

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen
Faculté de TECHNOLOGIE
Département d'HYDRAULIQUE



THESE

Présentée pour l'obtention du grade de **DOCTEUR EN SCIENCES**

En : Hydraulique

Spécialité : Hydraulique

ZENNAKI Ahmed

**Fluctuation pluviométrique et son impact sur l'écoulement dans une zone
semi aride.**

Cas du bassin versant de l'oued Boukiou (NW algérien)

Soutenue publiquement, le / / 2022, devant le jury composé de :

M. CHIBOUB FELLAH Abdelghani	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mme. BABA-HAMED Kamila	Professeur	Univ. Tlemcen	Directrice de thèse
M. BOUANANI Abderrazak	Professeur	Univ. Tlemcen	Co-Directeur de thèse
Mme. BAGHLI Naoual	M.C.A.	Univ. Ain Temouchent	Examinatrice
M. ROUISSAT Boucherit	M.C.A.	E.S.A.Tlemcen	Examineur
M. YLES Fouad	M.C.A.	Univ. Saida	Examineur

2021-2022

REMERCIEMENTS

Dans un premier temps, je remercie le bon dieu qui m'a aidé à terminer ce travail.

Je tiens à remercier en premier lieu, ma directrice de thèse madame **BABA-HAMED Kamila** et mon co-directeur de thèse monsieur **BOUANANI Abderrazak** auprès de qui, j'ai énormément appris des discussions enrichissantes, des larges connaissances scientifiques et leur inestimable savoir faire,

Je vous remercie pour votre disponibilité, vos conseils avisés, vos encouragements intarissables. J'ai pu apprécier tout au long de mon parcours universitaire leur patience inébranlable avec moi.

Ce travail est un des résultats de vos encouragements. Merci Madame, et Monsieur vous m'avez aidé à trouver et démêler un fil conducteur.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude au professeur **BENSALAH Mustapha**, directeur du laboratoire de recherche 25 de m'avoir accueilli au sein de son laboratoire. Je le remercie pour ses remarquables informations et prestigieuses instructions.

Je suis sensible à l'honneur que m'a accordé le professeur **CHIBOUB FELLAH Abdelghani** de l'Université de Tlemcen en acceptant de présider le jury de ce travail.

Mes sincères remerciements vont également aux examinateurs, qui ont accepté de juger ce travail à savoir : Madame **BAGHLI Naoual** de l'Université de Ain Temouchent, Monsieur **ROUISSAT Boucherit** directeur de l'Ecole des Sciences Appliquées de Tlemcen et Monsieur **YLES Fouad** de l'université de Saida. Je les remercie pour leur lecture attentive de ma thèse ainsi que pour les remarques qu'ils m'adresseront lors de ma soutenance pour améliorer mon travail.

Merci à tous les acteurs de l'eau, de la **D.H.W.** de Tlemcen, de l'**A.N.R.H** et de l'**O.N.M**, qui m'ont aidé à acquérir des informations et ont mis à ma disposition une banque de données inestimable.

Les derniers remerciements et non les moindres vont à mon entourage, famille et amis, pour leur soutien sans faille et leurs encouragements constants.

REMERCIEMENTS

La palme des remerciements revient à ma mère et mon père sans qui, il ne m'aurait pas été possible de mener ce travail à bien. De tout cœur, merci pour votre sourire, votre amour, vos encouragements, votre écoute, votre patience à chaque épreuve.

Je réserve les derniers mots de conclusion pour une pensée affectueuse à mes frères, qui ont toujours été prêt de moi et n'ont pas cessé eux aussi de m'encourager à terminer cette thèse.

Je remercie évidemment mes amis(es) du laboratoire, **GHERISSI Radia**, **OTMANE Abdelkader** et **KAZI TANI Hycham** pour les moments inoubliables passés ensemble. Que l'avenir nous en procure encore en abondance.

Merci finalement à tous ceux que je n'ai pas nommé mais qui savent tout ce que je leur dois

DEDICACES

Je dédie cette thèse

*A mes très chers **Parents** toujours présents à me donner un magnifique modèle de labeur et de persévérance.*

J'espère qu'ils trouveront dans ce travail tout mon Amour et toute ma reconnaissance.

*A mes chers frères: **Othmane, Yassine, leur conjointes** et **Younes**.*

A mes chers amis

*A la famille **ZENNAKI ET BENSNAËNE***

A tous ceux que je porte dans mon cœur

*A mon adorable femme pour son véritable soutien le long de ce magnifique parcours, mes beaux parents **Abdelmadjid** et **Nawel** et mes beaux frères et sœurs **Charaf, Amel** et **Nadia**.*

ZENNAKI Ahmed

Résumé

La modélisation hydrologique en particulier les modèles pluie-débit sont devenus des outils indispensables permettant la prise de décision pour toutes les études et les recherches dans le domaine de l'estimation et de la gestion des ressources en eau. L'approche envisagée dans ce travail consiste à utiliser des indices climatiques et des modèles hydrologiques basés sur des séries de données pluviométriques et hydrométriques mesurées au niveau de la station de djebel Chouachi afin de comprendre le fonctionnement du bassin versant de l'oued Boukiou occupant une superficie de 117km², situé au Nord ouest algérien dans le bassin de la Tafna et permettant ainsi de simuler sa réaction face à des sollicitations principalement pluviométriques.

Pour ce faire, nous avons appliqué trois modèles hydrologiques, Le GR (Génie rural), le Gardénia (Modèle global à réservoirs pour la simulation de débits et des niveaux aquifères) au pas de temps annuel, mensuel et journalier et le SWAT (Soil and Water Assessment Tool) aux pas de temps annuel et mensuel afin de les tester et de comparer leur performance à simuler les phénomènes hydrologiques qui caractérisent le bassin de Boukiou.

Les trois modèles semblent bien adaptés aux données de l'oued Boukiou, leur optimisation a été obtenue pour des valeurs élevées des critères de Nash (supérieur à 80%) et des coefficients de corrélation (plus de 90% pour les modèles GR et GARDENIA et 70% pour le SWAT).

Toutefois, le modèle à réservoirs Gardénia paraît plus performant que les deux autres pour le bassin versant de l'oued Boukiou. En effet, en dépit du nombre important de paramètres de calage, il demeure le plus facile à caler.

Mots clés : Bassin Versant - Modélisation Pluie-Débit - Oued Boukiou – GR – Gardénia
- SWAT – Simulation - Préviation.

ملخص

أصبحت النمذجة الهيدرولوجية ، ولا سيما نماذج تدفق الأمطار ، أدوات أساسية لصنع القرار لجميع الدراسات والبحوث في مجال تقدير وإدارة الموارد المائية. تتمثل المقاربة المتوخاة في هذا العمل في استخدام المؤشرات المناخية والنماذج الهيدرولوجية القائمة على سلسلة من بيانات قياس الرطوبة والهيدرومتر المقاسة على مستوى محطة جبل شواشي من أجل فهم طريقة عمل مستجمعات المياه في وادي بوكيو الذي يشغل مساحة 117 كم² يقع في شمال غرب الجزائر في حوض تافنة.

وبالتالي تسمح لمحاكاة رد فعلها على استجابات هطول الأمطار.

للفيما بذلك ، قمنا بتطبيق ثلاثة نماذج هيدرولوجية ، GR (الهندسة الزراعية) ، Gardenia (النموذج العالمي مع الخزانات لمحاكاة التدفقات ومستويات الخزان الجوفي) في خطوات زمنية سنوية وشهرية ويومية و SWAT (أداة تقييم التربة والمياه) على فترات زمنية سنوية وشهرية لاختبارها ومقارنة أدائها في محاكاة الظواهر الهيدرولوجية التي تميز حوض بوكيو.

تبدو النماذج الثلاثة متكيفة جيدًا مع بيانات وادي بوكيو ، وقد تم الحصول على تحسينها للقيم العالية لمعايير ناش (أكبر من 80%) ومعاملات الارتباط (أكثر من 90% لنماذج GR و GARDENIA و 70% لـ SWAT).

ومع ذلك ، فإن نموذج خزان جاردينيا يبدو أكثر كفاءة من النموذجين الآخرين لمستجمعات المياه في وادي بوكيو. في الواقع ، على الرغم من العدد الكبير من معاملات المعايرة ، يبقى هذا الأخير الأسهل معايرة.

الكلمات الرئيسية : مستجمعات المياه - نمذجة المطر - التدفق - وادي بوكيو - GR - SWAT - Gardénia - محاكاة - التنبؤ .

Abstract

Hydrological modeling, in particular rain-flow models, has become essential tools for decision-making for all studies and research in the field of water resources estimation and management. The approach envisaged in this work consists in using climatic indices and hydrological models based on series of pluviometric and hydrometric data measured at the level of the Jebel Chouachi station in order to understand the functioning of the watershed of the Boukiou wadi occupying a area of 117km², located in the North West of Algeria in the Tafna basin and thus allowing to simulate its reaction to mainly rainfall solicitations.

To do this, we applied three hydrological models, the GR (Agricultural engineering), the Gardenia (Global model with reservoirs for the simulation of flows and aquifer levels) at annual, monthly and daily time steps and the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) at annual and monthly time steps in order to test them and compare their performance in simulating the hydrological phenomena that characterize the Boukiou basin.

The three models seem well adapted to the data of the Boukiou wadi, their optimization was obtained for high values of the Nash criteria (greater than 80%) and correlation coefficients (more than 90% for the GR and GARDENIA models and 70% for SWAT).

However, the Gardenia reservoir model seems more efficient than the other two for the watershed of the Boukiou wadi. Indeed, despite the large number of calibration parameters, it remains the easiest to calibrate.

Keywords: Watershed - Rainfall-runoff modeling - Wadi Boukiou – GR – Gardenia – SWAT – Simulation - Forecast.

LISTE DES MATIERES

REMERCIEMENTS

DEDICACES

Résumé

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE..... 1

CHAPITRE1 : SYNTHESES BIBLIOGRAPHIQUES SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

I Introduction	6
I.1 Climat.....	6
I.1.1 Changement climatique	7
I.2 Le cycle de l'eau	11
I.2.1 La température	11
I.2.2 L'Evaporation	11
I.2.3 Les précipitations	11
I.2.4 L'évapotranspiration	12
I.3 Variabilité pluviométrique	13
I.3.1 Tendances pluviométriques	13
I.3.2 Le climat de l'Algérie.....	13
I.4 Conclusion.....	18

CHAPITRE 2:DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

II Cadre régional	20
II.1 Bassin de la Tafna.....	20
II.1.1 Situation géographique	20
II.1.2 Délimitation du bassin de la Tafna	21
II.1.3 Les sous bassins de la Tafna	21
II.1.4 Géographie du bassin de la Tafna	22
II.1.5 Hydrographie	23
II.2 Description du bassin versant de l'oued boukiou.....	24
II.2.1 Situation géographique	24

LISTE DES MATIERES

II.2.2	Étude des caractéristiques morphométriques.....	26
II.2.3	Caractéristiques géométriques	26
II.2.4	Caractéristiques de la forme.....	26
II.2.5	Caractéristiques du relief	27
II.2.6	Hypsométrie.....	28
II.2.7	Indices de pente.....	31
II.2.8	Classification du bassin versant de l'oued Boukiou	32
II.2.9	Caractéristiques du réseau hydrographique	33
II.2.10	Occupation du sol.....	38
II.3	Géologie et hydrogéologie.....	39
II.3.1	Géologie.....	39
II.3.2	Hydrogéologie du secteur d'étude	45
II.4	Conclusion	47
CHAPITRE 3:ETUDE HYDROCLIMATOLOGIQUE		
III	Introduction	49
III.1.1	Variabilité interannuelle des précipitations.....	50
III.1.2	Etude des précipitations mensuelles.....	51
III.1.3	Etude des précipitations saisonnières	52
III.1.4	Etude des précipitations journalières.....	53
III.2	Etude des Températures.....	54
III.2.1	Température moyenne annuelle	54
III.2.2	Températures Moyennes Mensuelles	54
III.3	Étude du climat.....	55
III.3.1	Diagramme pluviothermique (methode de gausse et bagnouls, 1952)	55
III.3.2	Méthode d'Euverte	56
III.4	Indices climatiques	57
III.4.1	Indice d'aridité de De. Martonne	57
III.4.2	Indice de Moral	59
III.5	Climagrammes.....	60
III.5.1	Climagramme D'emberger.....	60
III.5.2	Evapotranspiration potentielle et déficit d'écoulement (ETR)	61

LISTE DES MATIERES

III.5.3	Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP).....	61
III.5.4	Méthode De Wundt	64
III.5.5	Calcul de la réserve facilement utilisable (R.F.U)	66
III.5.6	Estimation Du Ruissellement	67
III.5.7	Estimation De L'infiltration.....	67
III.6	Etude des écoulements.....	68
III.6.1	Variation annuelle des lames d'eau écoulées	68
III.6.2	Variation mensuelle des lames d'eau écoulées	68
III.6.3	Variation saisonnière des lames d'eau écoulées	71
III.6.4	Variation journalières des débits moyens journaliers	72
III.7	Etude statistique des données hydropluviométriques.....	72
III.7.1	Ajustement des données de précipitations à une loi statistique	74
III.7.2	Ajustement par la loi normale	75
III.7.3	Ajustement des données de lames d'eau écoulées a une loi statistique	77
III.8	Conclusion.....	79

CHAPITRE 4: VARIABILITE CLIMATIQUE

IV. Introduction	82
IV.1 Le logiciel de calcul statistique KHRONOSTAT	82
IV.2 Identifications des tests statistiques	82
IV.2.1 Test de A.N PETTITT	83
IV.2.2 Test de segmentation de P. HUBERT(1989).....	83
IV.2.3 Méthode Bayésienne De A.F.S LEE et S.M. HEGHINIAN.....	83
IV.2.4. Statistique u de Buishand.....	83
IV.3 Application des tests statistiques	84
IV.3.1 Test de PETTITT	84
IV.3.2 Test de segmentation de P. HUBERT.....	95
IV.3.3 Test de la méthode bayésienne de A.F.S. LEE et S.M. HEGHINIAN	100
IV.3.4 Test de BUIHAND et ellipse de BOIS	105
IV.4 Conclusion.....	112

LISTE DES MATIERES
CHAPITRE 5: MODELISATION HYDROLOGIQUE

V Introduction	115
V.1 Modélisation hydrologique	116
V.1.1 Utilisation des Systèmes d'Information Géographiques (S.I.G)	117
V.1.2 Description des trois modèles utilisés.....	118
V.2.1 Modèle GR	118
V.2.2 Modèle Gardénia	121
V.2.3 Modèle SWAT	123
V.5 Application de la modélisation sur l'oued Boukiou	146
V.5.1 Calage et validation des deux modèles GR et GARDENIA	146
V.6 Résultats et discussions	147

CONCLUSION GENERALE

RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANEXES

LISTE DES FIGURES

Figure 1.Changement relatif d'intensité des percentiles de précipitations zonalement agrégées	12
Figure 2.Carte de régions climatiques (compilé par Belgaid, 2014).	14
Figure 3.Variation des températures max et min plus les précipitations de la station du port d'Alger en Janvier 2017.	14
Figure 4. Variation des températures max et min plus les précipitations de la station de Chleff du mois de Janvier 2017.	15
Figure 5. Variation des températures max et min plus les précipitations de la station de Djelfa.....	16
Figure 6. Variation des températures max et min plus les précipitations de la station de Ghardaïa	16
Figure 7. Variation des températures max et min plus les précipitations de la station d'Adrar	17
Figure 8.Variation des températures max et min plus les précipitations de la station de Tamanrasset	17
Figure 9.Bassins versants de l'Algérie	20
Figure 10. Délimitation du bassin versant de la Tafna (Zettam, 2018)	21
Figure 11. Sous bassins de la Tafna (Zettam, 2018)	22
Figure 12. Cadre géographique de la Tafna (Zettam, 2018)	23
Figure 13. Réseau hydrographique de la Tafna (Zettam, 2018).....	24
Figure 14. Situation du bassin versant de l'Oued Boukiou	25
Figure 15.Carte du réseau hydrographique du bassin d'oued Boukiou.....	25
Figure 16. Courbe hypsométrique du bassin versant du Boukiou.	29
Figure 17. Histogramme des fréquences altimétriques du bassin versant du Boukiou	29
Figure 18. Carte des altitudes du bassin versant de l'oued Boukiou.....	30
Figure 19.Représentation graphique du rapport de confluence	34
Figure 20. Représentation graphique du rapport des longueurs.	35
Figure 21. Profil en long de l'oued Boukiou.....	37
Figure 22. Profil croisé de l'oued Boukiou.	38
Figure 23. Répartition de la couverture terrestre du bassin versant de l'oued Boukiou.....	39
Figure 24. Schéma de la chaîne alpine de l'Algérie Nord occidentale (Ameur, 1988).....	40
Figure 25. Extrait de la carte Géologique du Nord d'Algérie 1/500 000	41
Figure 26. Carte géologique du bassin versant d'oued Boukiou. Modifié ZENNAKIA 2020	42
Figure 27. Situation géologique du Secteur étudié (Ameur, 1988).....	43
Figure 28.Coupe réalisée au niveau de l'Oued Boukiou.....	44
Figure 29.Log synthétique du secteur d'étude (Kébir & Miri, 1992).....	45
Figure 30.Coupe à travers de la plaine alluviale de l'Oued Boukiou (Zennaki, 2016).....	47
Figure 31.Situation des stations de mesure hydrométéorologiques.	50
Figure 32.Variations interannuelles des précipitations à la station de Djebel Chouachi (1974/75- 2015/16).	50
Figure 33.Variations des précipitations moyennes mensuelles (1974-1975/2015-2016)	51
Figure 34.Variation des précipitations moyennes mensuelles, minimales, maximales et moyennes des extrêmes (1974-75-2015/16).	52
Figure 35.Variation des précipitations moyennes saisonnières (1974-75/2015-16)	53
Figure 36.Variation des précipitations moyennes journalières (1974-75-2015/16).....	53
Figure 37.Variation des températures moyennes annuelles (1974/75-2015/16).	54
Figure 38.Variation des températures moyennes mensuelles (1974-1975-2015/16).	55
Figure 39.Diagramme pluviothermique de Gaussen et Bagnouls dans l'oued Boukiou (1974/1975-2015/2016). 56	
Figure 40.Abaque de De. Martonne.	58
Figure 41.Climagramme d'Emberger.....	61
Figure 42. Abaque de Thornthwaite	63

LISTE DES FIGURES

Figure 43.Détermination du déficit d'écoulement (Abaque de Wundt).....	64
Figure 44.Détermination du déficit d'écoulement (Abaque de Verdeil).....	65
Figure 45.Variation interannuelle des lames d'eau écoulées (1974-75/2015-16).....	68
Figure 46.Valeurs des lames d'eau moyennes mensuelles, minimales, maximales et moyennes des extrêmes....	69
Figure 47.Variation des lames d'eau écoulées mensuelles minimales,.....	70
Figure 48.Variation mensuelle des précipitations et des lames d'eau écoulées.....	70
Figure 49.Variation du coefficient moyen mensuel de l'écoulement (1974-75-2015/16).....	71
Figure 50.Variation des lames d'eau saisonnières (1974-75-2015-16).....	72
Figure 51.Variation des débits moyens journaliers (1974/75-2015/16).....	72
Figure 52. Ajustement graphique des précipitations annuelles à la loi de distribution log normale.....	75
Figure 53.Période de retour des précipitations annuelles par la loi log normale.....	77
Figure 54.Ajustement graphique des lames d'eau écoulées annuelles à la loi de distribution log normale.....	78
Figure 55.Période de retour des lames d'eau écoulées annuelles par la loi log normale.....	79
Figure 56.Evolution de la variable U du test de Pettitt des précipitations annuelles.....	84
Figure 57. Evolution de la variable U du test de PETTITT des précipitations au cours des Périodes humide et sèche.....	85
Figure 58.Evolution de la variable U du test de PETTITT des précipitations saisonnières.....	85
Figure 59.Evolution de la variable U du test de PETTITT des précipitations mensuelles.....	87
Figure 60.Evolution de la variable U du test de PETTITT des températures annuelles.....	88
Figure 61.Evolution de la variable U du test de PETTITT des températures au cours des périodes humide et sèche.....	88
Figure 62.Evolution de la variable U du test de PETTITT des Températures saisonnières.....	89
Figure 63.Evolution de la variable U du test de PETTITT des températures mensuelles.....	90
Figure 65.Evolution de la variable U du test de PETTITT des lames d'eau écoulées annuelles.....	92
Figure 64.Evolution de la variable U du test de PETTITT des lames d'eau écoulées au cours des Périodes humide et sèche.....	92
Figure 66.Evolution de la variable U du test de PETTITT des lames d'eau écoulées saisonnières.....	93
Figure 67.Evolution de la variable U du test de PETTITT des lames d'eau écoulées mensuelles.....	94
Figure 68.Procédure de Lee et Heghinian-Densité de Probabilité à posteriori de la position d'un changement des précipitations annuelles.....	100
Figure 69.Procédure de Lee et Heghinian-Densité de Probabilité à posteriori de la position d'un changement au cours des périodes humide et sèche.....	101
Figure 70.Procédure de Lee et Heghinian-Densité de Probabilité à posteriori de.....	101
Figure 71.Procédure de Lee et Heghinian-Densité de Probabilité à posteriori de la position d'un changement des précipitations mensuelles.....	102
Figure 73.Procédure de Lee et Heghinian-Densité de Probabilité à posteriori de.....	104
Figure 72.Procédure de Lee et Heghinian-Densité de Probabilité à posteriori de la position d'un changement des températures au cours de la période humide.....	103
Figure 74.Procédure de Lee et Heghinian-Densité de Probabilité à posteriori de la position d'un changement des lames d'eau écoulées annuelles.....	105
Figure 75.Ellipse de contrôle des précipitations annuelles.....	106
Figure 76.Ellipses de contrôle au cours des périodes humide et sèche.....	106
Figure 77.Ellipses de contrôle des précipitations saisonnières.....	106
Figure 78 Ellipses de contrôle des précipitations mensuelles.....	108
Figure 80.Ellipses de contrôle des températures saisonnières.....	109
Figure 79.Ellipses de contrôle des Températures en période humide.....	108

LISTE DES FIGURES

Figure 81. Ellipses de contrôle des températures mensuelles	110
Figure 82. Ellipses de contrôle des lames d'eau écoulées annuelles.....	111
Figure 83. Ellipses de contrôle des lames d'eau au cours de l'Hiver.....	111
Figure 84. Structure du modèle GR2M (Perrin et al., 2007).....	119
Figure 85. Schéma de la structure du modèle GR4J.....	121
Figure 86. Organigramme montrant les étapes de simulation de Gardénia.....	123
Figure 87. Principe de discrétisation des Unités de Réponse Hydrologiques (URH).....	128
Figure 88. Méthodologie générale de l'utilisation du modèle SWAT	129
Figure 89. Interface de l'extension ArcSWAT, 2012.....	130
Figure 90. Délimitation des sous-bassins du bassin versant de l'oued Boukiou.....	133
Figure 91. Interface d'addition des caractéristiques des sols dans la base de données SWAT	135
Figure 92. Carte des classes de pente	135
Figure 93. Interface de SWAT CUP 2012.....	138
Figure 94. Effet du contour, du terrassement et de la gestion des résidus sur le numéro de courbe (CN) (Arabi, et al., 2008).....	144
Figure 95. Calage du modèle GR1A (Thorntwaite)	149
Figure 96. Corrélation entre débit observé et débit simulé (Thorntwaite)	149
Figure 97. Calage du modèle GR1A (Turc)	149
Figure 98. Corrélation entre débit observé et débit simulé (Turc).	149
Figure 99. Validation du modèle GR1A.....	149
Figure 100. Validation du modèle GR1A(Turc)	149
Figure 101. Calage du modèle GR2M (Thorntwaite).....	152
Figure 102. Corrélation entre débit observé et débit simulé (Thorntwaite)	152
Figure 103. Calage du modèle GR2M (Turc)	152
Figure 104. Corrélation entre débit observé et débit simulé. (Turc)	152
Figure 105. Validation du modèle GR2M.....	152
Figure 106. Validation du modèle GR2M (Turc).....	152
Figure 107. Visualisation de la qualité du calage et de la validation	154
Figure 108. Corrélation entre débit observé et débit simulé.....	154
Figure 109. Résultat de la validation du modèle GR4J sur les données journalières.....	154
Figure 110. Visualisation de la qualité du calage et de la validation	155
Figure 111. Corrélation entre débit observé et débit simulé.....	155
Figure 112. Résultat de la validation du modèle GR4J sur les données journalières.....	155
Figure 113. Visualisation de la qualité du calage et de la validation	156
Figure 114. Corrélation entre débit observé et débit simulé.....	156
Figure 115. Résultat de la validation du modèle GR4J sur les données journalières.....	156
Figure 116. Visualisation de la qualité du calage et de la validation	157
Figure 117. Corrélation entre débit observé et débit simulé.....	157
Figure 118. Résultat de la validation du modèle GR4J sur les données journalières.....	157
Figure 119. Visualisation du calage au pas de temps annuel (Thorntwaite)	158
Figure 120. Visualisation de la validation au pas de temps annuel (Thorntwaite).....	159
Figure 121. Visualisation du calage au pas de temps annuel (Turc)	160
Figure 122. Visualisation de la validation au pas de temps annuel (Turc).....	160
Figure 123. Visualisation du calage au pas de temps mensuel (Thorntwaite)	161
Figure 124. Visualisation de la validation au pas de temps mensuel (Thorntwaite).....	162
Figure 125. Visualisation du calage au pas de temps mensuel (Turc)	163

LISTE DES FIGURES

Figure 126. Visualisation de la validation au pas de temps mensuel (Turc)	163
Figure 127. Résultats du calage (a) et validation (b) sur les données journaliers (1974/1976).....	165
Figure 128. Résultats du calage (a) et validation (b) sur les données journaliers (2009/2011).....	165
Figure 129. Résultats du calage (a) et validation (b) sur les données journaliers (1994/1996).....	166
Figure 130. Résultats du calage (a) et validation (b) sur les données journaliers (1989/1991).....	166
Figure 131. Hydrogramme des débits mensuels observés et simulés durant la phase de calibration	169
Figure 132. Corrélation entre les débits mensuels observés et simulés durant la phase de calibration (2005-2014)	169
Figure 133. Hydrogramme des débits mensuels observés et simulés durant la phase de validation (2005-2014)	170
Figure 134. Corrélation entre les débits mensuels observés et simulés durant la phase de la Validation (2005- 2014)	170
Figure 135. Bilan hydrique généré par le modèle SWAT durant toute la période d'étude	173
Figure 136. Classement des paramètres utilisés selon leurs degrés de sensibilité à l'aide de la valeur P.....	174
Figure 137. Le moyen annuel du bilan hydrique en pourcentage par rapport aux précipitations pour les années de calibration.....	174
Figure 138. Le moyen annuel du bilan hydrique en pourcentage par rapport aux précipitations pour les années de validation.....	175

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Formes caractéristiques du bassin versant de l'oued Boukiou	27
Tableau 2. Répartition hypsométrique du bassin versant du Boukiou	28
Tableau 3. Calcul de l'altitude moyenne du bassin versant de l'oued Boukiou	31
Tableau 4. Altitudes caractéristiques du bassin versant de l'oued Boukiou.....	31
Tableau 5. Classification des reliefs selon les Ig et Ds par l'O.R.S.T.O.M	32
Tableau 6. Valeurs des indices de pente et types de relief du bassin versant de Boukiou.....	33
Tableau 7. Classification des bassins versants en fonction de leur superficie.....	33
Tableau 8. Caractéristiques du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Boukiou	33
Tableau 9. Calcul du rapport de confluence du bassin versant de l'oued Boukiou	34
Tableau 10. Calcul du rapport des longueurs du bassin de l'oued Boukiou (Méthode analytique).....	35
Tableau 11. Distinction hydrogéologique des formations d'oued Boukiou	46
Tableau 12. Description des stations hydrométéorologiques de la zone d'étude.....	49
Tableau 13. Valeurs moyennes mensuelles des précipitations (1974-75-2015/16).....	51
Tableau 14. Valeurs des précipitations moyennes mensuelles, minimales, maximales	51
Tableau 15. Répartition des précipitations saisonnières.	52
Tableau 16. Températures moyennes mensuelles des températures de la station de Zenata.....	54
Tableau 17. Précipitations et températures moyennes mensuelles Zenata	55
Tableau 18. Répartition des mois selon la méthode d'Euverte	56
Tableau 19. Classification du climat suivant l'indice d'aridité de De. Martonne.	57
Tableau 20. Valeurs des indices d'aridité mensuel de De. Martonne	58
Tableau 21. Calcul d'indice de Kerner.	59
Tableau 22. Calcul des indices mensuels de Moral	59
Tableau 23. Types de mois indiqués par Moral	60
Tableau 24. Poids affecté à chaque type de mois	60
Tableau 25. Indice d'Emberger	60
Tableau 26. Calcul et correction des valeurs de l'ETP à la station Djebel Chouachi.....	62
Tableau 27. Calcul d'ETR par la méthode de Turc	63
Tableau 28. Valeur du déficit et du quotient d'écoulement (Wundt).....	64
Tableau 29. Valeur du déficit d'écoulement selon la méthode de P. Verdeil	65
Tableau 30. Valeurs de C-F (%) en fonction de la nature du sol.	66
Tableau 31. Eléments du bilan hydrologique calculés (mm) pour la station de Dj Chouachi	66
Tableau 32. Valeur du ruissellement (Tixeront – Berkaloff)	67
Tableau 33. Valeurs de l'infiltration selon les différentes méthodes	67
Tableau 34. Valeurs moyennes mensuelles de la lame d'eau écoulée.	68
Tableau 35. Variation des lames d'eau écoulées mensuelles minimales, moyennes et maximales.....	69
Tableau 36. Répartition des lames d'eau écoulées saisonnières.	71
Tableau 37. Paramètres de position des précipitations de la station de Djebel Chouachi	74
Tableau 38. Résultats du χ^2	76
Tableau 39. Calcul des précipitations pour une période de récurrence donnée.....	76
Tableau 40. Paramètres de distribution des lames d'eau écoulées de la station de Djebel Chouachi.....	77
Tableau 41. Paramètres de position pour la loi log normale de la station de Djebel Chouachi.....	77
Tableau 42. Résultats du X^2	78

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 43. Calcul des lames d'eau écoulées pour une période de récurrence donnée.....	79
Tableau 44. Evolution de la variable U du test de PETTITT des Précipitations.....	87
Tableau 45. Evolution de la variable U du test de PETTITT des températures.....	91
Tableau 46. Evolution de la variable U du test de PETTITT des lames d'eau écoulées.....	95
Tableau 47. Résultat de la segmentation d'Hubert des Précipitations.....	96
Tableau 48. Résultat de segmentation d'Hubert des Températures.....	97
Tableau 49. Résultats de la segmentation d'Hubert des lames d'eau écoulées.....	99
Tableau 50. Résultat de la méthode bayésienne et Heghinian des précipitations.....	103
Tableau 51. Résultat de la méthode bayésienne et Heghinian des températures.....	104
Tableau 52. Résultat de la méthode bayésienne et Heghinian des lames d'eau écoulées.....	105
Tableau 53. Résultat du Test de BUISHAND et l'ellipse de BOIS des précipitations.....	108
Tableau 54. Résultat du Test de BUISHAND et l'ellipse de BOIS des températures.....	110
Tableau 55. Résultat du Test de BUISHAND et l'ellipse de BOIS.....	112
Tableau 56. Valeurs des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants (Andreassian et al., 2007).	119
Tableau 57. Valeurs des paramètres du modèle GR4J obtenues sur un large échantillon de bassins versants.....	120
Tableau 58. Paramètres requis par le modèle SWAT pour les caractéristiques des sols.....	132
Tableau 59. Table de correspondance entre les classes d'occupation du sol de la zone d'étude et la base de données SWAT.....	134
Tableau 60. Classes de sols intégrées dans la base de données SWAT.....	134
Tableau 61. Paramètres de calage qui influent les débits (Arnold et al., 2012; modifié).....	139
Tableau 62. Critères d'évaluation de la performance du modèle recommandés pour un pas de temps mensuel (Moriassi et al., 2007).....	142
Tableau 63. Valeurs de facteur P pour les contours, les cultures en bandes et les terrasses parallèles (Adapté depuis Wischmeier & Smith, 1978, in Arabi et al., 2008).....	144
Tableau 64. Justificatif du choix des modèles.....	148
Tableau 65. Résultats obtenus des phases de calage et validation par le GR1A.....	148
Tableau 66. Résultats obtenus calage et validation par le GR2M.....	151
Tableau 67. Résultats du calage et validation GR4J.....	153
Tableau 68. Résultats du calage des paramètres au pas de temps annuel.....	158
Tableau 69. Critères de qualité et d'optimisation.....	158
Tableau 70. Résultats du calage des paramètres au pas de temps annuel.....	159
Tableau 71. Critères de qualité et d'optimisation.....	159
Tableau 72. Résultats du calage des paramètres au pas de temps mensuel.....	161
Tableau 73. Critères de qualité et d'optimisation.....	161
Tableau 74. Résultats du calage des paramètres au pas de temps mensuel.....	162
Tableau 75. Critères de qualité et d'optimisation.....	162
Tableau 76. Résultats du calage des paramètres au pas de temps journalier.....	164
Tableau 77. Critères de qualité et d'optimisation.....	164
Tableau 78. Comparaison des performances entre GR et GARDENIA.....	168
Tableau 79. Valeurs des paramètres calibrés.....	171

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 80. Résultat du bilan hydrologique calculé par SWAT pour le bassin versant de l'oued Boukiou (1974-2004).....	172
Tableau 81. Résultat du bilan hydrologique calculé par SWAT pour le bassin versant de l'oued Boukiou (2005-2014).....	172
Tableau 82. Performance des trois modèles utilisés	177

LISTE DES ABREVIATIONS

ARS: Agricultural Research Service
A.S.P.W.I.T : Association pour la sauvegarde et la promotion de l'environnement de la wilaya de Tlemcen.
ANRH : Agence nationale des ressources hydrauliques
CN: Curve number.
DRH: Direction des ressources hydriques
Dd : Densité de drainage
ETP : Evapotranspiration potentielle
ETR: Evapotranspiration réelle
FAO: Food and Agriculture Organisation
G.I.E.C: Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GR: Génie rural
HWSD: Harmonized World Soil Database
I : Infiltration
I : Indice d'aridité
Ig : Indice de pente globale
Im : Indice de Moral
K : Perméabilité
IK : Indice de continentalité de Kerner IK
IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change
Ip : Indice de pente de ROCHE
Kc : Coefficient de compacité du Gravelius
Le : lame d'eau écoulée
IIASA: International Institute for Applied Systems Analysis
INRS : Institut national de la recherche scientifique
IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change
MNS : Modèle numérique de surface
IRD : L'Institut de recherche pour le développement
NP : Niveau piézométrique
P : Précipitations
PGB : Pratiques de gestion bénéfiques
Q : Débit
O.M.M. : Organisation météorologique mondiale
O.R.S.T.O.M : Office de la recherche scientifique et technique outre-mer
R : Ruissellement
Rc : Rapport de confluence
Rl : Rapport de longueur.
Rh: Rayon hydraulique
RFU : Réserve facilement utilisable
S : Coefficient d'emmagasinement

LISTE DES ABREVIATIONS

SUFI: Sequential Uncertainty Fitting

SCS: Service de Conservation du Sol

SRTM: Shuttle Radar Topographic Mission

SWAT: Soil and Water Assessment Tool

SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Procedures

SIG: Systèmes d'Information Géographiques

t: Temps.

USDA : Département américain pour l'agriculture

UTM: Transverse Universelle De Mercator

USDA: United State Department of Agriculture

URH : Unité de réponse hydrologique

WMO : World Meteorological Organization

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Depuis ces dernières décennies, le phénomène de la variabilité climatique demeure une notion très vaste dont les causes sont difficiles à cerner. Il peut se manifester par de longues périodes de sécheresse avec pour conséquences des effets négatifs sur les ressources en eaux superficielles et souterraines, sur l'environnement et les activités socio-économiques.

L'Algérie pays méditerranéen, glisse vers la semi-aridité et les risques de désertification restent très élevés. Cela présage des conditions naturelles singulièrement plus difficiles qu'aujourd'hui, dont les conséquences commencent à se faire sentir dans beaucoup de régions du pays. Cette nouvelle donnée insinue que toutes les prédictions calculées à partir des données historiques sur le cycle naturel et qui servent de base aux décisions d'investissement dans le secteur d'hydraulique devraient alors être réétudiées en fonction des nouvelles données de climat surtout que l'importance de l'eau en tant que support de vie et de facteur régulateur du développement d'un pays est universellement reconnue. Il sera donc 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 les outils disponibles pour aider à une meilleure gestion et utilisation de cette ressource ainsi que le suivi de son évolution dans le temps et l'espace, nous disposons des modèles pluie-débit qui ont pour objectif de reproduire à l'échelle du bassin versant, les débits des cours d'eau à partir de la mesure ou de la simulation des pluies. Dans cette optique, plusieurs travaux à travers le monde ont été proposés par les chercheurs surtout ceux qui s'intéressent aux modèles qui relient les paramètres hydroclimatiques (précipitations, écoulements et/ou transport de matériaux solides) Walling et al., (1981), Demmak (1982), Nash et al., (1983), Katlan et al., (1987), Probst et al., (1992), Loumagne et al., (1999), Terfous et al., (1999, 2001, 2003), Megnounif et al., (2000, 2003), XU et al., (2002), Riad (2003 et 2004), Bouanani (2004), Borrell (2004), Mathevet (2005), Abadi (2006), Boudahraa (2007), Huard et al., (2008), Gaume (2009), Harlan et al., (2010), McMillan et al., (2010), Dilip (2011), Adeaga et al., (2012), Zolfaghari et al., (2013), Traore et al., (2014), Abdi et al., (2015), Bakriti (2014), Baahmed (2015), Djellouli (2016), Gherissi (2017), Otmane (2019)...dont l'objectif principal de ces auteurs était d'expliquer le phénomène de l'écoulement et du transport solide en relation avec le climat et l'environnement du bassin versant..

