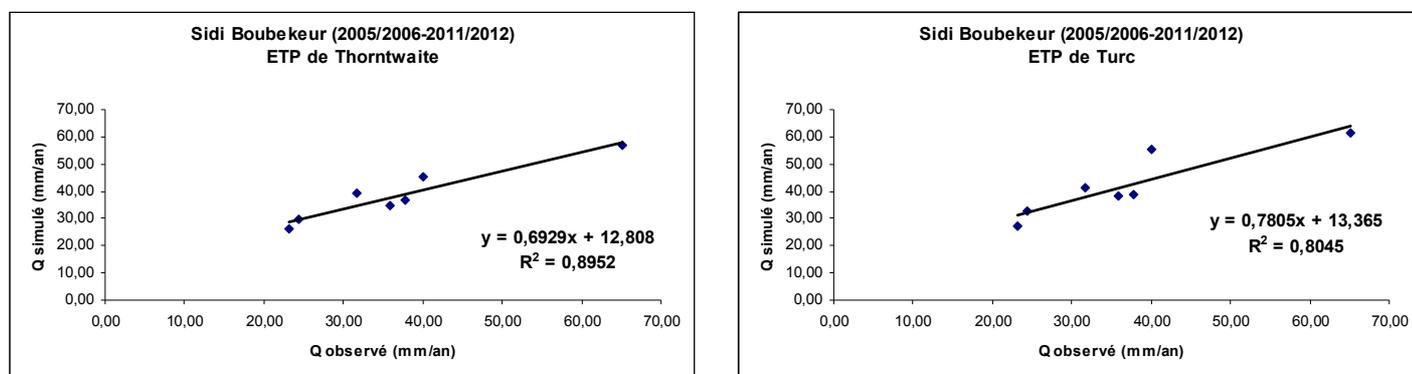


Fig. 75: Validation du modèle GR1A pour le sous bassin de Sidi Boubekeur selon l'ETP de Turc et Thornthwaite (2005/2006-2011/2012)

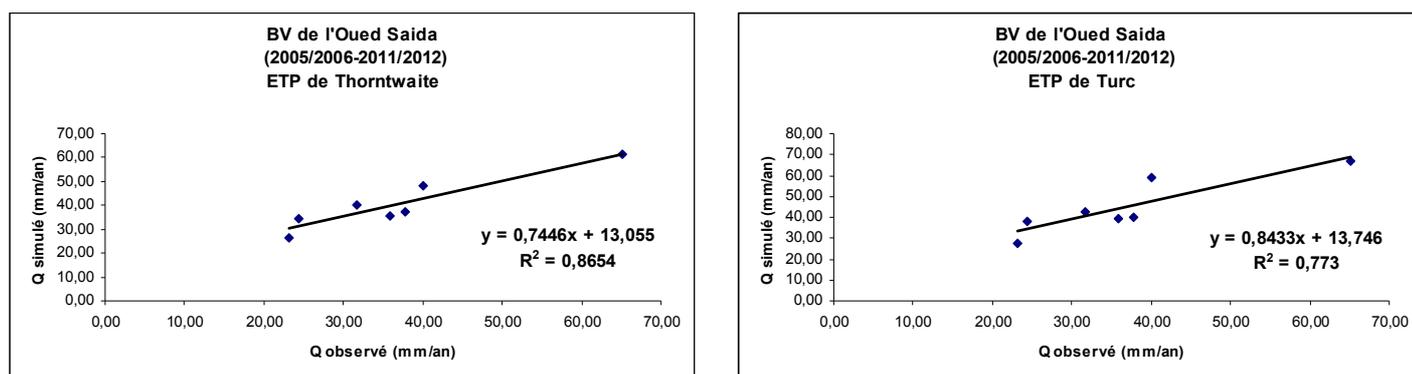


Fig. 76: Validation du modèle GR1A pour le bassin versant de l'Oued Saida selon l'ETP de Turc et Thornthwaite (2005/2006-2011/2012)

A partir des figures ci-dessus, nous constatons que les points ne s'alignent pas tous sur la droite $y = x$ toutefois la répartition globale des points paraît acceptable.

2. Modèle mensuel (GR2M)

Le modèle GR2M est un modèle pluie-débit mensuel qui présente deux paramètres à caler. Pour prédire le débit mensuel simulé nous avons utilisé les pluies et les débits exprimés en lames d'eau écoulées mensuelles en mm relatives à la période allant de Septembre 1993 à Août 2001 mesurés au niveau des stations pluviométriques et hydrométriques de Saida et Sidi Boubekeur (Tab. 71, 72 et 73 en annexe).

De la même manière que GR1A, nous avons testé l'évapotranspiration (mensuelle) calculée par les méthodes de Turc et de Thornthwaite.

2.1. Calage du modèle GR2M

Dans ce cas nous avons cherché à caler les deux paramètres X1 et X2 du modèle jusqu'à l'obtention des valeurs optimum des coefficients de détermination et du critère de Nash. La période choisie pour le calage est celle comprise entre Septembre 1993 à Août 2001.

Après plusieurs manipulations sur le logiciel GR2M, et pour trouver la meilleure simulation nous avons procédé d'entrer les valeurs des précipitations et des débits mensuelles de chaque sous bassin, ainsi que la totalité du bassin (la moyenne de P mensuelles sur le bassin avec le débit à l'exutoire) Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 74. Le calage du Modèle GR2M a été relativement plus difficile par rapport au GR1A.

Tableau 74 : Résultat du calage du modèle GR2M

Données annuelles	ETP (Thornthwaite)					ETP (Turc)				
	X1	X2	Nash	Bilan	Coeff. de corr. (R ²)	X1	X2	Nash	Bilan	Coeff. de corr. (R ²)
Saida (P Saida-Q Saida)	148,41	0,87	78,5	72,0	0,66	244,69	1,00	70,0	60,0	0,73
Sidi Boubekeur (P SB-Q SB)	148,41	0,60	30,1	47,2	0,35	148,41	0,84	37,3	69,2	0,36
BV de l'Oued Saida (P moy - Q SB)	148,41	0,57	34,4	55,4	0,39	148,41	0,71	33,8	56,1	0,38

D'après les valeurs du critère de Nash et les coefficients de détermination, ainsi que la superposition des courbes des lames d'eaux écoulées calculés et simulés (Tableau 74 et les figures 77-82), le calage paraît correct juste pour le sous bassin de Saida, par ailleurs l'évapotranspiration résultant de la formule de Turc donne un meilleur résultat que celle de Thornthwaite.

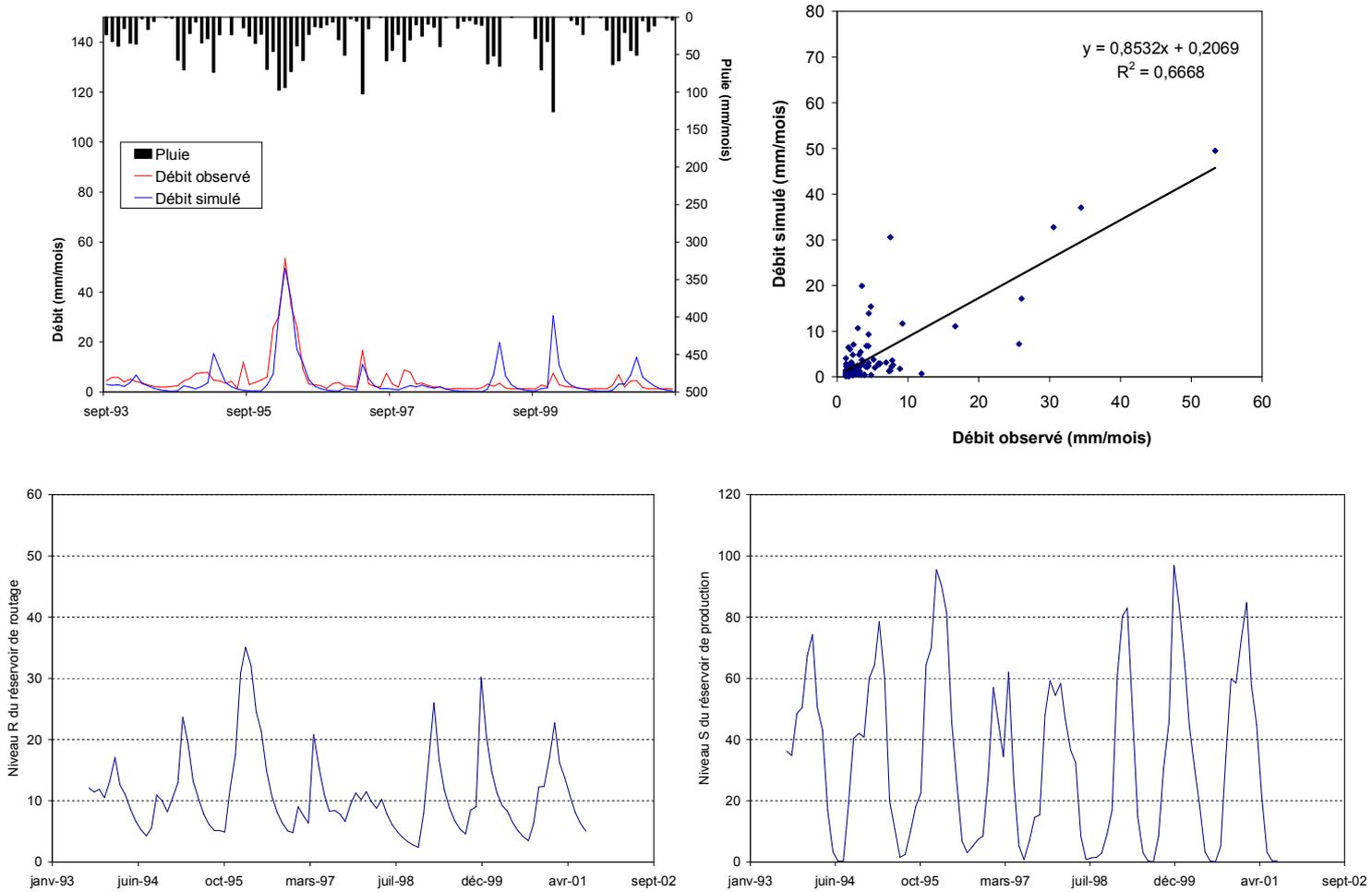


Fig. 77: Calage du modèle GR2M avec l'ETP de Thornthwaite pour le sous bassin de Saida (09/1993-08/2001)

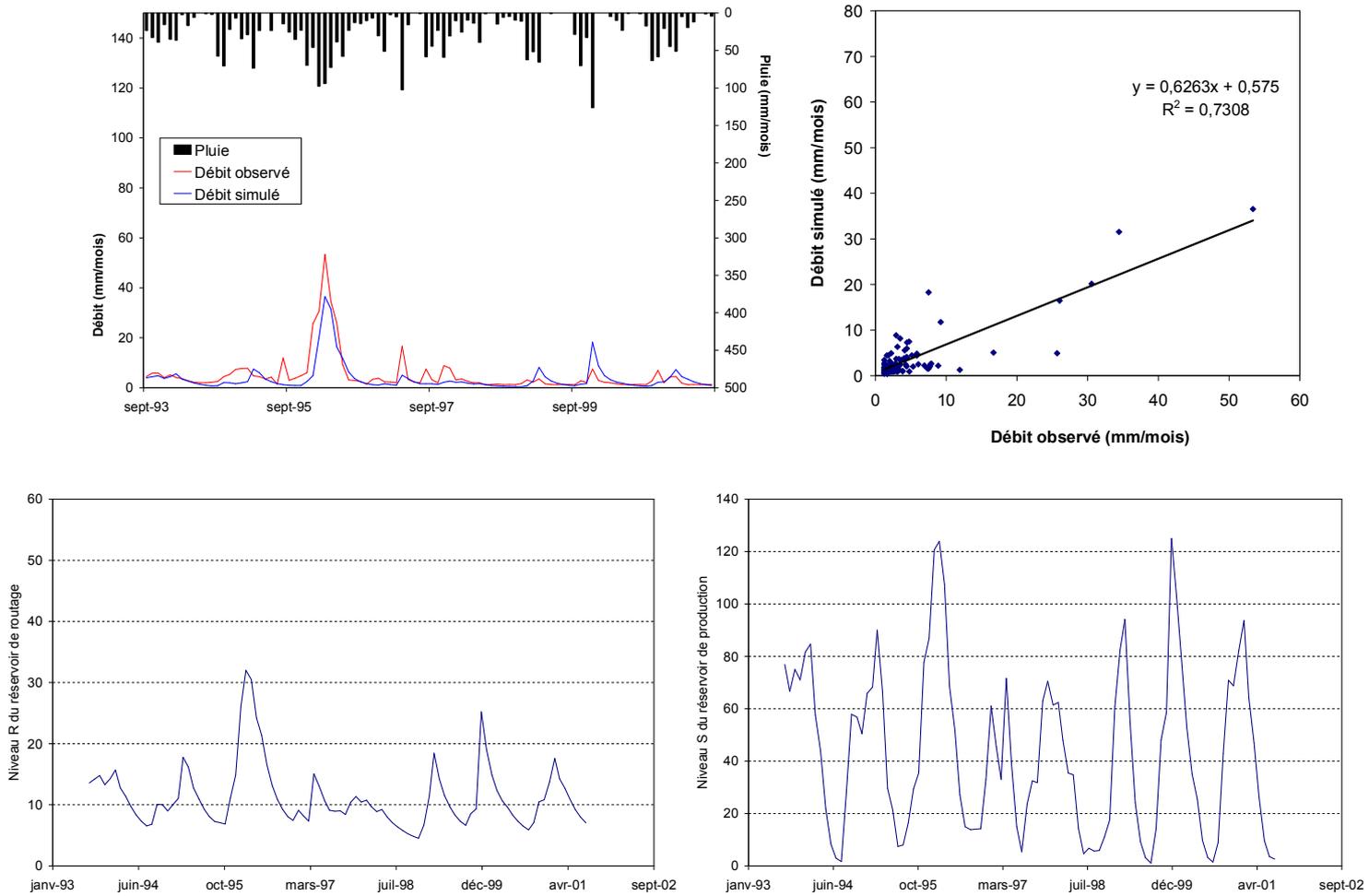


Fig. 78: Calage du modèle GR2M avec l'ETP de Turc pour le sous bassin de Saida (09/1993-08/2001)

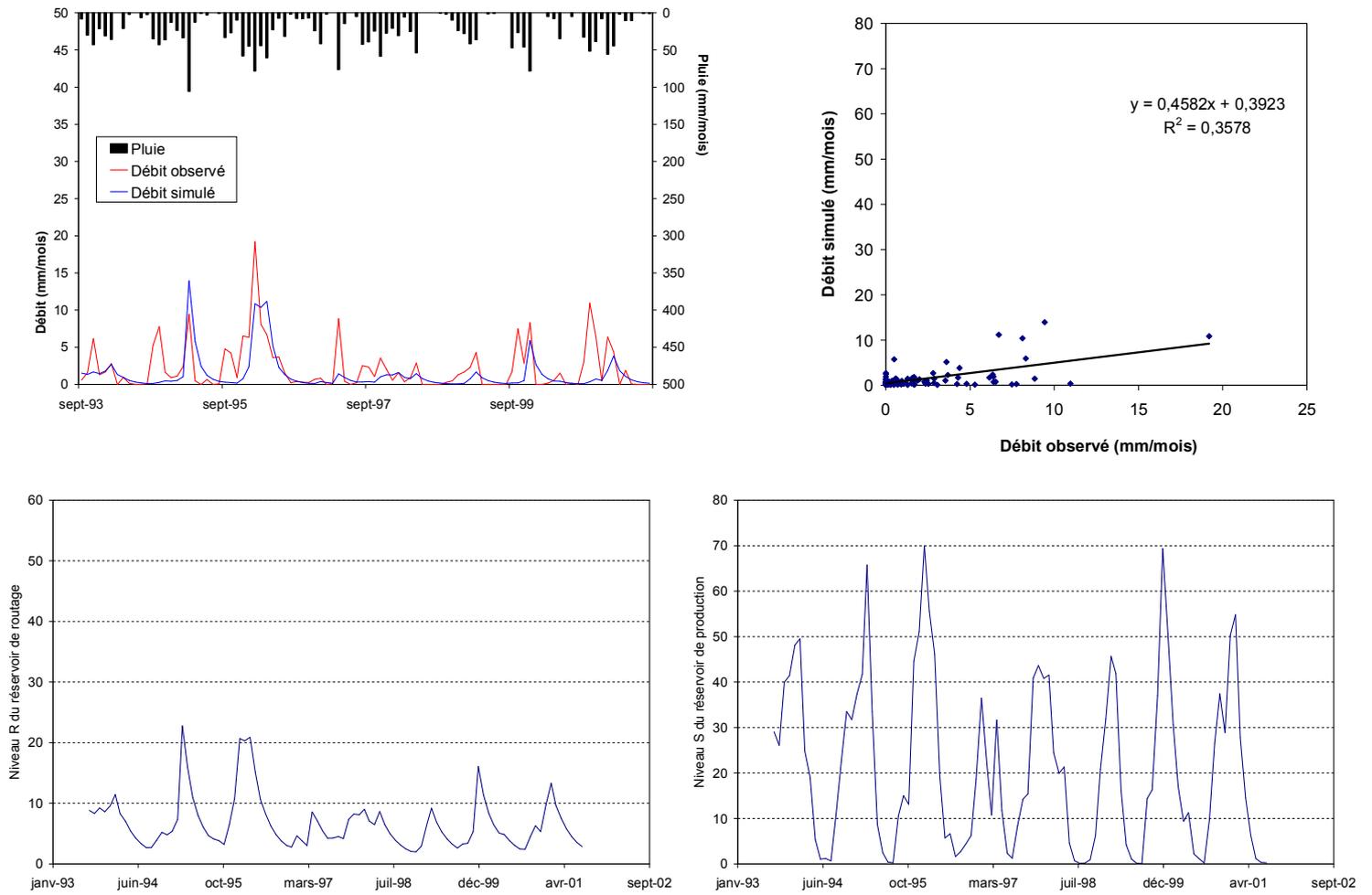


Fig. 79: Calage du modèle GR2M avec l'ETP de Turc pour le sous bassin de Sidi Boubekeur (09/1993-08/2001)