La présente étude s'intéresse en première partie aux modèles hydrologiques conceptuels globaux tels que ceux du Génie Rural « GR » mis au point par le CEMAGREF au pas de temps annuel (GR1A : proposée par Mouelhi (2003) et Mouelhi *et al.*, (2006a)), mensuel (GR2M : développé successivement par Kabouya (1990), Kabouya et Michel (1991), Makhlof (1994), Makhlof et Michel (1994), Mouelhi (2003) et Mouelhi *et al.*, (2006b)) et journalier (GR4J : initié successivement par Edijatno et Michel (1989), Edijatno (1991), Nascimento (1995), Edijatno *et al.*, (1999), Perrin (2000), Perrin (2002) et Perrin *et al.*, (2003)) qui ont permis d'améliorer progressivement les performances du modèle) afin qu'ils simulent plus efficacement les écoulements mensuels et journaliers et le modèle GARDENIA (modèle Global à Réservoirs pour la simulation des Débits et des Niveaux Aquifères), initié et développé au BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) à la fin des années 1988 (Roche et Thiéry, 1984) avec des objectifs d'application dans le domaine des ressources en eau.

INTRODUCTION GENERALE

Le GR ainsi que le GARDENIA, sont des modèles simples parcimonieux demandant peu de données (les variables d'entrée indispensables sont limitées aux séries de pluies, de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et des débits pour le calage et la validation. L'objectif principal de leur application dans ce travail est de tester leur adaptabilité et leur efficacité à simuler les écoulements dans le bassin versant d'oued Boukiou affluent rive gauche de l'oued Tafna.

Dans la deuxième partie de ce travail nous tenterons d'analyser les différentes fonctions de notre bassin versant avec le modèle SWAT «Soil and Water Assessment Tool » au pas de temps mensuel et mettre en évidence la contribution de l'approche spatiale à la modélisation du bassin versant, en s'appuyant sur les avantages offerts par les nouvelles technologies en référence spatiale, pour la fourniture de modèles en entrée de données (techniques de télédétection spatiale), et pour le traitement et le franchissement des différentes couches d'information (techniques SIG). Le modèle SWAT a été utilisé dans de nombreux pays du monde entier de façon intensive pour l'estimation des eaux de ruissellement, des sédiments, des éléments nutritifs et des pesticides, ainsi pour les évaluations d'impact des mesures de conservation dans le bassin versant (Arnold & Fohrer, 2005). À titre d'illustration et notamment au niveau des pays méditerranéens le modèle SWAT a été appliqué dans le Nord d'Espagne par Epelde et al. (2014) pour évaluer l'impact des pratiques de gestion bénéfiques sur la qualité de l'eau, par Peraza Castro et al.(2015) pour étudier la variabilité de l'hydrologie, des sédiments et de nickel, et par Palazón & Navas(2016) pour examiner les effets de différents scénarios des précipitations dans les Pyrénées Centrales, dont l'objectif principal était de mieux caractériser les variables climatiques et les simulations hydrologiques du bassin versant. Ainsi, dans le Nord-Est de l'Espagne, Ramos & Martínez-Casasnovas (2015) ont analysé la pertinence de l'utilisation du modèle SWAT pour la prévision du ruissellement et de la perte en sol. En outre, dans le Sud ouest de l'Espagne, des recherches ont été menées en utilisant le modèle SWAT afin d'évaluer l'impact du changement climatique sur les ressources en eau selon différents scénarios à court,moyen et long terme (Pulido-Velazquez et al., 2015; Senent-Aparicio et al.,2017). Sellami et al. (2014) ont conçu la possibilité du modèle SWAT pour prédire avec précision le débit journalier dans plusieurs bassins versants jaugés et non jaugés dans le Sud de la France, Grusson et al. (2017) ont testé le modèle SWAT avec des données météorologiques de différentes résolutions spatiales afin d'explorer la relation entre la résolution des données climatiques maillées et la discrétisation interne de SWAT, et éviter toute perte d'information. Licciardello et al. (2011) ont testé l'efficacité hydrologique du modèle SWAT pour estimer avec précision le bilan hydrique d'un bassin versant en Sicile orientale qui se caractérise par des précipitations de courte durée et de forte intensité. Une étude similaire concernant la quantification des différentes composantes des processus hydrologiques par le modèle SWAT, a été réalisée en Italie centrale par Fiseha et al. (2013). Ainsi, Tuo et al. (2016) ont évalué l'impact de différentes entrées de précipitations sur les simulations du modèle SWAT dans les bassins versants alpins au Nord-Est de l'Italie. Pinaras et al. (2010) ont testé la performance du modèle SWAT à simuler différents scénarios des pratiques de gestion bénéfiques dans un bassin méditerranéen au Nord-Est de la Grèce. En 2013, le modèle SWAT a été utilisé par Nikolaidis et al pour simuler la réponse hydrologique et chimique d'un bassin versant au Nord-Ouest de la Crète (Sud-Est de la Grèce), et évaluer les impacts de la gestion de l'utilisation des terres et du changement climatique dans le même bassin. Et récemment, une approche de l'étude sur les interactions hydrodynamiques surface/souterrain dans un grand bassin versant méditerranéen situé au Sud-Est de la péninsule du Péloponnèse, a été réalisée par Gamvroudis et al. (2017) à l'aide du modèle SWAT, afin d'améliorer la prévision saisonnière d'une sécheresse hydrologique potentielle dans les scénarios futurs de changement climatique. SWAT a été testé dans un bassin méditerranéen situé dans le

INTRODUCTION GENERALE

Nord-Ouest de la Turquie dans la région de Marmara par Cuceloglu et al. (2017), pour prédire les composantes du bilan hydrique et évaluer le potentiel des ressources en eau. Et, dans un bassin localisé dans l'Anatolie centrale par Duru et al. (2017) pour la prévision du débit et du rendement de sédiments afin d'évaluer la performance du modèle et de générer une carte d'érosion du sol. En Tunisie, le modèle SWAT a été sélectionné pour quantifier l'érosion annuelle des sols et identifier les sous-bassins critiques responsables des plus grandes quantités des pertes de sol afin d'améliorer les zones affectées (Mosbahi et al., 2011). Une autre étude s'intéressant à la simulation des débits et des sédiments à l'aide du modèle SWAT a été effectuée par Ben Salah & Abida en 2016, dans le but de développer un outil de décision pour la gestion optimale des ressources en eau et en sol d'un bassin versant situé en Tunisie centrale. Récemment, SWAT a été utilisé pour identifier les sources critiques et étudier l'efficacité des différentes pratiques de gestion bénéfiques, pour réduire le rendement des sédiments dans le Nord de la Tunisie (Mtibaa et al., 2018). En Algérie, Yebdri et al. (2007) ont testé le modèle SWAT pour prédire le bilan hydrique du bassin versant de la Tafna au Nord-Ouest de l'Algérie, afin d'assurer une gestion durable des ressources en eau. Dans le même bassin, Zettam et al. (2017) ont utilisé le modèle pour quantifier le ruissellement et la perte de sol, et par la suite, évaluer les risques d'érosion des sols et déterminer les utilisations des terres appropriées et les mesures de conservation des sols pour le bassin, D'autres études se sont enchaînées avec le SWAT afin de modéliser l'impact du changement climatiques sur l'hydrologie et la gestion des ressources en eau, tels que les travaux de Otmane et al.(2019) sur le bassin versant de l'oued Mekerra, pour estimer les changements climatiques et hydrologiques futures, de Manie et al (2021) bassin versant de la Tafna, et enfin la modélisation du débit et du transport sédimentaire par Hallouz et al (2019) sur le bassin versant de la Harraza, et le transport des sédiments Ketab et al (2020) bassin versant du barrage de Beni Haroun.

Au Maroc, Chaponnière et al. (2008) ont testé le modèle SWAT dans un bassin de Haut Atlas au Sud du Maroc central afin de caractériser le fonctionnement hydrologique des différentes composantes qui interviennent dans le cycle hydrique et de leurs dynamiques. Dans le même cadre, des études ont été menées par Fadil et al. (2011) et Kharchaf et al. (2013) dans le Nord du Maroc central à l'aide du modèle SWAT afin de comprendre et de déterminer les différents processus hydrologiques du bassin versant. Ensuite l'étude de Briak et al., (2016) a été basée sur l'utilisation du modèle SWAT dans un bassin du Rif occidental au Nord du Maroc pour évaluer les composantes du cycle hydrologique et les rendements de sédiments, et par conséquent, simuler différents scénarios des pratiques de gestion bénéfiques agricoles afin de choisir la pratique la mieux adaptée. Chadli (2017) a utilisé le modèle pour prédire le bilan hydrique et la perte de sol dans un bassin au Nord-Est du Maroc central. À une échelle plus large, le modèle SWAT a été utilisé au niveau de nombreux bassins de continent européen, afin de tester sa performance et de l'intégrer dans les pays d'Europe et, par la suite, estimer les différentes composantes du cycle hydrologique, chose qui permet de garantir une gestion durable des ressources en eau (Abbaspour et al., 2015). Toutes ces recherches mentionnées précédemment, confirment l'intérêt du modèle SWAT et son adaptabilité et fiabilité dans plusieurs régions du monde.

En Algérie, il est admis que des mesures sont nécessaires pour améliorer la capacité à s'adapter à la variabilité hydrologique et aux phénomènes extrêmes (inondations et sécheresses) observés aujourd'hui dans des circonstances dynamiques (notamment les pressions actuelles dues à la démographie, à l'économie, à l'utilisation des terres et au développement régional), de même que pour réduire les vulnérabilités significatives de la société, de l'économie et de l'environnement aux impacts futurs(Otmane.A 2018).

INTRODUCTION GENERALE

Dans ce contexte le bassin versant de l'oued Boukiou qui appartient au bassin versant de la Tafna à fait l'objet de cette étude.

L'objectif principal de ce travail est de mettre en évidence :

- Le changement climatique et son impact sur la ressource en eau,
- Le comportement de la nappe alluviale de l'oued Boukiou,
- La variabilité climatique à l'échelle spatiotemporelle,
- L'impact de la sécheresse sur le régime hydrologique au niveau du bassin versant de l'oued Boukiou à différents pas de temps,
- La modélisation hydrologique avec les différents processus de cycle hydrologique.

Cette thèse s'articule en 5 chapitres :

1- Une synthèse bibliographique sur le changement climatique : le changement climatique a été toujours reconnu comme l'un des problèmes majeurs à l'échelle locale, régionale et même sur l'échelle internationale, dans cette partie nous analyserons l'origine des changements climatiques, ainsi que les causes et enfin les risques.

2- Une description de la zone d'étude (situation géographique, étude morphométrique, occupation du sol, et enfin une étude géologique et hydrogéologique).

3- Une présentation hydro climatique avec un traitement des données des climatiques, pluviométriques et hydrologiques à l'échelle annuelle, mensuelle, saisonnière et journalière afin de définir le type de climat, les conditions climatiques et l'estimation des différents termes du bilan hydrologique.

4- Une étude de la variabilité climatique afin de connaître les tendances pluviométrique et de détecter les ruptures des précipitations et les hausses des températures.

5- la modélisation par application du modèle hydrologique à pas de temps annuel, mensuel, et journalier, afin de caractériser la réponse hydrologique et d'évaluer l'impact de la sécheresse sur la ressource en eau de notre bassin versant. Dans ce chapitre nous présenterons la performance des trois modèles GR , Gardénia et SWAT.

Enfin, une conclusion générale où, nous essayerons de faire la synthèse des résultats trouvés et proposons des recommandations.

Chapitre 1 : SYNTHESE
BIBLIOGRAPHIQUE
SUR LE CHANGEMENT
CLIMATIQUE

I Introduction

Au cours de la dernière décennie, le changement climatique a été toujours reconnu comme l'un des problèmes majeurs à l'échelle locale, régionale et même sur l'échelle internationale. L'Algérie est l'un des plus grands pays d'Afrique (zones arides et semi-arides) qui sont vulnérables et souffrent de sécheresses chroniques. Ce qui entraîne de forts déficits hydriques qui représentent une forte contrainte sur l'environnement, les activités socio-économiques et le bien-être des populations et intensifient inexorablement le phénomène de désertification qui affecte déjà gravement le pays. Le milieu naturel subit une forte dégradation : la déforestation, l'érosion des sols, la baisse de la qualité des terres agricoles et des parcours, la diminution quantitative et qualitative des ressources en eau, la dégradation des écosystèmes et l'assèchement des oueds. Les régions les plus touchées en Algérie sont les Hauts Plateaux et la Steppe. Celles-ci constituent des zones de transition entre le Nord et le Sud du pays et couvrent environ 70 % des terres viables du Nord. Elles constituent de véritables potentiels agricoles et assurent la sécurité alimentaire du pays. Les changements climatiques peuvent constituer un facteur aggravant de la dégradation de ces régions.

Le climat de notre planète répond bien aux variations saisonnières de l'insolation dues aux petites modifications de l'orbite que la terre décrit autour du soleil. Le climat de l'Algérie est de type méditerranéen caractérisé par une période pluvieuse allant en moyenne de Septembre à Mai et un été sec et ensoleillé. Il est soumis à l'influence des circulations atmosphériques dont les plus importantes sont la dépression d'Islande et les dépressions méditerranéennes. L'Algérie fait partie des pays semi-arides les plus exposés au phénomène de changement climatique. Le pays a subi des périodes de sécheresses très sévères avec des augmentations de la température moyenne annuelle variant de 0.65 à 1.45°C entre 1970 et 2004, une moyenne comparable à la hausse moyenne planétaire observée sur la période 1906–2005 (OMM, 12/2006).

Ainsi, l'Algérie est passée depuis les 30 dernières années à un déficit hydrique sévère et persistant sur plusieurs années, issu d'un déficit pluviométrique évalué à 30% (FAO, 2008). Cette sécheresse météorologique serait la principale source de tous les problèmes socio-économiques dans la région, ayant évolué depuis le siècle dernier d'une fréquence tous les dix ans à des fréquences très rapprochées depuis 1975 de l'ordre de six années durant dix ans (FAO, 2008). Dans la littérature scientifique, les changements climatiques sont généralement définis comme les perturbations à long terme, des paramètres climatiques habituels telles que les températures, les précipitations, les vents etc. Diverses études climatiques particulièrement sur des pluies en Afrique, en région méditerranéenne (Franquin et al, 1969) et en Algérie se sont intéressées à l'évolution des pluies aux échelles de temps mensuelles et annuelles en vue d'une modélisation hydrométéorologique de cette variable. Cette modélisation a pour but majeur la détection de changement climatique précisément pluviométrique.

I.1 Climat

Étymologiquement, le terme climat vient du mot grec « Klima » qui fait référence à l'inclinaison des rayons solaires par rapport à la surface de la Terre. Cette définition souligne le rôle moteur que joue la radiation solaire qui plonge la terre dans un flux de chaleur et de lumière.

Pour les climatologues, le climat est l'ensemble des phénomènes météorologiques qui se produisent sur un lieu dans leur succession habituelle.

CHAPITRE 1 SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

La détermination d'un climat repose sur une analyse du temps qu'il a fait chaque jour durant une longue période, en général trente années consécutives. Elle s'appuie sur les valeurs fournies par la météorologie pour caractériser les états de l'atmosphère : la température de l'air, la lame d'eau précipitée, la durée de l'insolation, la direction du vent. Malgré le caractère fugace du temps, des situations semblables se répètent et peuvent être groupées en famille.

La durée et la fréquence annuelle des types de temps, leur rythme saisonnier permet de décrire plusieurs types de climats : tropical, tempéré, aride ou semi-aride.

I.1.1 Changement climatique

Pour faire face à ce danger, les hommes ont essayé d'apprécier le phénomène en essayant de comprendre les cycles climatiques en étudiant la variabilité et les tendances de différentes variables climatiques, notamment les précipitations et les températures (Vinnikov et coll., 1990; Balling et al. 1998; Zhai et al. 2003; Gautam, 2016). L'étude du climat a toujours intéressé l'Homme puisqu'il en affecte considérablement les conditions de vie et induit des réponses biologiques et écologiques de la faune et de la flore à travers le monde (Root et al, 2003). L'influence du climat sur l'Homme s'effectue dans plusieurs domaines : ressources en eau, agriculture, sécurité alimentaire, santé, hygiène, stabilité ...etc. Aux échelles plus locales, son influence peut être masquée par d'autres facteurs tels que les facteurs édaphiques ou biotiques (Pearson et Dawson, 2003).

La compréhension des grands mécanismes du climat est à l'évidence, un enjeu majeur pour le monde scientifique. Depuis la fin du XIX^{ème} siècle, le climat du globe est affecté par un réchauffement à grande échelle qui ne touche pas de la même manière les deux hémisphères.

L'hémisphère nord se réchauffant plus lentement que l'hémisphère sud (GIEC, 2007). Cette évolution différentielle des températures entre les deux hémisphères est liée à la baisse des cumuls pluviométriques dans les régions subtropicales de l'hémisphère nord, observée depuis les années 70 (Flageollet, 2012).

L'évolution de la pluviométrie mondiale est beaucoup plus contrastée, puisqu'elle est soumise à une forte variabilité spatio-temporelle. Malgré ce constat et compte tenu de l'augmentation des températures, une hausse probable des précipitations est attendue. En effet, l'accélération du cycle hydrologique sous l'effet des fortes températures pourrait entraîner plus de précipitations et d'évaporation (OMM, 2013).

Certaines études montrent que ce changement se traduit par une intensification des pluies et une récurrence des événements extrêmes (plus perceptible sur les dernières décennies 1991-2010) (OMM, 2013, New et al, 2001; Christensen et al, 2007).

Les changements du cycle hydrologique global lors des dernières décennies ont été associés, au Réchauffement observé: hausse du contenu atmosphérique en vapeur d'eau, changement des précipitations, réduction de la couverture neigeuse et fonte des glaciers, changement de l'humidité des sols et du ruissellement. Les simulations des modèles climatiques sur le XXI^{ème} siècle s'accorde sur une hausse très probable des précipitations aux hautes latitudes, sur une partie des tropiques, et une réduction dans certaines zones subtropicales et de moyennes latitudes. Des réductions importantes pourraient se produire, allant jusqu' à 20%, dans la région selon le dernier rapport de l'IPCC(2012), le réchauffement global provoquera l'augmentation d'événements climatiques extrêmes et touchera les populations avec une vulnérabilité croissante au fil du temps. Par ailleurs, la présence de plus en plus

CHAPITRE 1 SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

fréquente de sécheresses, d'inondations ou ouragans, a rendu très actuel l'approfondissement de l'étude du climat et ses variations, et incite la communauté scientifique à intensifier ses efforts afin d'identifier les changements à l'échelle globale (OMM, 2007).

L'échelle des ères géologiques, les avancées en matière de paléoclimatologie ainsi que les reconstitutions de plus en plus précises de la coévolution entre le climat et le couvert végétal dans les basses latitudes, ont stimulé les recherches sur les interactions entre les processus de surface et le climat régional. L'un des effets le plus remarqué étant l'élévation de la température moyenne du globe depuis la deuxième moitié du 20^{ème} siècle (Cantat, 1995; Nicholls et al, 1996; Parker et al, 2000).

Depuis quelques années les débats scientifiques sur le climat se focalisent beaucoup plus sur le réchauffement climatique actuel et ses conséquences environnementales (Duplessy, 2001).

En 1995, l'IPCC a émis la certitude que les activités anthropogéniques ont influencé considérablement les changements globaux. Plusieurs auteurs (Crisci et al, 2002) attribuent le réchauffement terrestre à l'accentuation de l'effet de serre et suggèrent que cette tendance continuera aussi dans le futur. Il convient de noter qu'il existe un découpage, qui est à la base des travaux consacrés à la recherche de la valeur du réchauffement global, à savoir un découpage des espaces terrestres et océaniques selon un maillage géométrique (Dessai, 2003).

Parmi les résolutions communes aux études effectuées par la communauté scientifique (GIEC, 2008), il y a la mesure précise des fluctuations et leur interprétation statistique. Dans ce cadre plusieurs méthodes de détection des changements climatiques ont été mises au point (WMO, 1966 ; Lubès et al, 1994 ; et Cavadias., 1994).

Ces dernières années, plusieurs études sur les variations climatiques ont été réalisées en analysant l'évolution de la pluviométrie dans diverses parties du globe et à différentes échelles temporelles. Cette notion diffère de la variabilité climatique qui suppose la stationnarité et décrit la fluctuation des valeurs saisonnières ou annuelles par rapport aux valeurs temporelles de référence (Salinger, 1980; Jones et al, 2008).

Les résultats de risques du changement climatique en Italie indiquent une tendance à la hausse des températures et une baisse de la pluviométrie. Ils ont utilisé les paramètres climatiques classiques (températures, événements d'averses, évaporation), et ont évalué le risque de sécheresse et les tendances temporelles pour toutes les variables en utilisant les techniques de régression linéaires (Maheras ,1981) et (Wigley et al ,1984).

Ses conséquences peuvent être désastreuses même dans les pays très développés. Par exemple, la sécheresse de 1988 a causé aux États-Unis et au Canada des dégâts estimés respectivement à 40 milliards de dollars américains et 1.8 milliard de dollars canadiens.

Généralement, la sécheresse est apparue sur la majorité des pays du bassin méditerranéen depuis les débuts des années 80. De nombreuses études à travers le monde ont été menées pour la détection de ces changements.

En Afrique sahélienne et non sahélienne, beaucoup d'auteurs ont mis en évidence, à partir des séries hydro-pluviométriques, une phase sèche qui a débuté vers les années 1970 et qui perdure jusqu'à présent. Dans cette région, il a été constaté une diminution du nombre de jours de pluie et la

pluviométrie annuelle (Hubert et Carbonnel, 1998; Paturel et al, 1995; Paturel et al, 1997; Moron Vincent, 1994; Servat et al, 1999, Servat et al, 1997; Houndénou et Hernandez, 1998). Les études sur le changement climatique des pays du bassin méditerranéen, indiquent une augmentation des températures et une accentuation de la variabilité climatique (GIEC, 2008).

En Afrique du Nord et au Maghreb, on observe ces dernières années des bouleversements climatiques sans précédent (Stour et al, 2009), sachant que dans les climats subtropicaux de l'Afrique du Nord-ouest, les bouleversements sont liés aux caractères très variables des précipitations annuelles et décennales.

Par ailleurs, la région méditerranéenne a été identifiée comme un « hot spot » du changement climatique, c'est-à-dire une région particulièrement vulnérable où les changements seront marqués en termes d'élévation des températures et de diminution des précipitations moyennes, de variabilité interannuelle et d'événements météorologiques extrêmes (Douguédroit et Nourant, 2003; Piervitali et Colacino, 2003). De plus, divisée entre trois continents, abritant 7,4 % de la population mondiale et devant faire face à une forte disparité de la répartition des ressources en eau, la région méditerranéenne présente des enjeux scientifiques, environnementaux et socio-économiques importants. D'autre part, vers la fin des années 1970, la rive sud-méditerranéenne a connu des épisodes prolongés de sécheresses qui ont incité de nombreux scientifiques à étudier les causes possibles (Bouqdaoui et al, 2006; Nicholson et Wigley, 1984).

Il est à constater aussi que, l'IPCC (2007) a annoncé dans son rapport que le changement climatique se traduirait entre autres par une modification des régimes pluviométriques à l'échelle mondiale et régionale, et entraînera le déplacement des zones climatiques. Or, dans les pays méditerranéens, situés en zone subtropicale semi-aride, la pluviométrie est le paramètre climatique dominant (Chaumont, 1971), étant d'une part généralement insuffisante, et d'autre part beaucoup plus variable que la température.

Au cours des années 70, 80, 90 et 2000, plusieurs chercheurs ont montré qu'après les années 70, les précipitations ont significativement baissé en Afrique du Nord (Meddi et al, 2009; Sebbar et al, 2012).

I.1.1.1 Origine des changements climatiques

Les principales causes des changements sont tous les facteurs pouvant provoquer l'augmentation de la concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Cette augmentation de la concentration engendre la destruction de la couche d'ozone qui entraîne des modifications de l'intensité du rayonnement solaire atteignant la surface terrestre d'où le réchauffement de la Terre.

Ce phénomène de réchauffement lié au problème de couches d'ozone dû à l'énorme production mondiale de gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4) de la terre influe sur les différents facteurs climatiques (température, vent,) et sur les différents termes du bilan hydrique (Evapotranspiration (ETP/ETR), Précipitation (P), Ruissellement (R), Infiltration (I)).

On peut citer à titre d'exemples :

- Les variations de la teneur en aérosols,
- La pollution de l'air due à la circulation automobile, les industries, les feux de brousse, les bois de chauffe, les déchets, ...
- Les changements de la réflectivité de la surface de la Terre.

I.1.1.2 Les causes du changement climatique

Les changements climatiques sont dus à un renforcement de l'effet de serre naturel, par les activités humaines, ce qui a pour conséquence d'augmenter sensiblement la température sur terre. Deux causes principales sont à pointer.

I.1.1.2.1 Augmentation des concentrations de gaz à effet de serre

Les recherches scientifiques ont montré que depuis 800.000 ans il n'y a jamais eu autant de concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Depuis, et à partir de l'apparition de la révolution industrielle, la forte utilisation des ressources fossiles (charbon, pétrole, gaz, ...etc) comme source d'énergie a provoqué l'augmentation des rejets du CO₂. Aussi, les activités agricoles (élevages, engrais, pesticides...etc) et industrielles rejettent d'avantage du méthane (CH₄) et de l'oxyde nitreux (N₂O). L'ensemble de ces facteurs est la conséquence d'une augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre.

Les rejets de gaz à effet de serre d'origine anthropique sont responsables d'environ 75% du phénomène des changements climatiques (GIEC, 2008).

I.1.1.2.2 Déforestation

La déforestation est responsable d'un quart du phénomène des changements climatiques. En effet, les zones forestières stockent beaucoup de carbone tant au-dessus du sol qu'en dessous. Une fois coupées, les arbres larguent le CO₂ accumulé pendant des siècles. De plus, moins il y a d'arbres, moins il y a de CO₂ absorbé pour la photosynthèse... Ce sont surtout les forêts primaires des zones tropicales qui connaissent la déforestation (agriculture, bois de chauffage, meuble, gain de surface...). Selon la FAO, environ 13 millions d'hectares de forêts disparaissent annuellement sur Terre, soit 1 terrain de football toutes les quinze secondes (Saidi, 2011). La déforestation est responsable d'environ 25% du phénomène des changements Climatiques (GIEC, 2008).

I.1.1.3 Les risques du changement climatique

I.1.1.3.1 Les risques directs

La modification de la configuration des pluies - la même quantité ou une augmentation totale de la pluviométrie par an, mais les précipitations se concentrent sur des périodes plus courtes, des périodes de pluies intenses, avec également de plus longues périodes de sécheresse entre les deux. Les impacts comprennent plus de risques d'inondations et de glissements de terrain et la réduction de la disponibilité en eau au cours de l'année.

Augmentation des températures de la surface de l'air et de la surface de la mer.

Il semblerait que la zone des cyclones (les Seychelles ne sont actuellement pas concernées) se déplace plus au Nord, ce qui pourrait entraîner une augmentation des tempêtes tropicales, accompagnées de vents, et ondes de tempête.

- Hausse graduelle du niveau de la mer et détérioration des zones côtières accueillant la majeure partie des infrastructures du pays.
- Un changement des saisons est noté par le grand public.
- L'acidification des océans qui est une conséquence directe de l'absorption du dioxyde de carbone par les océans et l'augmentation de la concentration en ions hydrogène.
-

I.1.1.3.2 Les risques indirects

Les risques indirects associés sont :

- les incendies, les maladies et les espèces envahissantes,
- les variations du vent de mousson,
- les variations de la position et l'intensité de l'anticyclone du Sud de l'océan Indien tropical,
- les migrations saisonnières et les changements de l'intensité du creux des complexes intertropicaux
- les courants océaniques et des modèles de température de surface dans la zone équatoriale de l'océan.

I.2 Le cycle de l'eau

Le cycle de l'eau (ou cycle hydrologique) est un phénomène naturel qui représente le parcours entre les grands réservoirs d'eau liquide, solide ou de vapeur d'eau sur Terre : les océans, l'atmosphère, les lacs, les cours d'eau, les nappes d'eaux souterraines et les glaciers. Le « moteur » de ce cycle est l'énergie solaire qui, en favorisant l'évaporation de l'eau, entraîne tous les autres échanges.

I.2.1 La température

Les différents travaux entamés sur la variation de la température moyenne, ont montré que cette dernière a augmenté de façon remarquable. Différentes approches ont été utilisées :

L'utilisation des indices de modèles à grande échelle de variation de température de surface (Karoly et al., 2003) permet la comparaison entre les tendances des indices dans les observations et la simulation du modèle a montré que les changements de température observés en Amérique du Nord entre 1950 et 1999 ne peuvent être expliqués par la seule variation du climat. Brohan et al., (2006) ont confirmé qu'au cours du 20ème siècle, l'augmentation de la température est encore nettement plus grande que son incertitude. Aussi, les résultats obtenus de l'utilisation de la décomposition empirique des données climatiques ont montré l'existence d'une tendance croissante approximativement linéaire d'environ 0.66°C/siècle de 1942 à 2010.

I.2.2 L'Evaporation

Grâce à l'énergie solaire, l'eau des mers et des océans s'évapore dans l'atmosphère en se débarrassant de son sel et de ses impuretés.

L'évaporation peut également provenir de la terre, nous parlerons alors d'évapotranspiration. C'est un phénomène qui transforme en vapeur d'eau les eaux des rivières, des lacs, des sols et surtout de la végétation. Cette vapeur d'eau viendra ensuite s'accumuler dans les nuages, de la même manière que l'évaporation des mers et océans.

I.2.3 Les précipitations

Les précipitations sont le principal facteur de variabilité dans le cycle de l'eau, elles sont en continues variations que ce soit à l'échelle journalière, mensuelle, annuelle ou saisonnière.

Différentes tendances de variations des précipitations aux échelles saisonnière et annuelle ont pu être mises en valeur. Une augmentation des précipitations annuelles dans les moyennes et hautes latitudes,

de même pour les régions tempérées comme l'Europe du Nord qui enregistrent une augmentation des précipitations en hiver, par contre pour l'Asie centrale et l'Asie du Nord les précipitations augmentent en été. Pour les régions subtropicales comme la Méditerranée, le Sahel, l'Afrique et l'Asie du Sud, des tendances négatives ont été observées suivies d'un assèchement important (Saidi, 2011).

Beaucoup de travaux ont été réalisés à propos de ce sujet-là. Pall et al., (2006) ont confirmé que les événements les plus intenses à l'échelle planétaire se situent principalement dans les tropiques, ils ont en outre étudié le lien entre augmentation des extrêmes et relation de Clausius-Clapeyron et ont analysé la déclin des extrêmes selon les latitudes (fig. 1). Ils ont constaté aussi qu'entre 60°N et 60°S il existe une diminution d'intensité des événements peu intenses et une augmentation d'intensité des événements rares.

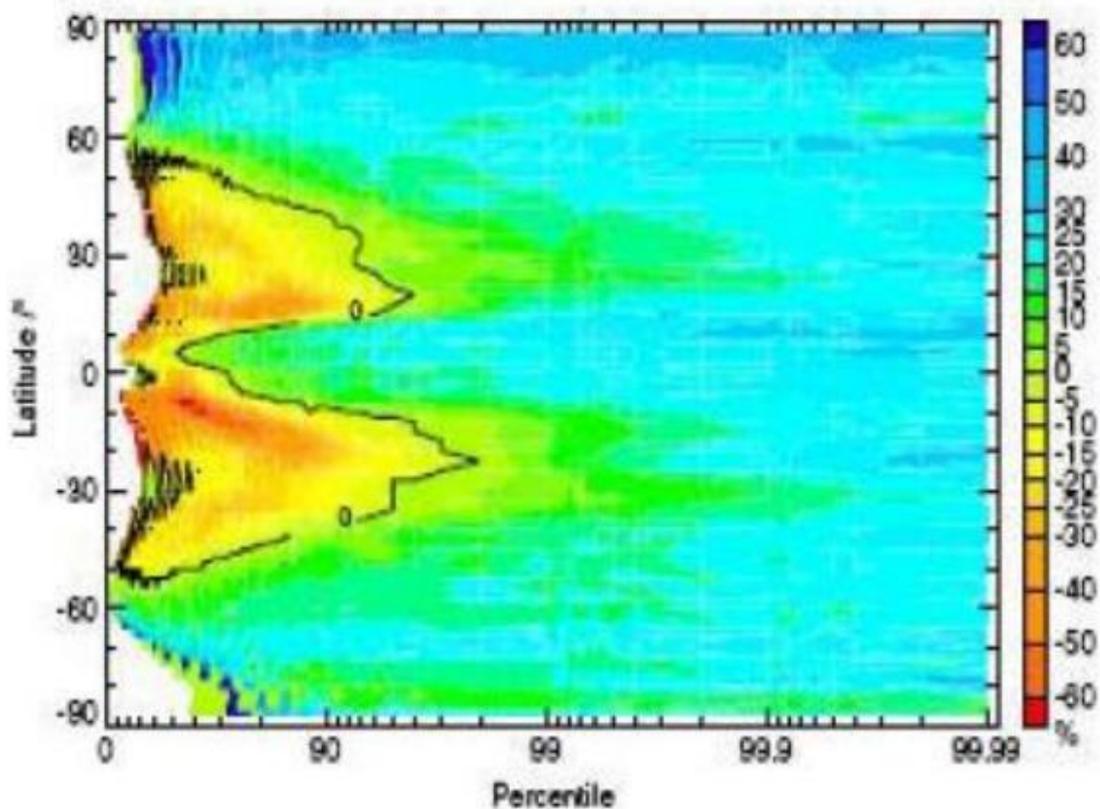


Figure 1. Changement relatif d'intensité des percentiles de précipitations zonalement agrégées (Pall et al. 2006).

I.2.4 L'évapotranspiration

Une augmentation de l'évapotranspiration pourrait apparaître avec la diminution de l'humidité de l'air. À partir de 1950, une augmentation de l'évapotranspiration réelle a été ressentie sur la plupart des régions sèches des États-Unis et de la Russie (Golubev et al. 2001).

L'évapotranspiration de la surface des terres émergées du globe suit de près les variations des précipitations terrestres (Qian et al. 2006a). En effet, les changements dans l'évapotranspiration dépendent non seulement de l'humidité d'alimentation, mais aussi de la disponibilité de l'énergie et le vent de surface (GIEC, 2007).

I.3 Variabilité pluviométrique

Un des éléments intégrateurs de la variabilité climatique, l'expression « variabilité pluviométrique » a été définie par plusieurs auteurs dont (Boko, 1988; Beltrando, 1995; Brou ,2005). Elle fait pressentir la mobilité ou la variation du schéma pluviométrique moyen et l'accentuation des valeurs extrêmes à toutes les échelles temporelles et spatiales. Autant que possible, elle est analysée par rapport aux valeurs centrales ou médianes des séries plutôt que par rapport aux valeurs moyennes ou normales, qui sous-entendent l'idée de fixité du climat. La variabilité peut être due à des processus internes naturels au sein du système climatique ou à des variations du forçage externe anthropique.

I.3.1 Tendances pluviométriques

Au sens général, une tendance se traduit par l'évolution probable d'un phénomène au cours d'une longue période. Dans le cas des précipitations, c'est une forme d'inconstance pluviométrique caractérisée par une baisse ou une hausse régulière et unidirectionnelle des valeurs moyennes des précipitations. Selon le Guide des pratiques climatiques de l'OMM (2005), cette variation tend à se maintenir dans un sens déterminé pendant de nombreuses périodes, allant de quelques années à plusieurs décennies.

I.3.2 Le climat de l'Algérie

Le climat de l'Algérie est essentiellement méditerranéen, c'est-à-dire caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers pluvieux. Mais sous ce qualificatif général, on est appelé à distinguer une grande diversité de climats régionaux, déterminés par la situation géographique et par l'orographie de l'Algérie. Celle-ci est bordée au Nord par la Méditerranée, relativement chaude en été, relativement fraîche en hiver, au Sud par le Sahara où la température est élevée en moyenne, mais très variable dans le temps. Il en résulte pour les différentes parties de l'Algérie, soumise à ces deux influences, des écarts de température considérables, et essentiellement variables d'une saison à l'autre (ce qui se traduit par une déformation des courbes isothermes). Les importantes chaînes de l'Atlas tellien et de l'Atlas saharien qui traversent le pays d'Ouest en Est contribuent pour leur part à différencier les climats en abaissant la température de l'air, et en augmentant les précipitations aux dépens des régions situées plus au Sud. Cette diversité des climats régionaux et locaux entraîne la bigarrure de la carte agricole de l'Algérie d'après Belgaid,2014.

On définit pour l'Algérie les régions ou les zones climatiques suivantes (fig.2) :

- Quatre zones climatiques et une sous zone au Nord.
- Trois zones climatiques au Sud.

Pour chaque zone, on distingue les sites d'altitude inférieure à 500 m, comprise entre 500 et 1000 m et supérieure à 1000 m.

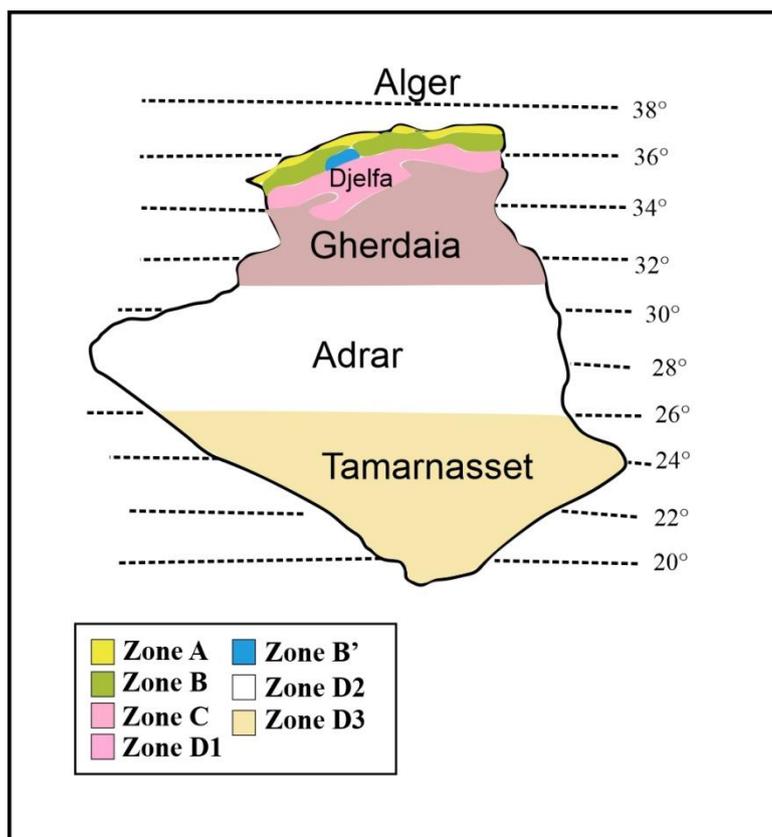


Figure 2. Carte de régions climatiques (compilé par Belgaid, 2014).

La zone A : Elle comprend le littoral et une partie du versant Nord des chaînes (climat méditerranéen maritime). Cette zone bénéficie d'un climat doux et régulier, dû à l'influence modératrice de la mer. Les températures moyennes y sont sensiblement les mêmes de l'Ouest à l'Est, et en un point donné la température varie relativement peu entre le jour et la nuit comme entre l'hiver et l'été comme le décrit la figure 3:

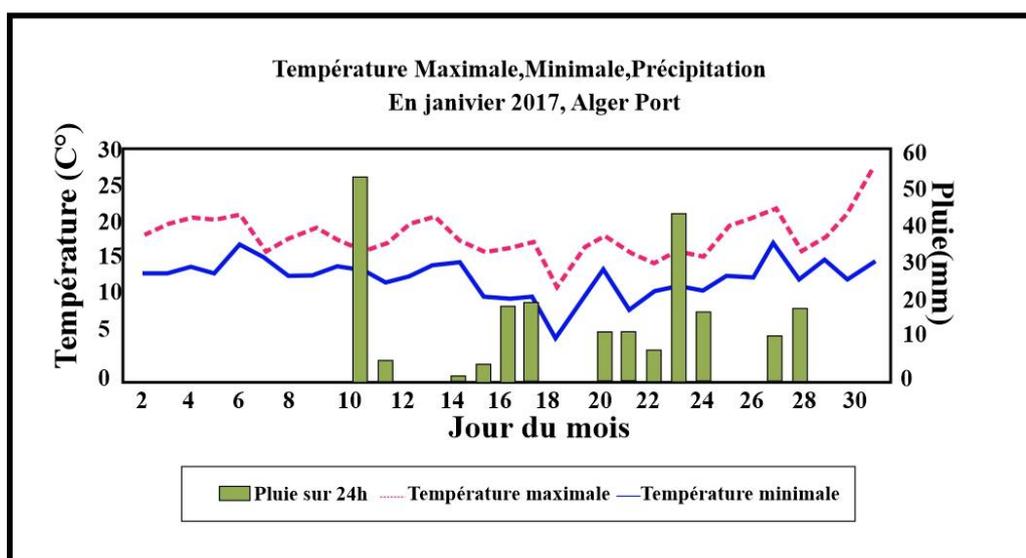


Figure 3. Variation des températures max et min plus les précipitations de la station du port d'Alger en Janvier 2017.

La zone B : Elle comprend la plaine et les vallées comprises entre les chaînes côtières et l'Atlas tellien, autre que celle de Chleff (climat méditerranéen continental).

La plaine du Chéiff peut être considérée comme " une zone climatique un peu particulière " de l'Algérie, par les écarts de température considérables que l'on y rencontre. Distante de la mer de moins de 50 km, elle est cependant soustraite à l'influence maritime par la chaîne du Dahra qui la borde au Nord. L'important massif de l'Ouarsenis qui la domine au Sud augmente les effets du sirocco, les masses d'air transportées des Hautes Plaines s'échauffant en même temps qu'elles s'abaissent vers la plaine du Chéiff. Enfin, on trouve confirmée ici la loi générale suivant laquelle toute forme concave du terrain - vallée, cuvette - entraîne de fortes variations de température comme il est illustré dans la figure 4.

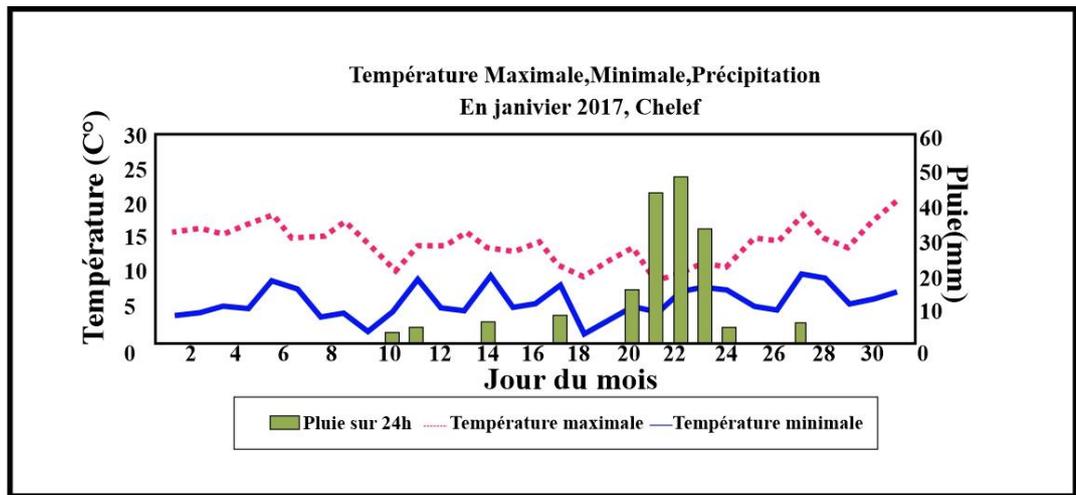


Figure 4. Variation des températures max et min plus les précipitations de la station de Chleff du mois de Janvier 2017.

La zone B' : C'est une sous-zone de la zone B. Elle comprend la vallée de Chleff, comprise entre la chaîne de l'Ouarsenis et les montagnes du Dahra.

La zone C : Elle comprend les hauts plateaux entre l'Atlas tellien et l'Atlas saharien, avec des altitudes supérieures à 500 m (climat méditerranéen de montagne) illustré par la figure 5.

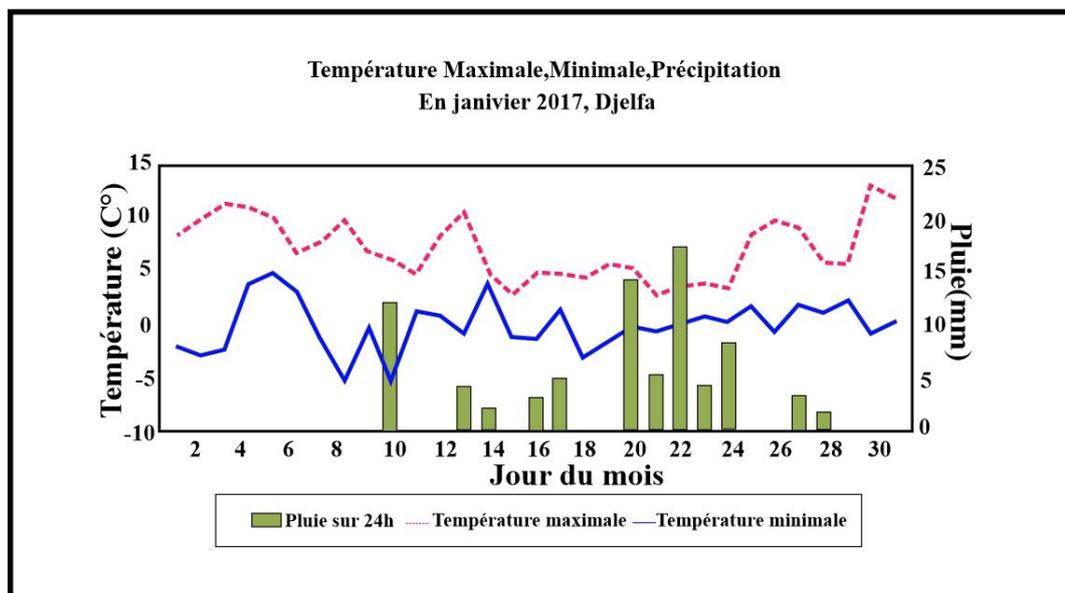


Figure 5. Variation des températures max et min plus les précipitations de la station de Djelfa en Janvier 2017.

La zone D1 : Elle comprend le Sahara au-delà de l'Atlas saharien jusqu'à la latitude 31°. Au-delà de l'Atlas saharien, on observe les mêmes fortes amplitudes thermiques, mais des températures plus élevées dues à la moindre altitude et aussi à la latitude plus basse : Touggourt est un exemple typique du climat nord-saharien, avec des maxima absolus voisins de 50°, alors que dans l'Algérie septentrionale ceux-ci dépassent rarement le 45°. La faible humidité atmosphérique permet un rayonnement intense, et les nuits peuvent être très fraîches. D'après la figure 6.

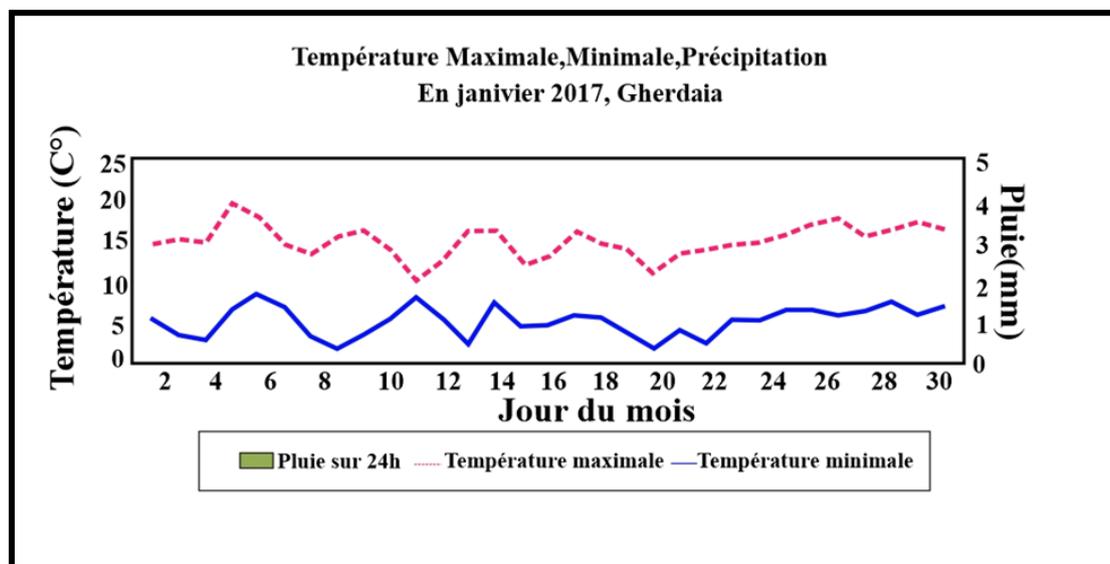


Figure 6. Variation des températures max et min plus les précipitations de la station de Gherdaïa en Janvier 2017.

La zone D2 : Elle comprend le Sahara au-delà de la latitude 31° jusqu'à la latitude 26°. La figure 7 nous en édifie plus :

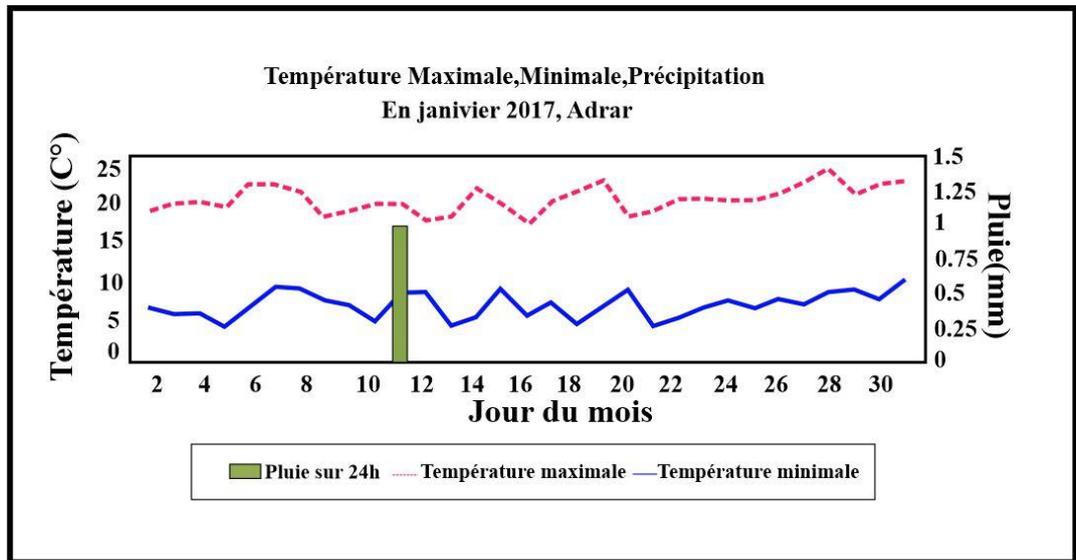


Figure 7. Variation des températures max et min plus les précipitations de la station d'Adrar en Janvier 2017

La zone D3 : Elle comprend le Sahara au-delà de la latitude 26° jusqu'aux frontières Sud (illustré dans la figure 8).

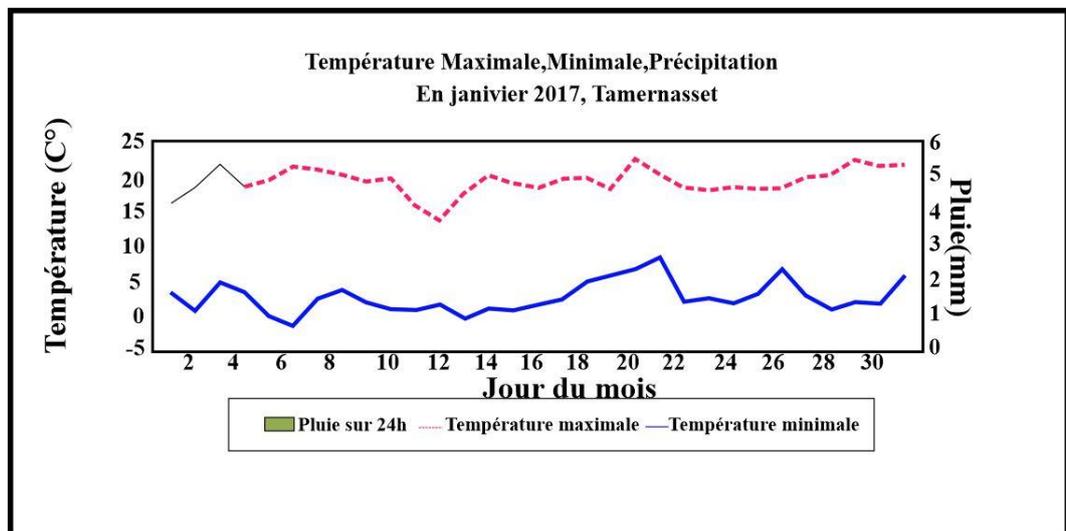


Figure 8. Variation des températures max et min plus les précipitations de la station de Tamernasset en Janvier 2017.

I.4 Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons présenté La problématique des changements climatiques considérés comme l'un des problèmes majeurs du développement à l'échelle locale et régionale voire même à l'échelle internationale, les problèmes liés aux changements climatiques occupent une importante place parmi les préoccupations majeures contemporaines. Le changement climatique est un phénomène qui a fait et qui fait encore largement parler de lui compte tenu des fluctuations qui touchent le climat terrestre, et leur conséquence sur le mode de vie de l'humanité.

Aujourd'hui, les changements climatiques sont considérés comme l'une des plus grandes menaces sur l'environnement, l'économie et le bien-être humain.

La région méditerranéenne fait partie des régions les plus sensibles à cette variabilité particulièrement sa rive sud qui est considérée comme très vulnérable. En effet, en l'Algérie et dans d'autres pays du Maghreb, la variabilité de la disponibilité des ressources en eau n'est pas récente. Mais ces dernières années, la sécheresse s'est manifestée d'une manière préoccupante, sévère, persistante et avec une intensité remarquable.

Afin de mieux comprendre l'impact de la variabilité climatique et la répercussion de la sécheresse sur les ressources en eau dans le bassin de l'oued Boukiou, nous essayerons dans les chapitres suivants de faire un zoom sur le terrain d'étude en identifiant ses caractères morphologiques, climatiques et hydrologiques.

Chapitre 2 :
DESCRIPTION DE LA ZONE
D'ETUDE

II Cadre régional

II.1 Bassin de la Tafna

II.1.1 Situation géographique

Le bassin versant de l'oued Tafna se situe au Nord ouest algérien, il couvre 37communes de la wilaya de Tlemcen (fig. 9 et 12) et une partie du territoire marocain. Drainant une superficie de 7245km², il porte le code 16 parmi les 17 bassins de l'Algérie et appartient à la région hydrographique Oranie-chott chergui.

L'oued Tafna prend naissance à Ghar Boumaaza en Algérie à 1100m d'altitude et achève son parcours dans la mer méditerranée exactement à la plage de Rachgoune en Algérie.

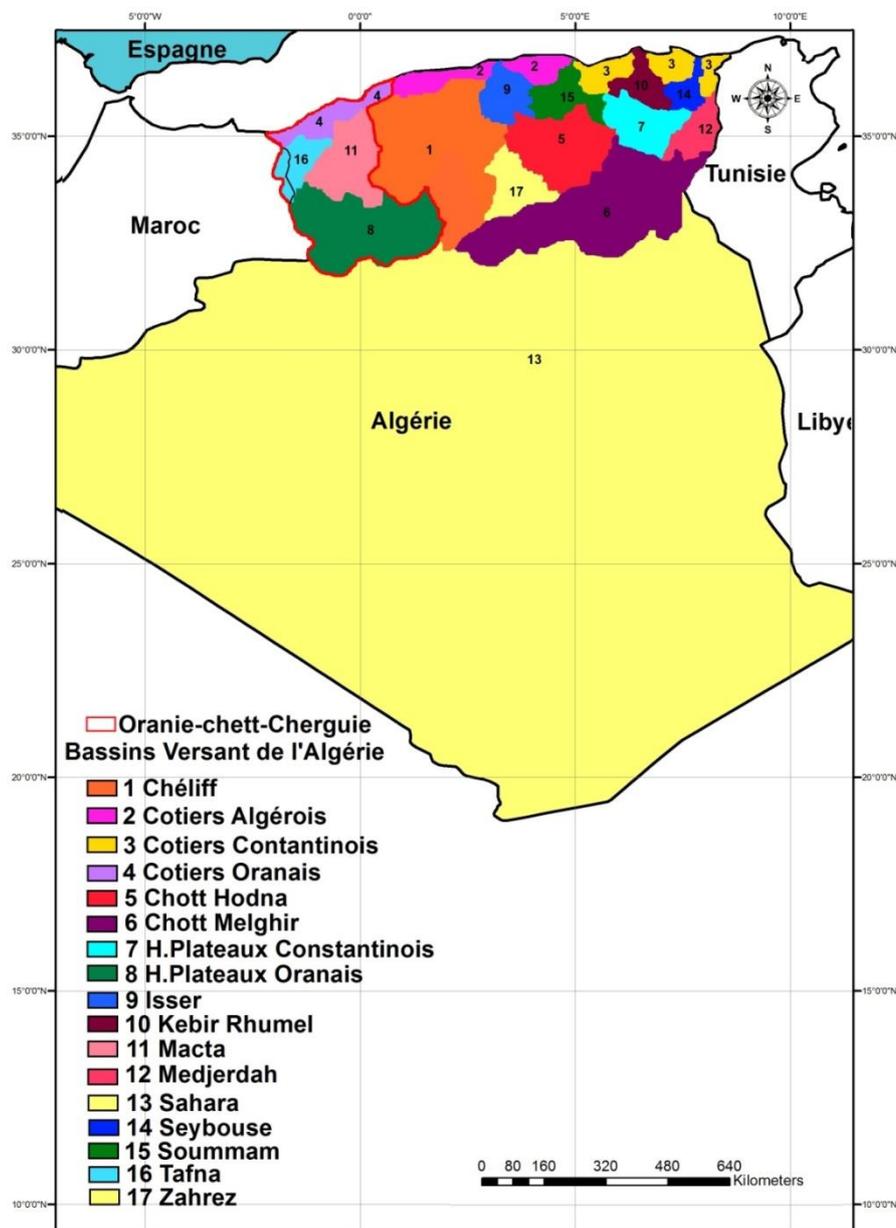


Figure 9. Bassins versants de l'Algérie

II.1.2 Délimitation du bassin de la Tafna

Le bassin versant de la Tafna est limité au Nord par la mer Méditerranée, A l'Ouest par le Maroc, A l'Est par le bassin versant de la Macta et le côtier Oranais, et Au sud par les hauts plateaux oranais (fig.10).

Il comporte les monts des Traras situés au Nord ouest du bassin, les monts de Sebaa Chioukh situés au Nord Est, les monts de Tlemcen à l'Ouest qui s'étendent jusqu'au Maroc, et les plaines et plateaux intérieurs localisés au centre du bassin versant de la Tafna.

Entre les zones montagneuses. On distingue :

- Le plateau d'Hennaya : limité au Sud par les piémonts Nord de Tlemcen et au Nord par le plateau de Zenata,
- Le plateau de Zenata-Ouled Riah : situé au Nord ouest de la plaine d'Hennaya,
- Le plateau de Sidi Abdelli – Ain Nehala : situé sur la rive droite de l'Oued Isser au Nord d'Ouled Mimoun (Remaoune, 2003).

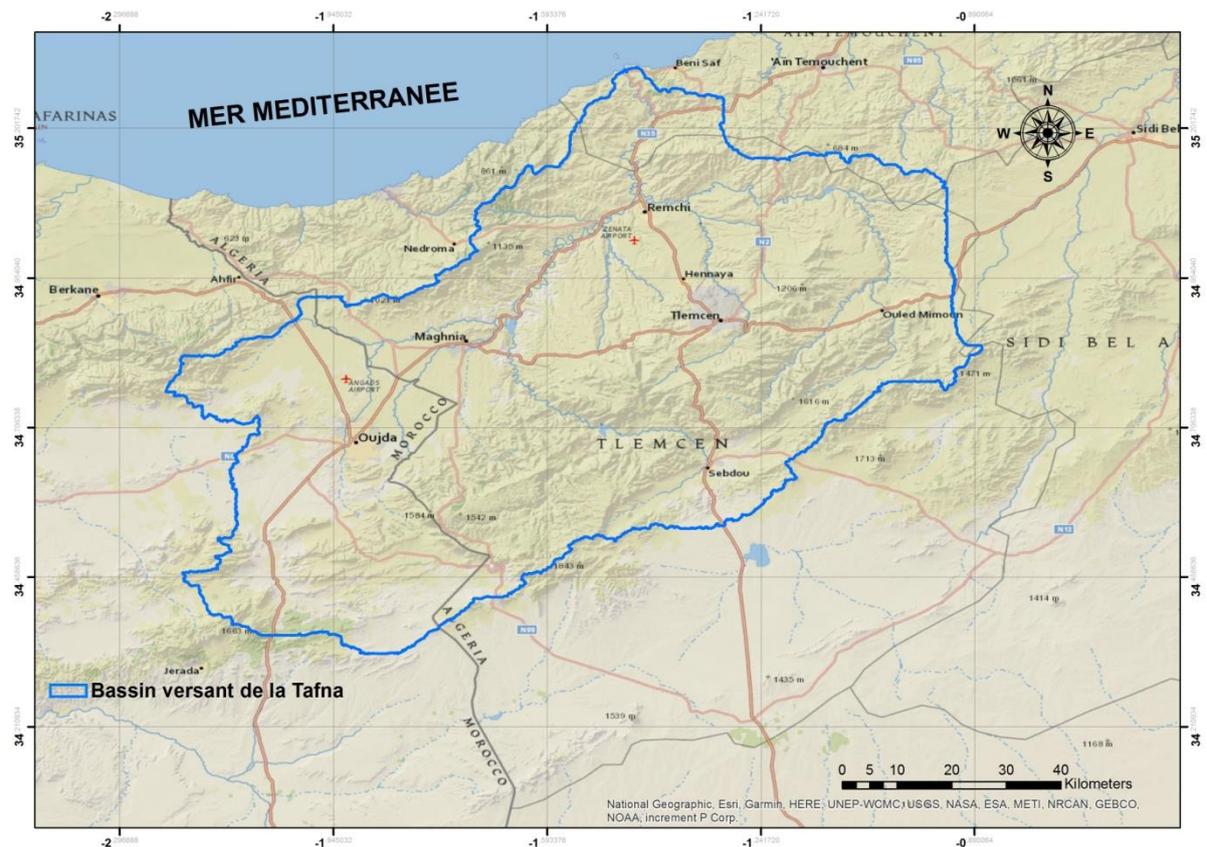


Figure 10. Délimitation du bassin versant de la Tafna (Zettam, 2018)

II.1.3 Les sous bassins de la Tafna

Le bassin de la Tafna est constitué de 8 sous bassins, dont deux se trouvent en amont dans le territoire marocain ils sont codifiés par L'ANRH (fig.11).

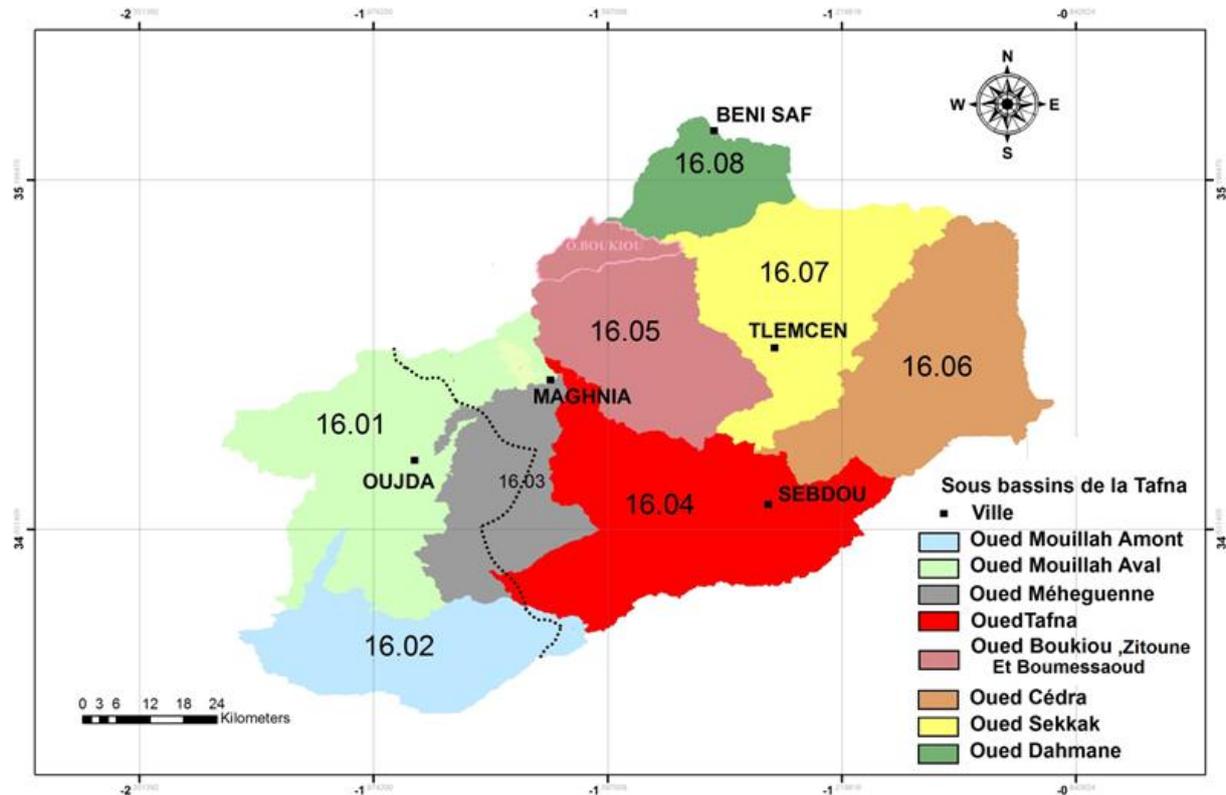


Figure 11. Sous bassins de la Tafna (Zettam, 2018)

II.1.4 Géographie du bassin de la Tafna

Le bassin versant de la Tafna est géographiquement constitué de : (fig.12)

- Les monts des Traras situés au Nord ouest de Tlemcen, c'est une chaîne montagneuse 1250Km².
- Les monts de Sebaa Chiouch situés au Nord-est de Tlemcen avec une surface de 250Km².
- Les monts de Tlemcen situés au Sud, cette chaîne montagneuse s'étend à l'Ouest jusqu'au Maroc et à l'Est jusqu'à la région de Sidi Bel Abbes d'une surface de 3000Km².
- Les plaines et plateaux intérieurs : ils constituent le centre du bassin de la Tafna, on y distingue la plaine d'Hennaya limitée au Sud par les piémonts nord des monts de Tlemcen et au Nord par le plateau de Zenata-Oued Riah situé au Nord ouest et enfin le plateau de Sidi Abdeli-Ain Nehala localisé sur la rive droite de l'oued Isser au Nord d'Ouled Mimoun, ses plaines et plateaux constituent une importante richesse agricole de la région.

- La plaine de Maghnia limitée au Nord par les piémonts sud des Traras, au sud par les piémonts nord des monts de Tlemcen et à l'Ouest par la plaine des Angads (Maroc).

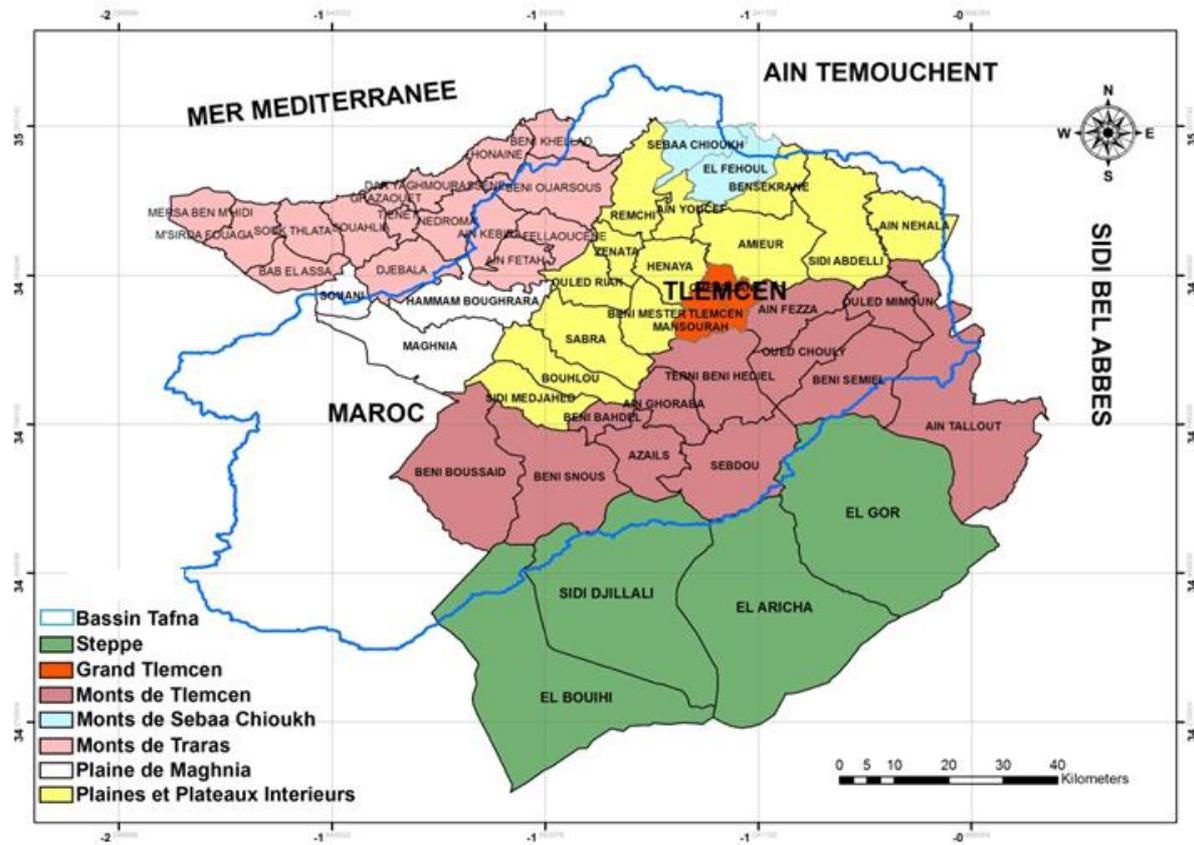


Figure 12. Cadre géographique de la Tafna (Zettam, 2018)

II.1.5 Hydrographie

Le réseau hydrographique de la Tafna est un ensemble important d'oueds et de chaabats qui ont un exécutoire dans l'oued Tafna (fig.13), les plus importants sont : oued Isser, Mouillah, Sikkak, Boumassaoud, Khemis, Boukiou, Dahmane, Chida, et Mehaguene. L'oued Tafna mesure 170km de long et est divisé en trois parties :

- La haute Tafna, l'oued prend naissance au niveau d'Ouled Ouriach jusqu'à Sidi Medjahed, avec comme affluents l'oued Sebdoou et oued Khemis,
- La moyenne Tafna de Sidi Medjahed jusqu'aux gorges de Tahouart et comprend oued Mouillah, Boukiou, Zitoune, Boumessaoud, Isser et Sikkak.
- La basse Tafna des Gorges de Tahouart jusqu'à la mer à Rachgoun.-

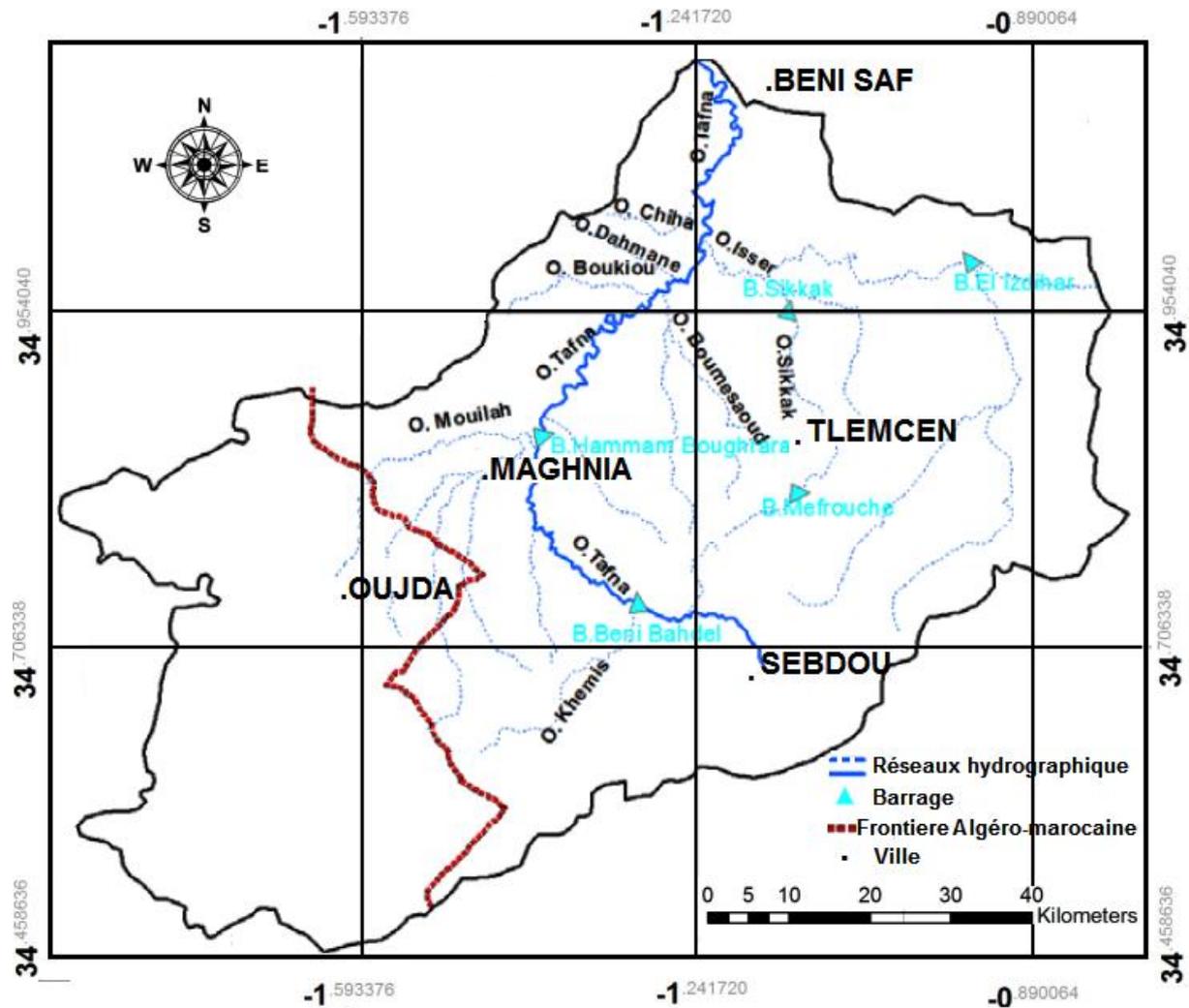


Figure 13. Réseau hydrographique de la Tafna (Zettam, 2018)

II.2 Description du bassin versant de l’oued boukiou

II.2.1 Situation géographique

Le bassin versant de l’oued Boukiou est un sous bassin de la Tafna (affluent rive gauche), situé au Nord ouest de l’Algérie (fig.14). Il occupe une superficie de 117,3Km². Il a une forme allongée traduisant une érosion linéaire et régressive, son altitude moyenne est de 382,74m. Il présente un relief assez fort avec un Ig de Roche de 0.023 et une pente moyenne égale à 5.13% (Zennaki, 2020).