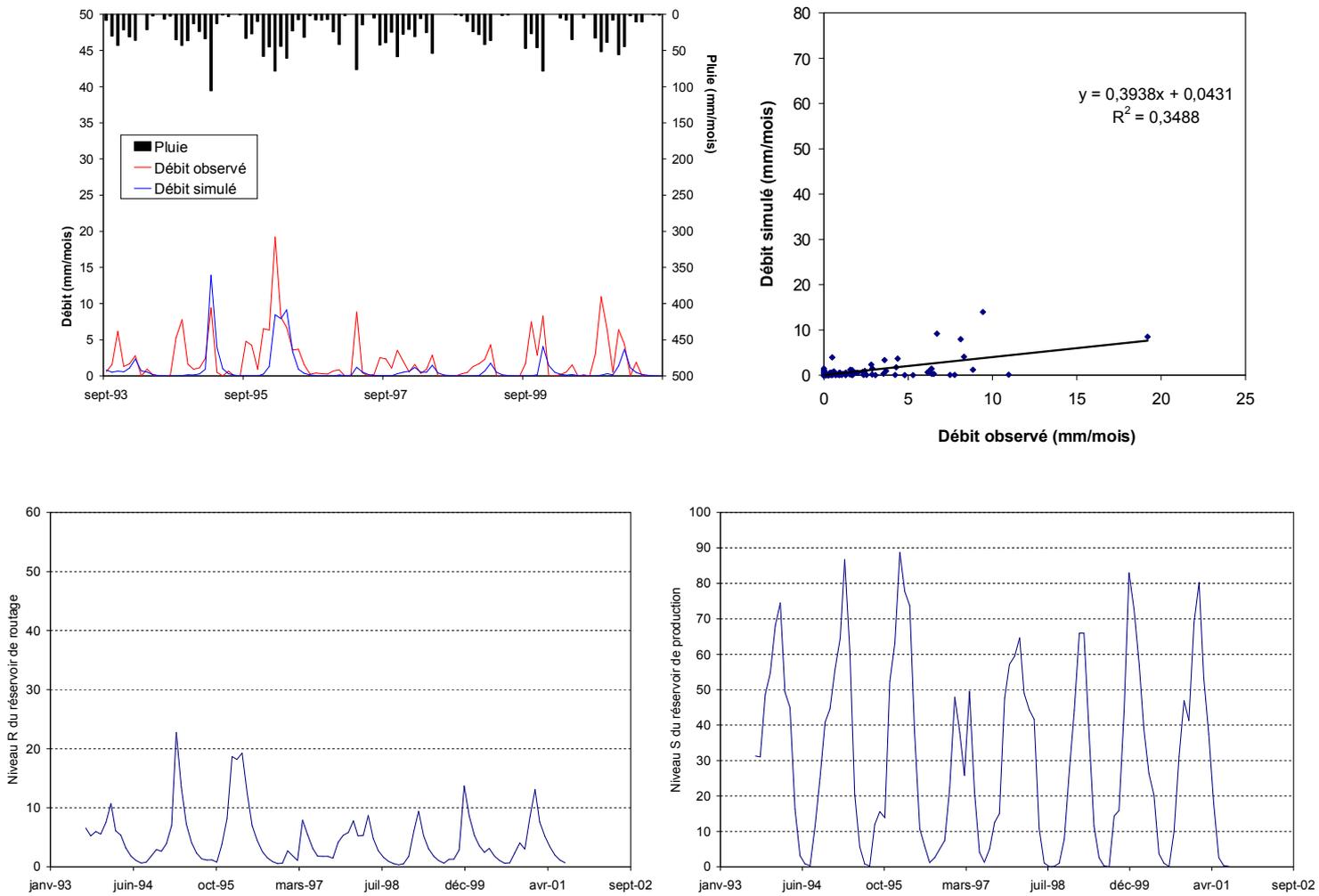


Fig. 80: Calage du modèle GR2M avec l'ETP de Thornthwaite pour le sous bassin de Sidi Boubekeur (09/1993-08/2001)

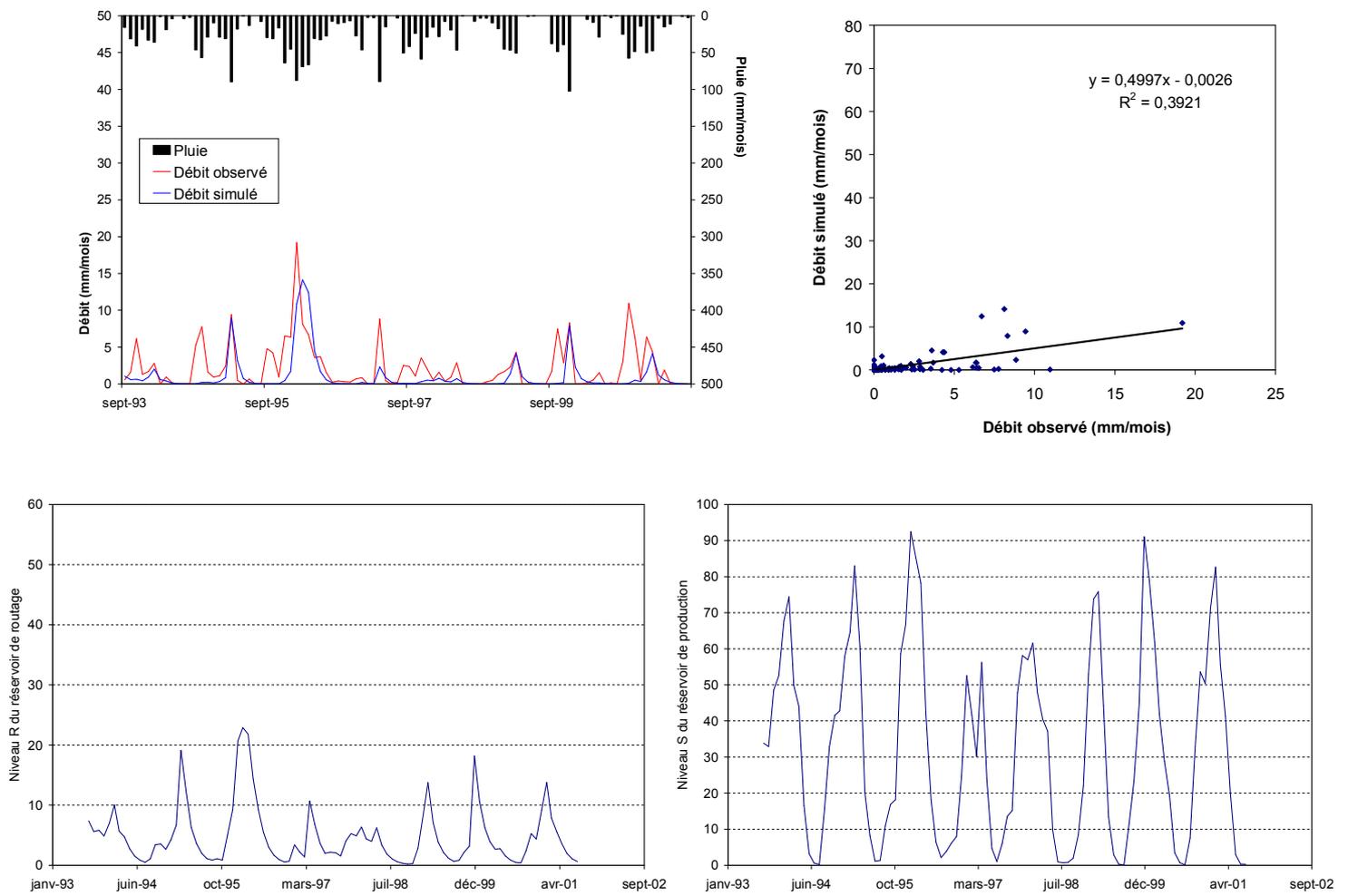


Fig. 81: Calage du modèle GR2M avec l'ETP de Thornthwaite pour le bassin versant d'Oued Saida (09/1993-08/2001)

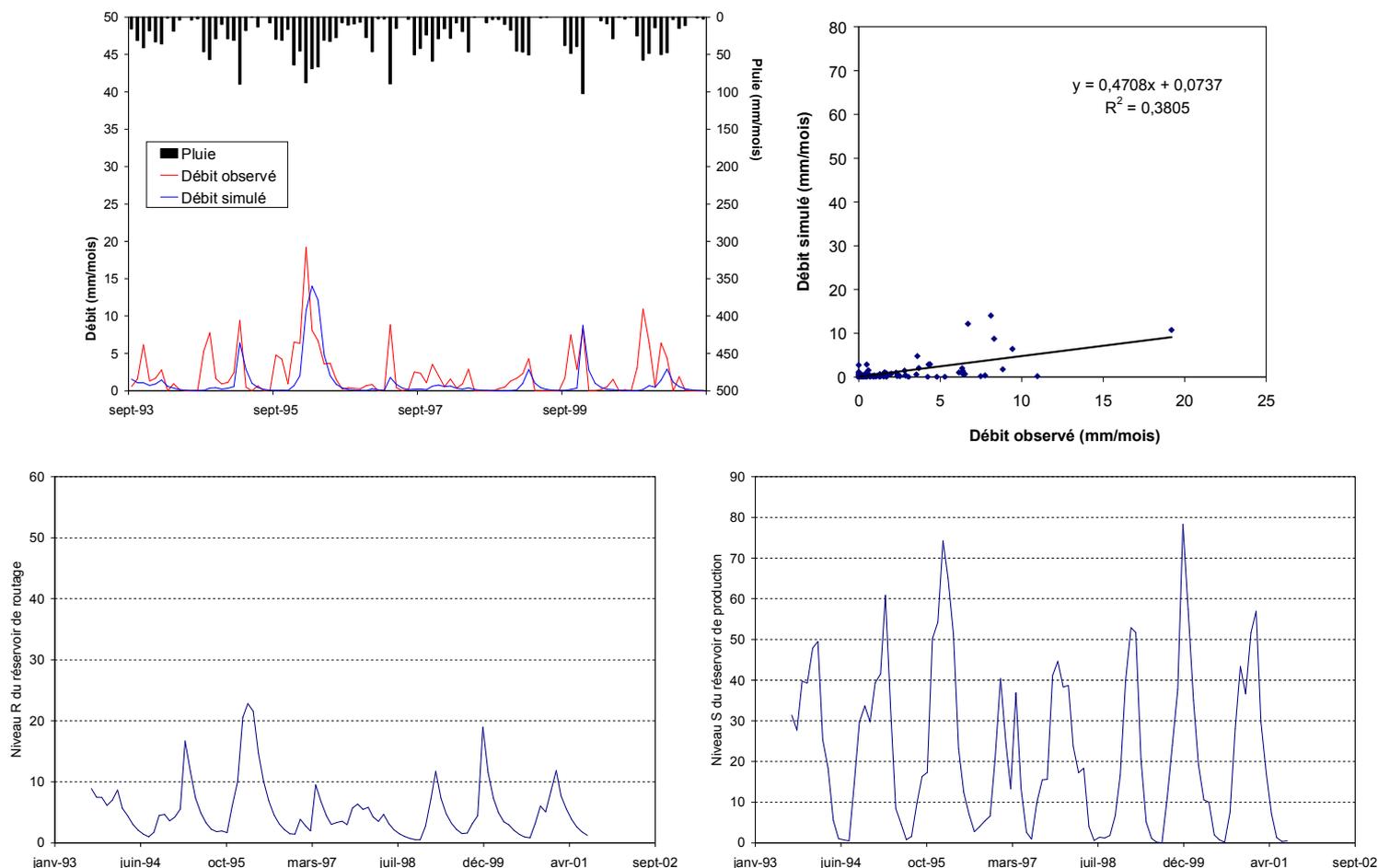


Fig. 82: Calage du modèle GR2M avec l'ETP de Turc pour le bassin versant d'Oued Saida (09/1993-08/2001)

Selon les graphes de l'évolution du taux de remplissage du réservoir de production (S) (Fig. 77-82 et tableau 75), nous pouvons dire qu'il y a une variation très importante plus remarquable dans l'amont (SBV de Saida) que l'aval du bassin de l'Oued Saida (SBV de Sidi Boubekeur) ce qui se traduit par l'importance des pertes par infiltration au niveau du réseau de failles caractérisant surtout la partie amont de l'Oued Saida qui fait retarder la réponse au niveau de la station hydrométrique.

Ainsi l'évolution du taux de remplissage du réservoir de routage (Fig. 77-82) peut expliquer un échange avec les formations adjacentes.

Alors la réponse des pluies est plus lente due aux formations karstiques (caractérisant la partie amont) qui retardent leur arrivée et les pertes en profondeur.

Tableau 75: Valeurs des paramètres après calibration et performance du modèle

Bassin versant	ETP (Thornthwaite)		ETP (Turc)	
	S	R	S	R
Saida	0,05 - 96,87	2,41 - 35,10	1,10 - 125,00	4,53 - 31,99
Sidi Boubekeur	0,04 - 88,74	0,35 - 22,77	0,03 - 69,97	2,01 - 22,77
BV de l'Oued Saida	0,05 - 92,47	0,27 - 22,90	0,03 - 78,29	0,53 - 22,83

S : le niveau du réservoir de production

R: le niveau du réservoir de routage

2.2. Validation du modèle GR2M

Pour la validation, nous utilisons des séries des données des précipitations et d'évapotranspirations correspondant à la période de Septembre 2001 à Août 2006 et qui n'ont pas été déjà introduites lors du calage.

Le Tableau 76 montre les variations du coefficient de corrélation par les deux types de données de l'évapotranspiration (Turc et Thornthwaite).

Tableau 76 : Les variations de coefficients de corrélation de la validation du modèle GR2M

Bassin	Coefficient de corrélation (R ²)	
	ETP (Thornthwaite)	ETP (Turc)
SBV de Saida	0,34	0,33
SBV de Sidi Boubekeur	0,1	0,09
BV de l'Oued Saida	0,17	0,14

Selon le coefficient de corrélation de la fonction débit observé et débit simulé (Tab. 76), la modélisation pluie-débit réalisée par l'utilisation du GR2M donne de faible résultat.

C'est pour cela que nous jugeons utile de représenter la répartition des points selon la droite $y = x$ pour mieux apprécier la qualité de la validation.

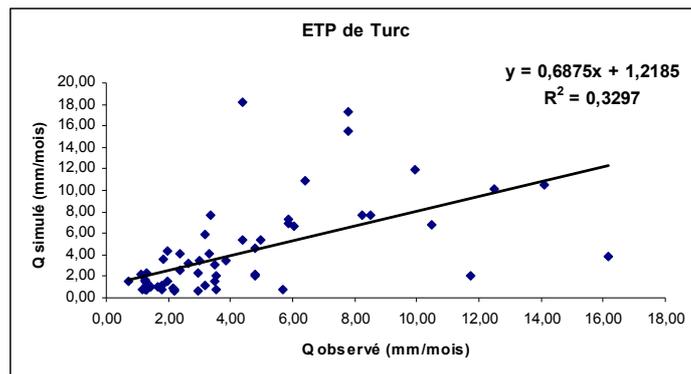
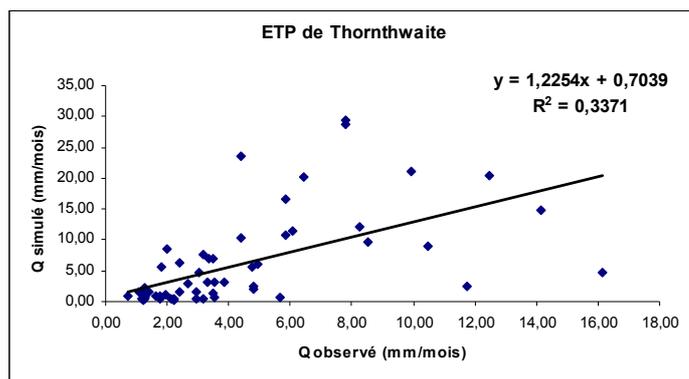


Fig. 83: Validation du modèle GR2M pour le sous bassin de Saida selon l'ETP de Turc et Thornthwaite (09/2001-08/2006)

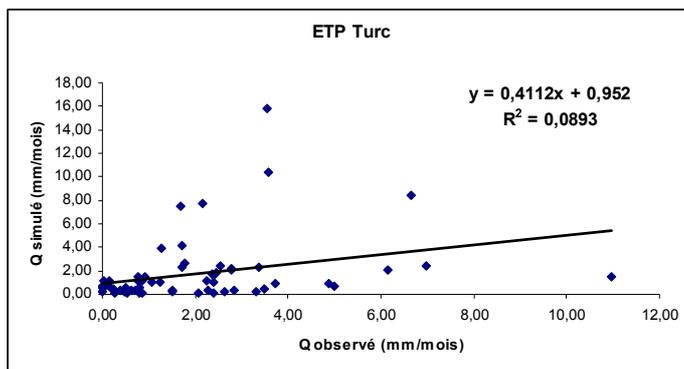
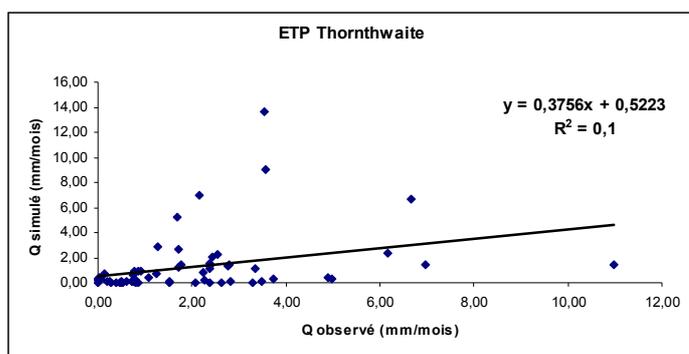


Fig. 84: Validation du modèle GR2M pour le sous bassin de Sidi Boubekeur selon l'ETP de Turc et Thornthwaite (09/2001-08/2006)

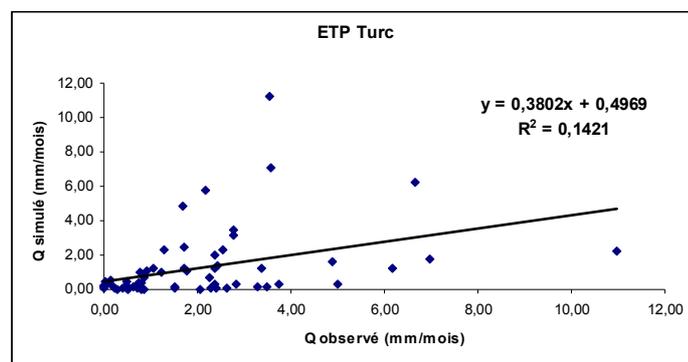
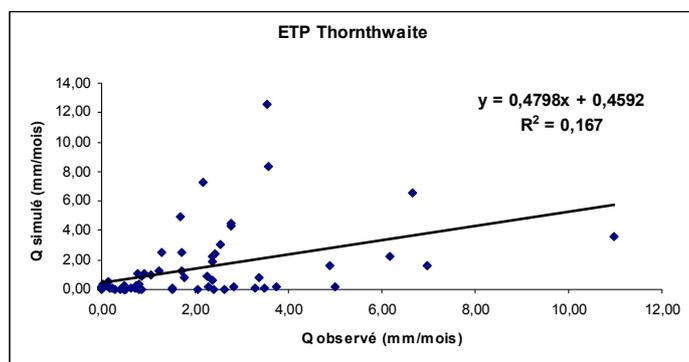


Fig. 85: Validation du modèle GR2M pour le bassin versant d'Oued Saida selon l'ETP de Turc et Thornthwaite (09/2001-08/2006)

Les valeurs des débits simulés issues de la validation sont assez loin de ceux mesurés ceci est bien indiqué par la répartition des points par rapport à la droite $y=x$ (fig. 83, 84 et 85) par conséquent la validation n'est pas acceptable. Le modèle GR2M ne peut pas être bien appelé à cause de l'incompatibilité des données mesurées des débits et celles des précipitations ou la non intégrité du modèle GR2M sur notre bassin.

3. Conclusion

La modélisation pluie-débit à l'aide du logiciel GR donne des résultats plus performants et représentatifs que celle par approche corrélatrice.

Les résultats de la validation entre débits observés et débits simulés sont bons, ils varient en fonction du pas de temps utilisé. Pour le modèle annuel, le coefficient de corrélation est significatif, il est de 0,79 et 0,90. A l'échelle mensuelle, les coefficients de corrélation sont faibles, ceci peut s'expliquer par l'irrégularité des précipitations au cours des mois et surtout de l'état du sol et des conditions géologiques (saturation et occupation).

Le modèle annuel paraît être le modèle le mieux adapté et le plus performant pour notre étude.

CONCLUSION GENERALE

Le bassin versant de l'Oued Saida qui appartient au grand bassin versant de la Macta, présente une superficie de 644 km² pour un périmètre de 164,5 km.

L'étude morphométrique a montré que le bassin versant de l'oued Saida est de type modérément allongé. Cette valeur a une influence sur le temps de concentration. Selon l'indice de pente globale, le bassin versant se caractérise par un relief assez fort. La topographie est marquée par une altitude maximale de 1216 m et une altitude minimale de 433 m ce qui génère un ruissellement important.

La zone d'étude est formée de trois types de formations lithologiques attribuées au Jurassique il s'agit :

- Des dolomies et calcaires du Dogger (Aalénien-Bajocien) localisés essentiellement en rive droite de l'Oued Saïda. Ces faciès favorisent l'infiltration de surface par rapport à l'écoulement des eaux là où ils sont karstifiés et fracturés.
- Des argiles, des marnes, des grès calcaires et des calcaires attribués au Dogger-Malm (Callovien-Oxfordien), localisés en rive gauche et droite de l'Oued Saïda. Ces formations faiblement perméables favorisent l'écoulement des eaux superficielles par rapport à leur infiltration. Ces faciès auront un comportement différent des dolomies et calcaires et seront plus sensibles aux phénomènes d'érosion et de transport en suspension.
- Des grès carbonatés, dolomies gréseuses, dolomies, grès quartzeux et calcaires du Malm (Kimméridgien), qui favorisent également l'infiltration de surface plutôt que l'écoulement là où les karsts sont bien développés.

Hydrogéologiquement, la région des Monts de Saida est caractérisée par la présence de deux types de nappes, une nappe superficielle localisée exclusivement dans la vallée de l'Oued Saida, et une autre, plus importante et plus intéressante située dans les sédiments carbonatés du Jurassique inférieur et moyen (formation des carbonates de Nador : l'Aaléno-Bathonien). Cette nappe comportant une partie captive dans la vallée de Saida et une autre libre dans le reste du réservoir est très influencée par le phénomène de fissuration et de karstification.

De part sa forme allongée du Nord au Sud et sa position géographique dans les Hauts Plateaux, le bassin versant de l'Oued Saïda jouit d'un climat semi-aride. La pluviométrie est irrégulière, caractérisée par des périodes hivernales pluvieuses et des périodes estivales sèches.

La diminution de la pluviométrie associée à l'accroissement considérable de la température durant les deux dernières décennies a influencé le régime des écoulements (A. KHALDI, 2005).

Le régime des oueds est très irrégulier durant l'année, les débits commencent à augmenter à partir du mois de Septembre.

Les variations mensuelles des débits varient de l'amont vers l'aval, en effet plus on se dirige vers l'aval du bassin de Saida plus les débits mensuelles augmentent

Les corrélations débits/débits sont bonnes, c'est-à-dire une importante liaison hydrologique entre les oueds.

Les corrélations débits/pluies montrent la liaison saisonnière et annuelle étroite entre les précipitations et les régimes des oueds, avec un décalage dans le temps, qui constitue le temps de réponse.

Les débits annuels des oueds sont bien ajustés à des lois de type polynomial ou exponentiel.

En ce qui concerne la Modélisation par corrélation entre les pluies et lames d'eau écoulées au pas de temps annuel, l'ajustement du nuage de points, a montré qu'il existe une meilleure corrélation entre la pluie annuelle et la lame d'eau écoulée annuelle par rapport aux pas de temps mensuels. Toutefois ces corrélations restent non significatives et ne peuvent être utilisées comme modèle de prévision ou de prédiction des écoulements pour l'Oued de Saida.

A cet effet, nous avons opté dans cette étude pour le modèle hydrologique GR, comportant peu de paramètres et pouvant rendre compte du comportement hydrologique de notre bassin.

Ce modèle est de type globale, dont les paramètres d'entrées sont les précipitations, d'ETP (calculée par deux méthodes différentes celles de Turc et celle de Thornthwaite) ainsi que la superficie du bassin versant et le paramètre de sortie est constitué par les lames d'eau écoulées.

Conclusion générale

La modélisation pluie-débit à l'aide du logiciel GR donne des résultats plus performants et représentatifs que celle par approche corrélatoire.

Les résultats de la validation entre débits observés et débits simulés sont bons, ils varient en fonction du pas de temps utilisé. Pour le modèle annuel, le coefficient de corrélation est significatif, il est de 0,79 et 0,90 . A l'échelle mensuel, les coefficients de corrélation sont faibles, ceci peut s'expliquer par l'irrégularité des précipitations au cours des mois et surtout de l'état du sol et des conditions géologiques (saturation et occupation).

Ce modeste travail représente un premier essai d'utilisation du modèle globale GR qui n'a pas donné de bons résultats pour notre bassin. Il serait alors souhaitable de tester d'autres modèles qui existent dans la littérature sur la modélisation hydrologique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A.B.H. Agence de Bassin Hydrographique. Les cahiers de l'Agence.

AFFOUN S. (2006). Ressources en eaux, mobilisation et utilisation dans le bassin versant de la mafragh. Mémoire de Magister, université Mentouri de Constantine, 200p.

AMBROISE B., (1998). La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant – Processus, Facteurs, Modèles. H.G.A (Ed) Bucarest, 200p.

ANCTIL F., PERRIN C., ANDREASSIAN V., (2004). Impact of the length of observed records on the performance of ANN and of conceptual parsimonious rainfall-runoff forecasting models. *Environmental modeling & Software*, vol 19, n°4, 357-368.

A.N.R.H. (2001). Agence Nationale des Ressources Hydrauliques .Inventaire des points d'eau.

BENCHERKI A. (2008). Réalisation d'une carte de vulnérabilité des nappes Phréatiques de la région de Saida, en Algérie, avec l'aide des Systèmes d'information géographique. Thèse de Maitrise en études de l'environnement (MEE), Université de Moncton. 84 p.

BENKACI ALI, T. (2001). Contribution à la modélisation de la relation pluie-débit au pas de temps mensuel et journalier par les modèles conceptuels et les réseaux de neurones. Thèse de Magister, Institut National Agronomique d'Alger.

BENTABET A. (2008). Apport des méthodes hydrochimiques dans la caractérisation du fonctionnement hydrodynamique des aquifères des Monts de Saida. Thèse de Magister, CUM de Mascara. 122p.

BENYAMINA B. (2012). Approche hydrogéologique et cartographique de la nappe karstique des monts de Saida. Thèse de Magister, Université de Mascara 131 p.

BEVEN KJ., KIRKBY MJ. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Science Bulletin*, 24(1), 43-69.

BNEDER. (2005). Bureau National d'Etude pour le Développement Rural, Direction des services Agricoles (Programme de mise en valeur des terres par le biais de la Concession). Etude de mise en valeur des terres (Périmètre de la Wilaya de Saida), Rapport préliminaire.

BOUABDALLAH F. (1997). Mise au point d'un modèle de transformation pluie-débit au pas de temps annuel. Rapport de DEA, DEA Hydrogéologie-Hydrologie filière Géochimie isotopique, Paris Sud Orsay, Cemagref Antony, 45 p.

Références bibliographiques

BOUASSRIA S.(1998). Contribution à la cartographie du système aquifère karstique des Mons de Saida. Thèse de magister, CUM de Mascara.

BOX GEP, JENKINS GM, (1976). Time series analysis – forecasting and control. Holden Day (Ed), Oakland, California, 575 p.

BURTON J. (2001). La gestion intégrée des ressources en eau par bassin. Manuel de formation, Institut de l’Energie et de l’Environnement de la Francophonie. I.E.P.F.

Clair A.(1952) Etude hydrogéologique des monts de Saida. Rapport de synthèse, Agence Nationale des Ressources en Eau, Alger.

Clarke R.T. (1973). Review of some mathematical models used in hydrology, with the observations on their calibration and used. Journal of Hydrology 19, pp 1-20.

Cormary Y., Guilbot A. (1973). Etude des relations pluie-débit sur trois bassins versants d’investigation. Proceedings of the IAHS Madrid Symposium, IAHS Publ. 108, 265-279.

CTS. Centre des Techniques Spatiales.

DEVRED D. (1989). Etude pluviométrique du bassin de la Sambre. Etude hydrologique du sous-bassin de la Solre. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Techniques de Lille - Flandre – Artois, 382 p.

DJIDI K. (2015). Contribution à l’étude de l’aquifère karstique de Saida. Thèse de Doctorat, Université d’Oran 2, 282 p.

DHW. (1992). La Direction de l’Hydraulique de la Wilaya de Saida (inventaire des points d’eau).

EDIJATNO (1987). Amélioration des modèles simples de transformation pluie-débit au pas de temps journalier sur des petits bassins versants. Mémoire de DEA, Université Louis Pasteur (Strasbourg), Cemagref (Antony).

EDIJATNO (1991). Mise au point d’un modèle élémentaire pluie-debit au pas de temps journalier (Elaboration of a simple daily rainfall-runoff model). Ph.D. dissertation, Louis Pasteur University (Strasbourg)/Cemagref (Antony), France, 625p.

EDIJATNO. , MICHEL C. (1989). Un modèle pluie-débit à trois paramètres. La Houille Blanche, n°2, 113-121.

Références bibliographiques

EDIJATNO., NASCIMENTO N.O., YANG X., MAKHLOUF Z. ET MICHEL C. (1999). GR3J: a daily watershed model with three free parameters. Hydrological Sciences Journal, 44(2), 263-278.

ELMI S, BENEST M. (1978). Les “ Argiles de Saïda ” faciès flyshoïde du Callovo-Oxfordien du sillon tlemcenien (Ouest algérien). Stratonomie, environnements, interprétation et évolution paléogéographique. Livre Jubilaire J. Flandrin, Lyon. pp, 203-242.

EL MORJANI Z. (2002). Conception d'un système d'information à référence spatiale pour la gestion environnementale ; application à la sélection de sites potentiels de stockage de déchets ménagers et industriels en région semi-aride (Souss, Maroc). Thèse de doctorat, université de Genève, Terre et Environnement, Vol. 42. 300 p.

FOUCHIER C. (2010). Développement d'une méthodologie pour la connaissance régionale des crues. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc. Aix en provence, 266 p.

GAUMME E. (2000). Hydrologie : cycle de l'eau et modélisation pluie-débit. Cours ENPC.

KABOUYA M. (1990). Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale. Thèse de Doctorat, Université Paris Sud Orsay, 347 p.

KABOUYA M., MICHEL C. 1991 : Estimation des ressources en eau superficielle aux pas de temps mensuel et annuel, application à un pays semi-aride. Revue des Sciences de l'Eau, n° 4(4).

KEBIR .L.W. (2009). Atelier scientifique et technique à Alger sur l'outil spatial au service du développement, Article « Prospection hydrogéologique dans le bassin de Tindouf, par utilisation des données optiques et Radars (Cas du bassin versant de l'oued El Ma) » 41 p.

KHALDI A. (2005). Impact de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien, Monts de Tlemcen-Saida. Thèse de doctorat d'état. Université d'ORAN, 239 p.

LOUMAGNE C. (1988). Prise en compte d'un indice de l'état hydrique du sol dans la modélisation pluie-débit. Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud (Orsay), Cemagref (Antony), 200 p.

Références bibliographiques

MANGIN. A. (1975). Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. 3ème partie. Constitution et fonctionnement des aquifères karstiques, Annales de Spéléologie, 30 (1) 21-124.