Elle est définie par l’ensemble des chenaux de drainage naturels où s’écoulent les eaux provenant du ruissellement ou restituées par les nappes souterraines soit sous forme de source, soit par restitution continue le long du lit du cours d’eau

La disposition du réseau hydrographique (fig.15) est liée en grande partie à l’évolution des phénomènes structuraux qui ont affecté la région au cours des temps géologiques.

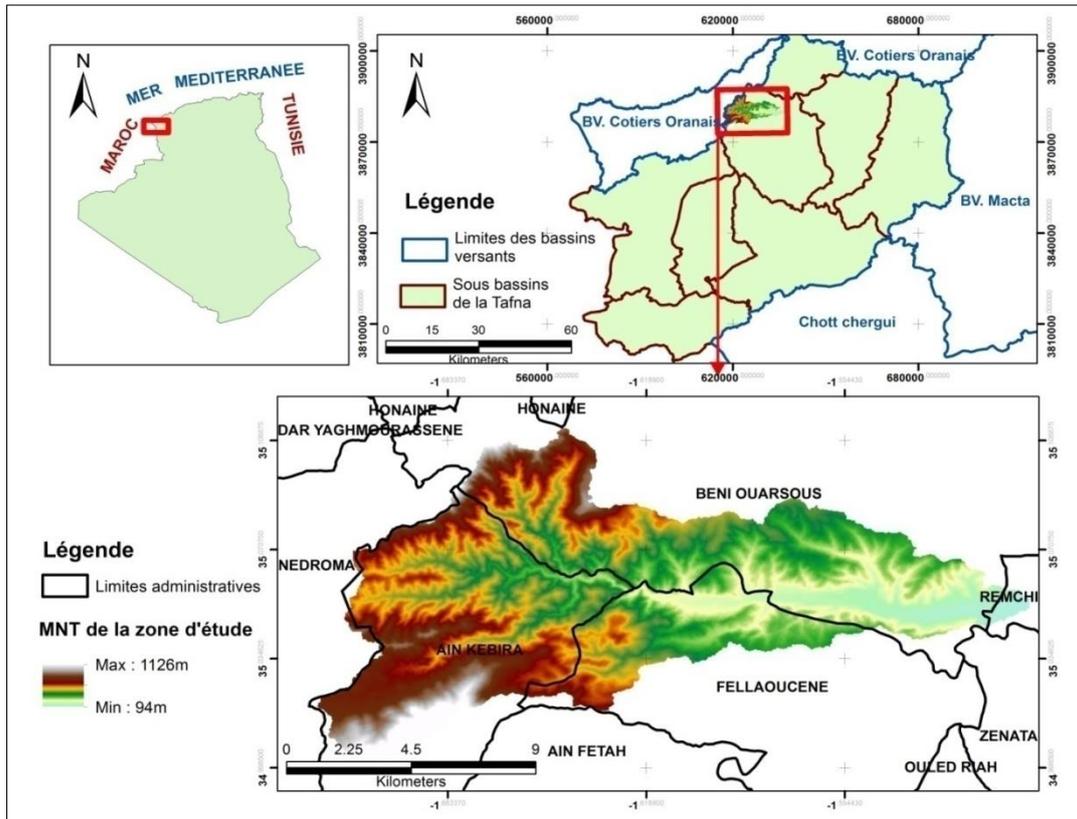


Figure 14. Situation du bassin versant de l'Oued Boukiou

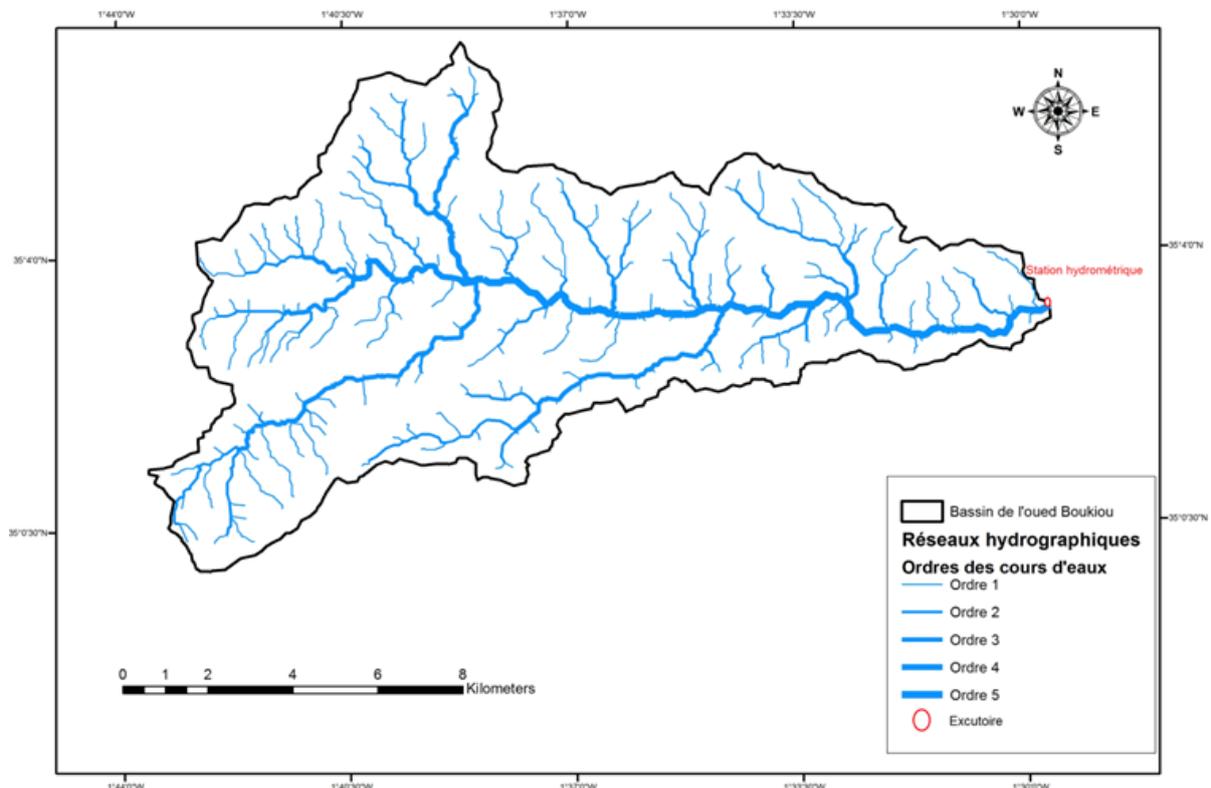


Figure 15. Carte du réseau hydrographique du bassin d'oued Boukiou

II.2.2 Étude des caractéristiques morphométriques

Ce bassin a fait l'objet de plusieurs études intéressantes, Bouanani (2004) dans sa thèse a présenté une analyse en composantes principales mettant en relation les paramètres morphométriques pour caractériser les types des Sous bassins de la Tafna, suivie par celui de Baba-Hamed et al.(2016) caractérisant un bassin versant par l'analyse statistique des paramètres morphométriques. Bouguara (2016) à l'aide de l'outil SIG a repris l'étude des paramètres physiques du bassin de Boukiou pour conforter les résultats de ces prédécesseurs.

Les principaux paramètres morphométriques ayant une influence sur la variation du régime hydrologique sont : la forme, l'ordre des cours d'eau, le relief et en particulier, la densité du drainage, la fréquence des cours d'eau, l'allongement et le profil des flux.

II.2.3 Caractéristiques géométriques

II.2.3.1 Superficie

La superficie est la partie du plan délimitée par la ligne de crête, ou contour du bassin, déterminée par le logiciel Arcgis 10.3. La superficie du bassin versant de l'oued Boukiou est de 117,3 Km².

II.2.3.2 Le périmètre

Le périmètre est la longueur de la ligne de contour du bassin, sa mesure est effectuée en utilisant le logiciel Arcgis 10.3. Le bassin versant a un périmètre de 58 km.

II.2.4 Caractéristiques de la forme

Ce sont les caractères purement géométriques des bassins pouvant être réalisés par la concurrence des seuls levés topographiques.

II.2.4.1 Indice de compacité de Gravelius (Kc) (1914)

L'indice de compacité de Gravelius (Kc) fournit des informations sur la forme du bassin versant qui a une grande influence sur le débit global de l'oued et notamment sur la vitesse de l'hydrogramme à la sortie du bassin versant résultant d'une pluie donnée. Il est établi en comparant le périmètre du bassin avec celui d'un cercle qui aurait la même surface et est exprimé par la formule suivante :

$$KC = 0.28P\sqrt{A} \quad \text{Eq.1}$$

Où :

Kc : Coefficient de compacité du Gravelius.

P : Périmètre du bassin versant (Km)

A : Superficie du bassin versant (Km²)

Cet indice détermine la forme du bassin versant. Il est proche de 1 pour un bassin de forme circulaire et lorsqu'il est supérieur à 1, le bassin est allongé.

Pour notre bassin $K_c = 1,50$, ce qui exprime que le bassin est donc relativement allongé et compact, reflétant une érosion linéaire et régressive.

Sur la base de la valeur obtenue à partir du coefficient de compacité de $K_c \geq 1.12$, le bassin peut être représenté par un rectangle équivalent.

II.2.4.2 Equivalent Rectangle

Ce concept a été développé par Roche en 1963. Il compare l'influence de la forme sur écoulement dans différents bassins versants. Les dimensions du rectangle équivalent sont déterminées par les formules suivantes.

$$P = 2(L + l) = K_c \sqrt{A/0.28P} \quad \text{Eq.2}$$

avec $A = L \times l$

L : Longueur du rectangle (km).

l : Largeur du rectangle (km).

Longueur "L" :

$$L = \frac{K_c \sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right] \quad \text{Eq.3}$$

L=24.14Km

Largeur "l" :

$$l = \frac{K_c \sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right] \quad \text{Eq.4}$$

l=4.86Km

Tableau 1. Formes caractéristiques du bassin versant de l'oued Boukiou

Bassin	Superficie (Km ²)	Périmètre (Km)	Kc	Rectangle équivalent	
				Longueur (Km)	Largeur (Km)
Bassin versant d'oued Boukiou	117.3	58	1.50	24.15	4.86

II.2.5 Caractéristiques du relief

Le relief a un impact significatif sur les différents paramètres hydro-climatiques du bassin versant. C'est un facteur essentiel pour déterminer une grande partie de la capacité de ruissellement et de l'infiltration des terres.

II.2.6 Hypsométrie

La courbe hypsométrique est la courbe de surface en km² ou en pourcentage du bassin versant, lorsque les altitudes sont supérieures à une cote "h" donnée. Le relief d'un bassin est souvent caractérisé par la courbe de sa distribution hypsométrique.

Le tableau 2, représente la répartition de l'altitude du bassin versant de l'oued Boukiou.

Nous avons représenté la courbe hypsométrique (en reportant sur l'axe des y les altitudes (m), et sur l'axe des x les pourcentages des surfaces cumulées) (fig.16), et l'histogramme des fréquences altimétriques (fig.17).

Tableau 2. Répartition hypsométrique du bassin versant du Boukiou

Altitudes m	Superficies km ²	Superficies	Superficies	Superficies
		Partielles (%)	Cumulées km	Cumulées (%)
1200-1100	0,3	0,26	0,3	0,26
1100-1000	0,73	0,62	1,03	0,88
1000-900	0,58	0,49	1,6	1,37
900-800	1,05	0,9	2,65	2,27
800-700	2,38	2,02	5,03	4,29
700-600	6,23	5,31	11,25	9,6
600-500	15,65	13,34	26,9	22,94
500-400	20,32	17,33	47,23	40,27
400-300	24,43	20,84	71,68	61,11
300-200	33,48	28,54	105,13	89,65
200-94	12,15	10,35	117,3	100
Total	117,3	100		

La courbe hypsométrique semble assez régulière (fig.16). A partir de 600m d'altitude, il y a une concavité vers le haut reflétant une érosion récente.

On observe que vers les hautes altitudes, la pente de la courbe est assez forte, ce qui indique la présence d'un plateau, et au niveau des basses altitudes (sortie), la faible pente de la courbe hypsométrique indique la présence d'une vallée profonde.

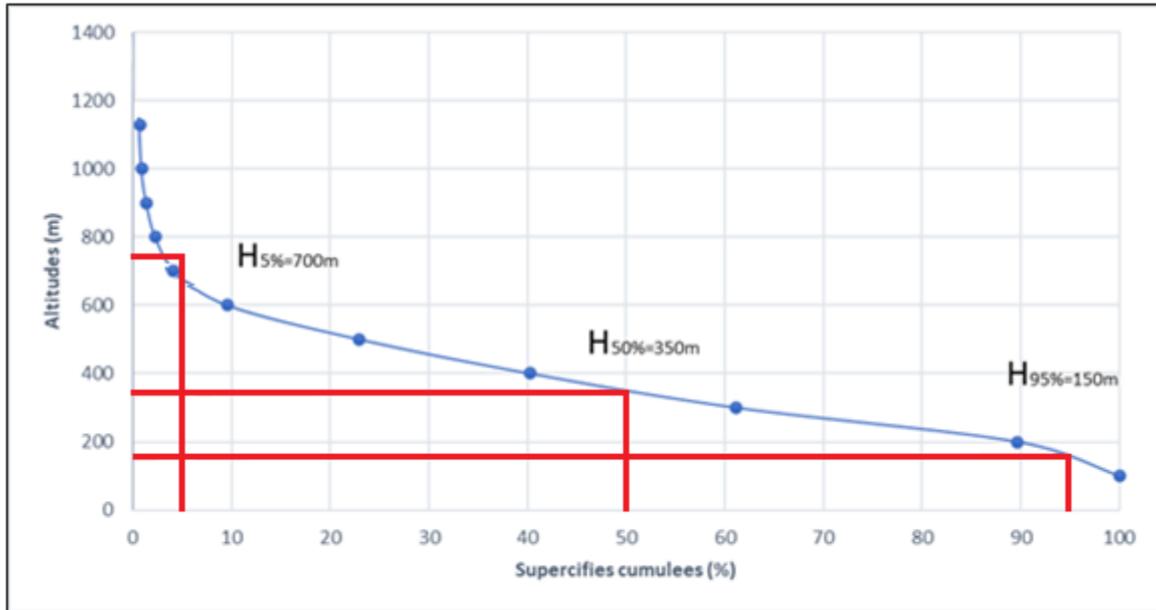


Figure 16. Courbe hypsométrique du bassin versant du Boukiou.

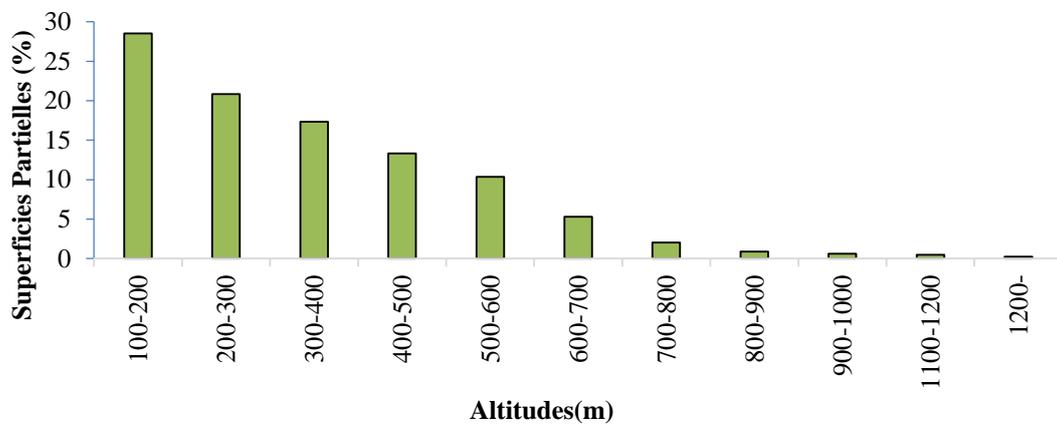


Figure 17. Histogramme des fréquences altimétriques du bassin versant du Boukiou

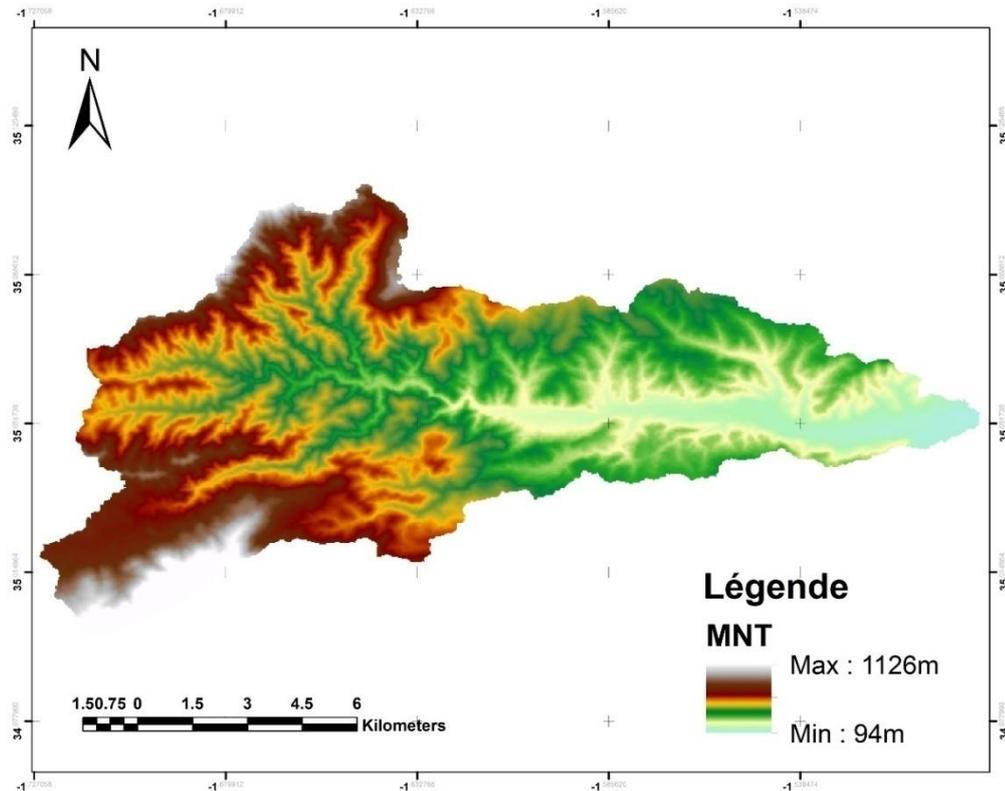


Figure 18. Carte des altitudes du bassin versant de l'oued Boukiou

Les altitudes caractéristiques déterminées à partir de la courbe hypsométrique sont données comme suit et sont résumées dans le tableau 3:

- Altitude maximale :

Elle correspond au sommet du bassin versant (fig.18).

$$H_{\max} = 1126 \text{ m}$$

- Altitude minimale

Elle correspond au point le plus bas du bassin versant.

$$H_{\min} = 94 \text{ m}$$

- L'altitude médiane ou de fréquence $\frac{1}{2}$.

L'altitude médiane correspond à l'altitude au point de l'axe des abscisses. C'est la valeur correspondant à 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique.

$$H_{\text{médiane}} = 350 \text{ m}$$

- L'altitude moyenne

L'altitude qui correspond à la moyenne de la courbe hypsométrique.

$$H_{\text{moyenne}} = \frac{\sum(A_i \times H_i)}{A}$$

$H_{moyenne}=382.74 \text{ m}$

Où :

H : Altitude moyenne du bassin (m),

A_i : Surface entre deux courbes de niveau (km^2),

H_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m),

A : Superficie totale du bassin versant (km^2).

Tableau 3. Calcul de l'altitude moyenne du bassin versant de l'oued Boukiou

Altitude ranges (m)	Superficie "Ai" (km^2)	H_i (Altitude moyenne) (m)	$H_i \times A_i$
1200-1100	0,3	1219	365.7
1100-1000	0,73	1050	761.25
1000-900	0,58	950	546.25
900-800	1,05	850	892.5
800-700	2,38	750	1781.25
700-600	6,23	650	4046.25
600-500	15,65	550	8607.5
500-400	20,32	450	9146.25
400-300	24,43	350	8557.5
300-200	33,48	250	8368.75
200-100	12,15	150	1822.5
Totaux	117,3		44895.7

Tableau 4. Altitudes caractéristiques du bassin versant de l'oued Boukiou

Bassin	Altitude maximum (m)	Altitude minimale (m)	Altitude moyenne (m)	Altitude 50% (m)	Altitude 5% (m)	Altitude 95% (m)	Observation
Bassin de Boukiou	1126	94	382.73	350	700	150	Un vieux bassin

II.2.7 Indices de pente

Ces indices sont destinés à décrire les pentes du bassin et à permettre des comparaisons et des classifications.

II.2.7.1 Indice de pente de Roche "Ip" (1963)

Cette valeur caractérise la pente globale du bassin versant, Elle est exprimée par l'équation suivante :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_n^l \sqrt{a_i \times d_i} \quad \text{Eq.5}$$

Où :

L : Longueur du rectangle équivalent (m)

a_i : Fraction en % de la surface "A" entre deux courbes de niveau, distance adjacente à "di".

$I_p = 1,8 \text{ Km/m}$.

II.2.7.2 Pente globale Indice "Ig"

Cet indice est déterminé en fonction de la courbe hypsométrique, qui est déjà tracée ; on prend les points tels que la surface supérieure ou inférieure soit égale à 5% de la surface totale.

$$I_g = \frac{D}{L} = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L} \quad \text{Eq. 6}$$

Où :

L : Longueur du rectangle équivalent (m)

D : Différence d'altitude égale à $D = H_{5\%} - H_{95\%}$: altitude (m).

Ig : Indice global de pente de ROCHE(1963).

Ig = 0,0228 = 2,28%.

II.2.7.3 Dénivelé spécifique "Ds"

$$D_s = I_g \times \sqrt{A} \quad \text{Eq. 7}$$

La différence de hauteur spécifique apparaît donc comme une correction de la différence de hauteur simple par l'application d'un coefficient qui dépend de la forme du bassin.

Ds = 247m.

II.2.8 Classification du bassin versant de l'oued Boukiou**II.2.8.1** Selon le relief

On se réfère à la classification établie par l'O.R.S.T.O.M (Office de la recherche scientifique et technique d'outre-mer, 1943), pour classer le bassin en fonction de son relief (Tableau 5).

Tableau 5. Classification des reliefs selon les Ig et Ds par l'O.R.S.T.O.M

Classe de relief	Type de relief	Valeurs de Ig	Valeurs de Ds (m)
R ₁	Très faible	Ig < 0.002	Ds < 10
R ₂	Faible	0.002 < Ig < 0.005	10 < Ds < 25
R ₃	Assez faible	0.005 < Ig < 0.01	25 < Ds < 50
R ₄	Modéré	0.01 < Ig < 0.02	50 < Ds < 100
R ₅	Assez fort	0.02 < Ig < 0.05	100 < Ds < 250
R ₆	Fort	0.05 < Ig < 0.5	250 < Ds < 500
R ₇	Très fort	0.5 < Ig	500 < Ds

La valeur de "Ig" trouvée étant égale à 0,0228 indique que le bassin versant de l'oued Boukiou présente un relief assez fort, selon la classification de l'O.R.S.T.O.M. Aussi, la valeur élevée de Ds (249m) reflète l'importance du volume de la montagne et la forte incision du relief et confirme le résultat précédent.

Les résultats sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 6. Valeurs des indices de pente et types de relief du bassin versant de Boukiou

Bassin	Ip (m /km)	Ig	Selon relief « Ig »	Ds(m)	Selon relief « Ds »
Boukiou	1.8	0.0228	Assez fort	249	Assez fort

II.2.8.2 Selon la superficie du bassin versant

Le bassin versant de l'oued Boukiou est un bassin petit fonction de sa superficie comme le montre le tableau suivant :

Tableau 7. Classification des bassins versants en fonction de leur superficie

Très petit bassin versant	Petit bassin versant	Grand bassin versant	Très grand bassin versant
$0 < A \leq 10 \text{ km}^2$	$10 < A \leq 200 \text{ km}^2$	$200 < A \leq 2000 \text{ km}^2$	$A > 2000 \text{ km}^2$

II.2.9 Caractéristiques du réseau hydrographique

Il est défini par l'ensemble des cours d'eau naturels dans lesquels l'eau de ruissellement ou des eaux souterraines s'écoule soit comme source, soit par restauration continue le long du fleuve (Roche, 1963).

II.2.9.1 Hiérarchie des réseaux

Pour présenter le réseau hydrographique de la région, nous nous sommes basés sur la classification des thalwegs. Pour chaque ordre nous déterminons le nombre et la longueur totale de thalwegs (tableau 8). Pour ce faire, nous suivrons les règles de Horton (modifiées par Schumm). En fait, c'est la méthode la plus utile, son principe est comme suit :

- Tout cours d'eau sans affluent est dit d'ordre 1.
- Au confluent de deux rivières de même ordre n, le cours d'eau qui en résulte est d'ordre (n+1).
- Un cours d'eau recevant un affluent d'ordre inférieur garde son ordre.

Tableau 8. Caractéristiques du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Boukiou (Kacemi & Senina, 2015)

Ordre	Nombre	Rapport de confluence	Longueurs Cumulées (km)	Moyenne des longueurs (km)	Rapports des longueurs
1	1063	4,74	157	0,14	3,21
2	224	5,46	101	0,45	2,44
3	41	4,55	45,1	1,1	1,99
4	9	4,5	19,75	2,19	2,51
5	2	2	11	5,5	2,72
6	1	0	15	15	0

Selon la classification de Schumm, les analyses du tableau 8 montrent que notre bassin est d'ordre 6.

Les paramètres les plus importants qui caractérisent le régime hydrologique d'un cours d'eau sont la densité de drainage (Dd), le rapport de confluence (Rc) et le rapport des longueurs (RL).

II.2.9.2 Rapport de confluence (Rc)

II.2.9.2.1 Méthode analytique

Il est défini par le rapport du nombre de thalwegs d'ordre 'n' par celui d'ordre (n+1) :

Où :
$$R_c = \frac{N_n}{N_{n+1}}$$
 Eq. 8

N_n : Nombre de cours d'eau d'ordre n.

N_{n+1} : Nombre de cours d'eau d'ordre (n+1).

Tableau 9. Calcul du rapport de confluence du bassin versant de l'oued Boukiou (Méthode analytique)

Ordre	1/2	2/3	3/4	4/5	5/6	Moyenne
Rapport de confluence	4,74	5,46	4,55	4,5	2	4,25

II.2.9.2.2 Méthode graphique

Les points reportés sur le diagramme semi-logarithmique sont alignés le long d'une ligne (fig.19). Le rapport de confluence moyen est égal à la pente de la droite ajustée à tous les points.

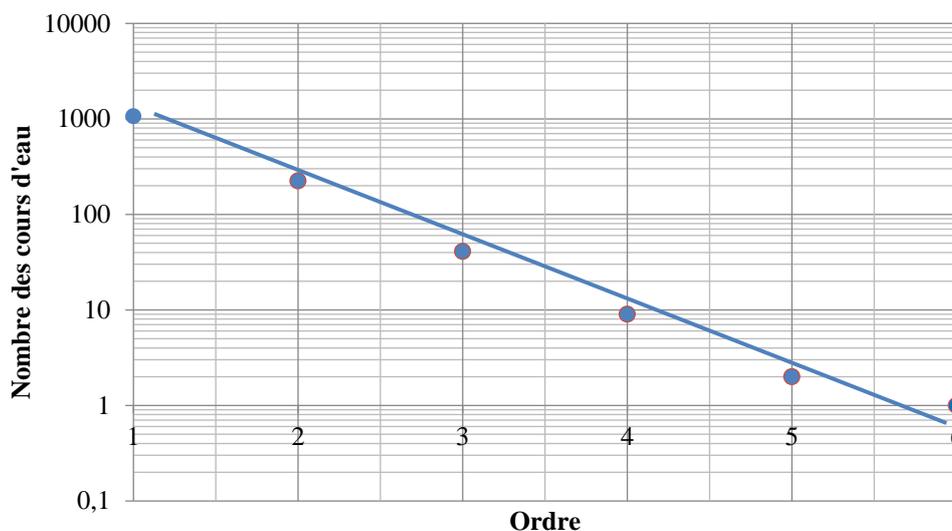


Figure 19.Représentation graphique du rapport de confluence

Le rapport de confluence moyen est représenté par : $R_c = \log^{-1} a$

$$R_c = 4,79 < 5$$

La figure 19 montre que le réseau est bien organisé, le nombre de flux d'ordre croissant forment une série géométrique inverse. Le rapport de confluence moyen est inférieur à 5, ce qui signifie que le réseau est de type chêne.

II.2.9.3 Rapport de longueur (R_L)

II.2.9.3.1 Méthode d'analyse

Le rapport de longueur est définie par :

$$R_L = \frac{L_{n+1}}{L_n} \tag{Eq. 9}$$

L_n : Longueur moyenne des thalwegs d'ordre (n).

L_{n+1} : Longueur moyenne des thalwegs d'ordre (n+1)

Tableau 10. Calcul du rapport des longueurs du bassin de l'oued Boukiou (Méthode analytique).

Ordre	1	2	3	4	5	Moyenne
Rapport de longueur	3.21	2.44	1.99	2.51	2.72	2.574

II.2.9.3.2 Méthode graphique

Selon la figure 20, le ratio de longueur moyenne est représenté par : $R_L = \log^{-1} a$

$$R_L = 2,57$$

La figure 20, montre que le réseau est bien organisé, les longueurs moyennes des thalwegs d'ordre croissant successifs forment une série géométrique directe.

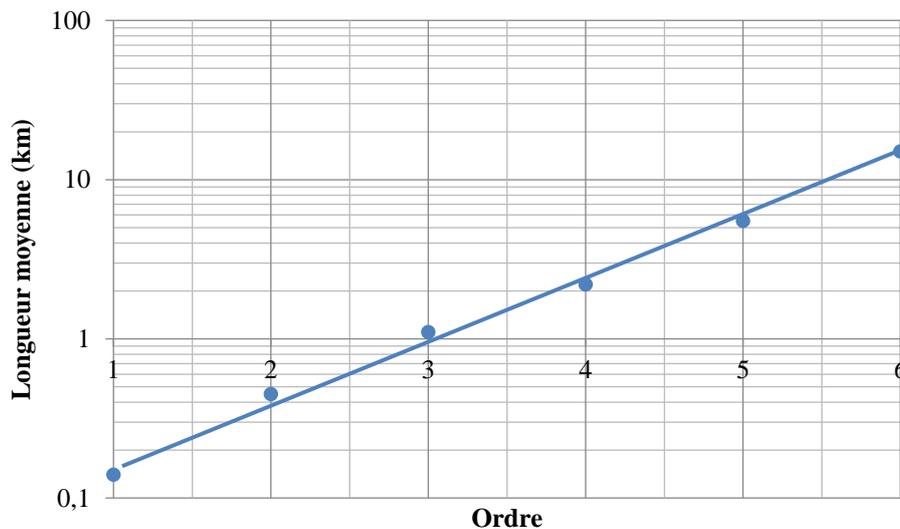


Figure 20. Représentation graphique du rapport des longueurs.

II.2.9.4 Densité de drainage

En 1945, Horton a introduit la densité de drainage comme longueur totale de la zone hydrographique par unité de bassin versant. Il est défini par l'équation suivante :

$$Dd = \sum_1^n \frac{L}{A} \quad \text{Eq. 10}$$

Où :

A : Superficie du bassin versant (km²)

L : Longueur cumulée des cours d'eau (km)

Dd : Densité de drainage (Km/Km²)

Par conséquent : Dd = 2,97 Km⁻¹

II.2.9.5 Fréquence des flux

Elle représente le rapport du nombre total des thalwegs d'ordre N à la surface (A) du bassin

$$F = N_i / A \quad \text{Eq. 11}$$

Où :

F : Densité hydrographique (km⁻¹),

N : Nombre de thalwegs d'ordre N,

A : Superficie du bassin versant (km²),

F = 11,42, ce qui correspond au nombre moyen de thalwegs par km²

II.2.9.6 Coefficient de torrentialité

Ce coefficient prend en compte à la fois la densité des thalwegs élémentaires par la densité de drainage :

$$C_T = D_d \times F_1 \quad \text{Eq. 12}$$

Où :

D_d : Densité de drainage (Km/Km²),

F₁ : Fréquence des thalwegs élémentaires, F₁ = N₁ / A avec : N₁ est le nombre de flux d'ordre 1=1063,

Par conséquent : C_T = 26,95

La valeur élevée du coefficient torrentiel correspond au système hydrographique provenant d'une zone montagneuse et plus ou moins pluvieuse (Bouanani, 2004).

II.2.9.7 Temps de concentration

C'est le temps qu'il faut à une particule d'eau provenant de la partie la plus éloignée du bassin pour atteindre la sortie, pour son calcul, nous utilisons la formule de Giandotti :

$$Tc = \frac{4\sqrt{A}}{0.8 \times \sqrt{(H_{moyenne} - H_{min})}} + 1.5L \tag{Eq. 13}$$

Où :

T_c : Temps de concentration (Heures).

A : Superficie du bassin hydrographique (km²).

L : Longueur principale du cours d'eau (km).

H : Altitude moyenne (m).

H min : Altitude minimale (m).

Donc : T_c = 06 heures

Le temps de concentration de l'eau dépend non seulement de la surface mais aussi d'autres paramètres tels que la lithologie, la pluviométrie et le terrain (Bouanani, 2004).

II.2.9.8 Profil en long de l'oued Boukiou

Le profil le long du cours d'eau principal du bassin versant (fig. 21) fournit des éléments complémentaires à ceux apportés par l'étude de la densité de drainage. En effet, nous remarquons une pente relativement forte au niveau de l'extrémité occidentale due probablement au changement de faciès et à une néotectonique.

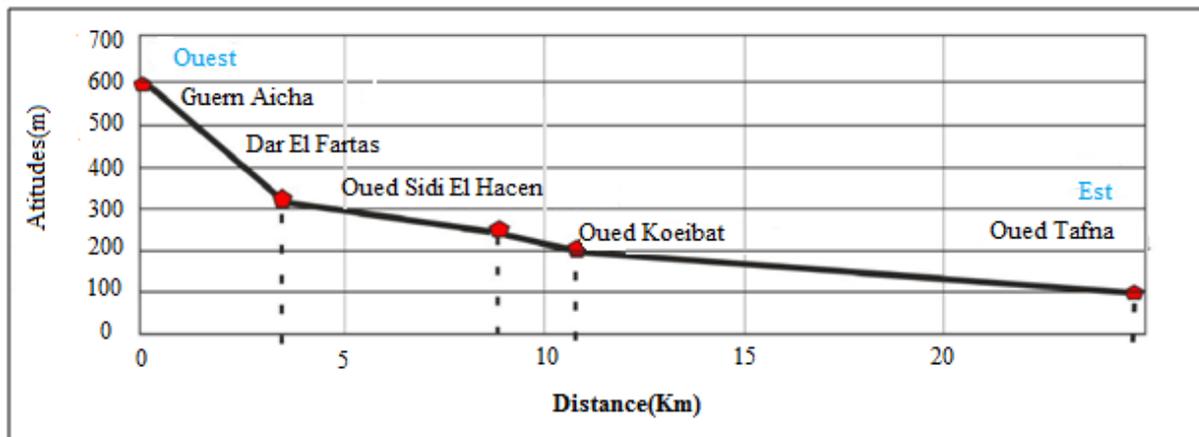


Figure 21. Profil en long de l'oued Boukiou.

II.2.9 Profil croisé de l'oued Boukiou

Le profil en travers (fig. 22), met en évidence de fortes pentes au Sud attribuées au chevauchement de la montagne de djebel Fillaoucène sur un massif schisteux. Les rives sud et nord constituent l'impluvium principal vu leurs fortes pentes.

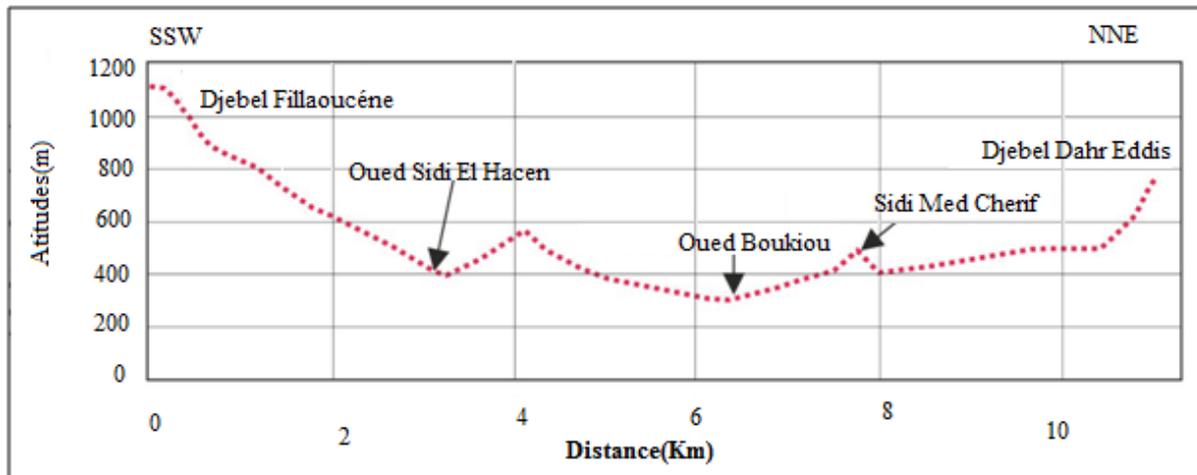


Figure 22. Profil croisé de l'oued Boukiou.

II.2.10 Occupation du sol

La végétation est un facteur déterminant de la vitesse de ruissellement de surface, du taux d'évaporation et de la capacité de rétention du bassin. Par conséquent, la présence de végétation a un rôle de « Régulateur » dans le régime d'écoulement. La couverture terrestre a une influence directe sur le débit d'un oued ainsi que les facteurs orographiques et climatiques. En effet, lorsque la végétation se développe, le ruissellement est retardé et le pic de crue est atténué, le débit étant plus long, et la part d'eau absorbée par l'évapotranspiration augmente et le volume de la crue diminue. La forêt pour exemple, intercepte une partie de l'averse par sa fronde. Par contre, un sol nu avec une faible capacité de rétention favorise un ruissellement très rapide. Cette influence de la forêt sur le régime hydrique dans la région méditerranéenne a un rôle considérable (Bouanani, 2004).

La végétation du bassin de la Tafna a été largement dégradée et défrichée dans les montagnes par le feu et par une petite agriculture extensive, entraînant une perte d'eau par évaporation et érosion accélérée. Concernant les types d'occupation des sols, les plus représentatifs du bassin versant de Boukiou nous citons les broussailles, les céréales, les terrains de parcours et les forêts (Bouanani, 2004). De plus, notre bassin versant est occupé en amont dans sa partie centrale par des broussailles, et quelques vignobles et cultures céréalières avec peu d'arboriculture. En aval, les monts des Traras sont couverts de forêts avec une proportion des parcours et des cultures annuels.

L'occupation des sols dans notre bassin est illustrée à la figure 23 basée sur l'analyse des pourcentages des valeurs des types de professions, nous notons que notre bassin connaît une activité agricole non négligeable.

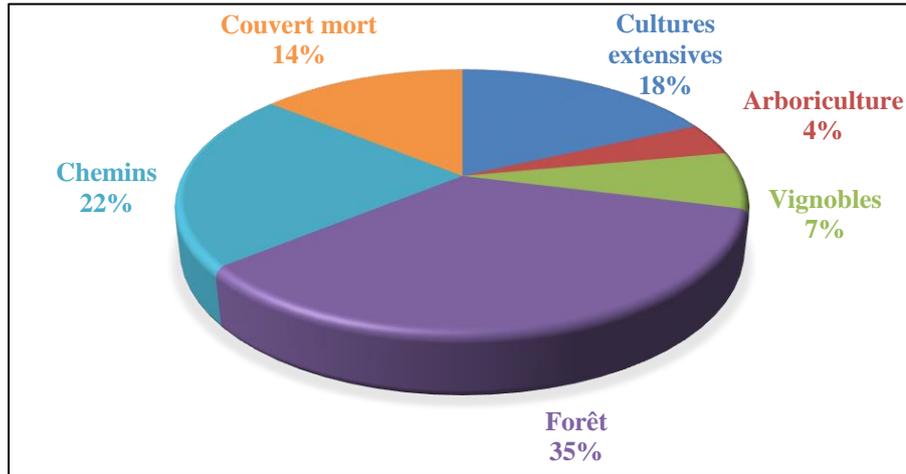


Figure 23. Répartition de la couverture terrestre du bassin versant de l'oued Boukiou
(Source : Département des services agricoles de Tlemcen (2012/2013))

II.3 Géologie et hydrogéologie

II.3.1 Géologie

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

II.3.1.1 Cadre géologique

La structure actuelle de l'Algérie du Nord est liée aux mouvements hercyniens et alpins qui ont permis l'individualisation de plusieurs domaines (Fig.24). En Oranie, nous distinguons du Nord au Sud (fig.24) :

- La chaîne alpine (Monts des Traras et les monts de Tlemcen).
- Les hautes plaines Oraïses.
- L'Atlas saharien.

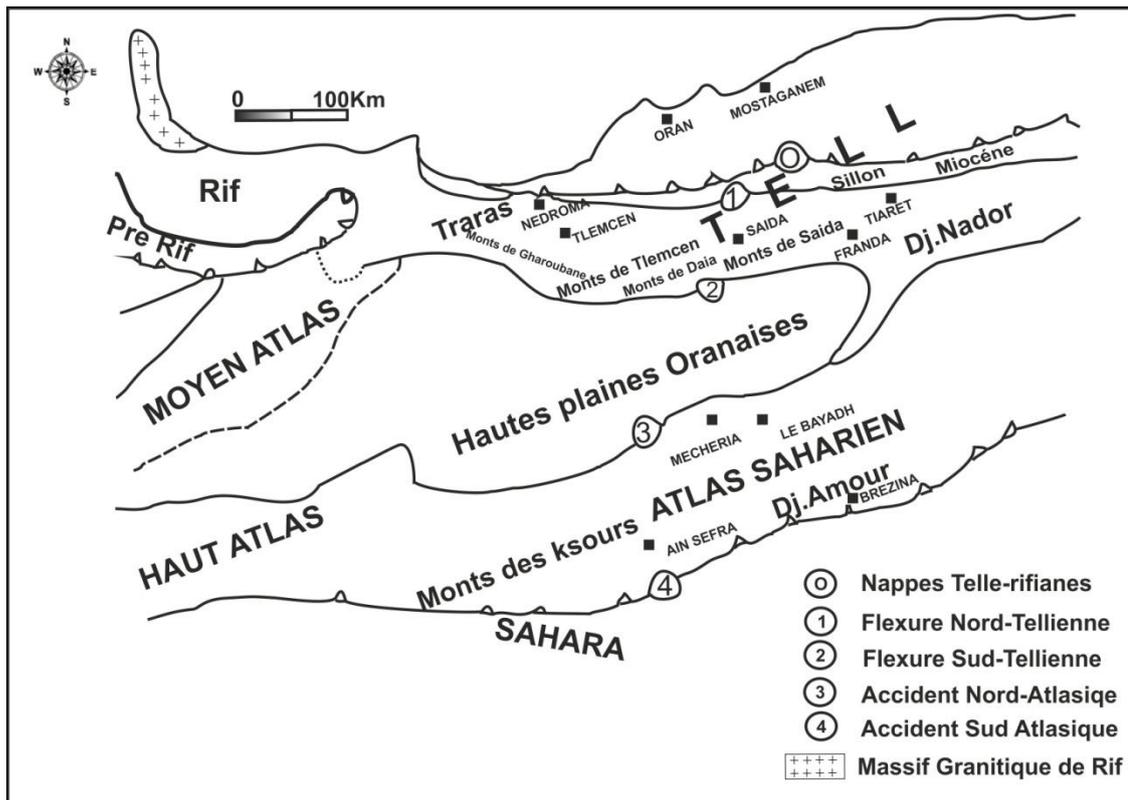


Figure 24. Schéma de la chaîne alpine de l'Algérie Nord occidentale (Ameur, 1988)

Le bassin de la Tafna comprend de grandes plaines, dont les deux principales sont celle de Maghnia à l'Ouest et celle des Ghossels à l'Est entourées de massifs élevés :

- Le massif montagneux des Traras au Nord est continué par des formations jurassiques

Essentiellement formées de calcaire, de marne et de calcaire marneux qui se prolongent sous les assises marneuses du Miocène. Il comporte la chaîne des Fillaoucène qui fait partie de la chaîne alpine et s'étendant vers l'Ouest par le massif des Béni-Snassen (Maroc occidental) (fig.25).

- Les monts de Tlemcen au Sud sont formés des terrains jurassiques carbonatés et dolomitiques présentant une étape de karstification importante qui facilite l'infiltration de eaux pluviales. Le massif calcaire des monts de Tlemcen dessine la bordure sud du bassin et s'interpose entre le domaine des nappes du Tell au Nord et le domaine stable des hautes plaines oranaises au Sud (fig.25).

Les formations alluviales anciennes au centre recouvrent des dépôts alluviaux marins d'âge miocène supérieur et inférieur ainsi des dépôts lacustres d'âge plus récent, les formations alluvionnaires récentes sont dispersées le long des vallées et dans la basse Tafna.

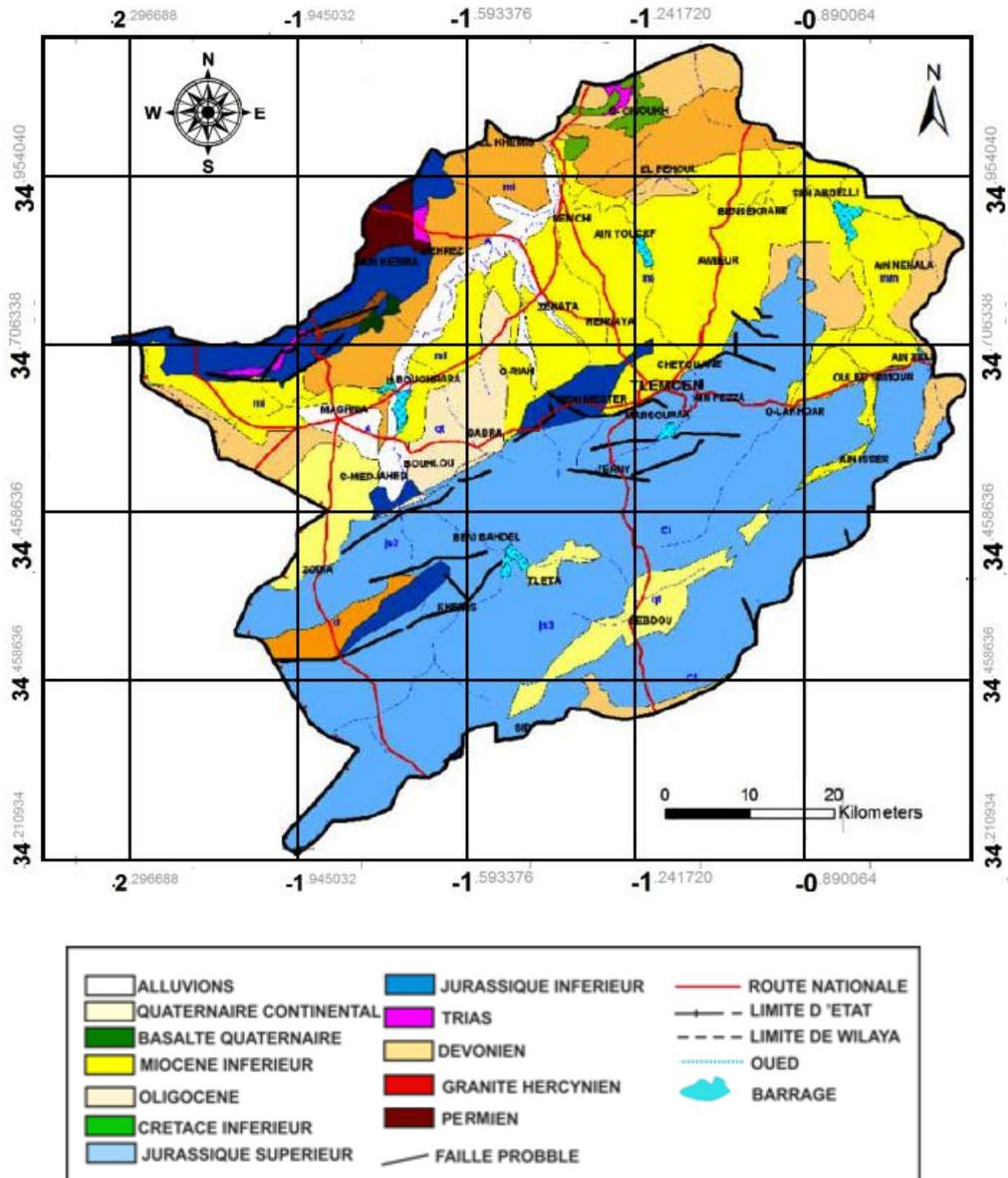


Figure 25. Extrait de la carte Géologique du Nord d'Algérie 1/500 000 (A.S.P.W.I.T, 2010)

Le bassin versant d'oued Boukiou à un substratum rigide constitué des roches anciennes de Dj Fillaoucène à 1138m, le bassin est caractérisé par (fig.26) :

- ❖ Les formations schisto-quartziques très compactes du Dévonien à l'ouest.
- ❖ Les argiles et des marnes dolomitiques et gypseuses du Trias et Jurassique moyen au centre.
- ❖ Les formations du Miocène Inférieur et moyen avec une alternance de poudingues formés d'éléments calcaires dolomitiques à ciment grès-calcaire et des séries argilo-marneuses intercalées par des bancs décimétriques de grès ferrugineux friables à l'Est (Bouanani, 2004)

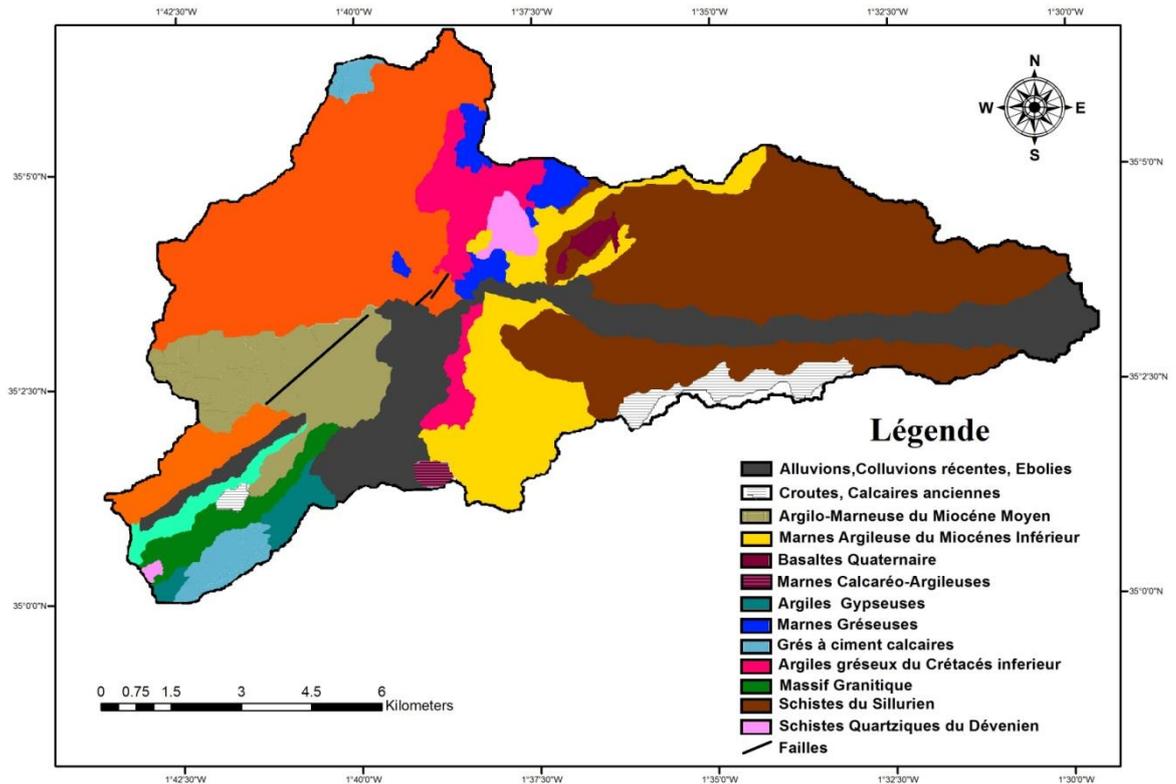


Figure 26. Carte géologique du bassin versant d'oued Boukiou. Modifié ZENNAKI.A 2020

La région se présente comme un bombement anticlinal de direction générale NE-SW, constitué par des terrains primaires formant le substratum sur lequel reposent les formations allant du Permo-Trias au Miocène.

II.3.1.2 Étude lithostratigraphique

L'évolution verticale des terrains rencontrés s'étend du Primaire au Quaternaire et présente trois grandes séries lithostratigraphiques distinctes qui sont de bas en haut (fig. 27) :

-**Substratum primaire** : (Infra-Silurien à Dévonien) : Très développé dans la partie nord occidentale.

-**Couverture secondaire** : (Permo-Trias à Crétacé basal) : Très épaisse, affectée par une tectonique souple et cassante très complexe.

-**Dépression miocène** : A l'Est, où l'on voit la mise en place de puissantes séries mio-plio-quaternaires.

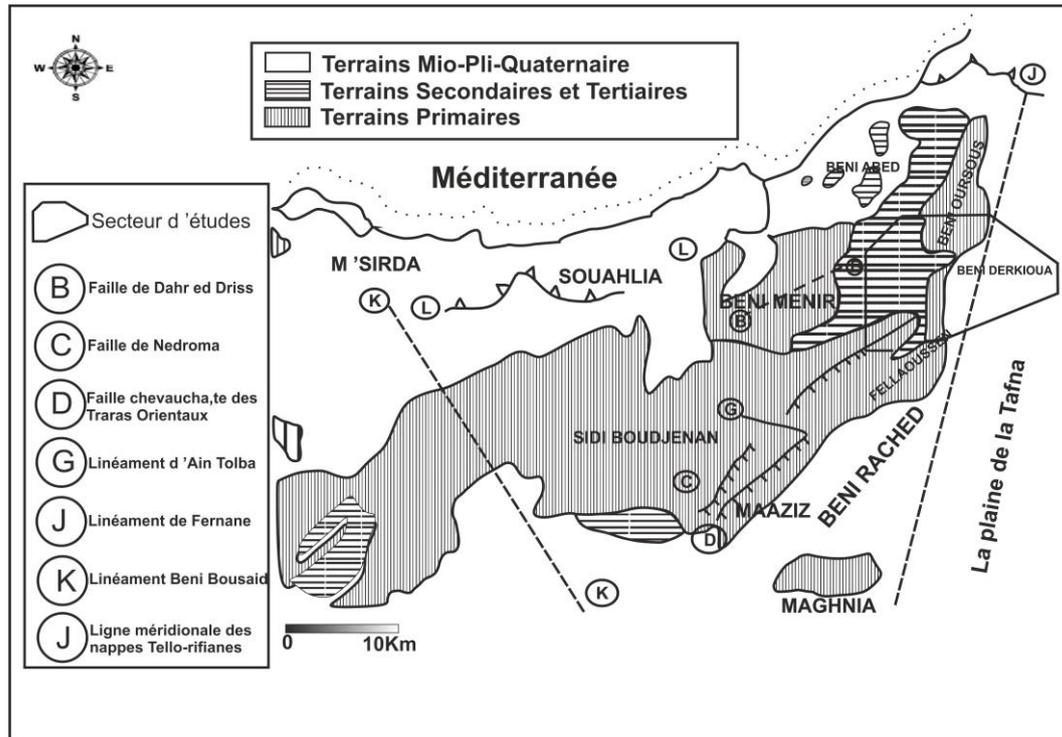


Figure 27. Situation géologique du Secteur étudié (Ameur, 1988)

II.3.1.2.1 Substratum primaire

On distingue les formations Schisto-quartzitique d'âge infra-silurien caractérisées par les schistes de couleur brune. Le massif granitique est abondant dans la région de Nedroma et l'intrusion granitique a développé une auréole de métamorphisme (Guardia, 1975),

II.3.1.2.2 Couverture secondaire

Cette série est représentée d'une part par la sédimentation détritique qui est caractérisée par les poudingues de Béni Menir (Gentil, 1903 ; Guardia (1970-1975) ; Bensalah, 1977, Benhamou, 1983 et Ameur, 1978, 1988), les conglomérats d'Ain Meftah attribués au Permo-Trias (Bensalah, 1977), et les formations conglomératiques du Permo-Trias de couleur rougeâtre visibles au niveau de l'oued Boukiou (Bensalah, 1977).

On distingue d'autre part, le complexe volcano sédimentaire du Lias inférieur composé essentiellement des épanchements volcaniques basaltiques, les formations carbonatées du Lias moyen comportant les calcaires compacts de Zailou (fig.28) (Kebir & Miri, 1992) et les calcaires graveleux de Tisedoura, les Ammonitico-Rosso des Traras (Guardia, 1975), les marno-calcaires de Bayada, les calcaires des Traras, les Marnes de Sékika visibles au Djebel Sekika, les argiles de Saida présentes dans tout le massif des Traras et dans notre secteur d'étude (Djebel Fillaoucène), les grés de Boumediene (Guardia, 1975, Benest, 1984), les dolomies de Tlemcen, les marnes carbonatées de couleur beige à verdâtre, et enfin les dolomies aptiennes, un groupe argileux-marneux, calcaires argileux et marno-calcaire blanc (Guardia, 1975).

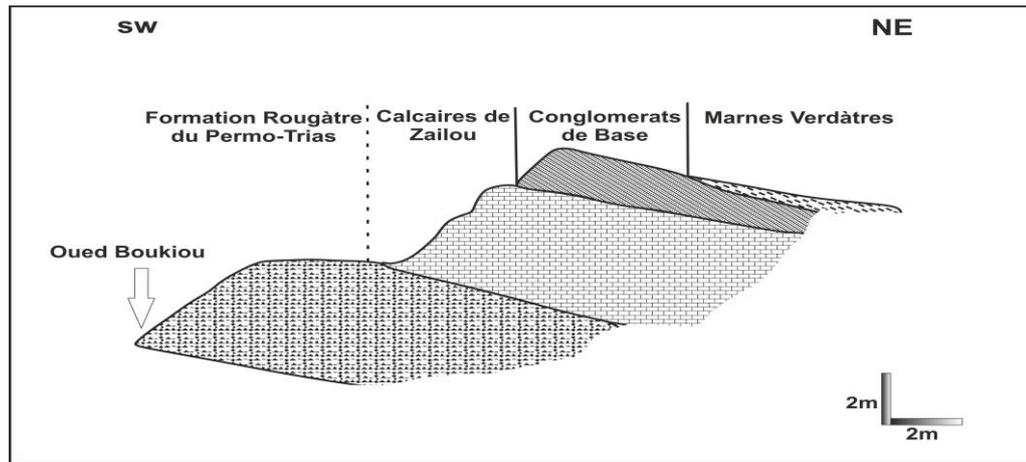


Figure 28. Coupe réalisée au niveau de l'Oued Boukiou
(Kébir & Miri, 1992)

II.3.1.2.3 Dépression miocène

Au niveau de la dépression miocène, on y reconnaît de bas en haut :
Les conglomérats de base visible sur la route Tlemcen-Ghazaouet, les marnes du Miocène inférieur de couleur verte, les basaltes de l'oued Boukiou, très fissurés d'une quarantaine de mètres (Sadran, 1958), et enfin les marnes gréseuses du Miocène moyen constituées par des marnes grises à verdâtre et des grès jaunes à roux (Guardia, 1975).

II.3.1.2.4 Quaternaire

Le quaternaire est constitué des travertins visibles au niveau d'Ain Kébir, et des alluvions occupant la vallée de l'Oued Boukiou, elles se traduisent par des alluvions grossières sur le support miocène nettement entamé (Kébir & Miri, 1992). Il s'agit de blocs de graviers de tailles variables.

Plusieurs mètres de limons de teinte claire surmontent directement les graviers provenant probablement de l'action du ruissellement sur les flancs marneux du Miocène de la vallée. Les limons présentent parfois des passés grossiers (fig.29).

Ages des Formations	Colonne Lithostratigraphique	Les Formations
Quaternaire		Alluvions+Limens
Miocène moyen (Serravalien)		Alternances de Marnes et de Grès
Miocène Inférieur		Basaltes de Boukiou
Miocène Inférieur		Marne Verdâtres
Miocène Inférieur		Conglomerats de Base
Coniacien		Marno-Calcaires Blancs
Turonien		Calcaires Argileux
Coniacien		Groupe Argilo-Marneux
Aptien		Dolomie Aptienne
Tithonien à Valanginien		Groupe Marno-Carbonaté
Kimmeridgien Supérieur		Dolomie de Tlemcen
Oxfordien supérieur à Kimmeridgien Inférieur		Grès de Boumediène
Callovo-Oxfordien		Argiles de Saida
Bathonien		Marnes de Sekika
Aoléno-Bajocien		Calcaires des Traras
Toarcien		Calcaires de Tissedoura
Domérien		Calcaires de Tissedoura
Carixien		Calcaires compacts de Zailou
Permo-Trias à Infra Lias		-Formations Volcano-Sédimentaire -Série Détritque Pourpe
Paléozoïque		Schistes Quartzitiques

Figure 29. Log synthétique du secteur d'étude (Kébir & Miri, 1992)

II.3.2 Hydrogéologie du secteur d'étude

Cette synthèse hydrogéologique est faite sur la base des travaux de magister de Zennaki en 2016.

Le substratum de la région formé par le Primaire et le Secondaire est recouvert par des sédiments miocènes et quaternaires.

Les structures profondes dues aux mouvements verticaux sont masquées par des formations miocènes affectées de déformations souples. Il faut donc distinguer dans notre secteur d'étude parmi les ressources en eaux souterraines les nappes profondes hypothétiques et les nappes superficielles observables.

Le changement très fréquent et rapide du lithofaciès et des épaisseurs des formations qu'offrent les horizons au-dessus du substratum, rend difficile la détermination des réservoirs potentiels.

Les seules formations qui peuvent être considérées comme réservoirs fréquents dans notre secteur d'étude sont :

- Les calcaires du Lias.
- Les dolomies de Tlemcen.
- les alluvions Plio-Quaternaires

Le tableau suivant englobe toutes les caractéristiques hydrogéologiques des formations du log stratigraphique de la zone d'étude.

Tableau 11. Distinction hydrogéologique des formations d'oued Boukiou

	Niveaux imperméables	Niveaux perméables
Nappe profondes	- Schistes Quartzeux - Formations conglomératiques du Permo-Trias - Complexe volcano-sédimentaire du Lias inférieur - Formation marno-calcaire du Toarcien - Marnes de Sekika - Argiles de Saida - Groupe marno-carbonaté - Groupe argilo-marneux - Marno-calcaires Blancs	- Grès de Boumediene - Granite de Nedroma - Calcaires du Lias - Dolomies de Tlemcen - Calcaires des Traras, Dolomies aptiennes et calcaires blancs du Turonien -Conglomérats de base du Miocène -Travertins
Nappes superficielles	-Marnes du Miocène (Marnes verdâtres et marnes gréseuse) et les limons superficielles.	-Basaltes et Alluvions grossiers de l'Oued Boukiou

Dans notre zone d'étude le principal épanchement basaltique très fissuré en contact avec les alluvions par sa terminaison est formé par les restes d'une coulée dont le tracé suit le cours de l'Oued Boukiou.

Les alluvions couvrent tout le fond de la vallée de l'Oued Boukiou. En effet, le réservoir alluvionnaire possède un mur et des rives totalement étanches représenté par les marnes gréseuses du Miocène moyen (fig.30) en aval et les marnes verdâtres du Miocène inférieur en amont.

L'aquifère alluvionnaire, constitue la principale ressource en eau de la région, que ce soit pour l'alimentation en eau potable du village Boukiou, ou pour l'irrigation des terres cultivables de la vallée.

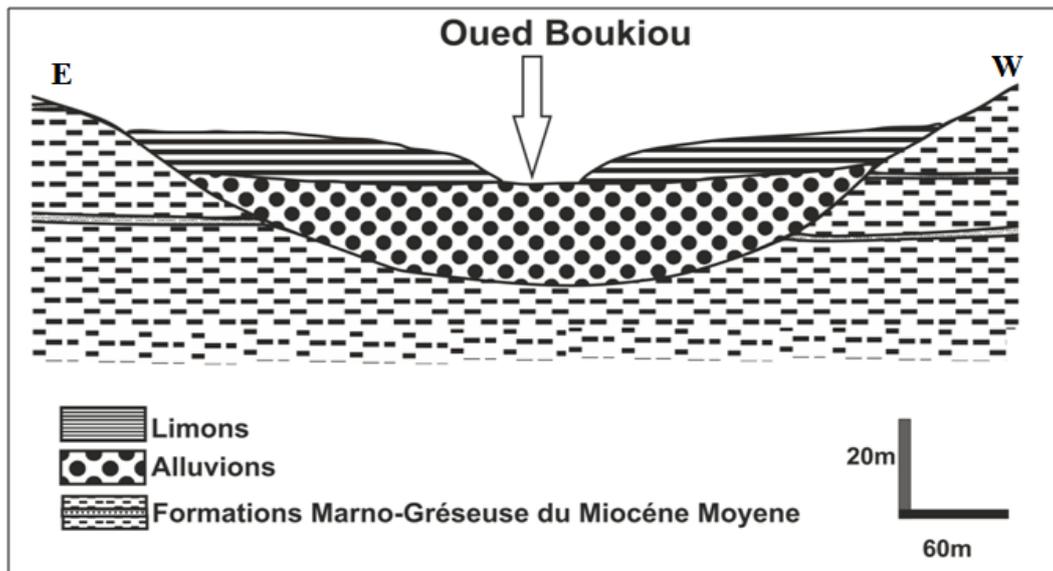


Figure 30. Coupe à travers de la plaine alluviale de l'Oued Boukiou (Zennaki, 2016)

II.4 Conclusion

En général, l'étude morphométrique nous a donné les informations suivantes sur le bassin de l'oued Boukiou :

- le bassin versant de l'oued Boukiou à une superficie de 117.3 km². Il est relativement compact, reflétant une érosion régressive et linéaire. La courbe hypsométrique reflète bien l'aspect vallonné de la zone.

Le bassin présente un substratum rigide formé des roches anciennes de Dj Fillaoucène (Bouanani, 2004), il est caractérisé par :

- Le massif primaire et secondaire occupant les hautes altitudes.
- Le Mio-plio-Quaternaire occupant la plaine à basse altitude.

Toute fois l'étude hydrogéologique a révélé l'existence des formations carbonatées perméables représentées par les poudings du Miocène inférieur et Moyen et la présence d'une nappe alluviale surexploitée par les agriculteurs.

Chapitre 3
ETUDE
HYDROCLIMATOLOGIQUE

III Introduction

Le climat correspond aux conditions et à l'ensemble des phénomènes météorologiques moyennes (températures, précipitations, ensoleillement, humidité de l'air, vitesse des vents, etc.) qui règnent sur une région donnée durant une longue période. Il est déterminé par la situation géographique du lieu (latitude, altitude, éloignement par rapport la mer).

Les conditions climatiques jouent un rôle important dans les comportements hydrologiques des cours d'eau et des conditions de recharge des aquifères.

Afin de déterminer le type de climat sur notre région d'étude, nous avons visé dans cette partie les principaux facteurs essentiels du bilan hydrique (Précipitations, Température et évapotranspiration).

Les précipitations sont des éléments très importants qui conditionnent le ruissèlement de surface aussi bien que l'infiltration. D'une part elles favorisent la compréhension et l'analyse du comportement hydrologique des cours d'eau et d'autre part elles établissent les bilans d'eau des bassins versants.

L'étude des séries hydrométriques menée sur une durée assez longue permet donc d'évaluer la réponse des rivières aux variations du climat. Dans cette optique, nous allons examiner l'évolution des précipitations et des écoulements au cours des dernières décennies dans le bassin versant d'Oued Boukiou.

Les données utilisées dans ce chapitre ont été recueillies auprès de l'Office National de Météorologie (O.N.M Oran) pour les précipitations et les températures et l'agence Nationale des Ressources Hydriques ANRH pour les débits (tableau 12 et figure 31).

Tableau 12. Description des stations hydrométéorologiques de la zone d'étude.

Nom	Code	Coordonnées			Période d'observation	Paramètres mesurés
		Longitude	Latitude	Altitude (m)		
Dj Chouachi	160518	01° 31'W	35° 14' N	130	1974-2016	P et Q
Zennata	605310	01° 46'W	35° 01'N	247	1974-2016	T

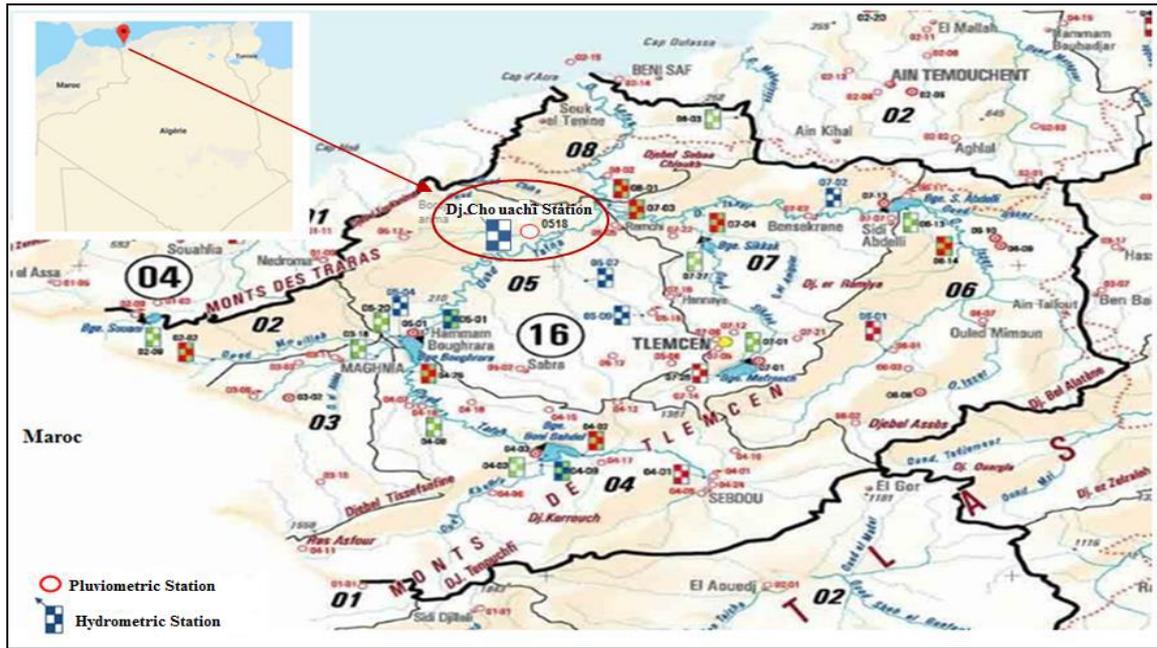


Figure 31. Situation des stations de mesure hydrométéorologiques.

III.1 Etude des précipitations

III.1.1 Variabilité interannuelle des précipitations

Sur une période de 42ans, la pluie est très irrégulière, avec 17années supérieures à la moyenne interannuelle de 291.7mm (fig.32).

L'évolution des précipitations permet de distinguer un maximum en 2008-2009 de 551.2mm caractérisant une rupture de la période sèche qui a duré trois décénies, et un minimum enregistré en 1987-1988 qui est de 143.4mm

Le coefficient d'irrégularité $= P_{max} / P_{min} = 3.84$, confirme que notre régime est très irrégulier de type méditerranéen, une abondance des périodes sèches par rapport aux périodes humides, le reste c'est des périodes humides.

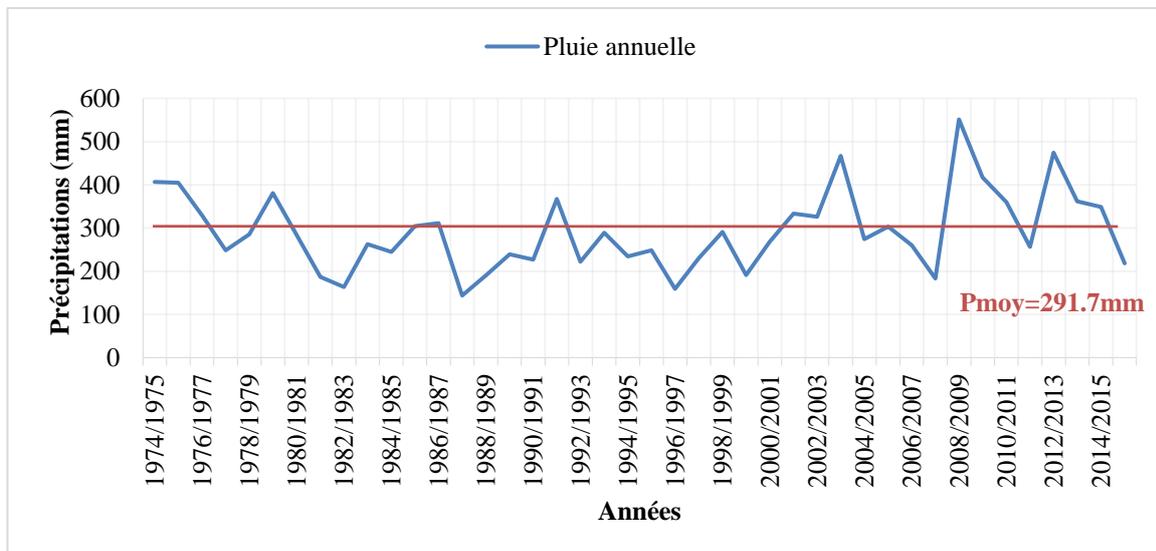


Figure 32. Variations interannuelles des précipitations à la station de Djebel Chouachi (1974/75- 2015/16).