MAKHLOUF Z. (1994). Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de Doctorat. Université de Paris XI Orsay / Cemagref (Antony), 228 pp.

MAKHLOUF Z., MICHEL C. (1994). A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. Journal of Hydrology, 162, 299-318.

MICHEL C. (1983). Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre. La Houille Blanche, 1, 39-44.

MOUELHI S. (2003). Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, ENGREF, Cemagref Antony, France, 323 p.

MOUELHI S., MICHEL C., PERRIN C. et ANDRÉASSIAN V. (2006a) Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. J. Hydrol. 318(1-4), 200-214, doi :10-1016/j.

MOUELHI S., MICHEL C., PERRIN C., ANDREASSIAN V. (2006b) Linking stream flow to rainfall at the annual time step: the Manabe bucket model revisited. J. Hydrol. 328, 283-296, doi:10.1016/j.jhydrol.2005.12.022.

NASCIMENTO NO. (1991). Adaptation d'un modèle conceptuel journalier (GR3J) aux bassins versants de cours d'eau intermittents. Mémoire de DEA, ENPC, ENGREF, Université Paris Val de Marne, 89p.

NASCIMENTO NO. (1995). Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'actions anthropiques sur la relation pluie-debit à l'échelle du bassin versant. Thèse de Doctorat, CERGRENE / ENPC, Paris, France, 550 p.

ONM. Office National de Météorologie.

LOUDIN L. (2004). Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. Thèse de Doctorat, Cemagref. Ecole Nationale du Génie Rural, des eaux et des forêts, centre de Paris, 495 p.

PERRIN C. 2000 : Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat, INPG (Grenoble) / Cemagref (Antony), 530 p.

Références bibliographiques

PERRIN C., MICHEL C., ANDREASSIAN V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology* 279(1-4), 275-289.

PITAUD G. (1973). étude hydrogéologique pour la mise en valeur de la vallée de l'oued Saïda (rapport de synthèse).

RIFAAT S. (1980) Comparaison de plusieurs techniques de reconstitution de débits moyens mensuels, Rapport de stage, 66 pp, EPFL (Lausanne), Cemagref (Antony).

SALEY M. B. (2003). Système d'informations hydrogéologiques à référence spatiale, discontinuités pseudo-images et cartographies thématiques des ressources en eau de la région semimontagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse Université de Cocody, 211p.

SAVANE I. (1997). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Apports de la télédétection et d'un Système d'Information Hydrogéologique à Référence Spatiale (S.I.H.R.S.). Thèse Université d'Abidjan, 386 p.

YLES F. (2014). Hydrologie et transport solide dans le bassin versant de l'Oued Saïda : Modélisation pluie-débit et débit liquide – transport solide; Thèse doctorat d'Etat, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen 150 p,

LISTE DES FIGURES

Figure 1:	Localisation de la wilaya de Saïda	3
Figure 2:	Localisation de la région d'étude (Image LANDSAT, prise en 2012) (Source CTS)	4
Figure 3:	Carte des sous bassins de la Macta (Source ABH)	5
Figure 4:	Rectangle équivalent du bassin versant de l'Oued Saïda	7
Figure 5:	Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued Saïda	8
Figure 6:	Modèle numérique du terrain (M.N.T) du bassin versant de l'Oued Saïda	9
Figure 7:	Classification du chevelu hydrographique du bassin versant de l'Oued Saïda	14
Figure 8:	Droite d'ajustement de R_C et de R_L	16
Figure 9:	Carte d'occupation du sol du bassin versant de l'Oued Saïda	20
Figure 10:	Carte Géologique du bassin versant de l'oued Saïda (d'après la carte géologique de l'Algérie au 1/200 000 établie par l'ANRH, 2008)	23
Figure 11:	Coupe lithostratigraphique de la région de Saïda (d'après Clair, 1952 et Pitaud, 1973)	24
Figure 12:	Carte structurale du bassin versant de l'oued Saïda	28
Figure 13:	Coupe des caractéristiques hydrogéologiques de la région de Saïda (D'après Clair, (1952) et Pitaud, (1973))	33
Figure 14:	Coupe lithostratigraphique de la région de Hammam Rabi (PITAUD G., 1973)	34
Figure 15:	Synthèse hydrogéologique de la nappe karstique des monts de Saïda (DHW)	37
Figure 16:	Carte piézométrique de la zone d'étude (Campagne Février, 1992)	39
Figure 17:	Carte piézométrique de la zone d'étude (Campagne Mars, 2001)	39
Figure 18:	Carte des pentes de la région d'étude	43
Figure 19:	Carte de perméabilité de la région d'étude	44
Figure 20:	Carte de la densité de drainage de la région d'étude	45
Figure 21:	Densité de drainage avec superposition du réseau hydrographique	46
Figure 22:	Carte de la densité de fracturation de la région d'étude	47
Figure 23:	Carte des potentialités des eaux souterraines	49
Figure 24:	Situation des stations pluviométriques	53
Figure 25:	Droite de la régression linéaire des précipitations annuelles Saïda-AinZerga Ferme (1974/1975 – 2011/2012)	55
Figure 26:	Droite de la régression linéaire des précipitations annuelles Saïda-PK 50 (1974/1975 – 2011/2012)	56
Figure 27:	Droite de la régression linéaire des précipitations annuelles Saïda-Sidi Boubekeur (1974/1975 – 2011/2012)	56
Figure 28:	Droite de la régression linéaire des précipitations annuelles Saïda-Ain El Hadjar (1974/1975 – 2011/2012)	56
Figure 29:	Ajustement des précipitations annuelles à une loi normale (station Saïda 1974/1975 – 2011/2012)	59
Figure 30:	Ajustement des précipitations annuelles à une loi normale (station Ain El Hadjar 1974/1975 – 2011/2012)	59
Figure 31:	Ajustement des précipitations annuelles à une loi normale (station Sidi Boubekeur 1974/1975 – 2011/2012)	60
Figure 32:	Ajustement des précipitations annuelles à une loi normale (station PK 50 1974/1975 – 2011/2012)	60
Figure 33:	Ajustement des précipitations annuelles à une loi normale (station Ain Zerga Ferme 1974/1975 – 2011/2012)	60
Figure 34:	Variations des précipitations moyennes annuelles (période 1974/1975 – 2011/2012)	61
Figure 35:	Histogramme des précipitations mensuelles pour la période 1974/75-2005/06 aux stations de Sidi Boubekeur, Ain El Hadjar et de Saïda	62
Figure 36:	Variations saisonnières des précipitations pour la période 1974/75-2005/06 aux stations de Sidi Boubekeur, Ain El Hadjar et de Saïda	63
Figure 37:	Polygone de THEISSEN	64
Figure 38:	Carte en courbes isoyètes du bassin versant de l'oued Saïda	64
Figure 39:	Fréquence des vents (%)	65

Figure 40:	Humidité relative de l'air (%)	66
Figure 41:	Variation des températures moyennes mensuelle à la station de Saida (1983-2012)	67
Figure 42:	Courbe pluvio-thermique de la station de Saida (1983-2012)	68
Figure 43:	Abaque d'indice d'aridité de DE MARTONNE	69
Figure 44:	Abaque de P. VERDEIL	71
Figure 45:	Abaque de WUNDT modifiée par COUTAGNE	72
Figure 46:	Situation des stations hydrométriques sur le bassin versant de l'Oued Saïda	77
Figure 47:	Histogrammes des débits moyens mensuels interannuels	78
Figure 48 :	Variation mensuelle des débits en fonction des précipitations à la station de Saida (1989/1990-2005/2006)	79
Figure 49 :	Variation mensuelle des débits en fonction des précipitations à la station de Sidi Boubekeur (1989/1990-2005/2006)	79
Figure 50 :	Corrélation linéaire entre les pluies moyennes mensuelles et les débits moyens mensuels. Stations : a) Saida, b) Sidi Boubekeur	80
Figure 51:	Courbes des coefficients mensuelles des débits à la station de Saida et Sidi Boubekeur (1989/1990-2011/2012)	82
Figure 52:	Courbes des coefficients de variations mensuelles des débits à la station de Saida et Sidi Boubekeur (1989/1990-2011/2012)	83
Figure 53:	Variation saisonnière des débits moyens mensuels de l'Oued Saïda (1989/1990-2011/2012)	84
Figure 54:	Variations des débits moyens annuels aux deux stations	86
Figure 55:	Corrélation linéaire entre les débits moyens annuels de Sidi Boubekeur et les débits moyens annuels de Saida	87
Figure 56:	Corrélation linéaire entre les pluies moyennes annuelles et les débits moyens annuels des stations étudiées	88
Figure 57:	Evolution du coefficient d'hydraulicité pour les deux stations de l'Oued Saïda	91
Figure 58:	Ajustement des débits moyens annuels à une loi log normale pour les deux stations d'étude	94
Figure 59:	Ajustement des débits journaliers maximums à la station de Saïda	97
Figure 60:	Variation interannuelle des hauteurs des pluies moyennes et des lames d'eau écoulées (Station de Sidi Boubekeur)	98
Figure 61:	Variation interannuelle des hauteurs des pluies moyennes et des lames d'eau écoulées (Station de Saida)	99
Figure 62:	Corrélation Pluie-Lame d'eau écoulee annuel (Station de Saida)	100
Figure 63:	Corrélation Pluie-Lame d'eau écoulee annuel (Station de Sidi Boubekeur)	101
Figure 64:	Les Corrélations entre les lames d'eau écoulées et les pluies mensuelles (Station de Sidi Boubekeur)	102
Figure 65:	Les Corrélations entre les lames d'eau écoulées et les pluies mensuelles (Station de Saida)	103
Figure 66 :	Relation entre les modèles pluie-débit. Gaumme (2000)	109
Figure 67 :	Schéma de la structure du modèle GR2M	116
Figure 68:	Résultat obtenu par le calage du modèle GR1A pour le sous bassin de Saida avec l'ETP de Thornthwaite (1989/1990-2004/2005)	121
Figure 69:	Résultat obtenu par le calage du modèle GR1A pour le sous bassin de Saida avec l'ETP de Turc (1989/1990-2004/2005)	121
Figure 70:	Résultat obtenu par le calage du modèle GR1A pour le sous bassin de Sidi Boubekeur avec l'ETP de Thornthwaite (1989/1990-2004/2005)	122
Figure 71:	Résultat obtenu par le calage du modèle GR1A pour le sous bassin de Sidi Boubekeur avec l'ETP de Turc (1989/1990-2004/2005)	122
Figure 72:	Résultat obtenu par le calage du modèle GR1A pour le bassin versant de l'Oued Saïda avec l'ETP de Thornthwaite (1989/1990-2004/2005)	123
Figure 73:	Résultat obtenu par le calage du modèle GR1A pour le bassin versant de l'Oued Saïda avec l'ETP de Turc (1989/1990-2004/2005)	123
Figure 74:	Validation du modèle GR1A pour le sous bassin de Saida selon l'ETP de Turc et Thornthwaite (2005/2006-2011/2012)	125

<u>Figure 75:</u>	Validation du modèle GR1A pour le sous bassin de Sidi Boubekeur selon l'ETP de Turc et Thornthwaite (2005/2006-2011/2012)	125
<u>Figure 76:</u>	Validation du modèle GR1A pour le bassin versant de l'Oued Saida selon l'ETP de Turc et Thornthwaite (2005/2006-2011/2012)	125
<u>Figure 77:</u>	Calage du modèle GR2M avec l'ETP de Thornthwaite pour le sous bassin de Saida (09/1993-08/2001)	128
<u>Figure 78:</u>	Calage du modèle GR2M avec l'ETP de Turc pour le sous bassin de Saida (09/1993-08/2001)	129
<u>Figure 79:</u>	Calage du modèle GR2M avec l'ETP de Turc pour le sous bassin de Sidi Boubekeur (09/1993-08/2001)	130
<u>Figure 80:</u>	Calage du modèle GR2M avec l'ETP de Thornthwaite pour le sous bassin de Sidi Boubekeur (09/1993-08/2001)	131
<u>Figure 81:</u>	Calage du modèle GR2M avec l'ETP de Thornthwaite pour le bassin versant d'Oued Saida (09/1993-08/2001)	132
<u>Figure 82:</u>	Calage du modèle GR2M avec l'ETP de Turc pour le bassin versant d'Oued Saida (09/1993-08/2001)	133
<u>Figure 83:</u>	Validation du modèle GR2M pour le sous bassin de Saida selon l'ETP de Turc et Thornthwaite (09/2001-08/2006)	135
<u>Figure 84:</u>	Validation du modèle GR2M pour le sous bassin de Sidi Boubekeur selon l'ETP de Turc et Thornthwaite (09/2001-08/2006)	135
<u>Figure 85:</u>	Validation du modèle GR2M pour le bassin versant de l'Oued Saida selon l'ETP de Turc et Thornthwaite (09/2001-08/2006)	135

LISTE DES TABLEAUX

<u>Tableau 1</u> : Répartition hypsométrique du bassin versant de l'Oued Saïda	8
<u>Tableau 2</u> : Répartition altimétrique du bassin versant de l'Oued Saïda	10
<u>Tableau 3</u> : Classification du relief selon Ig par O.R.S.T.O.M	11
<u>Tableau 4</u> : Fractions des surfaces entre courbes de niveau	12
<u>Tableau 5</u> : Classification du relief selon Ds.....	12
<u>Tableau 6</u> : Rapport de confluence	15
<u>Tableau 7</u> : Rapport de longueur.....	16
<u>Tableau 8</u> : Répartition des points d'eau (DHW Saida, 1992 / ANRH Alger, 2001).....	38
<u>Tableau 9</u> : Classification des critères de Potentialité aquifère.....	49
<u>Tableau 10</u> : Caractéristiques des stations pluviométriques.....	53
<u>Tableau 11</u> : Résultats des corrélations par régressions linéaires.....	55
<u>Tableau 12</u> : Présentation des données des précipitations moyennes annuelles des différentes stations (1974/1975 – 2011/2012) après comblement des lacunes.....	57
<u>Tableau 13</u> : Caractéristiques des pluies annuelles du bassin versant de l'Oued Saida (mm)	58
<u>Tableau 14</u> : Calcul du χ^2 pour la station de Saida (en annexe)	
<u>Tableau 15</u> : Table de distribution de χ^2 (loi de K. Pearson) (en annexe)	
<u>Tableau 16</u> : Pluies annuelles fréquentielles du bassin versant de l'Oued Saida (mm).....	59
<u>Tableau 17</u> : Valeurs moyenne mensuelle des précipitations aux stations de Sidi Boubekeur, Ain El Hadjar et Saida. (1974/75 – 2005/06).....	62
<u>Tableau 18</u> : Répartition saisonnière des précipitations.....	63
<u>Tableau 19</u> : Méthodes utilisées pour le calcul de la lame d'eau précipitée (en annexe)	
<u>Tableau 20</u> : Evaluation du volume d'eau tombé sur le bassin versant de Saida par la méthode de THIESSEN (en annexe)	
<u>Tableau 21</u> : Evaluation du volume d'eau tombé sur le bassin versant de Saida par la méthode des isohyètes (en annexe)	
<u>Tableau 22</u> : Lamme d'eau écoulée estimée par différentes méthodes (Période 1974/1975 - 2011/2012).....	63
<u>Tableau 23</u> : Fréquence du vent (%).....	64
<u>Tableau 24</u> : Nombre de jours de sirocco moyen. Station de Saida (1983–2012).....	65
<u>Tableau 25</u> : Vitesse moyenne mensuelle du vent (m/s). Station de Saida (1983–2012).....	65
<u>Tableau 26</u> : Humidité moyenne mensuelle en (%) Station de Saida (1983–2012).....	66
<u>Tableau 27</u> : Moyennes mensuelles et annuelles des températures.....	66
<u>Tableau 28</u> : Moyennes mensuelles des précipitations et des températures (1983-2012).....	67
<u>Tableau 29</u> : Méthodes utilisées pour le calcul des indices climatiques (en annexe)	

Tableau 30: Indice d'aridité mensuel à la station de Saida.....	68
Tableau 31: Valeurs des indices pluviométriques mensuels de MORAL.....	69
Tableau 32: Indices de MORAL.....	69
Tableau 33: Evapotranspiration réelle d'après TURC.....	70
Tableau 34: Méthode utilisée pour le calcul d'ETP (en annexe)	
Tableau 35: Table du coefficient de correction (en annexe)	
Tableau 36: Table des indices thermiques mensuels (en annexe)	
Tableau 37: Valeurs de l'ETP à la station de Saida (1983/2012).....	73
Tableau 38: Bilan de THORNTHWAITE (Station de Saida).....	74
Tableau 39: Résultats de l'E.T.R. d'après les différentes méthodes.....	74
Tableau 40: Bilan hydrique du bassin versant de Saida.....	75
Tableau 41: Caractéristiques des stations hydrométriques.....	77
Tableau 42: Moyennes mensuelles interannuelles des débits (m ³ /s) (1989-2012).....	78
Tableau 43: Répartitions des débits mensuels.....	81
Tableau 44: variation saisonnière des débits (1989/1990-2011/2012).....	84
Tableau 45: Débits moyens annuels d'oued Saida à Sidi Boubekeur et Saida.....	85
Tableau 46: Valeurs caractéristiques des modules au niveau du bassin versant de l'oued Saida.....	86
Tableau 47: Coefficients de corrélation des débits annuels d'oued Saida.....	87
Tableau 48: Débits spécifiques et lames d'eau écoulées.....	89
Tableau 49: Hydraulicité de l'oued Saida (1989-2012).....	91
Tableau 50: Bilan moyen annuel de l'écoulement.....	92
Tableau 51: Ajustement des modules annuels à la loi log normale (station de Saida) (en annexe)	
Tableau 52 : Calcul du χ^2 pour la station de Saida (en annexe)	
Tableau 53: Ajustement des modules annuels à la loi log normale (station de Sidi Boubekeur) (en annexe)	
Tableau 54: Calcul du χ^2 pour la station de Sidi Boubekeur (en annexe)	
Tableau 55: Ajustement à une loi log normale des modules annuels.....	94
Tableau 56: Modules caractéristiques pour des périodes de récurrences données en m ³ /s.....	95
Tableau 57: Débits annuels maxima pour la station de Saïda (1974-2012).....	96
Tableau 58: Paramètres statistiques de la série et droite d'ajustement obtenus par la loi de Gumbel.....	96
Tableau 59: Débits de crues fréquentiels déterminés par la loi de Gumbel à la station de Saïda (m ³ /s).....	97

<u>Tableau 60:</u> Résultats des différentes corrélations entre les deux paramètres pluie et la lame d'eau écoulée annuelle.....	99
<u>Tableau 61:</u> Représentation des différents types de régression.....	102
<u>Tableau 62:</u> Exemple de caractéristiques des modèles pluie-débit.....	109
<u>Tableau 63:</u> Valeurs des paramètres du modèle GR1A obtenues sur un large échantillon de bassins versants.....	114
<u>Tableau 64:</u> Valeur des paramètres du modèle GR2M.....	118
<u>Tableau 65:</u> Calculs de la lame d'eau précipitée chaque année par la méthode de Thiessen(en annexe)	
<u>Tableau 66:</u> L'application du modèle GR1A sur le sous bassin de Saida (en annexe)	
<u>Tableau 67:</u> L'application du modèle GR1A sur le sous bassin de Sidi Boubekeur (en annexe)	
<u>Tableau 68:</u> L'application du modèle GR1A sur le bassin versant de l'Oued Saida (en annexe)	
<u>Tableau 69:</u> Résultat du calage du modèle GR1A.....	120
<u>Tableau 70:</u> Variations des coefficients de corrélation de la validation du modèle GR1A.....	124
<u>Tableau 71:</u> L'application du modèle GR2M sur le sous bassin de Saida (en annexe)	
<u>Tableau 72:</u> L'application du modèle GR2M sur le sous bassin de Sidi Boubekeur (en annexe)	
<u>Tableau 73:</u> L'application du modèle GR2M sur le bassin versant de l'Oued Saida (en annexe)	
<u>Tableau 74:</u> Résultat du calage du modèle GR2M.....	126
<u>Tableau 75:</u> Valeurs des paramètres après calibration et performance du modèle.....	134
<u>Tableau 76:</u> Les variations de coefficients de corrélation de la validation du modèle GR2M.....	134

ANNEXE

Tableau 14 : Calcul du χ^2 pour la station de Saida

N° de classes	Limites des classes	Effectif observé n_i	Effectif théorique np_i	χ^2
1	< 230	8	7,6	1,211
2	230 – 290	6		
3	290 – 360	9		
4	360 – 420	9		
5	> 420	6		

χ^2 calculé = 1,211

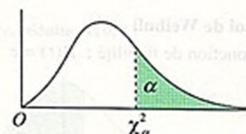
Pour un degré de liberté de $5 - 2 - 1 = 2$ et pour un seuil de 0,05, le χ^2 tabulé est de 5,99.

Le χ^2 calculé étant inférieur au χ^2 tabulé. L'ajustement à la loi normale sera donc retenu.

Tableau 15 : Table de distribution de χ^2 (loi de K. Pearson)

La table donne la probabilité α , en fonction du nombre de degrés de liberté v , pour que χ^2 égale ou dépasse une valeur donnée χ^2_α .

$$\alpha = P(\chi^2 \geq \chi^2_\alpha)$$



v	$\alpha = 0,990$	$\alpha = 0,975$	$\alpha = 0,950$	$\alpha = 0,900$	$\alpha = 0,100$	$\alpha = 0,050$	$\alpha = 0,025$	$\alpha = 0,010$	$\alpha = 0,001$
1	0,0002	0,0010	0,0039	0,0158	2,71	3,84	5,02	6,63	10,83
2	0,02	0,05	0,10	0,21	4,61	5,99	7,38	9,21	13,82
3	0,12	0,22	0,35	0,58	6,25	7,81	9,35	11,34	16,27
4	0,30	0,48	0,71	1,06	7,78	9,49	11,14	13,28	18,47
5	0,55	0,83	1,15	1,61	9,24	11,07	12,83	15,09	20,52
6	0,87	1,24	1,64	2,20	10,64	12,59	14,45	16,81	22,46
7	1,24	1,69	2,17	2,83	12,02	14,07	16,01	18,47	24,32
8	1,65	2,18	2,73	3,49	13,36	15,51	17,53	20,09	26,13
9	2,09	2,70	3,33	4,17	14,68	16,92	19,02	21,67	27,88
10	2,56	3,25	3,94	4,87	15,99	18,31	20,48	23,21	29,59
11	3,05	3,82	4,57	5,58	17,27	19,67	21,92	24,72	31,26
12	3,57	4,40	5,23	6,30	18,55	21,03	23,34	26,22	32,91
13	4,11	5,01	5,89	7,04	19,81	22,36	24,74	27,69	34,53
14	4,66	5,63	6,57	7,79	21,06	23,68	26,12	29,14	36,12
15	5,23	6,26	7,26	8,55	22,31	25,00	27,49	30,58	37,70
16	5,81	6,91	7,96	9,31	23,54	26,30	28,84	32,00	39,25
17	6,41	7,56	8,67	10,08	24,77	27,59	30,19	33,41	40,79
18	7,01	8,23	9,39	10,86	25,99	28,87	31,53	34,80	42,31
19	7,63	8,91	10,12	11,65	27,20	30,14	32,85	36,19	43,82
20	8,26	9,59	10,85	12,44	28,41	31,41	34,17	37,57	45,32
21	8,90	10,28	11,59	13,24	29,61	32,67	35,48	38,93	46,80
22	9,54	10,98	12,34	14,04	30,81	33,92	36,78	40,29	48,27
23	10,20	11,69	13,09	14,85	32,01	35,17	38,08	41,64	49,73
24	10,86	12,40	13,85	15,66	33,20	36,41	39,37	42,98	51,18
25	11,52	13,12	14,61	16,47	34,38	37,65	40,65	44,31	52,62
26	12,20	13,84	15,38	17,29	35,56	38,88	41,92	45,64	54,05
27	12,88	14,57	16,15	18,11	36,74	40,11	43,19	46,96	55,48
28	13,57	15,31	16,93	18,94	37,92	41,34	44,46	48,28	56,89
29	14,26	16,05	17,71	19,77	39,09	42,56	45,72	49,59	58,30
30	14,95	16,79	18,49	20,60	40,26	43,77	46,98	50,89	59,70

Quand v est supérieur à 30, on utilise la table de la loi normale (table de l'écart réduit) avec :

$$r = \sqrt{2\chi^2} - \sqrt{2v-1}$$

Annexe

Tableau 19: Méthodes utilisées pour le calcul de la lame d'eau précipitée.

Méthodes	Formules	Définitions
THIESEN	$P_t = \frac{\sum P_i S_i}{S} = \frac{V_t}{S}$	<p>V_t = Volume total d'eau tombé sur le bassin. S = Surface totale du bassin. P_i = Précipitations moyennes annuelles de la station à l'intérieur du polygone. S_i = Surface du polygone considéré.</p>
ISOHYETES	$P_t = \frac{\sum P_i S_i}{S}$	<p>S_i = Surface inter-isohyète. P_i = Pluviométrie moyenne inter-isohyète totale. S = Superficie totale du bassin.</p>

Tableau 20: Evaluation du volume d'eau tombé sur le bassin versant de Saida par la méthode de THIESEN.

Stations pluviométrique	Surface du polygone (Km ²)	Précipitations (mm/an)	Volume d'eau tombée (10 ⁶ m ³ / an)
Sidi Boubekeur	156	281,7	43945,2
PK 50	127	330,0	41910,0
Saida	166	333,0	55278,0
Ain Zerga Ferme	76	333,6	25353,6
Ain El Hadjar	119	335,9	39972,1
Total	644		206458,9

Tableau 21: Evaluation du volume d'eau tombé sur le bassin versant de Saida par la méthode des isohyètes.

Zone inter-isohyète (mm)	Précipitations moy. (mm)	Si (Km ²)	Vt (10 ⁶ m ³)
330	333	317	105561
330-320	325	105	34125
320-310	315	62	19530
310-300	305	46	14030
300-290	295	35	10325
290	286	79	22594

Tableau 29 : Méthodes utilisées pour le calcul des indices climatiques.

Méthodes	Formules	Définitions
DEMARTONNE	$I = \frac{P}{T + 10}$	<p>I : indice d'aridité annuel. P: précipitations annuelles moyennes (mm). T: températures annuelles moyennes (°C).</p> <p>20 < I < 30 climat tempéré. 10 < I < 20 climat semi-aride. 5 < I < 10 climat désertique. I < 5 climat hyper-aride.</p>
	$i = \frac{12 p}{t + 10}$	<p>i: indice d'aridité mensuelle. p: Précipitations mensuelles moyennes (mm). t: Températures mensuelles moyennes (°C).</p>
P. MORAL	$Ia = \frac{P}{T^2 - 10T + 200}$	<p>Ia : indice pluviométrique annuel, l'indice Ia = 1 marque la limite entre l'humidité et la sécheresse.</p> <p>P : précipitations moyennes annuelles en mm. T : températures moyennes annuelles en °C.</p>
	$Iam = \frac{P}{\frac{t^2}{10} - t + 20}$	<p>(I)</p> <p>Mois pluvieux $P > \frac{t^2}{10} + t + 30$</p> <p>Mois humide $\frac{t^2}{10} + t + 30 > P > \frac{t^2}{10} - t + 20$</p> <p>Mois sec $\frac{t^2}{10} - t + 20 > P > \frac{t^2}{20} - t + 10$</p> <p>Mois aride $P < \frac{t^2}{20} - t + 10$</p> <p>(II)</p> <p>Mois pluvieux " p " +2 Mois humide " h " +1 Mois sec " s " 0 Mois aride " a " -1</p>

Tableau 34 : Méthode utilisée pour le calcul d'ETP

Méthodes	Formules	Définitions
THORNTHWAITE	$ETP = 1,6 \left(\frac{10t}{I} \right)^a * K$	<p>ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle corrigée en cm.</p> <p>t : Température moyenne mensuelle en °C.</p> <p>k : coefficient de correction mensuel dépendant de la latitude et donné par la table (tableau 35).</p> <p>I : indice thermique annuel, défini comme la somme des indices thermiques mensuels i avec</p> <p>$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1,514}$ (voir tableau 36)</p> <p>$1,6 \left(\frac{10t}{I} \right)^a$: évapotranspiration potentielle mensuelle non corrigée en cm.</p>
	$a = 0,016 I + 0,5 = 1,78$	

Tableau 35 : Table du coefficient de correction.

Lat. N.	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
5	1.02	.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	.99	1.02
10	1.00	.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	.98	.99
15	.97	.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	.95	.97
20	.95	.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	.93	.94
25	.93	.89	1.03	1.06	1.15	1.14	1.17	1.12	1.02	.99	.91	.91
26	.92	.88	1.03	1.06	1.15	1.15	1.17	1.12	1.02	.99	.91	.91
27	.92	.88	1.03	1.07	1.16	1.15	1.18	1.13	1.02	.99	.90	.90
28	.91	.88	1.03	1.07	1.16	1.16	1.18	1.13	1.02	.98	.90	.90
29	.91	.87	1.03	1.07	1.17	1.16	1.19	1.13	1.03	.98	.90	.89
30	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
31	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.18	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
32	.89	.86	1.03	1.08	1.19	1.19	1.21	1.15	1.03	.98	.88	.87
33	.88	.86	1.03	1.09	1.19	1.20	1.22	1.15	1.03	.97	.88	.86
34	.88	.85	1.03	1.09	1.20	1.20	1.22	1.16	1.03	.97	.87	.86
35	.87	.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	.97	.86	.85
36	.87	.86	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	1.03	.97	.86	.84
37	.86	.84	1.03	1.10	1.22	1.23	1.25	1.17	1.03	.97	.85	.83
38	.85	.84	1.03	1.10	1.23	1.24	1.25	1.17	1.04	.96	.84	.83
39	.85	.84	1.03	1.11	1.23	1.24	1.26	1.18	1.04	.96	.84	.82
40	.84	.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	.96	.83	.81
41	.83	.83	1.03	1.11	1.25	1.26	1.27	1.19	1.04	.96	.82	.80
42	.82	.83	1.03	1.12	1.26	1.27	1.28	1.19	1.04	.95	.82	.79
43	.81	.82	1.02	1.12	1.26	1.28	1.29	1.20	1.04	.95	.81	.77
44	.81	.82	1.02	1.13	1.27	1.29	1.30	1.20	1.04	.95	.80	.76
45	.80	.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	.94	.79	.75
46	.79	.81	1.02	1.13	1.29	1.31	1.32	1.22	1.04	.94	.79	.74
47	.77	.80	1.02	1.14	1.30	1.32	1.33	1.22	1.04	.93	.78	.73
48	.76	.80	1.02	1.14	1.31	1.33	1.34	1.23	1.05	.93	.77	.72
49	.75	.79	1.02	1.14	1.32	1.34	1.35	1.24	1.05	.93	.76	.71
50	.74	.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	.92	.76	.70
Lat. S.												
5	1.06	.95	1.04	1.00	1.02	.99	1.02	1.03	1.00	1.05	1.03	1.06
10	1.08	.97	1.05	.99	1.01	.96	1.00	1.01	1.00	1.06	1.05	1.10
15	1.12	.98	1.05	.98	.98	.94	.97	1.00	1.00	1.07	1.07	1.12
20	1.14	1.00	1.05	.97	.96	.91	.95	1.99	1.00	1.08	1.09	1.15
25	1.17	1.01	1.05	.96	.94	.88	.93	.98	1.00	1.10	1.11	1.18
30	1.20	1.03	1.06	.95	.92	.85	.90	.96	1.00	1.12	1.14	1.21
35	1.23	1.04	1.06	.94	.89	.82	.87	.94	1.00	1.13	1.17	1.25
40	1.27	1.06	1.07	.93	.86	.78	.84	.92	1.00	1.15	1.20	1.29
42	1.28	1.07	1.07	.92	.85	.76	.82	.92	1.00	1.16	1.22	1.31
44	1.30	1.08	1.07	.92	.83	.74	.81	.91	.99	1.17	1.23	1.33
46	1.32	1.10	1.07	.91	.82	.72	.79	.90	.99	1.17	1.25	1.35
48	1.34	1.11	1.08	.90	.80	.70	.76	.89	.99	1.18	1.27	1.37
50	1.37	1.12	1.08	.89	.77	.67	.74	.88	.99	1.19	1.29	1.41