III.1.2 Etude des précipitations mensuelles

Le tableau 13 présente les valeurs moyennes mensuelles des précipitations à la station de Dejbel Chouachi.

Tableau 13.Valeurs moyennes mensuelles des précipitations (1974-75-2015/16).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A
P (mm)	10.7	21.6	46.5	31.9	37.2	48.2	36.8	26.8	23.8	3.6	0.9	3.7

La répartition des précipitations moyennes mensuelles pour la période (1974/75-2015/16) (fig. 33 & 34), montre que le minimum des précipitations s'observe au mois de juin et Juillet 3.6 mm et 1mm) (mois les plus secs), et le maximum au mois de Février avec (48.2 mm) (mois le plus pluvieux).

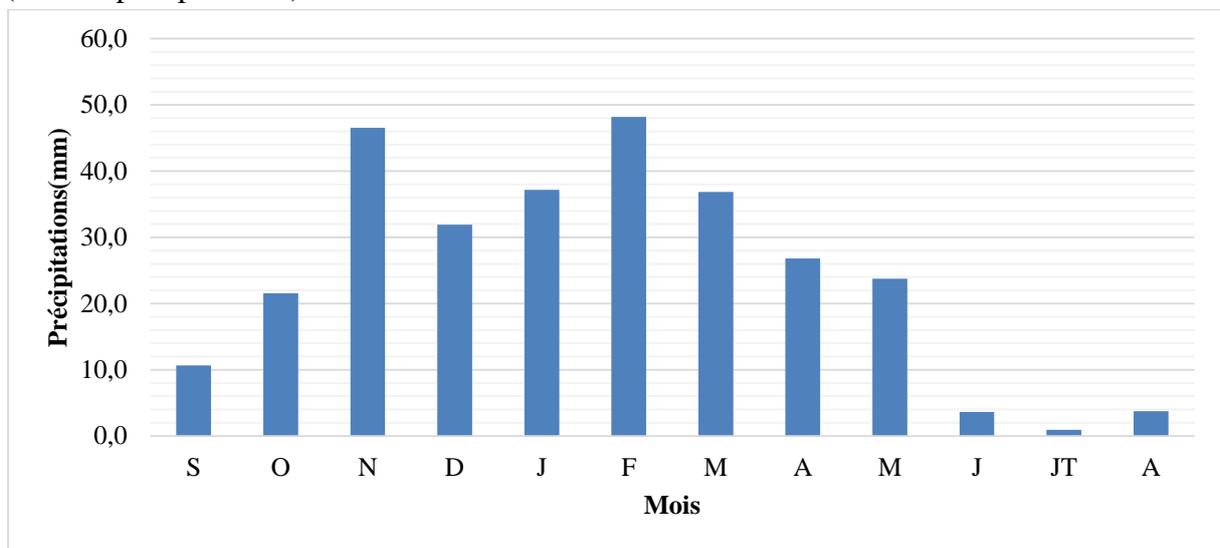


Figure 33.Variations des précipitations moyennes mensuelles (1974-1975/2015-2016)

- **Les minima** : Les valeurs minimales sont nulles.
- **Les maxima** : Les valeurs les plus basses apparaissent en Juillet, alors que les valeurs les plus élevées se présentent en Novembre et Avril.

Tableau 14.Valeurs des précipitations moyennes mensuelles, minimales, maximales moyennes des extrêmes

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
Moyenne (mm)	10.7	21.6	46.5	31.9	37.2	48.2	36.9	26.8	23.8	3.6	0.9	3.7
Maximum	43.1	83.1	180.1	148.4	95.4	125.0	110.9	161.2	88.6	60.2	14.4	52.8
Minimum	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Min extrême	3.9	7.9	23.8	15.5	12.8	24.0	17.6	11.7	9.2	0.5	0.0	0.3
Max extrême	20.9	44.6	89.0	62.6	65.2	76.0	72.9	55.9	42.2	17.3	4.2	16.6

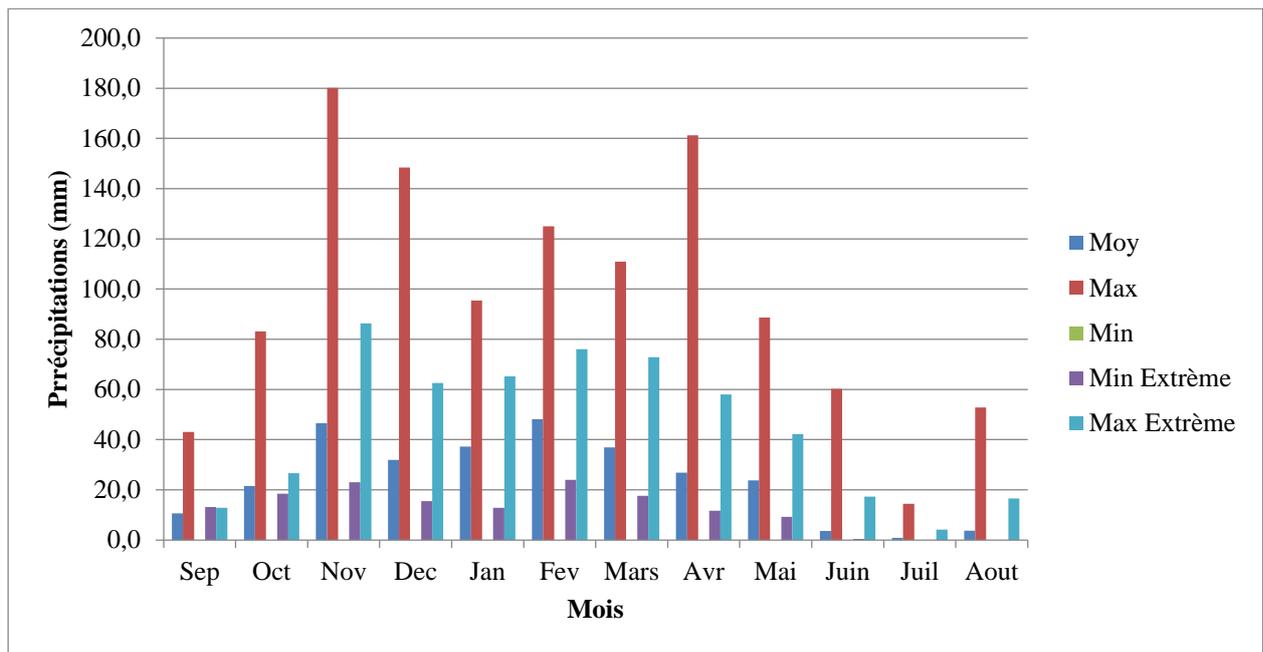


Figure 34. Variation des précipitations moyennes mensuelles, minimales, maximales et moyennes des extrêmes (1974-75-2015/16).

III.1.3 Etude des précipitations saisonnières

L'étude de la variabilité saisonnière est indispensable, pour voir si la baisse ou la hausse de la pluviométrie est spécifique à une saison particulière ou à plusieurs saisons.

Tableau 15. Répartition des précipitations saisonnières.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A
Saisons	Automne			Hiver			Printemps			Eté		
	78.7			117.3			87.4			8.3		

La figure 35 illustre un dispositif des précipitations saisonnières indiquant que l'Eté est la saison la plus sèche.

L'Hiver est la saison la plus arrosée c'est là où s'effectuerait la plus grande partie d'écoulement suivi du Printemps et enfin l'Automne.

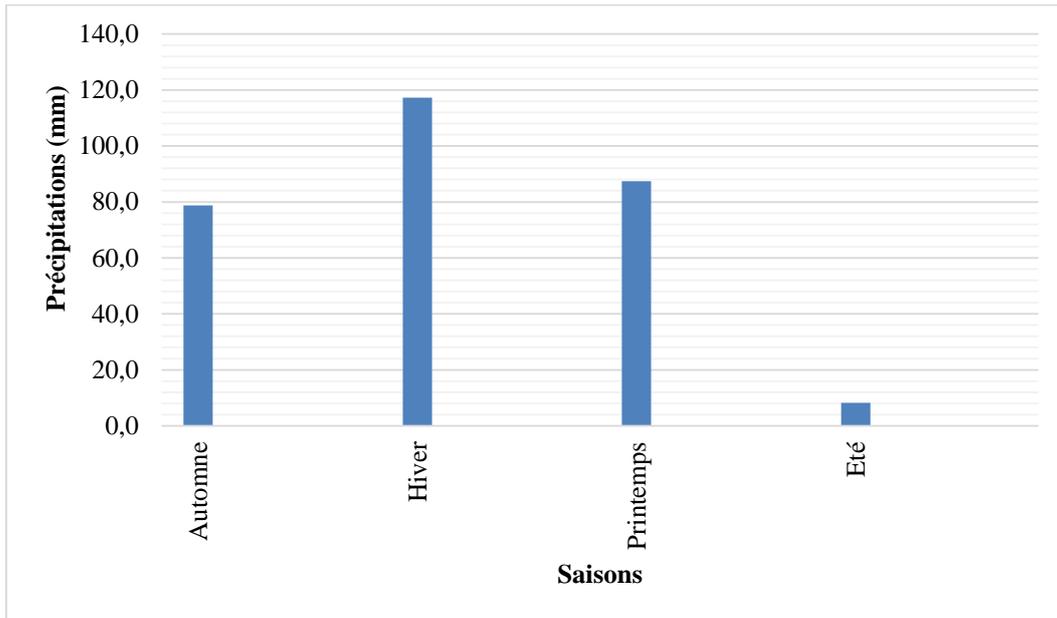


Figure 35. Variation des précipitations moyennes saisonnières (1974-75/2015-16)

III.1.4 Etude des précipitations journalières

La figure 36 montre une augmentation suivie de diminutions des précipitations moyennes journalières, les mois de l'été sont caractérisés par une baisse importante des précipitations.

Les mois les plus pluvieux sont les mois de Novembre et Février caractérisant la période Automne-Hiver.

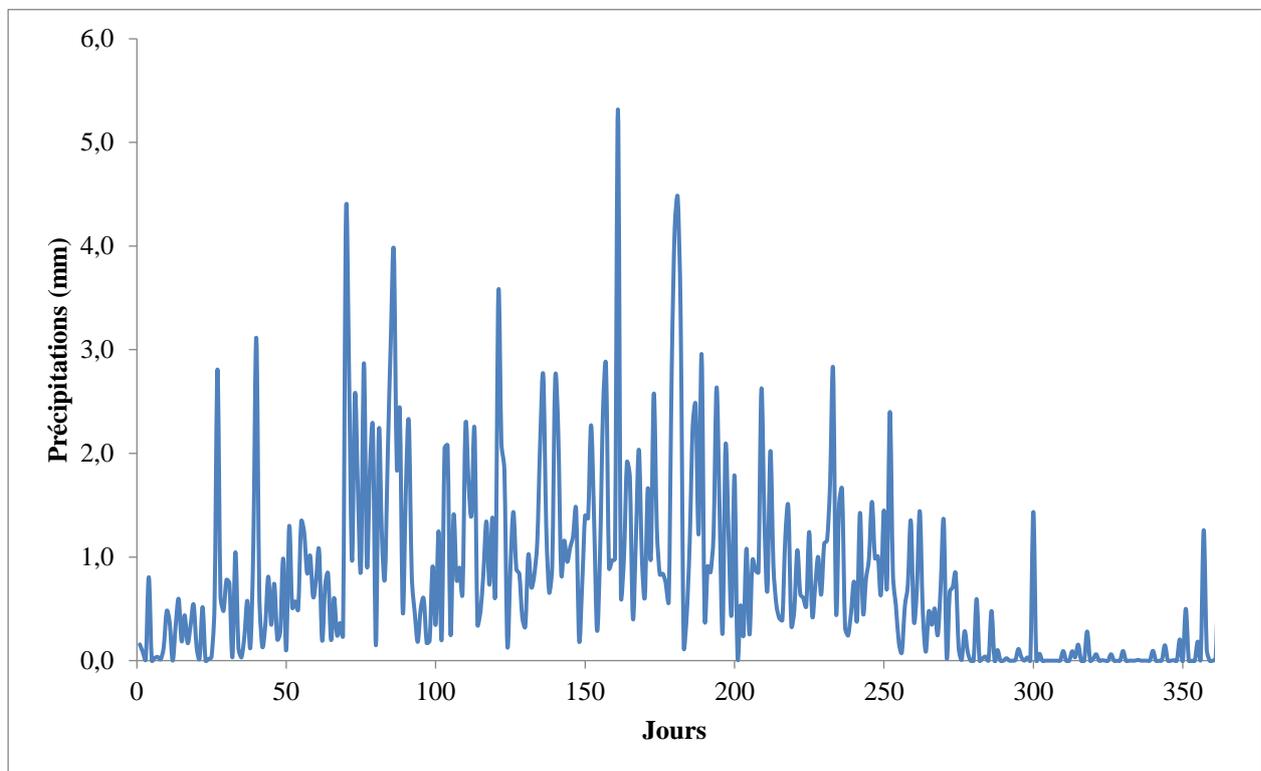


Figure 36. Variation des précipitations moyennes journalières (1974-75-2015/16).

III.2 Etude des Températures

La température est un élément fondamental dans la détermination du climat en interaction avec les autres facteurs météorologiques.

La température et les précipitations sont indispensables pour le calcul du déficit d'écoulement et les indices climatiques.

Afin de réaliser cette étude, notre station de Zenata dispose des mesures durant la période 1974-75-2015-16.

III.2.1 Température moyenne annuelle

Les températures moyennes annuelles sont irrégulières, elles ont tendance à augmenter d'une année à l'autre (fig.37). Cette tendance apparait bien dès le début des années 1980, période à partir de laquelle la région connaît une sécheresse continue avec une diminution des précipitations assez prononcée.

Cette variabilité serait due au changement climatique global.

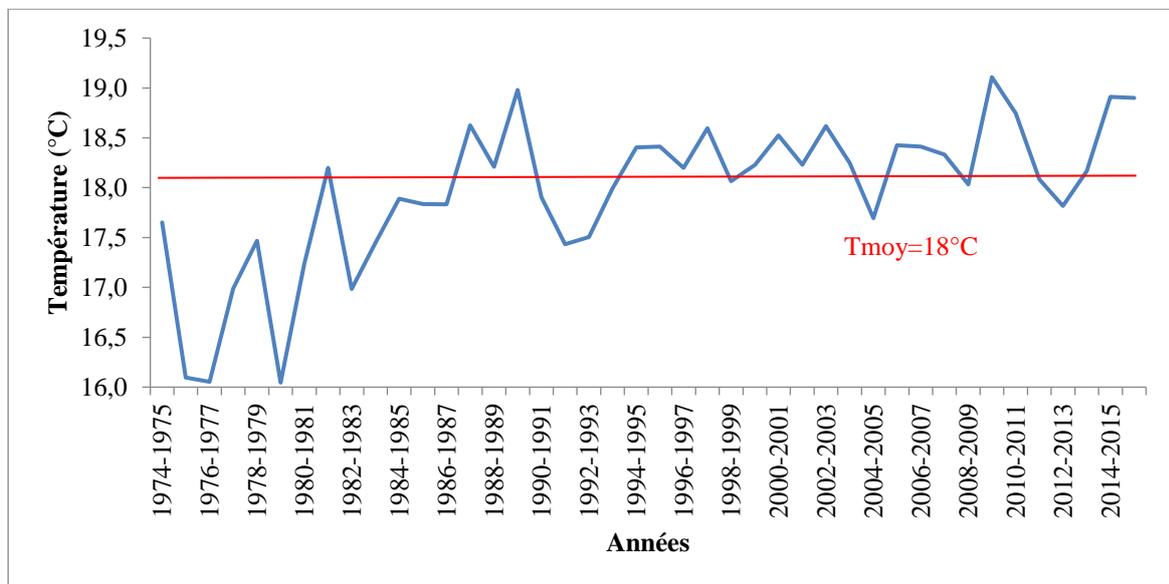


Figure 37. Variation des températures moyennes annuelles (1974/75-2015/16).

III.2.2 Températures Moyennes Mensuelles

Les températures moyennes mensuelles à la station de Zenata sont reportées sur le tableau 16.

Tableau 16. Températures moyennes mensuelles des températures de la station de Zenata (1974/75-2015/16)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
Moyenne	23.6	19.7	15.1	12.2	10.8	11.8	13.6	15.6	18.5	22.5	25.9	26.3

Les variations des températures moyennes mensuelles à la station de Zenata (fig. 38), montrent que le mois de Janvier avec 10.8°C est le plus froid, et les mois de Juillet et d'Août avec plus de 25°C sont les plus chauds.

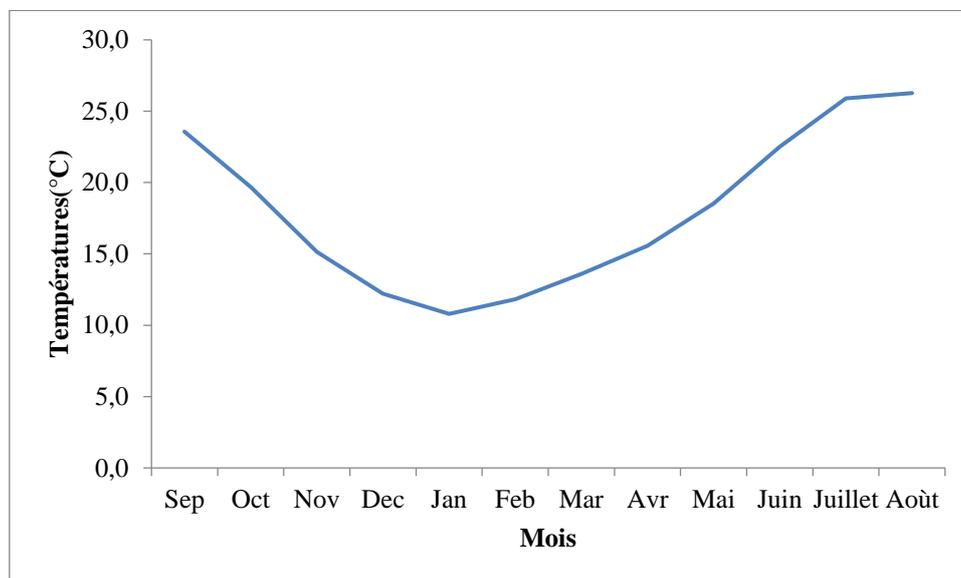


Figure 38.Variation des températures moyennes mensuelles (1974-1975-2015/16).

III.3 Étude du climat

L'étude du climat est basée sur les données de température et de précipitations moyennes mensuelles durant la période (1974/1975-2015/2016) (tableau 17)

III.3.1 Diagramme pluviothermique (méthode de Gaussen et Bagnouls, 1952)

Le diagramme pluviothermique est une représentation graphique où sont reportés en abscisses les mois, en ordonnées les températures suivant une échelle arithmétique et les précipitations suivant une échelle arithmétique double de celle des températures. Selon Bagnouls et Gaussen, un mois humide est celui où le total moyen des précipitations (mm) est supérieur au double des températures moyennes (°C) ($P > 2T$) dans le cas contraire, un mois est dit sec.

Tableau 17.Précipitations et températures moyennes mensuelles Zenata (1974/1975-2015/2016)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A
P(mm)	10.7	21.6	46.5	31.9	37.2	48.2	36.8	26.8	23.8	3.6	0.9	3.7
T(°C)	23.7	19.7	15.2	12.2	10.9	11.9	13.7	15.5	18.6	22.5	25.9	26.6

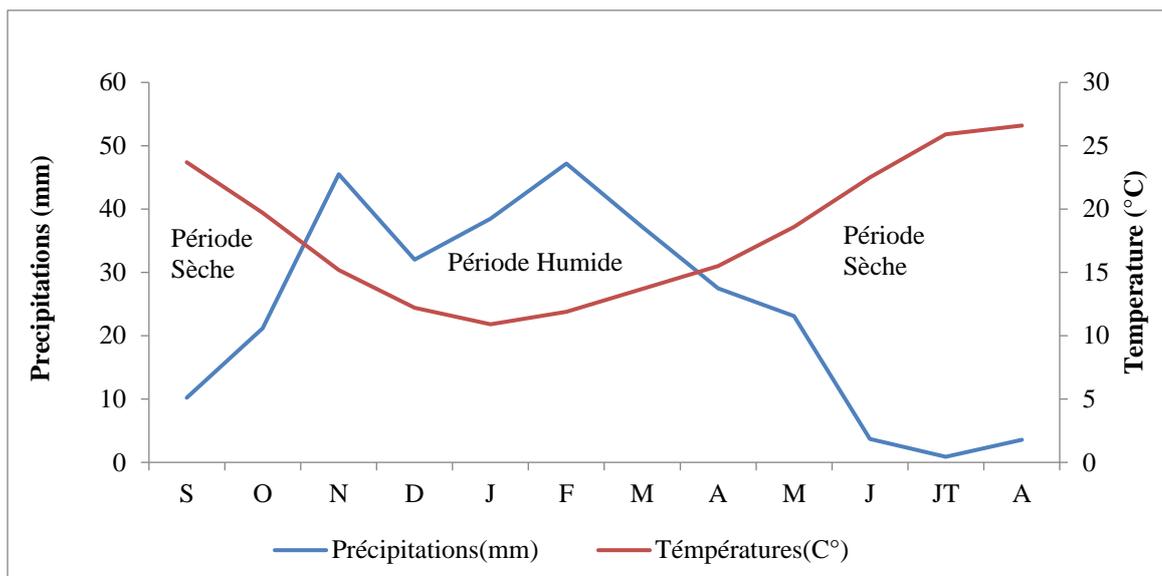


Figure 39. Diagramme pluviothermique de Gaussen et Bagnouls dans l'oued Boukiou (1974/1975-2015/2016)

La courbe pluviométrique du bassin de Boukiou (fig. 39) permet de visualiser l'alternance de deux saisons :

- Une saison des pluies, de novembre à mi-avril.
- Une saison sèche, couvrant le reste des mois de l'année.

III.3.2 Méthode d'Euverte

Le rapport P / T établi mensuellement, permet de connaître l'évolution de l'humidité du sol. Il permet également de définir trois (03) types de régime :

- Régime très sec où le rapport $P/T < 1$.
- Régime sec où le rapport P/T est compris entre 1 et 2
- Régime subhumide où le rapport P/T est compris entre 2 et 3.
- Régime humide où le rapport $P/T > 3$.

Selon le tableau ci-dessus il en ressort que la période Sub humide – humide s'étale depuis le mois de Novembre jusqu'à la fin Mars.

Tableau 18. Répartition des mois selon la méthode d'Euverte

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A
P(mm)	10.7	21.6	46.5	31.9	37.2	48.2	36.8	26.8	23.8	3.6	0.9	3.7
T(°C)	23.7	19.7	15.2	12.2	10.9	11.9	13.7	15.5	18.6	22.5	25.9	26.6
P/T	0.4	1.08	3	2.6	3.5	4	2.7	1.7	1.25	0.16	0.03	0.14
Régime	Très sec	Sec	Sub Humide (Sh)	Humide			Sub Humide (Sh)	Sec	Très sec			

III.4 Indices climatiques

III.4.1 Indice d'aridité de De. Martonne

III.4.1.1 Indice d'aridité annuel de De. Martonne

Cet indice est fonction des températures et des précipitations, il est calculé par la relation suivante :

$$I = \frac{P}{T+10} \quad \text{Eq. 14}$$

P : Précipitations moyennes annuelles = 291.7 (mm)

T : Températures moyennes annuelles = 18 (°C)

I : Indice d'aridité = 10.38

Cette formule permet de trouver le type de climat qui règne dans le bassin versant, ce dernier est défini en fonction de la valeur de cet indice (tableau 19).

Tableau 19 Classification du climat suivant l'indice d'aridité de De. Martonne.

Indice d'aridité	Type de climat
$20 < I < 30$	Tempéré
$10 < I < 20$	Semi -aride
$7.5 < I < 10$	Steppique
$5 < I < 7.5$	Désertique
$I < 5$	Hyperaride

Nous avons obtenu un indice d'aridité, $I=10.38$. Cette valeur reportée sur l'abaque de De Martonne indique un régime climatique semi-aride avec un écoulement temporaire et des formations herbacées (fig. 40).

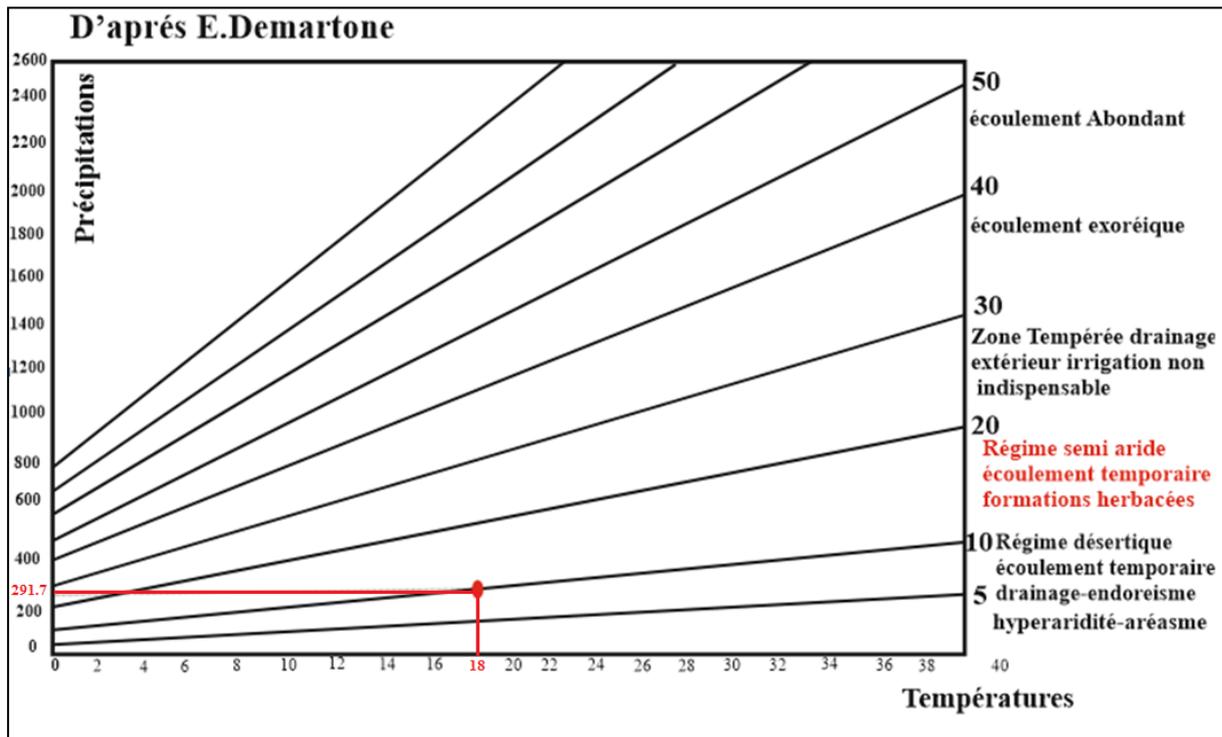


Figure 40. Abaque de De. Martonne.

III.4.1.2 Indice d'aridité mensuel

L'indice d'aridité mensuel est défini par la relation suivante :

$$I = \frac{12p}{t+10} \quad \text{Eq. 15}$$

- I : Indice d'aridité mensuel
- p : Précipitations moyennes mensuelles (mm).
- t : Température moyenne mensuelle (°C).

Tableau 20. Valeurs des indices d'aridité mensuel de De. Martonne

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
P(mm)	10.7	21.6	46.5	31.9	37.2	48.2	36.8	26.8	23.8	3.6	0.9	3.7
T(°C)	23.7	19.7	15.2	12.2	10.9	11.9	13.7	15.5	18.6	22.5	25.9	26.6
i	3.6	8.6	21.7	17.3	22.1	25.9	18.9	12.9	9.7	1.37	0.3	1.18

D'après les tableaux 19 et 20, on conclut que les mois sont caractérisés par un climat :

- Tempéré : Novembre, Janvier, Février
- Aride : Mai et Octobre
- Hyper aride : Septembre, Juin, Juillet, Août.
- Semi-aride : Décembre, Mars et Avril

III.4.1.3 Indice De Continentalité De Kerner

Cet indice permet de déterminer l'influence marine sur les conditions locales de la région, il est donné par :

$$IK = \frac{(T_0 - T_a)}{A \times 100} \quad \text{Eq. 16}$$

A : Amplitude moyenne annuelle c'est-à-dire la différence entre la température du mois le plus chaud et

celle du mois le plus froid (°C).

T₀ : Température moyenne mensuelle du mois d'Octobre (°C).

T_a : Température moyenne mensuelle du mois d'Avril (°C).

Tableau 21. Calcul d'indice de Kerner.

Station	A	T ₀	T _a	IK
Dj Chouachi	15.8	19.6	15.5	26.8

Cet indice est plus important au voisinage des régions côtières et diminue de plus en plus que l'on s'éloigne de la mer.

Comparons la valeur obtenue (Ik =26.8), (Tab.23.) avec les résultats de la station côtière de Béni-Saf (Ik =34,7) et celle très continentale de Ghardaïa (Ik =1,3), Nous constatons que notre région subie des influences maritimes (climat méditerranéen).

III.4.2 Indice de Moral

III.4.2.1 Indice mensuel de Moral

Pour préciser le type du climat de chaque mois (tab.24), on utilise l'indice mensuel de Moral qui est donné par la formule suivante :

$$Im = \frac{P}{0.1T^2 - T + 20} \quad \text{Eq. 17}$$

P : Précipitations moyennes mensuelles (mm)

T : Température moyenne mensuelle (°C)

Tableau 22. Calcul des indices mensuels de Moral

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
P (mm)	10.7	21.6	46.5	31.9	37.2	48.2	36.8	26.8	23.8	3.6	0.9	3.7
T (°C)	23.7	19.7	15.2	12.2	10.9	11.9	13.7	15.5	18.6	22.5	25.9	26.6
(Im)	0.2	0.54	1.63	1.41	1.84	2.13	1.49	0.97	0.65	0.08	0.01	0.06
Poids	-1	0	2	1	2	2	2	0	0	-1	-1	-1
Type de mois	Aride	Sec	Pluvieux	Humide	Pluvieux			Sec		Aride		

Tableau 23. Types de mois indiqués par Moral

Type de mois	Intervalle
Pluvieux	$P > 0,1T^2 - T + 30$
Humide	$0,1T^2 - T + 30 > P > 0,1T^2 - T + 20$
Sec	$0,1T^2 - T + 20 > P > 0,05T^2 - T + 10$
Aride	$P < 0,05T^2 - T + 10$

Tableau 24. Poids affecté à chaque type de mois

Type de mois	Poids
Pluvieux	$P = 2$
Humide	$H = 1$
Sec	$s = 0$
Aride	$a = -1$

III.4.2.2 Indice annuel de Moral Im

C'est La somme des valeurs des indices pluviométrique I_m sur la fréquence des types de mois.

Pour notre cas $Im = 10 < 11.07 < 20$ indique un climat est semi- aride.

III.5 Climagrammes

III.5.1 Climagramme D'emberger

La méthode d'Emberger est adaptée à l'analyse du climat de type méditerranéen (tab.27). Emberger a mis au point une formule pour le calcul du quotient pluviométrique basée sur la température et la pluviosité.

$$Q2 = \frac{2000P}{M2 - m2} \tag{Eq. 18}$$

- Q2 : Quotient pluviométrique d'Emberger.
- P : Précipitations moyennes annuelles (mm).
- M : Moyenne des maxima du mois le plus chaud (K).
- m : Moyenne des minima du mois le plus froid. (K).
- $T(K) = T(^{\circ}C) + 273,15$

Tableau 25. Indice d'Emberger

Station	P(mm)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Q2
Dj Chouachi	291.7	33.4	5.5	35.5

D'après l'abaque d'Emberger (fig.41), nous constatons que le climat de la région de Boukiou, est semi-aride à hiver tempéré.

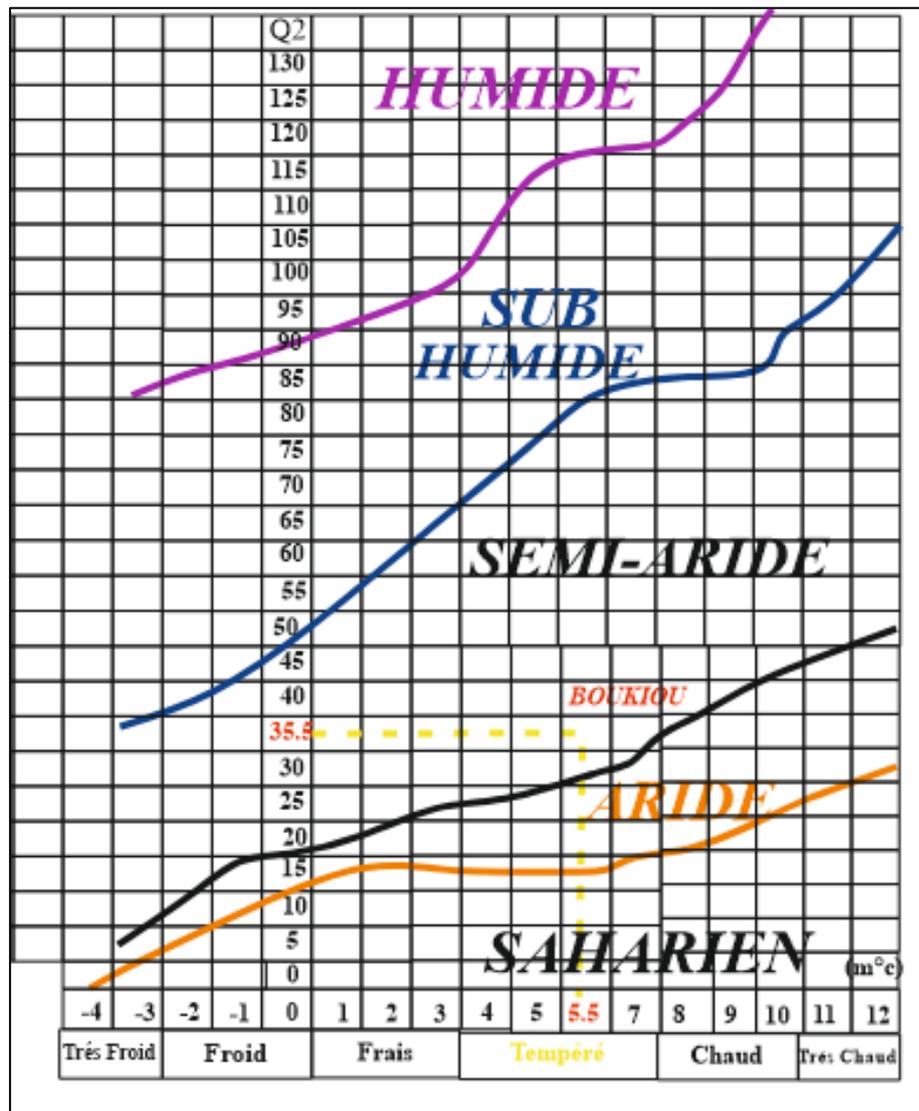


Figure 41. Climagramme d'Emberger

III.5.2 Evapotranspiration potentielle et déficit d'écoulement (ETR)

On appelle évapotranspiration réelle (notée ETR), la quantité d'eau, généralement exprimée en millimètres, évaporée ou transpirée par le sol, les végétaux et les surfaces libres d'un bassin versant. L'évapotranspiration potentielle (notée ETP) est la quantité d'eau qui serait évaporée ou transpirée à partir d'un bassin versant si l'eau disponible pour l'évapotranspiration n'était pas un facteur limitant.

III.5.3 Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

De nombreuses formules permettent d'évaluer l'ETP à partir de différentes mesures. Pour notre cas, nous avons utilisé les formules de Thornthwaite.

III.5.3.1 Methode De Thornthwaite 1957

Thornthwaite a été le premier à adopter la notion de l'évapotranspiration potentielle, en partant d'expériences réalisées sur divers climats : humide, subhumide et semi-aride, suivant la formule :

$$ETP=16. \left(\frac{10.t}{I}\right)^a. K \quad \text{Eq. 19}$$

ETP : Evapotranspiration potentielle (mm)

T : Température moyenne du mois (°C)

I : Indice thermique annuel : soit la somme des indices thermiques mensuels (i) calculés selon

la formule : $i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514}$

a: Constante fonction de l'indice thermique annuel

$$a = 6,75. 10^{-7} .I^3 - 7,71. 10^{-5} .I^2 + 1,79. 10^{-2} .I + 0,49$$

K : Coefficient de correction en fonction de la latitude et du mois (pour notre cas on prend une latitude égale à N35°). Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 26.Calcul et correction des valeurs de l'ETP à la station Djebel Chouachi (1974/1975-2015-2016)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
T (°C)	23.7	19.7	15.2	12.2	10.9	11.9	13.7	15.5	18.6	22.5	25.9	26.6
I (mensuel)	10.5	7.94	5.38	3.85	3.24	3.68	4.56	5.53	7.26	9.75	12.06	12.56
a	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89
K	1.03	0.97	0.86	0.85	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16
ETP corrigé (mm)	110.86	74.9	39.78	26.27	21.35	24.66	39.09	53.62	82.18	118.99	157.84	153.24
P (mm)	10.7	21.6	46.5	31.9	37.2	48.2	36.8	26.8	23.8	3.6	0.9	3.7

La valeur de l'évapotranspiration potentielle annuelle corrigée est : 902.8 mm.