Tableau 36 : Table des indices thermiques mensuels

Calcul des indices mensuels : $i = \left(\frac{t}{5}\right) 1.514$

T°	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
0°			0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07
1°	0.09	0.10	0.12	0.13	0.15	0.16	0.18	0.20	0.21	0.23
2°	0.25	0.27	0.29	0.31	0.33	0.35	0.37	0.39	0.42	0.44
3°	0.46	0.48	0.51	0.53	0.56	0.58	0.61	0.63	0.66	0.69
4°	0.71	0.74	0.77	0.80	0.82	0.85	0.88	0.91	0.94	0.97
5°	1.00	1.03	1.06	1.09	1.12	1.16	1.19	1.22	1.25	1.29
6°	1.32	1.35	1.39	1.42	1.45	1.49	1.52	1.56	1.59	1.63
7°	1.66	1.70	1.74	1.77	1.81	1.85	1.89	1.92	1.96	2.00
8°	2.04	2.08	2.12	2.15	2.19	2.23	2.27	2.31	2.35	2.39
9°	2.44	2.48	2.52	2.56	2.60	2.64	2.69	2.73	2.77	2.81
10°	2.86	2.90	2.94	2.99	3.03	3.08	3.12	3.16	3.21	3.25
11°	3.30	3.34	3.39	3.44	3.48	3.53	3.58	3.62	3.67	3.72
12°	3.76	3.81	3.86	3.91	3.96	4.00	4.05	4.10	4.15	4.20
13°	4.25	4.30	4.35	4.40	4.45	4.50	4.55	4.60	4.65	4.70
14°	4.75	4.81	4.86	4.91	4.96	5.01	5.07	5.12	5.17	5.22
15°	5.28	5.33	5.38	5.44	5.49	5.55	5.60	5.65	5.71	5.76
16°	5.82	5.87	5.93	5.98	6.04	6.10	6.15	6.21	6.26	6.32
17°	6.38	6.44	6.49	6.55	6.61	6.66	6.72	6.78	6.84	6.90
18°	6.95	7.01	7.07	7.13	7.19	7.25	7.31	7.37	7.43	7.49
19°	7.55	7.61	7.67	7.73	7.79	7.85	7.91	7.97	8.03	8.10
20°	8.16	8.22	8.28	8.34	8.41	8.47	8.53	8.59	8.66	8.72
21°	8.78	8.85	8.91	8.97	9.04	9.10	9.17	9.23	9.29	9.36
22°	9.42	9.49	9.55	9.62	9.68	9.75	9.82	9.88	9.95	10.01
23°	10.08	10.15	10.21	10.28	10.35	10.41	10.48	10.55	10.62	10.68
24°	10.75	10.82	10.89	10.95	11.02	11.09	11.16	11.23	11.30	11.37
25°	11.44	11.50	11.57	11.64	11.71	11.78	11.85	11.92	11.99	12.06
26°	12.13	12.21	12.28	12.35	12.42	12.49	12.56	12.63	12.70	12.78
27°	12.85	12.92	12.99	13.07	13.14	13.21	13.28	13.36	13.43	13.50
28°	13.58	13.65	13.72	13.80	13.87	13.94	14.02	14.09	14.17	14.24
29°	14.32	14.39	14.47	14.54	14.62	14.69	14.77	14.84	14.92	14.99
30°	15.07	15.15	15.22	15.30	15.38	15.45	15.53	15.61	15.68	15.76
31°	15.84	15.92	15.99	16.07	16.15	16.23	16.30	16.38	16.46	16.54
32°	16.62	16.70	16.78	16.85	16.93	17.01	17.09	17.17	17.25	17.33
33°	17.41	17.49	17.57	17.65	17.73	17.81	17.89	17.97	18.05	18.13
34°	18.22	18.30	18.38	18.46	18.54	18.62	18.70	18.79	18.87	18.95
35°	19.03	19.11	19.20	19.28	19.36	19.45	19.53	19.61	19.69	19.78
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9

Tableau 43 : Moyennes mensuelles interannuelles des débits et précipitations
(1989/1990-2005/2006).

Mois	Saida		Sidi Boubekeur	
	Débits (m ³ /s)	Précipitations (mm)	Débits (m ³ /s)	Précipitations (mm)
S	0,12	19,90	0,39	18,50
O	0,14	35,20	0,87	27,30
N	0,24	36,1	0,70	38,3
D	0,25	35	0,62	28,3
J	0,32	37,3	0,78	33,1
F	0,34	31,9	0,59	30,4
M	0,45	37,8	1,03	32
A	0,38	33,9	0,46	26,7
M	0,23	30,8	0,28	24,6
J	0,15	7,2	0,14	4
Jt	0,10	3,50	0,06	4,80
A	0,14	9,9	0,14	4,3

Annexe

Tableau 51 : Ajustement des modules annuels à la loi log normale (station de Saida).

Rang i	Débits classés	Log Qi	Fréquence Expérimentale $F_i = \frac{(i-0,5)}{n}$
1	0,07	-1,15	0,022
2	0,08	-1,09	0,065
3	0,09	-1,04	0,109
4	0,10	-1,00	0,152
5	0,10	-1,00	0,196
6	0,11	-0,96	0,239
7	0,12	-0,92	0,283
8	0,13	-0,88	0,326
9	0,14	-0,85	0,370
10	0,18	-0,74	0,413
11	0,21	-0,67	0,457
12	0,21	-0,67	0,500
13	0,23	-0,64	0,543
14	0,28	-0,55	0,587
15	0,30	-0,52	0,630
16	0,30	-0,52	0,674
17	0,31	-0,50	0,717
18	0,32	-0,49	0,761
19	0,33	-0,48	0,804
20	0,35	-0,45	0,848
21	0,40	-0,39	0,891
22	0,61	-0,21	0,935
23	0,94	-0,02	0,978

Tableau 52 : Calcul du χ^2 pour la station de Saida.

N° de classes	Limites des classes	Effectif observé n_i	Effectif théorique np_i	$(n_i - np_i)^2 / (np_i)$
1	< 0,11	5	4,6	0,03
2	0,11 – 0,18	5	4,6	0,03
3	0,18 – 0,28	4	4,6	0,08
4	0,28 – 0,32	4	4,6	0,08
5	> 0,32	5	4,6	0,03

χ^2 calculé = **0,25**

Pour un degré de liberté de $5 - 3 - 1 = 1$ et pour un seuil de 0,05 , le χ^2 tabulé est de **3,84**.

Le χ^2 calculé étant inférieur au χ^2 tabulé. L'ajustement à la loi log normale sera donc retenu.

Tableau 53 : Ajustement des modules annuels à la loi log normale
(station de Sidi Boubekeur).

Rang i	Débits classés	Log Qi	Fréquence Expérimentale $F_i = \frac{(i-0,5)}{n}$
1	0,16	-0,80	0,022
2	0,21	-0,68	0,065
3	0,24	-0,62	0,109
4	0,30	-0,52	0,152
5	0,31	-0,51	0,196
6	0,31	-0,51	0,239
7	0,39	-0,41	0,283
8	0,42	-0,37	0,326
9	0,46	-0,34	0,370
10	0,47	-0,33	0,413
11	0,47	-0,33	0,457
12	0,50	-0,30	0,500
13	0,57	-0,24	0,543
14	0,61	-0,21	0,587
15	0,65	-0,19	0,630
16	0,69	-0,16	0,674
17	0,69	-0,16	0,717
18	0,73	-0,14	0,761
19	0,77	-0,11	0,804
20	0,82	-0,08	0,848
21	0,93	-0,03	0,891
22	1,33	0,12	0,935
23	1,34	0,13	0,978

Tableau 54 : Calcul du χ^2 pour la station de Sidi Boubekeur.

N° de classes	Limites des classes	Effectif observé n_i	Effectif théorique np_i	$(n_i - np_i)^2 / (np_i)$
1	< 0,39	6	4,6	0,43
2	0,31 – 0,47	5	4,6	0,03
3	0,47 – 0,65	4	4,6	0,08
4	0,65 – 0,77	4	4,6	0,08
5	> 0,77	4	4,6	0,08

χ^2 calculé = **0,70**

Pour un degré de liberté de $5 - 3 - 1 = 1$ et pour un seuil de 0,05 , le χ^2 tabulé est de **3,84**.

Le χ^2 calculé étant inférieur au χ^2 tabulé. L'ajustement à la loi log normale sera donc retenu.

Annexe

Tableau 65 : Calculs de la lame d'eau précipitée chaque année par la méthode de Thiessen

Stations	Si	1989/1990		1990/1991		1991/1992	
		Pi	Pi*Si	Pi	Pi*Si	Pi	Pi*Si
Sidi Boubekeur	156	285,5	44 538,00	400	62400,00	198,8	31012,80
PK 50	127	340,5	43 243,50	428,7	54444,90	255,1	32397,70
Saida	166	347,2	57 635,20	418,9	69537,40	176	29216,00
Ain Zerga Ferme	76	394,7	29 997,20	452,4	34382,40	228,3	17350,80
Ain El Hadjar	119	380	45 220,00	450	53550,00	200	23800,00
P moy		342,60		425,95		207,73	

1992/1993		1993/1994		1994/1995		1995/1996		1996/1997	
Pi	Pi*Si	Pi	Pi*Si	Pi	Pi*Si	Pi	Pi*Si	Pi	Pi*Si
172,4	26 894,40	202,6	31605,60	308,5	48126,00	421	65676,00	229,7	35833,20
202,4	25 704,80	205	26035,00	284,5	36131,50	532,6	67640,20	246,8	31343,60
173,5	28 801,00	209,1	34710,60	354,7	58880,20	595,6	98869,60	296,8	49268,80
249,7	18 977,20	275,2	20915,20	404,2	30719,20	464,1	35271,60	315,9	24008,40
213,7	25 430,30	286,6	34105,40	311,7	37092,30	567,8	67568,20	227,7	27096,30
195,35		228,84		327,56		520,23		260,17	

1997/1998		1998/1999		1999/2000		2000/2001		2001/2002	
Pi	Pi*Si	Pi	Pi*Si	Pi	Pi*Si	Pi	Pi*Si	Pi	Pi*Si
286,8	44 740,80	145,1	22635,60	251,3	39202,80	257	40092,00	274,2	42775,20
333,4	42 341,80	215,4	27355,80	294,9	37452,30	281,3	35725,10	325,9	41389,30
270,8	44 952,80	210,8	34992,80	297	49302,00	296,5	49219,00	279,4	46380,40
277	21 052,00	203,1	15435,60	292,3	22214,80	319,6	24289,60	274,9	20892,40
296,8	35 319,20	221,8	26394,20	246	29274,00	280,2	33343,80	305,7	36378,30
292,56		196,92		275,54		283,65		291,64	

2002/2003		2003/2004		2004/2005		2005/2006		2006/2007	
Pi	Pi*Si	Pi	Pi*Si	Pi	Pi*Si	Pi	Pi*Si	Pi	Pi*Si
310,2	48 391,20	313,9	48968,40	228,8	35692,80	342,3	53398,80	287,9	44912,40
353,4	44 881,80	388,4	49326,80	263,7	33489,90	429,1	54495,70	338,7	43014,90
350,9	58 249,40	418,8	69520,80	250,8	41632,80	468,8	77820,80	340	56440,00
344,4	26 174,40	360,4	27390,40	274,2	20839,20	391,9	29784,40	324,4	24654,40
359	42 721,00	371,2	44172,80	276	32844,00	445,2	52978,80	334,1	39757,90
342,26		371,71		255,43		416,89		324,19	

2007/2008		2008/2009		2009/2010		2010/2011		2011/2012	
Pi	Pi*Si	Pi	Pi*Si	Pi	Pi*Si	Pi	Pi*Si	Pi	Pi*Si
351,5	54 834,00	415,2	64771,20	338,6	52821,60	342,2	53383,20	396,6	61869,60
416,4	52 882,80	494,2	62763,40	400,7	50888,90	405,1	51447,70	471,4	59867,80
429	71 214,00	518	85988,00	411	68226,00	416	69056,00	492	81672,00
384,9	29 252,40	445,4	33850,40	372,6	28317,60	376	28576,00	427,7	32505,20
444,6	52 907,40	555,1	66056,90	422,3	50253,70	428,5	50991,50	522,8	62213,20
405,42		486,69		388,99		393,56		462,93	

Tableau 66 : L'application du modèle GR1A sur le sous bassin de Saïda.

Données de calage		ETP Turc			ETP Thornthwaite	
Année	Pluie (mm)	ETP (mm)	Débit (mm)	Débit simulé	ETP (mm)	Débit simulé
1989 - 1990	347,2	958,15	45,36	55,16	867,04	54,73
1990 - 1991	418,9	902,38	71,28	93,35	813,15	93,25
1991 - 1992	176	893,86	17,33	19,34	769,42	20,85
1992 - 1993	173,5	911,85	15,12	9,81	815,86	9,93
1993 - 1994	209,1	930,82	45,36	14,42	856,34	13,87
1994 - 1995	354,7	924,5	64,80	53,05	794,63	57,04
1995 - 1996	595,6	944,89	203,60	178,31	836,79	181,84
1996 - 1997	296,8	966,47	49,68	57,68	877,63	56,97
1997 - 1998	270,8	947,53	38,88	32,59	869,49	31,58
1998 - 1999	210,8	931,41	19,44	18,69	841,96	18,56
1999 - 2000	297	942,1	28,16	34,49	862,7	33,54
2000 - 2001	296,5	963,3	30,24	38,49	896,67	36,45
2001 - 2002	279,4	952,62	21,60	34,50	869,99	33,71
2002 - 2003	350,9	960,19	60,48	54,13	926,01	48,55
2003 - 2004	418,8	942,7	69,31	88,12	850,69	87,84
2004 - 2005	250,8	938,74	23,76	34,79	912,31	30,73
Données de validation		ETP Turc			ETP Thornthwaite	
Année	Pluie (mm)	ETP (mm)	Débit (mm)	Débit simulé	ETP (mm)	Débit simulé
2005 - 2006	468,8	959,01		97,98	914,12	90,27
2006 - 2007	340	952,27		65,53	876,89	63,41
2007 - 2008	429	950,42		90,46	886,71	85,99
2008 - 2009	518	943,72		143,81	894,84	134,70
2009 - 2010	411	974,62		95,67	906,9	91,46
2010 - 2011	416	971,03		88,76	923,77	82,06
2011 - 2012	492	943,41		128,93	956,59	110,07

Tableau 67: L'application du modèle GR1A sur le sous bassin de Sidi Boubekeur.

Données de calage		ETP Turc			ETP Thornthwaite	
Année	Pluie (mm)	ETP (mm)	Débit (mm)	Débit simulé	ETP (mm)	Débit simulé
1989 - 1990	285,5	958,15	27,96	23,09	867,04	22,89
1990 - 1991	400	902,38	45,33	56,19	813,15	56,13
1991 - 1992	198,8	893,86	11,67	15,87	769,42	17,18
1992 - 1993	172,4	911,85	7,68	6,83	815,86	6,91
1993 - 1994	202,6	930,82	15,33	8,82	856,34	8,47
1994 - 1995	308,5	924,5	29,73	26,05	794,63	28,25
1995 - 1996	421	944,89	65,88	60,22	836,79	61,84
1996 - 1997	229,7	966,47	14,69	19,14	877,63	18,86
1997 - 1998	286,8	947,53	15,31	22,15	869,49	21,43
1998 - 1999	145,1	931,41	10,33	5,95	841,96	5,91
1999 - 2000	251,3	942,1	22,56	13,51	862,7	13,10
2000 - 2001	257	963,3	33,90	17,48	896,67	16,46
2001 - 2002	274,2	952,62	19,31	20,89	869,99	20,38
2002 - 2003	310,2	960,19	20,67	28,13	926,01	24,95
2003 - 2004	313,9	942,7	33,75	31,68	850,69	31,57
2004 - 2005	228,8	938,74	23,16	16,19	912,31	14,11
Données de validation		ETP Turc			ETP Thornthwaite	
Année	Pluie (mm)	ETP (mm)	Débit (mm)	Débit simulé	ETP (mm)	Débit simulé
2005 - 2006	342,3	959,01		32,71	914,12	29,64
2006 - 2007	287,9	952,27		27,22	876,89	26,19
2007 - 2008	351,5	950,42		38,78	886,71	36,53
2008 - 2009	415,2	943,72		61,67	894,84	56,81
2009 - 2010	338,6	974,62		41,21	906,9	39,04
2010 - 2011	342,2	971,03		38,04	923,77	34,66
2011 - 2012	396,6	943,41		55,25	956,59	45,50

Tableau 68: L'application du modèle GR1A sur le bassin versant de l'Oued Saïda.

Données de calage		ETP Turc			ETP Thornthwaite	
Année	Pluie (mm)	ETP (mm)	Débit (mm)	Débit simulé	ETP (mm)	Débit simulé
1989 - 1990	342,6	958,15	27,96	25,74	867,04	25,38
1990 - 1991	425,95	902,38	45,33	49,83	813,15	49,53
1991 - 1992	207,73	893,86	11,67	12,63	769,42	13,64
1992 - 1993	195,35	911,85	7,68	6,34	815,86	6,38
1993 - 1994	228,84	930,82	15,33	8,54	856,34	8,16
1994 - 1995	327,56	924,5	29,73	21,93	794,63	23,71
1995 - 1996	520,23	944,89	65,88	71,29	836,79	72,87
1996 - 1997	260,17	966,47	14,69	20,18	877,63	19,78
1997 - 1998	292,56	947,53	15,31	17,04	869,49	16,37
1998 - 1999	196,92	931,41	10,33	7,78	841,96	7,68
1999 - 2000	275,54	942,1	22,56	13,10	862,7	12,63
2000 - 2001	283,65	963,3	33,90	15,86	896,67	14,84
2001 - 2002	291,64	952,62	19,31	17,52	869,99	16,99
2002 - 2003	342,26	960,19	20,67	25,31	926,01	22,26
2003 - 2004	371,71	942,7	33,75	34,08	850,69	33,78
2004 - 2005	255,43	938,74	23,16	15,87	912,31	13,73
Données de validation		ETP Turc			ETP Thornthwaite	
Année	Pluie (mm)	ETP (mm)	Débit (mm)	Débit simulé	ETP (mm)	Débit simulé
2005 - 2006	416,89	959,01		38,10	914,12	34,31
2006 - 2007	324,19	952,27		27,70	876,89	26,49
2007 - 2008	405,42	950,42		39,87	886,71	37,32
2008 - 2009	486,69	943,72		66,80	894,84	61,13
2009 - 2010	388,99	974,62		42,95	906,9	40,43
2010 - 2011	393,56	971,03		39,20	923,77	35,47
2011 - 2012	462,93	943,41		59,13	956,59	48,28

Tableau 71 : L'application du modèle GR2M sur le sous bassin de Saïda.

Données de calage		ETP Turc			ETP Thornthwaite	
Mois	Pluie (mm)	ETP (mm)	Débit (mm)	Débit simulé	ETP (mm)	Débit simulé
sept-93	23,5	90,96	4,44	3,97	84,72	3,07
oct-93	32,6	66,17	5,87	4,40	55,00	2,69
nov-93	39,0	42,84	5,86	4,83	31,18	2,93
déc-93	15,2	30,97	4,04	3,78	17,11	2,24
janv-94	35,0	31,11	5,14	4,47	11,96	3,77
févr-94	36,2	40,77	4,14	5,55	18,48	6,81
mars-94	2,4	58,16	3,67	3,46	37,41	3,37
avr-94	16,6	70,28	2,84	2,67	35,83	2,48
mai-94	5,8	107,44	2,20	1,88	87,41	1,45
juin-94	0,0	122,14	1,95	1,36	124,24	0,84
juil-94	0,9	139,61	2,02	1,02	181,13	0,51
août-94	1,9	130,37	2,20	0,80	171,87	0,33
sept-94	57,6	92,95	2,49	0,87	88,02	0,57
oct-94	70,6	70,38	4,40	2,04	63,06	2,43
nov-94	21,9	44,47	5,33	2,01	30,81	2,00
déc-94	6,6	30,45	7,34	1,58	13,61	1,30
janv-95	34,4	31,11	7,70	2,00	12,78	2,21
févr-95	28,7	41,85	7,79	2,48	20,92	3,58
mars-95	73,7	54,38	4,77	7,48	31,81	15,41
avr-95	23,4	73,22	4,44	5,97	42,23	9,31
mai-95	0,0	108,98	3,49	3,44	93,86	3,73
juin-95	23,5	118,33	4,26	2,46	109,96	2,14
juil-95	0,0	133,40	1,47	1,70	146,55	1,17
août-95	14,3	124,98	11,92	1,26	141,02	0,70
sept-95	25,5	90,76	3,02	1,00	81,3	0,48
oct-95	35,1	72,72	3,85	0,95	72,63	0,48
nov-95	23,0	50,32	4,79	0,89	47,59	0,43
déc-95	69,8	35,26	6,05	2,50	21,28	2,91
janv-96	45,9	42,64	25,68	4,90	29,23	7,22
févr-96	97,5	39,37	30,55	20,13	17,37	32,76
mars-96	94,0	56,32	53,38	36,55	34,71	49,46
avr-96	72,5	72,9	34,44	31,52	41,07	37,06
mai-96	38,5	104,49	26,05	16,43	79,69	17,13
juin-96	57,8	119,94	9,23	11,77	115,69	11,66
juil-96	23,3	135,00	3,12	6,32	154,43	4,89
août-96	12,7	125,17	2,94	3,68	141,8	2,32
sept-96	13,9	93,52	2,49	2,40	90,94	1,27
oct-96	10,3	68,45	1,47	1,68	57,81	0,75
nov-96	6,6	47,12	3,37	1,24	37,83	0,47
déc-96	30,2	38,38	3,85	1,06	26,61	0,42
janv-97	51,0	39,34	2,38	1,63	20,44	1,61
févr-97	2,4	45,37	2,32	1,26	23,05	1,07
mars-97	5,2	56,59	2,02	1,02	31,74	0,76
avr-97	102,5	81,51	16,69	5,05	55,12	11,09
mai-97	15,5	109,48	3,30	3,64	91,13	5,46
juin-97	0,0	122,99	2,31	2,34	126,31	2,50
juil-97	0,8	134	2,02	1,63	148,23	1,33
août-97	58,4	129,72	7,52	1,57	168,42	1,37
sept-97	44,2	96,26	3,20	1,59	100,03	1,18
oct-97	23,3	73,4	2,02	1,37	71,68	0,83
nov-97	59,1	46,02	8,88	2,18	32,04	1,75

Annexe

déc-97	30,5	35,26	7,89	2,65	18,35	2,61
janv-98	10,3	36,66	3,12	2,21	18,74	2,08
févr-98	25,5	43,15	3,48	2,35	22,03	2,73
mars-98	9,4	54,38	2,57	1,87	30,87	1,97
avr-98	13,6	73,22	1,95	1,54	41,17	1,51
mai-98	39,1	100,42	2,02	1,68	68,65	2,12
juin-98	1,0	118,09	1,24	1,23	108,19	1,17
juil-98	0,0	138,56	1,28	0,94	174,42	0,69
août-98	14,8	132,11	1,47	0,75	183,32	0,44
sept-98	5,7	98,78	1,24	0,61	114,09	0,29
oct-98	4,5	67,43	1,28	0,50	54,45	0,19
nov-98	9,5	41,54	1,24	0,43	25,38	0,13
déc-98	11,0	28,84	1,65	0,37	12,09	0,10
janv-99	62,5	33,45	3,12	0,85	14,97	1,24
févr-99	51,6	36,38	2,32	2,66	14,15	7,06
mars-99	65,4	53,8	3,49	8,16	30,35	19,90
avr-99	0,0	77,14	1,60	4,41	49,16	6,45
mai-99	0,6	110,7	1,28	2,74	99,14	2,86
juin-99	0,0	120,83	1,24	1,85	119,33	1,49
juil-99	0,0	135	1,28	1,34	154,43	0,86
août-99	0,0	127,52	1,28	1,01	154,42	0,52
sept-99	28,6	94,46	1,24	0,82	94,7	0,38
oct-99	70,4	73,57	2,75	1,41	75,45	1,40
nov-99	32,7	40,65	2,13	1,72	24,16	1,59
déc-99	126,3	31,23	7,52	18,26	15,09	30,57
janv-00	0,0	27,93	2,94	8,82	9,18	10,65
févr-00	0,0	42,9	2,23	4,91	21,33	4,81
mars-00	4,7	59,42	2,02	3,19	40,04	2,66
avr-00	9,9	76,56	1,60	2,29	46,99	1,68
mai-00	23,2	107,96	1,28	1,85	89,04	1,34
juin-00	0,3	123,61	1,24	1,34	130,89	0,78
juil-00	0,0	135,77	1,28	1,01	158,41	0,48
août-00	0,9	128,04	1,28	0,79	157,42	0,31
sept-00	17,4	94,46	1,24	0,64	94,03	0,21
oct-00	63,4	67,64	2,75	0,94	54,60	0,74
nov-00	58,3	43,87	6,92	2,21	29,53	3,14
déc-00	20,6	36,97	2,02	2,38	23,20	3,20
janv-01	44,7	38,63	4,40	4,09	18,55	6,76
févr-01	51,0	41,04	4,47	7,29	16,26	13,91
mars-01	4,8	60,88	1,83	4,45	39,39	6,02
avr-01	19,4	77,43	1,24	3,41	44,6	4,08
mai-01	11,7	106,12	1,28	2,40	78,99	2,36
juin-01	0,0	127,16	1,24	1,66	147,65	1,27
juil-01	1,2	138,73	1,28	1,22	176,55	0,74
août-01	4,0	130,37	1,28	0,94	173,32	0,46
Données de validation		ETP Turc			ETP Thorntwaite	
Mois	Pluie (mm)	ETP (mm)	Débit (mm)	Débit simulé	ETP (mm)	Débit simulé
sept-01	25,2	97,79		0,76	106,91	0,33
oct-01	26,6	77,34		0,68	88,87	0,27
nov-01	56,6	39,25		1,13	18,48	0,88
déc-01	10,1	33,43		1,05	14,98	0,88
janv-02	0,0	36,15		0,83	16,99	0,58
févr-02	9,6	43,91		0,73	22,01	0,52
mars-02	24,5	57,12		0,78	34,3	0,79
avr-02	37,3	75,67		1,08	44,06	1,67
mai-02	72,2	103,93		3,04	75,84	7,07
juin-02	0,0	127,72		2,02	151,49	3,04

Annexe

juil-02	0,0	134,4		1,44	150,83	1,57
août-02	17,3	125,91		1,10	145,23	0,91
sept-02	0,0	95,37		0,85	97,12	0,55
oct-02	8,8	72,55		0,68	69,76	0,35
nov-02	54,8	45,06		0,82	31,2	0,65
déc-02	14,5	37,78		0,80	23,9	0,65
janv-03	104,5	32		7,33	11,46	16,63
févr-03	61,2	37,3		15,46	13,06	29,50
mars-03	22,1	59,18		10,50	37,02	14,81
avr-03	28,1	75,67		7,71	42,56	9,58
mai-03	26,6	105,04		5,40	77,34	6,09
juin-03	5,2	129,71		3,25	163,2	2,81
juil-03	12,1	141,81		2,17	197,58	1,49
août-03	13,0	128,72		1,55	161,81	0,86
sept-03	9,8	96,26		1,16	100,18	0,53
oct-03	70,6	71,48		1,56	64,57	1,32
nov-03	40,6	44,67		2,05	29,19	2,03
déc-03	74,4	32,23		6,68	14,27	11,38
janv-04	25,9	34,28		6,86	14,85	10,88
févr-04	34,7	44,41		7,63	22,95	12,13
mars-04	6,2	55,5		4,67	31,58	5,68
avr-04	25,4	76,27		3,84	45,50	4,61
mai-04	104,3	96,3		10,89	57,86	20,28
juin-04	13,1	123,4		5,95	129,44	7,53
juil-04	3,3	138,01		3,45	171,34	3,20
août-04	10,5	129,89		2,26	168,96	1,64
sept-04	24,5	98,78		1,64	113,51	0,98
oct-04	33,0	74,73		1,36	78,76	0,74
nov-04	44,8	40,65		1,55	22,84	1,01
déc-04	64,8	30,19		4,08	12,83	6,39
janv-05	12,7	25,17		3,64	6,67	5,65
févr-05	27,7	27,61		4,41	6,44	8,45
mars-05	32,9	56,86		5,33	33,62	10,32
avr-05	6,5	77,14		3,46	46,80	4,78
mai-05	0,0	114,39		2,25	111,18	2,25
juin-05	3,5	125,23		1,58	138,11	1,23
juil-05	0,4	140,3		1,17	186,16	0,72
août-05	0,0	127,69		0,90	155,39	0,45
sept-05	33,3	95,19		0,76	96,21	0,36
oct-05	41,6	73,57		0,82	73,61	0,47
nov-05	68,6	43,87		2,15	28,49	2,50
déc-05	14,8	30,97		2,09	13,47	2,39
janv-06	86,4	29,87		10,10	8,84	20,37
févr-06	37,7	35,75		11,91	10,83	21,16
mars-06	7,4	57,65		6,76	32,50	8,95
avr-06	98,8	85,2		17,30	63,84	28,69
mai-06	75,2	113,94		18,15	106,96	23,59
juin-06	5,0	125,03		7,65	135,83	7,03
juil-06	0,0	140,98		4,13	192,46	3,03
août-06	0,0	126,99		2,58	151,08	1,56

Tableau 72: L'application du modèle GR2M sur le sous bassin de Sidi Boubekeur.

Données de calage		ETP Turc			ETP Thornthwaite	
Mois	Pluie (mm)	ETP (mm)	Débit (mm)	Débit simulé	ETP (mm)	Débit simulé
sept-93	8,3	90,96	0,59	1,52	84,72	0,81
oct-93	30,1	66,17	1,59	1,34	55,00	0,50
nov-93	43,1	42,84	6,15	1,67	31,18	0,66
déc-93	21,5	30,97	1,30	1,44	17,11	0,57
janv-94	31,2	31,11	1,67	1,82	11,96	1,09
févr-94	35,8	40,77	2,81	2,69	18,48	2,33
mars-94	0,0	58,16	0,00	1,33	37,41	0,69
avr-94	21,1	70,28	0,95	0,94	35,83	0,53
mai-94	2,3	107,44	0,16	0,54	87,41	0,18
juin-94	0,0	122,14	0,00	0,32	124,24	0,06
juil-94	6,7	139,61	0,00	0,20	181,13	0,02
août-94	2,5	130,37	0,10	0,13	171,87	0,01
sept-94	35,2	92,95	5,29	0,13	88,02	0,01
oct-94	43,0	70,38	7,76	0,27	63,06	0,06
nov-94	36,4	44,47	1,63	0,49	30,81	0,15
déc-94	12,9	30,45	0,91	0,42	13,61	0,12
janv-95	23,8	31,11	1,12	0,53	12,78	0,27
févr-95	33,7	41,85	2,43	1,03	20,92	0,93
mars-95	105,7	54,38	9,43	13,93	31,81	13,93
avr-95	12,8	73,22	0,49	5,76	42,23	3,92
mai-95	1,0	108,98	0,01	2,45	93,86	0,99
juin-95	3,0	118,33	0,65	1,23	109,96	0,30
juil-95	0,0	133,40	0,00	0,68	146,55	0,10
août-95	1,0	124,98	0,06	0,40	141,02	0,03
sept-95	33,4	90,76	4,80	0,30	81,3	0,02
oct-95	27,1	72,72	4,23	0,26	72,63	0,02
nov-95	9,9	50,32	0,91	0,18	47,59	0,01
déc-95	58,1	35,26	6,52	0,77	21,28	0,25
janv-96	45,0	42,64	6,35	2,36	29,23	1,30
févr-96	78,4	39,37	19,20	10,86	17,37	8,46
mars-96	44,2	56,32	8,11	10,36	34,71	7,91
avr-96	60,5	72,9	6,71	11,17	41,07	9,13
mai-96	23,0	104,49	3,60	5,16	79,69	3,34
juin-96	7,5	119,94	3,68	2,29	115,69	0,92
juil-96	31,9	135,00	1,55	1,32	154,43	0,36
août-96	2,0	125,17	0,23	0,72	141,8	0,12
sept-96	7,7	93,52	0,41	0,42	90,94	0,04
oct-96	8,1	68,45	0,30	0,26	57,81	0,01
nov-96	7,2	47,12	0,24	0,16	37,83	0,01
déc-96	24,1	38,38	0,70	0,14	26,61	0,01
janv-97	41,8	39,34	0,83	0,39	20,44	0,13
févr-97	2,0	45,37	0,00	0,25	23,05	0,06
mars-97	0,0	56,59	0,11	0,16	31,74	0,02
avr-97	76,5	81,51	8,83	1,44	55,12	1,20
mai-97	14,6	109,48	0,43	0,95	91,13	0,55
juin-97	0,0	122,99	0,00	0,54	126,31	0,17
juil-97	5,2	134	0,23	0,32	148,23	0,06
août-97	42,5	129,72	2,52	0,33	168,42	0,05
sept-97	39,3	96,26	2,35	0,37	100,03	0,05
oct-97	24,7	73,4	1,06	0,31	71,68	0,04
nov-97	58,5	46,02	3,54	1,03	32,04	0,31