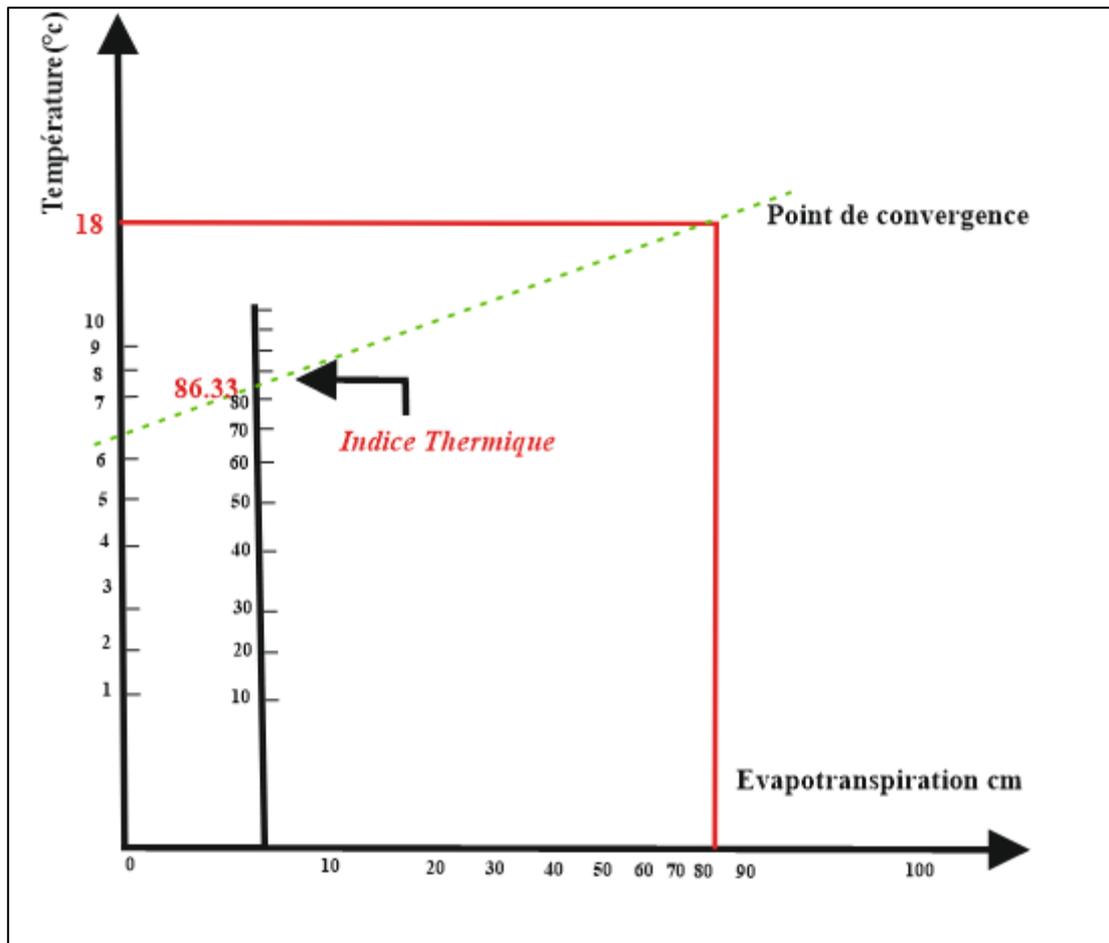


Figure 42. Abaque de Thornthwaite

III.5.3.2 Evapotranspiration Réelle (ETR)

Cela peut être fait en utilisant deux formules parmi beaucoup d'autres :

III.5.3.2.1 Formule de L. Turc (1954)

$$ETR = D = \sqrt{\frac{P}{0.9 + P^2/L^2}} \quad \text{Eq. 20}$$

avec :

- ETR : Déficit d'écoulement (mm).
- P : Précipitations moyennes annuelles (mm).
- $L = 300 + 25 T + 0,05 T^3$
- T : Température moyenne annuelle (°C).

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 27. Calcul d'ETR par la méthode de Turc

Station	P (mm)	T (°C)	L(m)	ETR (mm)
Dj Chouachi	291.7	18	1041.60	293.8

III.5.3.3 Formule de M. Coutagne

$$ETR = P - \lambda P^2 \tag{Eq. 21}$$

$$\lambda = 1 / (0,8 + 0,14T)$$

P : Précipitations moyennes annuelles (m).

L'application de cette formule est conditionnée par la relation suivante : $1/8\lambda \leq P \leq 1/2\lambda$
 Alors dans notre cas la formule, n'est pas applicable.

III.5.4 Méthode De Wundt

L'hydrologue Wundt a établi un diagramme permettant d'obtenir une valeur du déficit d'écoulement à partir d'un abaque modifié par M Coutagne (fig. 43).

Tableau 28. Valeur du déficit et du quotient d'écoulement (Wundt)

Station	P(mm)	T (°C)	D (mm)	E (mm)
Dj Chouachi	291.7	18	285	5.5

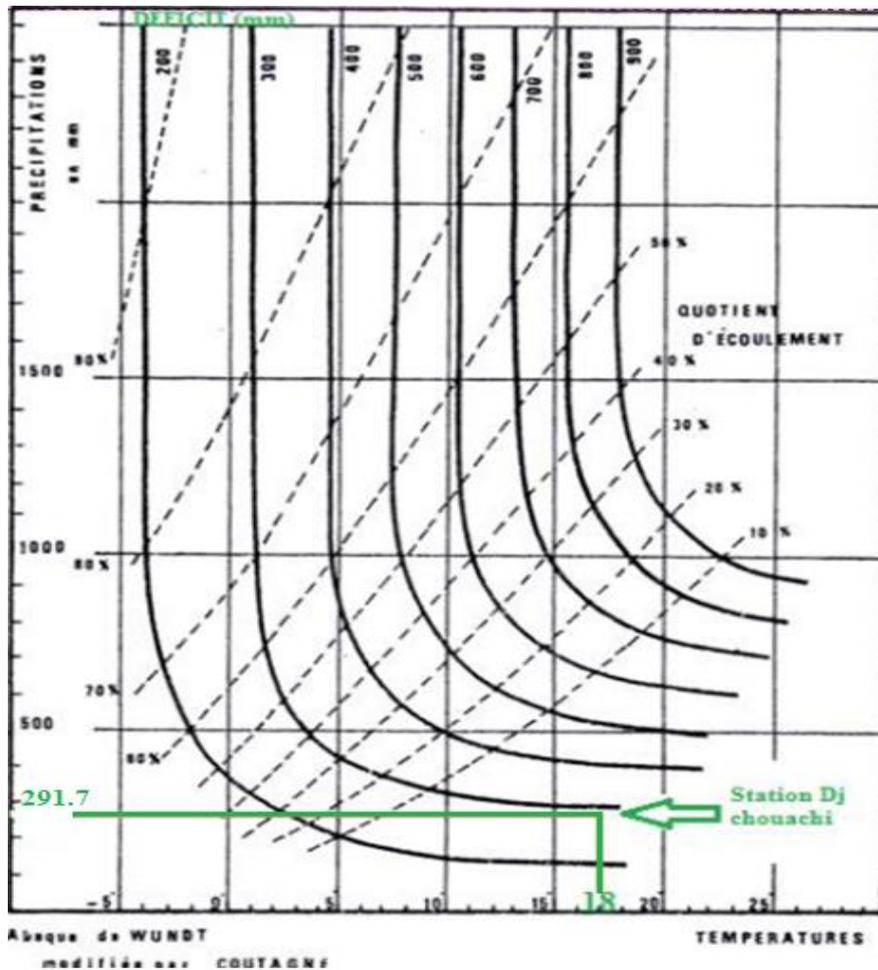


Figure 43. Détermination du déficit d'écoulement (Abaque de Wundt).

III.5.4.1 Méthode De P. Verdeil (1988)

Afin d'estimer les valeurs de l'évapotranspiration réelle ou déficit d'écoulement Verdeil (1988), a établi un abaque bilogarithmique pour les régions semi-arides en tenant compte uniquement des précipitations annuelles (fig. 44).

Tableau 29. Valeur du déficit d'écoulement selon la méthode de P. Verdeil

Station	P (mm)	T (°C)	D (mm)
Dj Chouachi	291.7	18	280

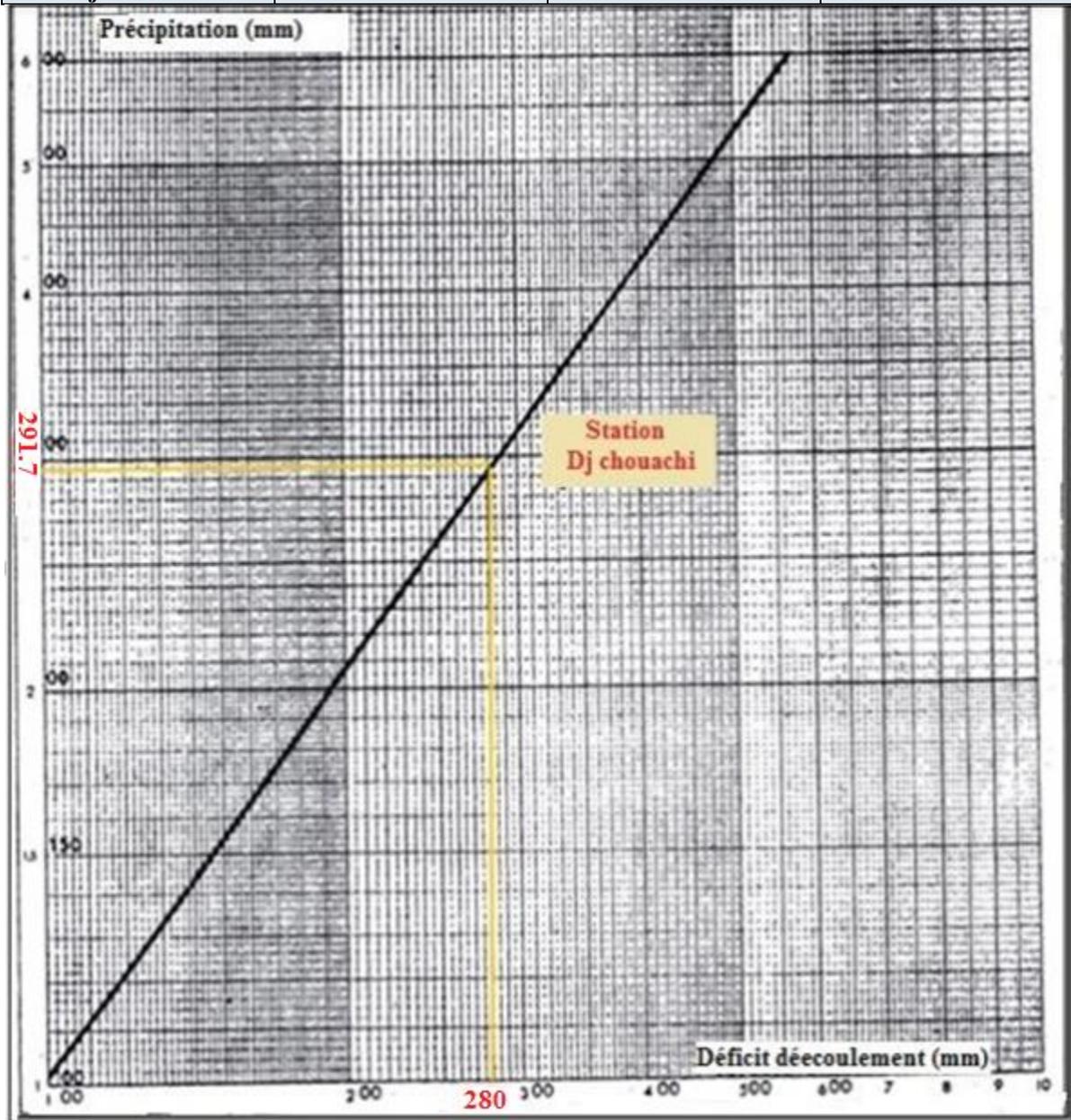


Figure 44. Détermination du déficit d'écoulement (Abaque de Verdeil).

III.5.5 Calcul de la réserve facilement utilisable (R.F.U)

La R.F.U est calculée par application de la formule de Hallaire (1960) qui peut s'écrire :

$$RFU = \frac{c-f}{100} \cdot H \cdot D + 30mm \quad \text{Eq. 22}$$

- RFU : Réserve en eau facilement utilisable
- C : Capacité au champ
- f : Capacité au point de flétrissement
- H : Profondeur du sol
- D : Densité apparente
- 30 mm : Enracinement capillaire

Le tableau suivant montre les valeurs de (C - f) qui dépendent de la nature du sol

Tableau 30. Valeurs de C-F (%) en fonction de la nature du sol.

Sol	C-F%
sableux	5
limoneux	10-15
Argilo-limoneux	20

D'après les mesures de la direction des services agricoles de Tlemcen, en considérant un sol limoneux (C-f = 10%) et une profondeur du sol égale à 500 mm nous obtenons une réserve utile égale à 90 mm. Evapotranspiration réelle est liée à la réserve en eau disponible, nous considérons deux possibilités

- P > ETP → ETR = ETP
- P > ETP → ETR = ETP
ETP = ETR → Existe une réserve.
ETR = P → Pas de réserve

Le tableau suivant montre les différents paramètres du bilan hydrologique calculés (mm) pour la station de Dj. Chouachi

Tableau 31. Eléments du bilan hydrologique calculés (mm) pour la station de Dj Chouachi (1974/1975-2015-2016) pour (R.U = 90 mm)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A	An
P(mm)	10.7	21.6	46.5	31.9	37.2	48.2	36.8	26.8	23.8	3.6	0.9	3.7	291.7
ETP cor	111.2	73.8	40.1	26.2	21.6	25.0	39.5	52.7	82.6	118.4	157.0	155.8	903
Variations réserve	-	-						-	-	-	-	-	
	100.5	52.2	6.4	5.7	15.6	23.2	-2.7	25.9	58.8	114.8	156.1	152.1	
RFU(90mm)	0	0	5.4	11.1	26.7	59.9	57.3	32	0.0	0	0	0	
ETR	10.7	21.6	40.1	26.2	21.6	25	39.5	52.7	55.8	3.6	0.9	3.7	301.4
Ex	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Da	100.5	52.2	0	0	0	0	0	0	26.8	114.8	156.1	152.1	634.5

P : Précipitations (mm), ETP : Evapotranspiration potentielle (mm), ΔU : Variation de la réserve (mm), RFU: Réserve utile (mm), ETR : Evapotranspiration réelle (mm), D.A: Déficit agricole (mm), Exc : Excédent (mm)

Les résultats obtenus à partir du bilan hydrologique montre que notre bassin versant est déficitaire influençant sur l'écoulement.

III.5.6 Estimation Du Ruissellement

Le ruissellement est considéré comme un écoulement de surface qui généralement n'intervient qu'après la saturation du sol, On estimera le ruissellement par la formule de Tixeront – Berkaloff (1969)

$$R = P^3 / 3 ETP^2 \tag{Eq. 23}$$

avec :

R : Ruissellement (m).

P : Précipitations (m)

ETP : Evapotranspiration potentielle (m).

Tableau 32.Valeur du ruissellement (Tixeront – Berkaloff)

Station	P (m)	T (°C)	ETP (m)	R (mm)
Dj Chouachi	0.29	18	0.9	10

III.5.7 Estimation De L'infiltration

La fraction d'eau infiltrée représente l'apport de la nappe à partir des précipitations efficaces :

$$P = ETR + R + I + \Delta W \tag{Eq. 24}$$

avec:

P: Hauteur des précipitations annuelles (mm).

R: Ruissellement de surface annuel en (mm).

ETR: Evapotranspiration réelle annuelle en (mm).

I: Infiltration annuelle (mm).

ΔW : Variation de réserves en (mm), souvent négligeable

$E = R + I$ R : Ruissellement mm).

I : Infiltration (mm).

E: Ecoulement (mm).

Tableau 33.Valeurs de l'infiltration selon les différentes méthodes

Méthodes	Turc		Wundt		Verdeil		Thorntwaite	
Paramètres	ETR (mm)	I	ETR (mm)	I	ETR (mm)	I	ETR (mm)	I
	293.8	-	285	-	280	-	301.4	-

L'analyse du tableau.35, montre que l'infiltration est nulle au pas de temps annuel, et il serait plus commode pour la calculer de travailler à l'échelle journalière en tenant compte de la lithologie du terrain, la topographie, le climat et la végétation.

III.6 Etude des écoulements

L'écoulement des oueds est essentiellement contrôlé par les pluies qui dépendent du climat de la région.

La station hydrométrique de djebel Chouachi est surveillée par l'A.N.R.H durant la période 1974-75 à 2015-16.

III.6.1 Variation annuelle des lames d'eau écoulées

Les variations de l'écoulement dans le bassin versant de l'oued Boukiou sont illustrées dans la figure 45, une moyenne de 28.3mm pendant la période 1974-75 à 2015-16.

Les lames d'eau écoulées annuelles sont caractérisées par une diminution progressive, avec des valeurs annuelles maximales atteignant 166.11mm pendant l'année 1976-77, 112.84 en 1979-1980 et la valeur de 87.04mm en 2008-09, tant dis que la valeur minimale est enregistré en 1981-82 avec 0.33mm

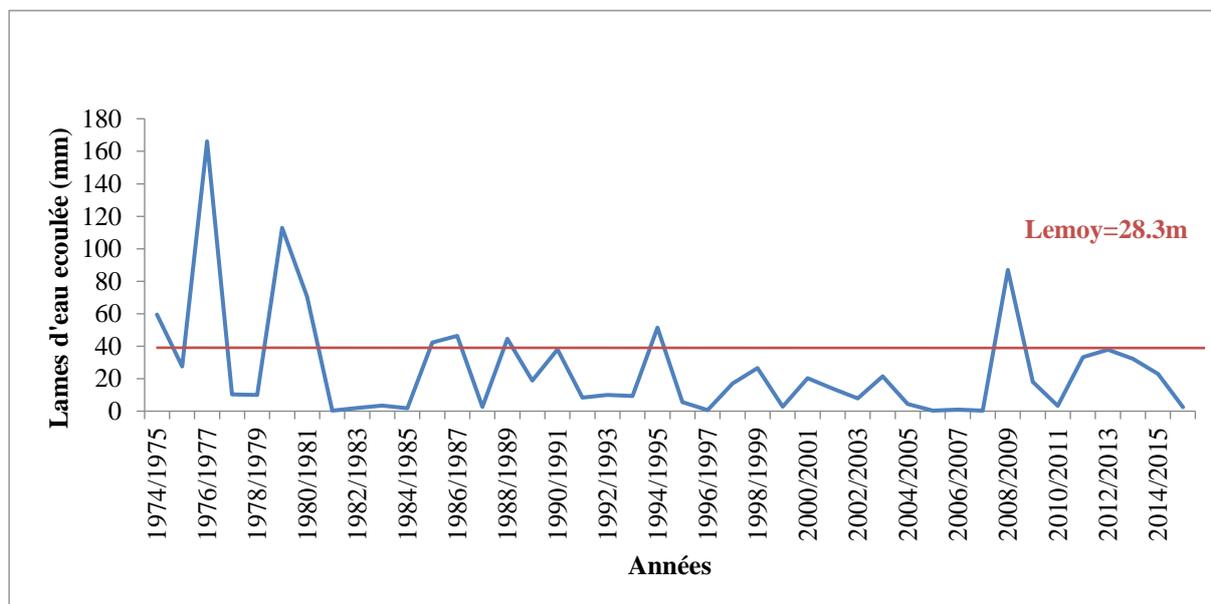


Figure 45. Variation interannuelle des lames d'eau écoulées (1974-75/2015-16)

III.6.2 Variation mensuelle des lames d'eau écoulées

Tableau 34. Valeurs moyennes mensuelles de la lame d'eau écoulée.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
Le (mm)	0.2	0.3	2.2	2.7	3.6	4.7	8.2	3.2	1.5	1.6	0.1	0.0

L'évolution des lames d'eau écoulées mensuels (fig. 46 et 47), montre un minimum en mois d'Août avec 00 mm et évolue vers des valeurs plus importantes, il atteint son maximum en mois de Mars avec 8.2mm.

A partir de Novembre, on observe un léger relèvement (en liaison avec la diminution de l'évapotranspiration potentielle) et surtout l'apparition des premières pluies de l'automne.

Le régime hydrologique de notre bassin est caractérisé par un écoulement de surface du mois de Novembre à Mai, et un étiage principal d'Eté allant de Juillet à Octobre. Les mois d'Octobre et Novembre sont consacrés à la reconstitution des réserves.

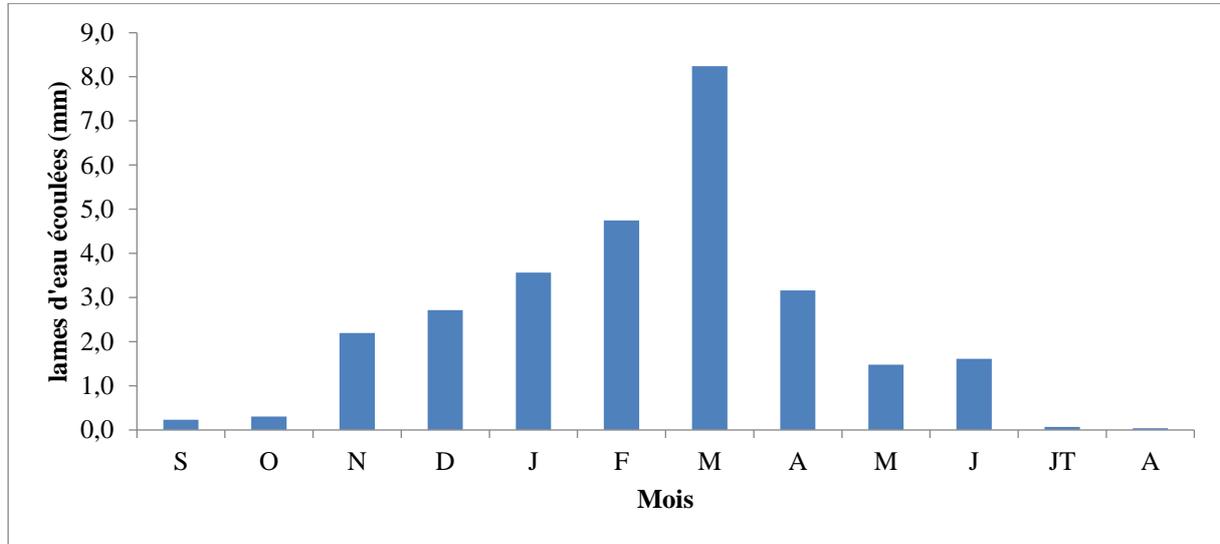


Figure 46. Valeurs des lames d'eau moyennes mensuelles, minimales, maximales et moyennes des extrêmes.

Tableau 35. Variation des lames d'eau écoulées mensuelles minimales, moyennes et maximales (1974-75-2015/16).

Lame d'eau écoulée	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
Moyenne	0.2	0.3	2.2	2.7	3.6	4.7	8.2	3.2	1.5	1.6	0.1	0
Maximum	3.94	3.98	19.94	30.45	39.68	25.86	48.48	42.29	22.07	44.00	0.91	0.74
Minimum	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Moy Min extrême	0.01	0.02	0.46	0.48	0.60	0.80	1.53	0.62	0.23	0.08	0.00	0.00
Moy Max extrême	1.48	1.17	9.72	15.10	16.10	11.87	25.68	10.39	6.13	21.04	0.52	0.56

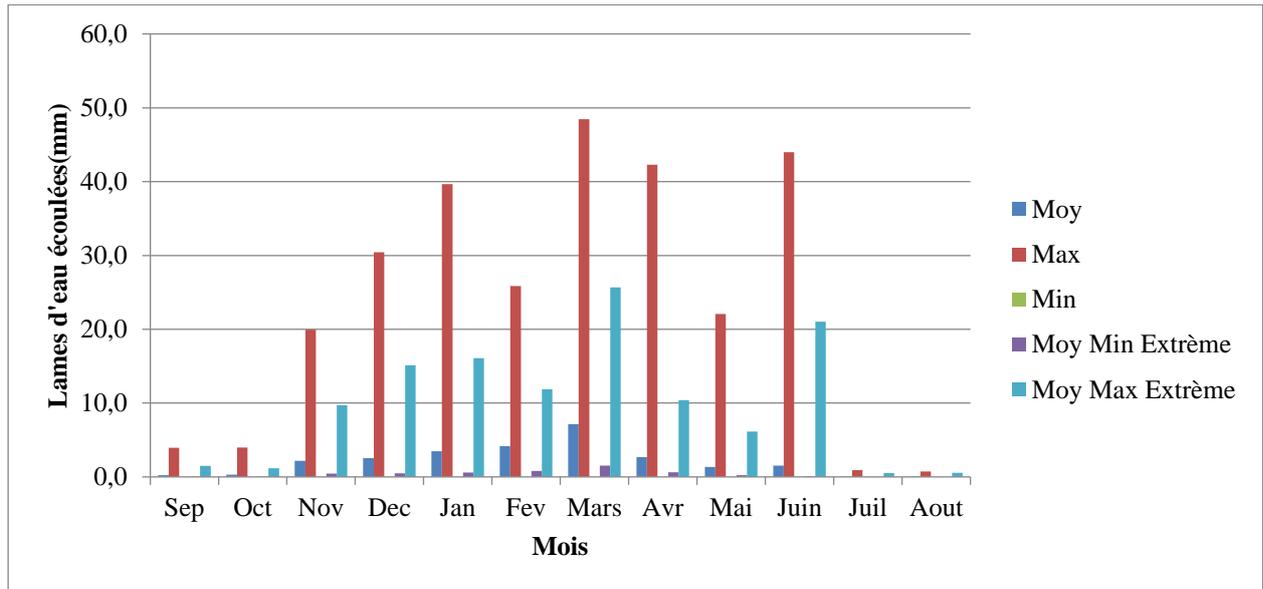


Figure 47. Variation des lames d'eau écoulées mensuelles minimales, Moyennes et maximales (1974-75-2015/16).

La figure 48, nous montre un décalage entre le maximum de la lame d'eau écoulée et celui des précipitations, cette comparaison entre les précipitations et les lames d'eau écoulées nous renseigne sur la capacité de stockage en eau du sol au niveau du bassin versant. Le faible décalage dans le temps influe directement sur la capacité de stockage et sur le rôle des nappes qui est négligeable.

Dans le cas contraire lorsque le décalage est important (entre le mois de Novembre et Décembre), le fonctionnement hydrologique par des surfaces saturées contributives et les nappes joue un rôle plus important.

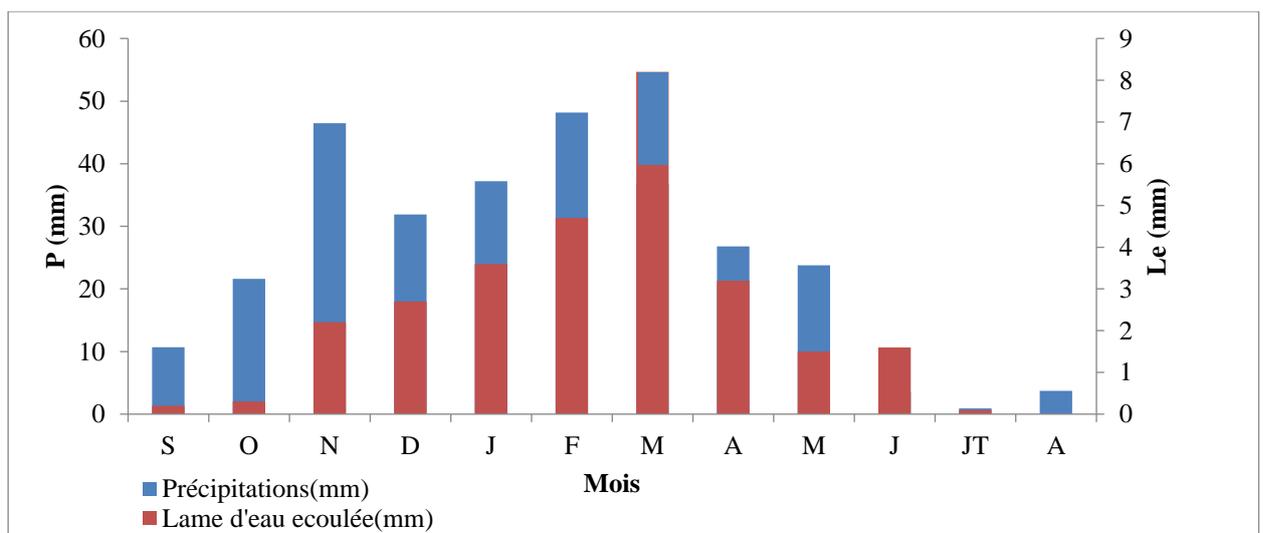


Figure 48. Variation mensuelle des précipitations et des lames d'eau écoulées (1974-75-2015/16).

Le régime mensuel du coefficient de l'écoulement (fig. 49), qui est défini comme étant le rapport de la lame d'eau écoulee sur la hauteur moyenne des précipitations, montre que le minimum des écoulements s'observe au mois de Septembre, Octobre, Novembre, Décembre et Janvier (6 %), donc les pluies du début de l'année hydrologique (Août-Septembre) n'interviennent pas efficacement au soutien de l'écoulement superficiel. A partir du mois de Février le taux des écoulements augmente et dépasse la moyenne avec un pic enregistré au mois de Juin (44.4 %), cet écoulement est soutenu par les sources (eaux souterraines) (bien que pendant l'été les pluies sont presque nulles mais le débit de base est soutenu par les sources).

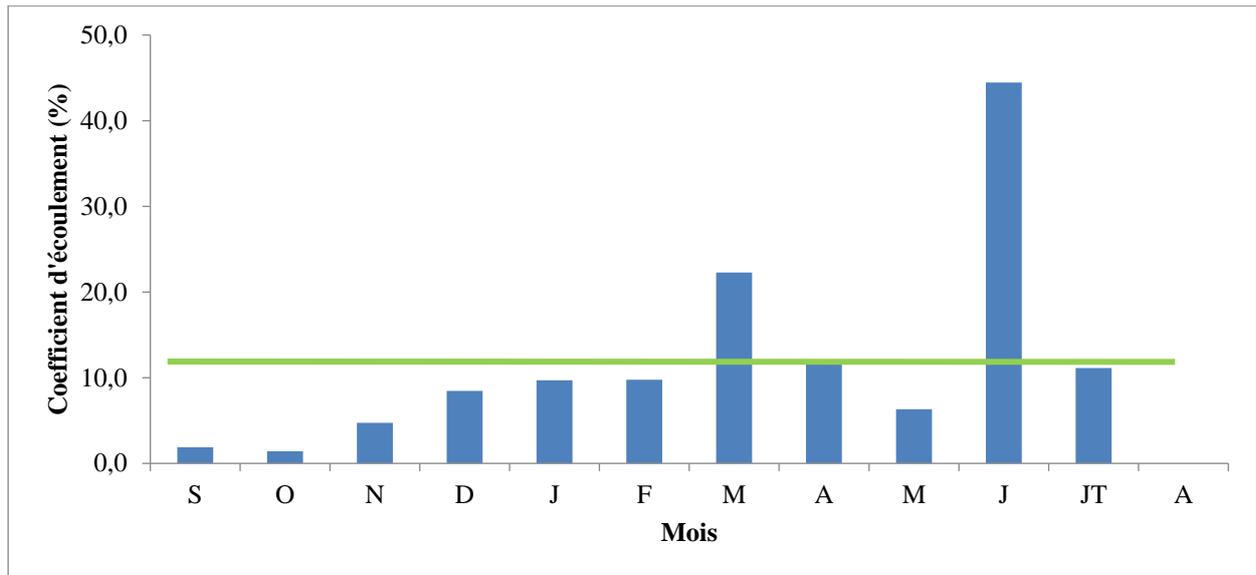


Figure 49. Variation du coefficient moyen mensuel de l'écoulement (1974-75-2015/16).

III.6.3 Variation saisonnière des lames d'eau écoulées

Tableau 36. Répartition des lames d'eau écoulées saisonnières.

Années	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A
Saison	Automne			Hiver			Printemps			Eté		
Le (mm)	2.7			11.0			12.9			1.7		

La figure 50, illustre une distribution saisonnière des lames d'eau écoulées, indiquant que c'est au Printemps et en Hiver que s'effectue essentiellement l'écoulement. Avec un maximum enregistré au Printemps lié à l'abondance de fortes pluies durant cette saison et à l'état du sol relativement saturé.

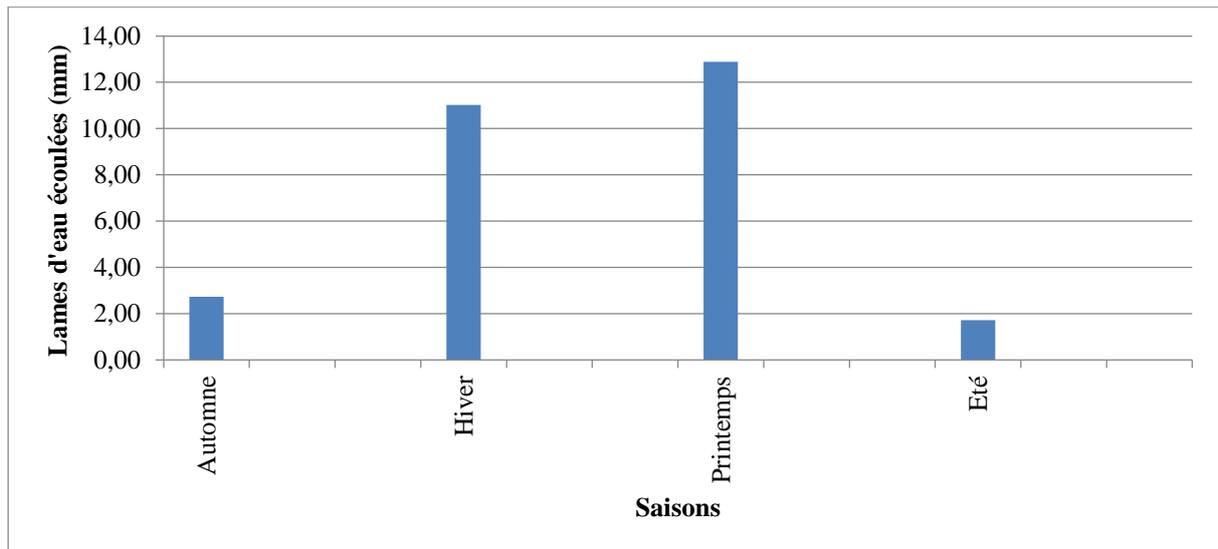


Figure 50. Variation des lames d'eau saisonnières (1974-75-2015-16)

III.6.4 Variation journalières des débits moyens journaliers

Pour les débits moyens journaliers, nous observons une augmentation générale des débits de Février à Mars, et un pic enregistré en mois de Juin dû aux averses orageuses et violentes, puis une baisse de Mai à Septembre. Cependant, ces augmentations et diminutions s'effectuent en dents de scie. En effet, on peut avoir un faible débit un jour, il peut doubler le lendemain et diminuer fortement le surlendemain (fig. 51).

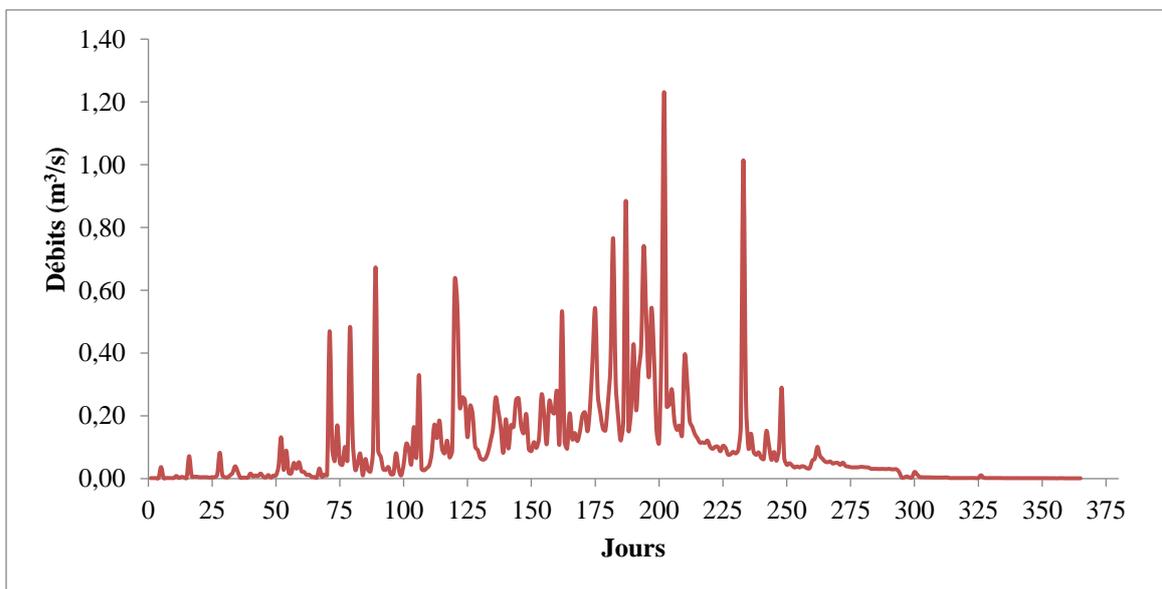


Figure 51. Variation des débits moyens journaliers (1974/75-2015/16).