Annexe

déc-97	27,6	35,26	2,00	1,30	18,35	0,52
janv-98	20,9	36,66	0,55	1,27	18,74	0,63
févr-98	30,8	43,15	1,57	1,60	22,03	1,17
mars-98	5,8	54,38	0,36	0,95	30,87	0,50
avr-98	25,1	73,22	0,91	0,79	41,17	0,52
mai-98	54,1	100,42	2,87	1,45	68,65	1,48
juin-98	0,0	118,09	0,01	0,78	108,19	0,42
juil-98	0,0	138,56	0,01	0,45	174,42	0,13
août-98	0,0	132,11	0,01	0,27	183,32	0,04
sept-98	0,7	98,78	0,00	0,17	114,09	0,02
oct-98	2,0	67,43	0,28	0,11	54,45	0,01
nov-98	9,9	41,54	0,48	0,07	25,38	0,00
déc-98	23,9	28,84	1,30	0,07	12,09	0,00
janv-99	28,0	33,45	1,67	0,15	14,97	0,05
févr-99	41,8	36,38	2,29	0,76	14,15	0,69
mars-99	36,2	53,8	4,30	1,67	30,35	1,75
avr-99	0,0	77,14	0,00	0,89	49,16	0,51
mai-99	1,6	110,7	0,00	0,51	99,14	0,16
juin-99	1,0	120,83	0,00	0,30	119,33	0,05
juil-99	0,0	135	0,00	0,19	154,43	0,02
août-99	0,0	127,52	0,00	0,12	154,42	0,01
sept-99	47,2	94,46	1,70	0,19	94,7	0,03
oct-99	26,8	73,57	7,48	0,20	75,45	0,03
nov-99	46,0	40,65	2,86	0,52	24,16	0,14
déc-99	78,5	31,23	8,30	5,90	15,09	4,07
janv-00	0,0	27,93	0,00	2,68	9,18	1,45
févr-00	0,0	42,9	0,00	1,34	21,33	0,52
mars-00	5,0	59,42	0,19	0,77	40,04	0,23
avr-00	8,0	76,56	0,53	0,47	46,99	0,11
mai-00	34,8	107,96	1,53	0,43	89,04	0,17
juin-00	0,0	123,61	0,00	0,26	130,89	0,06
juil-00	5,0	135,77	0,14	0,16	158,41	0,02
août-00	0,0	128,04	0,00	0,11	157,42	0,01
sept-00	32,9	94,46	3,06	0,10	94,03	0,01
oct-00	51,8	67,64	10,96	0,36	54,60	0,10
nov-00	38,8	43,87	6,40	0,74	29,53	0,29
déc-00	8,0	36,97	0,51	0,52	23,20	0,16
janv-01	55,8	38,63	6,38	1,90	18,55	1,41
févr-01	44,5	41,04	4,37	3,81	16,26	3,66
mars-01	2,0	60,88	0,00	1,85	39,39	1,11
avr-01	10,5	77,43	1,89	1,06	44,6	0,49
mai-01	10,5	106,12	0,06	0,62	78,99	0,21
juin-01	0,0	127,16	0,00	0,37	147,65	0,07
juil-01	1,0	138,73	0,00	0,23	176,55	0,02
août-01	1,2	130,37	0,00	0,14	173,32	0,01
Données de validation		ETP Turc			ETP Thornthwaite	
Mois	Pluie (mm)	ETP (mm)	Débit (mm)	Débit simulé	ETP (mm)	Débit simulé
sept-01	21,1	97,79		0,10	106,91	0,00
oct-01	16,0	77,34		0,08	88,87	0,00
nov-01	66,8	39,25		0,72	18,48	0,26
déc-01	26,3	33,43		1,13	14,98	0,63
janv-02	1,4	36,15		0,66	16,99	0,27
févr-02	4,0	43,91		0,42	22,01	0,13
mars-02	22,8	57,12		0,37	34,3	0,21
avr-02	51,3	75,67		0,98	44,06	1,08
mai-02	54,5	103,93		2,08	75,84	2,33
juin-02	6,0	127,72		1,10	151,49	0,68

Annexe

juil-02	0,0	134,4		0,61	150,83	0,21
août-02	4,0	125,91		0,36	145,23	0,07
sept-02	0,0	95,37		0,22	97,12	0,02
oct-02	11,5	72,55		0,14	69,76	0,01
nov-02	60,7	45,06		0,52	31,2	0,14
déc-02	6,0	37,78		0,37	23,9	0,08
janv-03	101,3	32		8,39	11,46	6,65
févr-03	62,1	37,3		15,79	13,06	13,60
mars-03	18,5	59,18		7,44	37,02	5,25
avr-03	23,5	75,67		4,11	42,56	2,66
mai-03	21,6	105,04		2,25	77,34	1,27
juin-03	0,0	129,71		1,14	163,2	0,37
juil-03	0,0	141,81		0,63	197,58	0,12
août-03	5,0	128,72		0,37	161,81	0,04
sept-03	10,8	96,26		0,23	100,18	0,01
oct-03	41,2	71,48		0,27	64,57	0,03
nov-03	31,3	44,67		0,34	29,19	0,06
déc-03	42,0	32,23		0,90	14,27	0,44
janv-04	33,3	34,28		1,71	14,85	1,30
févr-04	32,8	44,41		2,46	22,95	2,25
mars-04	8,0	55,5		1,45	31,58	0,97
avr-04	25,7	76,27		1,15	45,50	0,85
mai-04	47,5	96,3		1,48	57,86	1,44
juin-04	22,5	123,4		0,99	129,44	0,74
juil-04	4,0	138,01		0,56	171,34	0,23
août-04	14,8	129,89		0,34	168,96	0,08
sept-04	16,8	98,78		0,22	113,51	0,03
oct-04	29,8	74,73		0,20	78,76	0,02
nov-04	60,1	40,65		0,88	22,84	0,28
déc-04	43,5	30,19		2,38	12,83	1,45
janv-05	6,4	25,17		1,53	6,67	0,88
févr-05	23,6	27,61		1,66	6,44	1,56
mars-05	26,7	56,86		1,89	33,62	2,02
avr-05	11,6	77,14		1,18	46,80	0,91
mai-05	0,0	114,39		0,65	111,18	0,27
juin-05	10,3	125,23		0,39	138,11	0,09
juil-05	0,0	140,3		0,24	186,16	0,03
août-05	0,0	127,69		0,15	155,39	0,01
sept-05	13,5	95,19		0,10	96,21	0,00
oct-05	42,5	73,57		0,17	73,61	0,02
nov-05	78,5	43,87		2,36	28,49	1,10
déc-05	27,2	30,97		2,69	13,47	1,45
janv-06	71,3	29,87		10,35	8,84	9,06
févr-06	27,2	35,75		7,79	10,83	6,94
mars-06	11,5	57,65		3,91	32,50	2,85
avr-06	15,8	85,2		2,19	63,84	1,33
mai-06	47,8	113,94		2,05	106,96	1,42
juin-06	5,0	125,03		1,07	135,83	0,42
juil-06	2,0	140,98		0,60	192,46	0,13
août-06	0,0	126,99		0,35	151,08	0,04

Annexe

Tableau 73: L'application du modèle GR2M sur le bassin versant de l'Oued Saïda.

Données de calage		ETP Turc			ETP Thornthwaite	
Mois	Pluie (mm)	ETP (mm)	Débit (mm)	Débit simulé	ETP (mm)	Débit simulé
sept-93	15,9	90,96	0,59	1,55	84,72	1,03
oct-93	31,4	66,17	1,59	1,07	55,00	0,58
nov-93	41,1	42,84	6,15	1,06	31,18	0,63
déc-93	18,4	30,97	1,30	0,70	17,11	0,43
janv-94	33,1	31,11	1,67	0,93	11,96	0,92
févr-94	36,0	40,77	2,81	1,46	18,48	2,02
mars-94	1,2	58,16	0,00	0,60	37,41	0,59
avr-94	18,9	70,28	0,95	0,35	35,83	0,40
mai-94	4,1	107,44	0,16	0,16	87,41	0,13
juin-94	0,0	122,14	0,00	0,07	124,24	0,04
juil-94	3,8	139,61	0,00	0,04	181,13	0,01
août-94	2,2	130,37	0,10	0,02	171,87	0,00
sept-94	46,4	92,95	5,29	0,05	88,02	0,02
oct-94	56,8	70,38	7,76	0,36	63,06	0,21
nov-94	29,2	44,47	1,63	0,40	30,81	0,22
déc-94	9,8	30,45	0,91	0,23	13,61	0,12
janv-95	29,1	31,11	1,12	0,32	12,78	0,32
févr-95	31,2	41,85	2,43	0,57	20,92	0,84
mars-95	89,7	54,38	9,43	6,42	31,81	8,94
avr-95	18,1	73,22	0,49	2,88	42,23	3,16
mai-95	0,5	108,98	0,01	1,03	93,86	0,74
juin-95	13,3	118,33	0,65	0,43	109,96	0,23
juil-95	0,0	133,40	0,00	0,19	146,55	0,07
août-95	7,7	124,98	0,06	0,09	141,02	0,02
sept-95	29,5	90,76	4,80	0,06	81,3	0,01
oct-95	31,1	72,72	4,23	0,07	72,63	0,02
nov-95	16,5	50,32	0,91	0,05	47,59	0,01
déc-95	64,0	35,26	6,52	0,69	21,28	0,45
janv-96	45,5	42,64	6,35	2,01	29,23	1,71
févr-96	88,0	39,37	19,20	10,75	17,37	10,89
mars-96	69,1	56,32	8,11	14,01	34,71	14,13
avr-96	66,5	72,9	6,71	12,14	41,07	12,43
mai-96	30,8	104,49	3,60	4,78	79,69	4,52
juin-96	32,7	119,94	3,68	2,03	115,69	1,69
juil-96	27,6	135,00	1,55	0,90	154,43	0,55
août-96	7,4	125,17	0,23	0,37	141,8	0,16
sept-96	10,8	93,52	0,41	0,17	90,94	0,05
oct-96	9,2	68,45	0,30	0,08	57,81	0,02
nov-96	6,9	47,12	0,24	0,04	37,83	0,01
déc-96	27,2	38,38	0,70	0,04	26,61	0,01
janv-97	46,4	39,34	0,83	0,27	20,44	0,20
févr-97	2,2	45,37	0,00	0,13	23,05	0,08
mars-97	2,6	56,59	0,11	0,07	31,74	0,03
avr-97	89,5	81,51	8,83	1,79	55,12	2,32
mai-97	15,1	109,48	0,43	0,87	91,13	0,86
juin-97	0,0	122,99	0,00	0,36	126,31	0,23
juil-97	3,0	134	0,23	0,16	148,23	0,07
août-97	50,5	129,72	2,52	0,20	168,42	0,08
sept-97	41,8	96,26	2,35	0,22	100,03	0,07
oct-97	24,0	73,4	1,06	0,16	71,68	0,04
nov-97	58,8	46,02	3,54	0,60	32,04	0,29
déc-97	29,1	35,26	2,00	0,76	18,35	0,51
janv-98	15,6	36,66	0,55	0,55	18,74	0,43

Annexe

févr-98	28,2	43,15	1,57	0,63	22,03	0,75
mars-98	7,6	54,38	0,36	0,33	30,87	0,35
avr-98	19,4	73,22	0,91	0,22	41,17	0,28
mai-98	46,6	100,42	2,87	0,39	68,65	0,72
juin-98	0,5	118,09	0,01	0,17	108,19	0,20
juil-98	0,0	138,56	0,01	0,08	174,42	0,06
août-98	7,4	132,11	0,01	0,04	183,32	0,02
sept-98	3,2	98,78	0,00	0,02	114,09	0,01
oct-98	3,3	67,43	0,28	0,01	54,45	0,00
nov-98	9,7	41,54	0,48	0,00	25,38	0,00
déc-98	17,5	28,84	1,30	0,00	12,09	0,00
janv-99	45,3	33,45	1,67	0,13	14,97	0,14
févr-99	46,7	36,38	2,29	0,98	14,15	1,38
mars-99	50,8	53,8	4,30	2,85	30,35	4,09
avr-99	0,0	77,14	0,00	1,02	49,16	0,96
mai-99	1,1	110,7	0,00	0,42	99,14	0,26
juin-99	0,5	120,83	0,00	0,18	119,33	0,08
juil-99	0,0	135	0,00	0,08	154,43	0,02
août-99	0,0	127,52	0,00	0,04	154,42	0,01
sept-99	37,9	94,46	1,70	0,04	94,7	0,01
oct-99	48,6	73,57	7,48	0,18	75,45	0,08
nov-99	39,4	40,65	2,86	0,36	24,16	0,18
déc-99	102,4	31,23	8,30	8,75	15,09	7,89
janv-00	0,0	27,93	0,00	2,74	9,18	2,28
févr-00	0,0	42,9	0,00	1,01	21,33	0,72
mars-00	4,9	59,42	0,19	0,45	40,04	0,28
avr-00	9,0	76,56	0,53	0,21	46,99	0,12
mai-00	29,0	107,96	1,53	0,15	89,04	0,14
juin-00	0,2	123,61	0,00	0,07	130,89	0,04
juil-00	2,5	135,77	0,14	0,03	158,41	0,01
août-00	0,5	128,04	0,00	0,02	157,42	0,00
sept-00	25,2	94,46	3,06	0,01	94,03	0,00
oct-00	57,6	67,64	10,96	0,18	54,60	0,10
nov-00	48,6	43,87	6,40	0,68	29,53	0,51
déc-00	14,3	36,97	0,51	0,47	23,20	0,34
janv-01	50,3	38,63	6,38	1,42	18,55	1,64
févr-01	47,8	41,04	4,37	2,92	16,26	4,11
mars-01	3,4	60,88	0,00	1,14	39,39	1,19
avr-01	15,0	77,43	1,89	0,57	44,6	0,57
mai-01	11,1	106,12	0,06	0,27	78,99	0,23
juin-01	0,0	127,16	0,00	0,12	147,65	0,07
juil-01	1,1	138,73	0,00	0,06	176,55	0,02
août-01	2,6	130,37	0,00	0,03	173,32	0,01
Données de validation		ETP Turc			ETP Thornthwaite	
Mois	Pluie (mm)	ETP (mm)	Débit (mm)	Débit simulé	ETP (mm)	Débit simulé
sept-01	21,1	97,79		0,02	106,91	0,00
oct-01	16,0	77,34		0,01	88,87	0,00
nov-01	66,8	39,25		0,33	18,48	0,19
déc-01	26,3	33,43		0,35	14,98	0,28
janv-02	1,4	36,15		0,16	16,99	0,11
févr-02	4,0	43,91		0,09	22,01	0,07
mars-02	22,8	57,12		0,09	34,3	0,14
avr-02	51,3	75,67		0,29	44,06	0,60
mai-02	54,5	103,93		1,27	75,84	2,22
juin-02	6,0	127,72		0,51	151,49	0,57
juil-02	0,0	134,4		0,22	150,83	0,16
août-02	4,0	125,91		0,10	145,23	0,05

Annexe

sept-02	0,0	95,37		0,05	97,12	0,02
oct-02	11,5	72,55		0,02	69,76	0,00
nov-02	60,7	45,06		0,17	31,2	0,09
déc-02	6,0	37,78		0,13	23,9	0,06
janv-03	101,3	32		6,25	11,46	6,58
févr-03	62,1	37,3		11,25	13,06	12,57
mars-03	18,5	59,18		4,88	37,02	4,91
avr-03	23,5	75,67		2,48	42,56	2,54
mai-03	21,6	105,04		1,21	77,34	1,25
juin-03	0,0	129,71		0,49	163,2	0,34
juil-03	0,0	141,81		0,21	197,58	0,10
août-03	5,0	128,72		0,10	161,81	0,03
sept-03	10,8	96,26		0,05	100,18	0,01
oct-03	41,2	71,48		0,17	64,57	0,07
nov-03	31,3	44,67		0,30	29,19	0,16
déc-03	42,0	32,23		1,65	14,27	1,57
janv-04	33,3	34,28		1,98	14,85	2,26
févr-04	32,8	44,41		2,27	22,95	3,02
mars-04	8,0	55,5		1,00	31,58	1,09
avr-04	25,7	76,27		0,66	45,50	0,87
mai-04	47,5	96,3		2,22	57,86	3,59
juin-04	22,5	123,4		1,01	129,44	1,24
juil-04	4,0	138,01		0,41	171,34	0,33
août-04	14,8	129,89		0,18	168,96	0,10
sept-04	16,8	98,78		0,10	113,51	0,03
oct-04	29,8	74,73		0,08	78,76	0,02
nov-04	60,1	40,65		0,34	22,84	0,17
déc-04	43,5	30,19		1,78	12,83	1,66
janv-05	6,4	25,17		1,06	6,67	1,09
févr-05	23,6	27,61		1,19	6,44	1,91
mars-05	26,7	56,86		1,42	33,62	2,45
avr-05	11,6	77,14		0,67	46,80	0,89
mai-05	0,0	114,39		0,28	111,18	0,24
juin-05	10,3	125,23		0,13	138,11	0,07
juil-05	0,0	140,3		0,06	186,16	0,02
août-05	0,0	127,69		0,03	155,39	0,01
sept-05	13,5	95,19		0,02	96,21	0,00
oct-05	42,5	73,57		0,06	73,61	0,03
nov-05	78,5	43,87		1,24	28,49	0,82
déc-05	27,2	30,97		1,08	13,47	0,82
janv-06	71,3	29,87		7,08	8,84	8,39
févr-06	27,2	35,75		5,75	10,83	7,23
mars-06	11,5	57,65		2,30	32,50	2,53
avr-06	15,8	85,2		3,14	63,84	4,47
mai-06	47,8	113,94		3,50	106,96	4,29
juin-06	5,0	125,03		1,23	135,83	0,97
juil-06	2,0	140,98		0,49	192,46	0,26
août-06	0,0	126,99		0,21	151,08	0,08

Photos de morphologie karstique de la région de Saïda (K.DJIDI, 2015)



Epikarst Vieux Saïda



Gouffre environs d'Aïn Zerga