III.7 Etude statistique des données hydropluviométriques

L'objet de la méthode statistique est la réduction de la masse de données qui devrait être remplacée par un nombre réduit de paramètres statistiques pouvant représenter correctement cette masse.

Le travail d'un hydrologue consiste à vérifier des hypothèses d'homogénéité entre une variable aléatoire et un modèle calculé, si ce modèle est bien superposé à l'échantillon étudié, on peut dire qu'il est bien ajusté, et faire coïncider la probabilité avec le risque d'occurrence d'un événement bien défini. (Touaibia, 2004)

Les méthodes statistiques ou à échantillonnage n'étudient qu'une grandeur d'un processus (ex : pluie annuelle, débit maximum) en excluant la notion du temps. (Touaibia, 2004)

Les lois d'ajustement sont nombreuses et ne peuvent être appliquées à un échantillon que si les conditions Homogénéité – Stationnarité sont réunies parmi lesquelles :

- Loi de Laplace-Gauss ou loi normale, Loi de Galton ou loi log-normale,
- Loi de Fuller ou Loi exponentielle,
- Loi de Gamma, Loi de Pearson1,
- Loi de Gumbel ou Loi doublement Exponentielle,
- Loi de Goodrich,
- Loi de Fréchet,
- Loi de Weibull.

Ces lois comportent 2 ou 3 paramètres estimés par différentes méthodes :

- Méthode des moments,
- Méthode du Maximum de vraisemblance,
- Méthode du Maximum d'entropie....

Afin de réaliser une analyse détaillée de ces données, nous avons utilisé le logiciel HYFRAN1.2 développé par l'Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau-Terre et Environnement INRS-ETE, Québec pour l'ajustement statistique des données hydrologiques.

Le code de calcul Hyfran propose les ajustements statistiques et détermine le modèle d'une loi ou plus qui ajustent au mieux l'ensemble des données. La méthode de calcul choisie pour l'estimation des paramètres du modèle est la méthode du maximum de vraisemblance.

L'ajustement graphique permet de vérifier si la forme de la loi retenue, ayant une valeur de test la plus petite, corrèle bien avec la distribution de la variable étudiée et représente mieux l'échantillon. Le calcul des différents paramètres de la loi ou les lois choisies permet enfin de déduire les variations futures de la variable pour une probabilité donnée.

- **Test de normalité**

En statistiques, les tests de normalité permettent de vérifier si des données réelles suivent une loi normale ou non. Les tests de normalité sont des cas particuliers des tests d'adéquation (ou tests d'ajustement, tests permettant de comparer des distributions), appliqués à une loi normale.

Ces tests prennent une place importante en statistiques. En effet, de nombreux tests supposent la normalité des distributions pour être applicables. En toute rigueur, il est indispensable de vérifier la normalité avant d'utiliser les tests.

Pour tester la normalité des séries, il existe deux méthodes :

- **Test graphique** : Ce test repose sur la comparaison entre la courbe empirique et la courbe théorique tracée sur un papier de Gauss.

- **Test analytique** : ce test consiste à prendre en considération les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement. Parmi les tests utilisés nous avons le test du Khi², le test de Kolmogorov-Smirnov. Le test de Khi² mesure l'écart qu'il y a entre les fréquences observées et les fréquences théoriques, il est donné par la statistique du χ^2 . Il permet de tester l'adéquation d'une série de données à une famille de lois de probabilité ou de tester l'indépendance entre deux variables aléatoires.

Nous avons procédé à l'application des tests graphiques et le test du χ^2 des données du bassin versant de l'oued Boukiou.

III.7.1 Ajustement des données de précipitations à une loi statistique

L'analyse statistique permet d'identifier l'irrégularité interannuelle des précipitations et de préciser les conditions du régime pluviométrique dans notre zone d'étude. De plus, cela nous aidera également à estimer les précipitations pour des récurrences données (toute période de retour).

La fréquence de chaque valeur est calculée par la relation suivante :

$$F_i = i / N + 1$$

avec :

I : Rang

N : Période d'observation (nombres d'années).

La série pluviométrique obtenue permet de calculer les paramètres statistiques de position et de dispersion) et de juger de la distribution des précipitations interannuelles. Les résultats de l'étude statistique est présentée dans le tableau suivant.

Tableau 37. Paramètres de position des précipitations de la station de Djebel Chouachi

Paramètres	Formules	Valeurs
Moyenne	$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a p_i$	292
Variance	$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a (p_i^2 - \bar{p}^2)$	8240.47
Ecart-type	$\sigma = \sqrt{S^2}$	91
Coefficient de variation	$Cv = \frac{\sigma}{\bar{P}}$	0.31
Moyenne	$\overline{\text{Log}P} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^a \text{Log}P_i$	5.60
Variance	$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^a (\text{Log}P_i^2 - \overline{\text{Log}P}^2)$	0.095
Ecart-type	$\delta = \sqrt{\sigma^2}$	0.308
Coefficient de variation	$Cv = \frac{\sigma}{\overline{\text{Log}P}}$	0.0547

avec :

N : Effectif (nombre d'années),

P_i : Valeurs des précipitations de chaque année.

Le coefficient de variation $C_v < 0.5$, laisse supposer que l'ajustement suit une loi symétrique normale ou log normale, le test χ^2 permettra de vérifier cette adéquation.

III.7.2 Ajustement par la loi normale

III.7.2.1 Test graphique

La figure 52, illustre une bonne distribution des précipitations à la loi log normale suivie par un alignement de points acceptables.

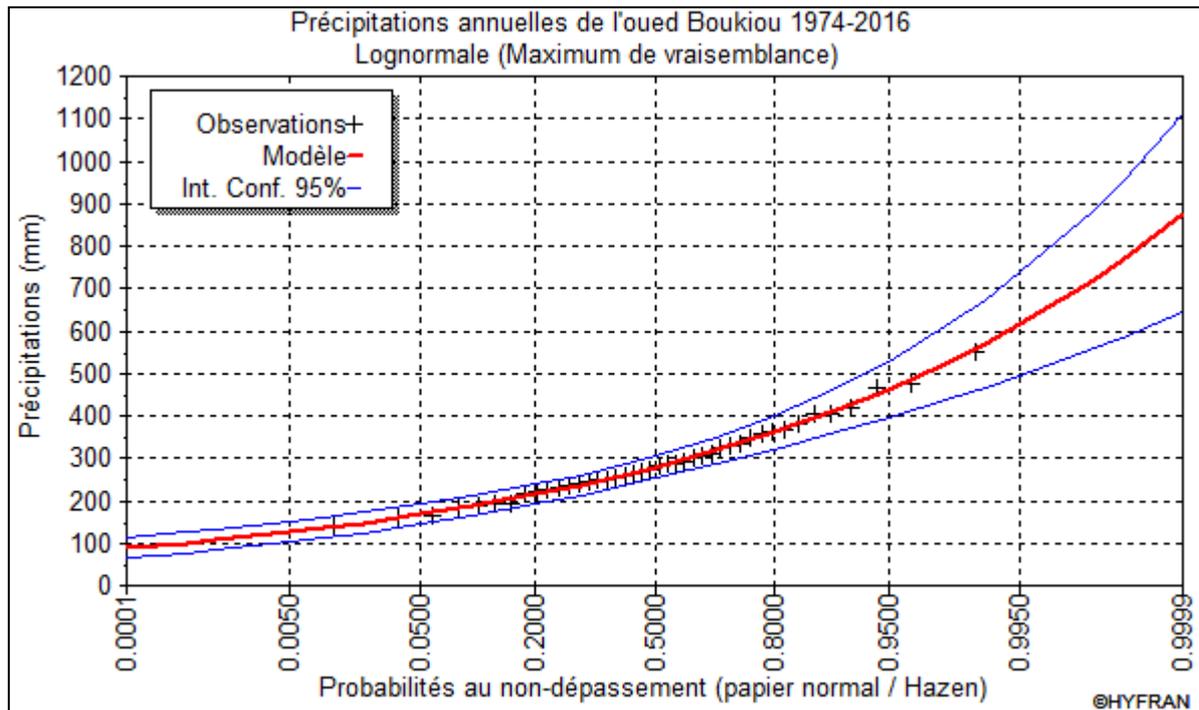


Figure 52. Ajustement graphique des précipitations annuelles à la loi de distribution log normale

On obtient une distribution représentée par une droite (la droite d'Henry) d'équation :

$$\text{Log}P = \text{Log}\bar{P} + \sigma\text{Log}u$$

avec : δ = Ecart-type = 0.308 ; β = moyenne des précipitations = 5.6 mm ; u : variable réduite de Gauss.

Pour : $F_i = 0.5 \longrightarrow U = 0 \longrightarrow P = 291.7\text{mm}$.

$F_i = 0.9 \longrightarrow U = 1.28 \longrightarrow P = 413\text{mm}$.

III.7.2.2 Test du χ^2

L'utilisation du logiciel Hyfran Plus donne les résultats des valeurs du Chi carré (χ^2)

Les résultats sont donnés au tableau.40

Le χ^2 est calculé par le logiciel HYFRAN 1.2 donne le résultat de : 3.71

Pour un seuil de probabilité de 5% (0.05) :

$\gamma = \text{ddl} = 8 - 2 - 1 = 5$,

Donc : $\chi^2_{\text{tabulé}} = 11.07$

Tableau 38. Résultats du χ^2 .

Paramètres	Valeurs
$\chi^2_{\text{calculé}}$	3.71
$\chi^2_{\text{tabulé}}$	11.07
Degré de liberté ddl	5
Nombre de classes K	8

Le $\chi^2_{\text{calculé}}$ étant inférieur au $\chi^2_{\text{tabulé}}$ ($\chi^2_c < \chi^2_t$), le test est positif, l'ajustement permet donc d'admettre une distribution normale des précipitations.

III.7.2.3 Calcul des précipitations pour une période de récurrence donnée

A partir du résultat obtenu des ajustements, nous pouvons conclure que l'adéquation la plus satisfaisante est celle donnée par la loi normale et s'est-elle que nous retiendrons pour effectuer les calculs des pluies correspondant à des récurrences données. Ceci confirme ce qui a été mentionné dans les tests du χ^2 .

Nous pouvons calculer les valeurs des précipitations pour des périodes de retour connues.

Partant de l'équation de la loi log normale : $\text{Log } P = 5.6 + 0.308 U$.

A partir de cette équation, nous calculerons un certain nombre de précipitations types, en remplaçant « U » par sa valeur. Les résultats sont donnés au tableau 39.

Tableau 39. Calcul des précipitations pour une période de récurrence donnée.

Période de retour T (ans)	U	Précipitations (mm)				
		Annuel	Automne	Hiver	Printemps	Eté
5	0.84	361	114	158	127	9.79
10	1.28	413	153	195	170	25.3
20	1.64	462	194	231	216	55.3
50	2.05	525	254	281	284	133
100	2.32	571	305	320	340	240
1000	3.09	722	505	460	564	411

Le pas de temps saisonnier donne une superposition des courbes indiquant les P de retour pour le Printemps et l'Hiver allant de 150 jusqu'à 550 mm (fig.53). Le maximum des précipitations est estimé pour le pas de temps millénaire qui dépasse les 700 mm.

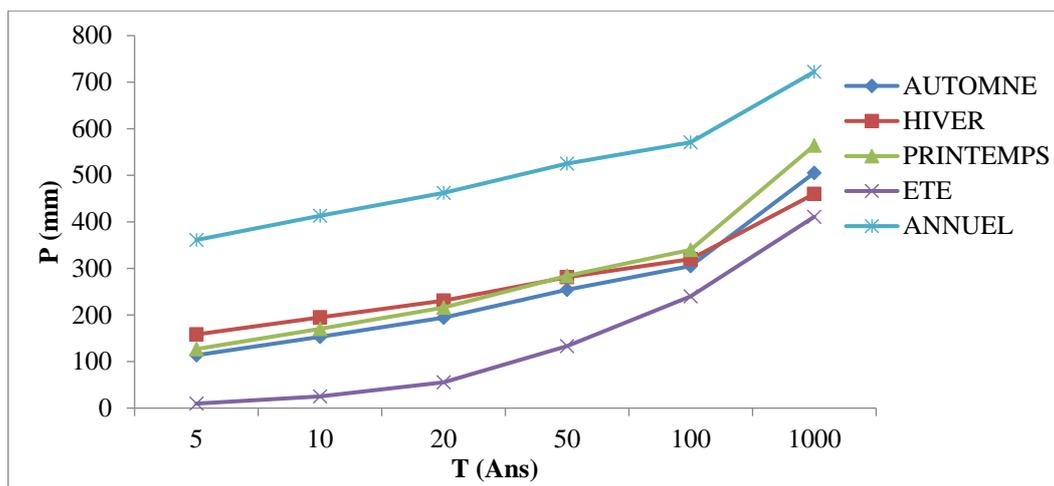


Figure 53. Période de retour des précipitations annuelles par la loi log normale.

III.7.3 Ajustement des données de lames d'eau écoulées à une loi statistique

Tableau 40. Paramètres de distribution des lames d'eau écoulées de la station de Djebel Chouachi

Paramètres	Formules	Valeurs
Moyenne	$\bar{Le} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a Le_i$	28.3
Variance	$\delta^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a (Le_i^2 - \bar{Le}^2)$	1203.6
Ecart-type	$\sigma = \sqrt{\delta^2}$	34.69
Coefficient de variation	$Cv = \frac{\sigma}{\bar{Le}}$	1.22

La variable statistique dans ce cas n'exprime pas les lames d'eau écoulées, mais leurs logarithmes.

$$\text{Log}Le = \text{Log}\bar{Le} + \sigma \text{Log}u$$

Tableau 41. Paramètres de position pour la loi log normale de la station de Djebel Chouachi

Paramètres	Formules	Valeurs
Moyenne	$\bar{Le} \log = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a Le_i \log$	2.47
Variance	$\delta^2 \log = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a (P_i^2 \log - \bar{p}^2 \log)$	2.562
Ecart-type	$\sigma = \sqrt{\delta^2 \log}$	1.60
Coefficient de variation	$Cv = \frac{\sigma}{\bar{Le}}$	0.648

III.7.3.1 Test graphique

D'après la figure 54, la distribution des lames d'eau écoulées à la loi log normale montre un bon alignement de points.

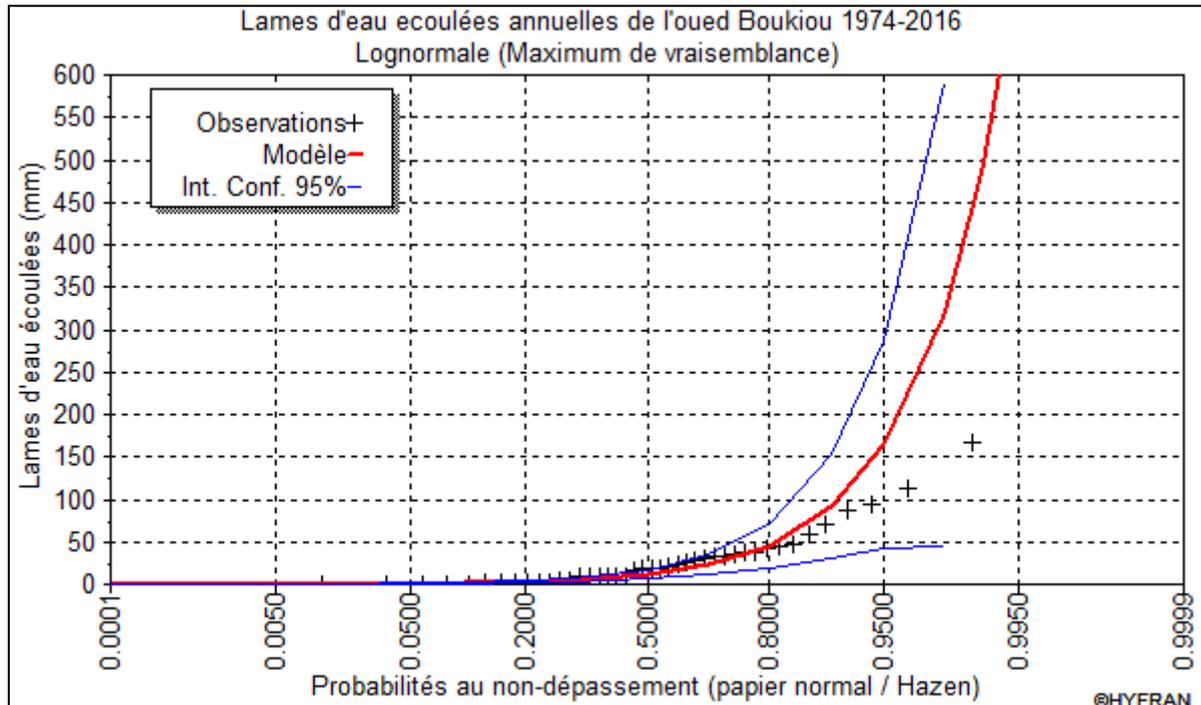


Figure 54. Ajustement graphique des lames d'eau écoulées annuelles à la loi de distribution log normale.

III.7.3.2 Test du χ^2

Les résultats du χ^2 sont récapitulés au tableau 42

Tableau 42. Résultats du χ^2 .

Paramètres	Valeurs
χ^2 calculé	8.29
χ^2 tabulé	9.48
Degré de liberté ddl	4
Nombre de classes K	8

D'après le tableau 42, nous remarquons que le χ^2 calculé est nettement inférieur au χ^2 tabulé ($\chi^2_c < \chi^2_t$), l'ajustement permet donc d'admettre une distribution log normale des lames d'eau écoulées.

III.7.3.3 Calcul des lames d'eau écoulées pour une période de récurrence donnée

Le calcul des valeurs d'eau écoulées correspond à des récurrences données, suivant l'équation de la loi log normale : $\text{Log } E = 2.4 + 1.6 U$.

Nous avons pu extraire un certain nombre de lames d'eau écoulées types, en remplaçant « U » par sa valeur, les résultats sont donnés au tableau 43.

Tableau 43. Calcul des lames d'eau écoulées pour une période de récurrence donnée.

Période de retour T (ans)	U	Lames d'eau écoulées (mm)				
		Annuel	AUTOMNE	HIVER	PRINTEMPS	ÉTÉ
5	0.84	45.6	5.35	21.4	22.4	0.184
10	1.28	92.6	8.43	33.3	33.2	0.487
20	1.64	166	11.7	46	44.4	1.09
50	2.05	321	16.5	64.6	59.8	2.69
100	2.32	498	20.5	80.2	72.2	4.92
1000	3.09	744	36.5	143	118	26.7

L'application de la loi log normale pour estimer les périodes de retour des lames d'eau écoulées a donné presque une similitude dans le comportant des différents pas de temps, c'est à partir du pas de temps centennal que la variation devient importante (fig.55). Pour 1000 ans, les récurrences annuelles varient entre 26 et 744mm.

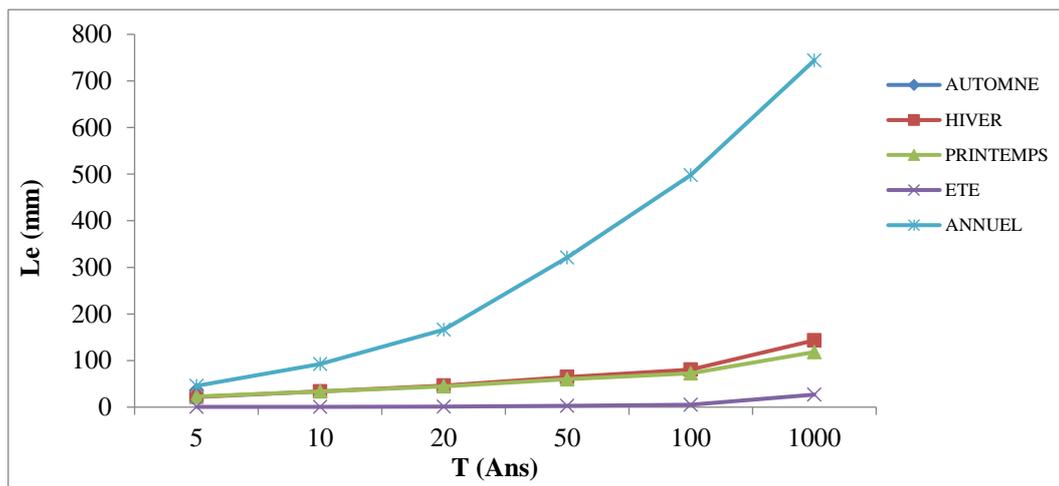


Figure 55. Période de retour des lames d'eau écoulées annuelles par la loi log normale

III.8 Conclusion

L'analyse des paramètres climatiques de la région de l'oued Boukiou montre que notre bassin a un climat méditerranéen semi-aride avec un hiver tempéré.

- Les précipitations sont variables, la moyenne enregistrée sur une période de 42 ans (1974 / 1975-2015/2016) est de 291,7 mm / an, tandis que la température correspondante est égale à 18 ° C.

- En général, les températures maximales sont enregistrées dans les mois de Juillet et Août, et les températures minimales sont observées dans les mois de Décembre à Février.

- En ce qui concerne les écoulements, l'étude hydrologique a montré que cet oued est caractérisé par un régime d'écoulement irrégulier en raison de l'irrégularité du régime pluviométrique. L'évolution des débits saisonniers a montré que c'est au Printemps que la

majeure partie du ruissellement se produit, ce qui signifie que l'intensité des précipitations est élevée pendant cette saison.

Chapitre 4 :
VARIABILITE
CLIMATIQUE

IV. Introduction

La problématique des changements climatiques a été reconnue comme l'un des problèmes majeurs qui engendre des impacts négatifs sur la ressource en eau. L'Algérie, à l'instar des pays d'Afrique du Nord a été affectée par ce phénomène, elle a connu plusieurs grandes sécheresses d'ampleurs variables durant ce siècle, pendant les années 40 et 80 jusqu'à nos jours, certaines ont eu des répercussions parfois dramatiques sur les conditions de vie de la population. Il est donc nécessaire de suivre rigoureusement et périodiquement la quantité de cette ressource, d'analyser sa tendance et de s'interroger sur les facteurs influençant cette tendance.

Cette partie a pour objectif de déterminer comment se manifeste la variabilité climatique selon son intensité, sa durée et sa situation chronologique. A cet effet, afin de mieux la caractériser, nous proposons de faire une étude sur les données pluviométriques et hydrologiques observées sur une période de 42 ans au niveau d'Oued Boukiou. Pour déceler d'éventuels changements dans le régime pluviométrique et hydrologique, nous avons utilisé un certain nombre d'indices de sécheresse qui servent à quantifier sa sévérité, et une étude statistique basée sur l'utilisation des tests statistiques afin de déterminer les tendances climatiques et les années de rupture.

Pour ce faire nous avons eu recours au programme Khronostat 1.01 pour déceler les ruptures affectant les séries de données pluviométriques et hydrométriques. Une rupture peut être définie de façon générale par un changement dans la loi de probabilité de la série chronologique à un instant donné, le plus souvent inconnu.

IV.1 Le logiciel de calcul statistique KHRONOSTAT

Le Khronostat1.01 est un logiciel d'analyse statistique de séries chronologiques conçu par l'équipe de recherche de l'IRD, dans le cadre d'une étude sur la variabilité climatique en Afrique de l'Ouest et Centrale. Cet objectif peut être atteint en considérant une seule série de données. De telles analyses sont qualifiées de ponctuelles ou par site. Le Khronostat permet d'effectuer deux types de tests :

- Les premiers tests sont relatifs à la vérification de caractère aléatoire de séries chronologiques de données météorologiques, ce qui traduit une tendance à la persistance.
- Les seconds tests concernent la détection d'un point de rupture dans l'hypothèse où la série est déclarée non aléatoire. (Sougoumi, 2009).

IV.2 Identifications des tests statistiques

Afin de détecter les ruptures nous avons procédé à quatre tests statistiques :

- Test de Pettitt.
- Test d'Hubert.
- Test de la méthode bayésienne et Heghinian.
- Test de Buishand et l'ellipse de contrôle.

IV.2.1 Test de A.N PETTITT

Le test de PETTITT (1979) est non-paramétrique et dérive du test de Mann Whitney. L'absence d'une rupture dans la série (Xi) de taille N constitue l'hypothèse nulle. La mise en œuvre du test suppose que pour tout instant t compris entre 1 et N, les séries chronologiques (Xi), de i=1 à t et de t+1 à N appartiennent à la même population. La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable Ut, N définie par :

$$U_t = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \tag{Eq. 25}$$

Où :

$D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j)$, avec :

$\text{Sgn}(X) = 1$, si $X > 0$

$\text{Sgn}(X) = 0$, si $X = 0$

$\text{Sgn}(X) = -1$, si $X < 0$

Au cas où l'hypothèse nulle est rejetée, une estimation de la date de rupture est donnée par l'instant t définissant le maximum en valeur absolue de la variable Ut, N. (Ahoussi et al., 2013).

IV.2.2 Test de segmentation de P. HUBERT(1989)

Une procédure de segmentation de séries hydrométéorologiques a été présentée par Hubert en 1989. Le principe de cette procédure est de « découper » la série en m segments ($m > 1$) de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit significativement différente de la moyenne (ou des) segment(s) voisin(s). Une telle méthode est appropriée à la recherche de multiples changements de moyenne. La segmentation est définie de la façon suivante : Toute la série xi, $i = i_1, i_2$ avec $i_1 \leq 1$ et $i_2 \geq N$ où ($i_1 < i_2$) constitue un segment de la série initiale des (xi), $i = 1, \dots, N$. Toute partition de la série initiale en m segments est une segmentation d'ordre m de cette série.

IV.2.3 Méthode Bayésienne De A.F.S LEE et S.M. HEGHINIAN

La méthode fournit la probabilité que le changement se produise à un moment t, dans une série chronologique où on suppose a priori qu'il y a effectivement un changement à un moment indéterminé. De même, cette procédure donne une estimation de la probabilité que l'amplitude du changement ait la valeur du changement éventuel de la moyenne (Ghenim, 2013).

IV.2.4. Statistique u de Buishand

Ce test de nature bayésienne est basé sur les hypothèses de normalité et de constance de la variance de la série. En supposant une distribution à priori uniforme pour la position du point de rupture, la statistique U est définie par :

$$U = [N(N + 1)]^{-1} \sum_{K=1}^{N-1} \left(\frac{S_k}{D_x} \right)^2 \tag{Eq. 26}$$

Où :

$S_k = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})$ pour $K=1, 2, 3, \dots, N$,

D_x : Ecart type de la série.

L'hypothèse nulle est l'absence de rupture dans la série. Si l'hypothèse nulle est rejetée, le test ne propose pas une estimation de la date de rupture. Des valeurs critiques de la statistique U sont données par Buishand (1982, 1984) à partir d'une méthode de Monte Carlo. Cette méthode donne moins de poids aux premières et aux dernières valeurs de la série et s'avère donc plus performante pour tout changement de moyenne intervenant au milieu de la série. La statistique U est une statistique robuste qui reste valide même pour des distributions de la variable étudiée qui s'écartent de la normalité. (Arodoin, 2004).

N. B : l'application des tests paramétriques (statistique de Buishand et méthode bayésienne) nécessitent, la vérification de la normalité de la variable étudiée. Dans la mesure où cette normalité n'est pas vérifiée, les procédures Buishand et bayésienne ne pourront pas être appliquées. (Koukponou, 2001).

IV.3 Application des tests statistiques

IV.3.1 Test de PETTITT

IV.3.1.1 Analyse des précipitations

Notre station a connu une rupture dans notre série de données annuelles en 2000 avec une probabilité de dépassement >20% et un seuil de confiance de 90% (fig.56).

Aucune rupture n'a été détectée sur la série des précipitations durant la période humide et sèche (fig.57).

Une seule rupture est mise en évidence à l'issue du test de Pettitt sur la saison d'Automne en 1998 avec un seuil de 90% et une probabilité de dépassement >20% (série homogène) (fig.58), et pour les autres saisons aucune rupture n'a été détectée.

L'application du test de Pettitt sur la série chronologique des précipitations mensuelles n'a pas identifié de rupture d'après le tableau 44 et la figure 59.

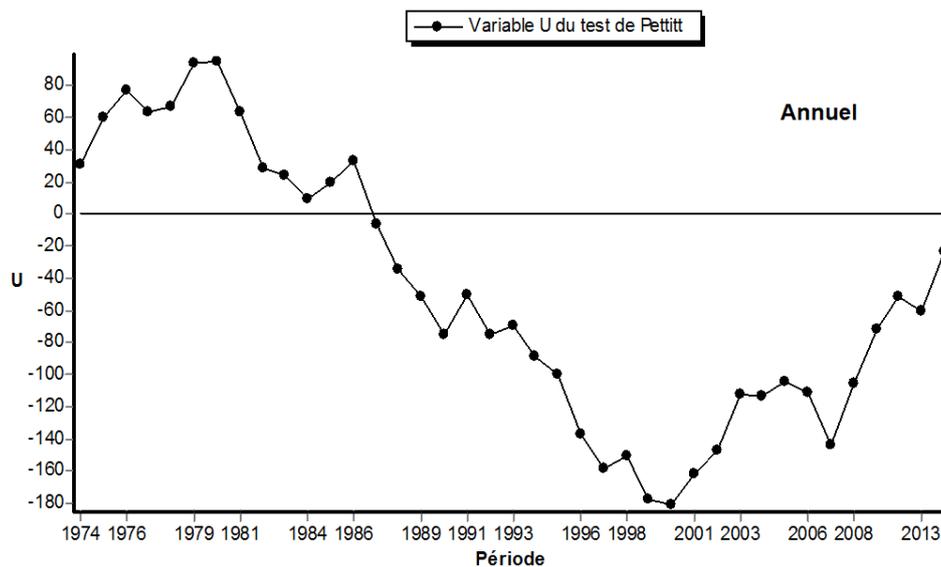


Figure 56. Evolution de la variable U du test de Pettitt des précipitations annuelles

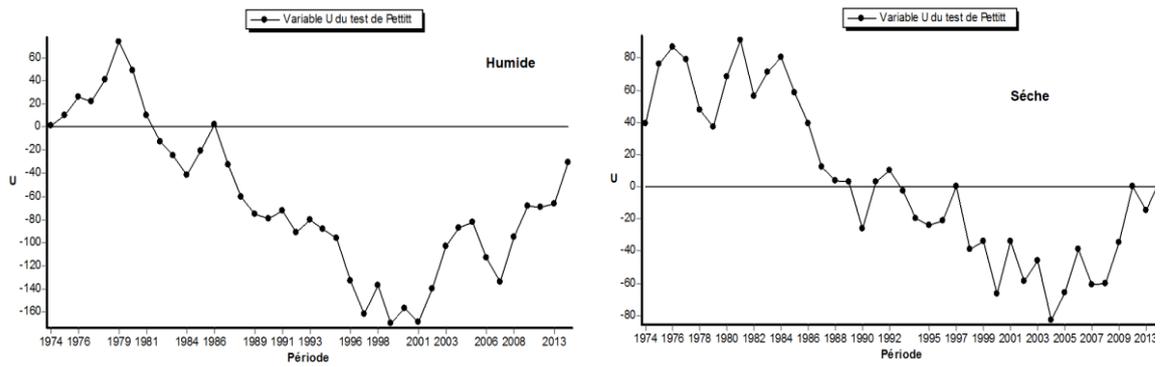


Figure 57. Evolution de la variable U du test de PETTITT des précipitations au cours des Périodes humide et sèche.

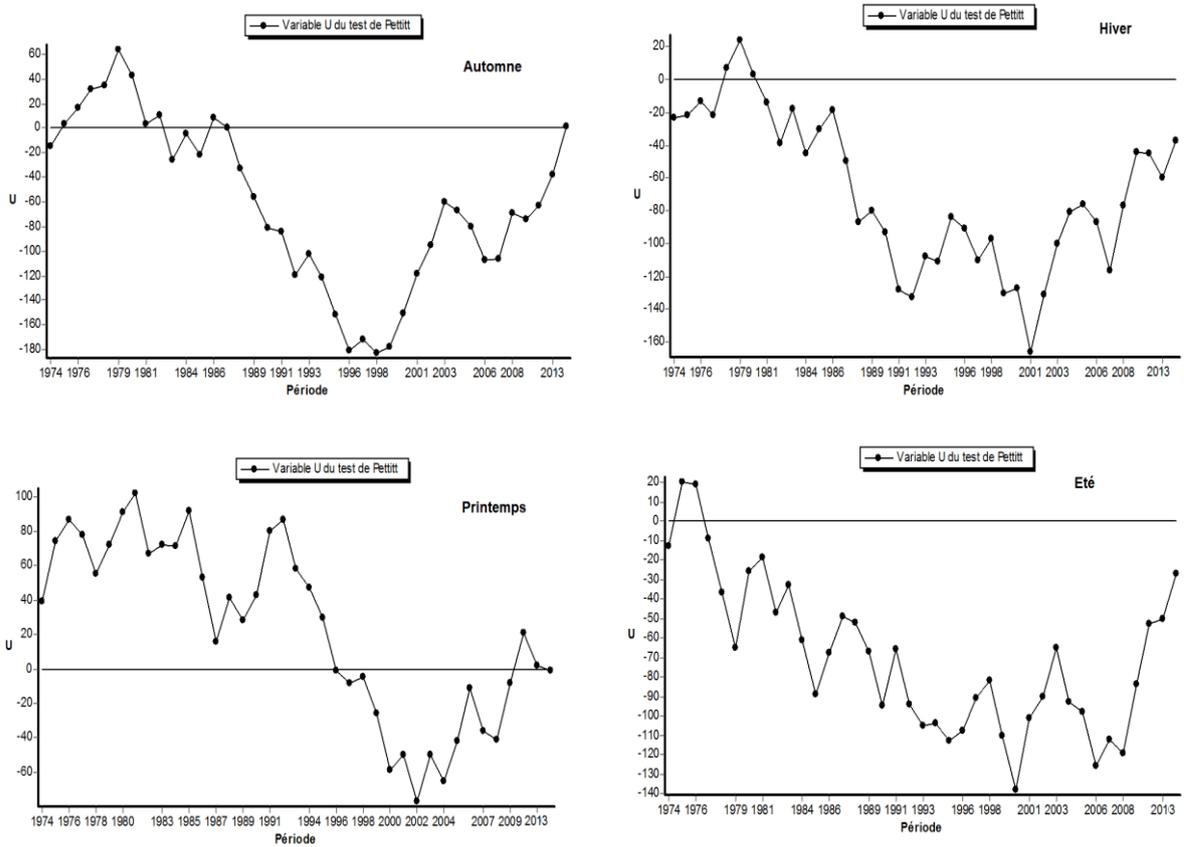
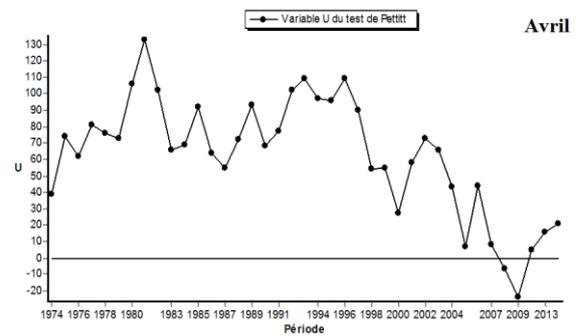
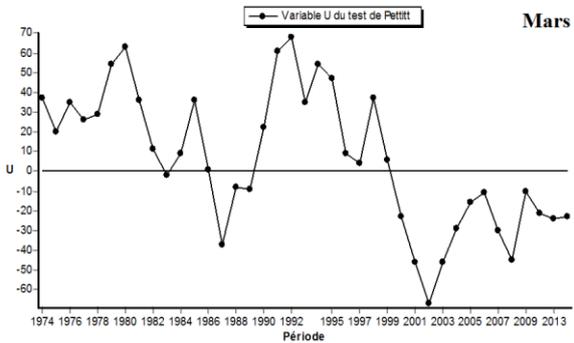
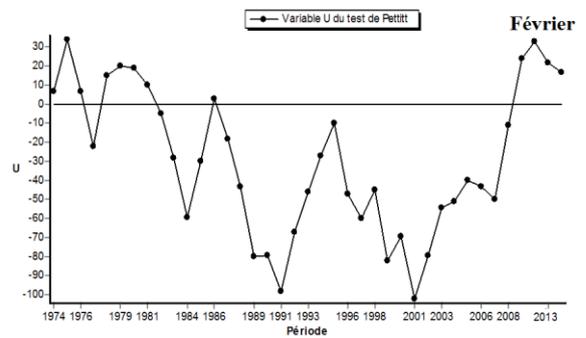
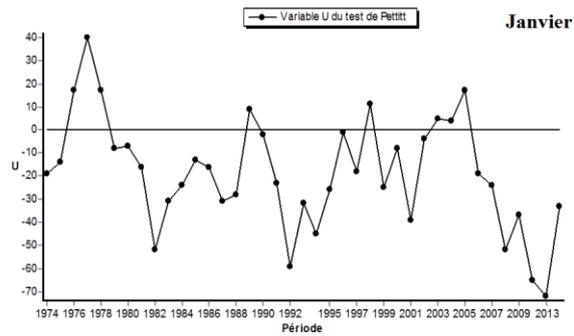
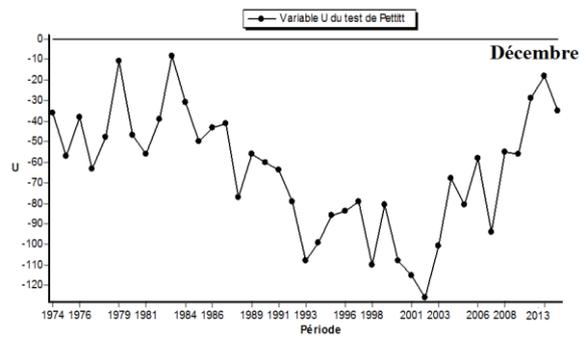
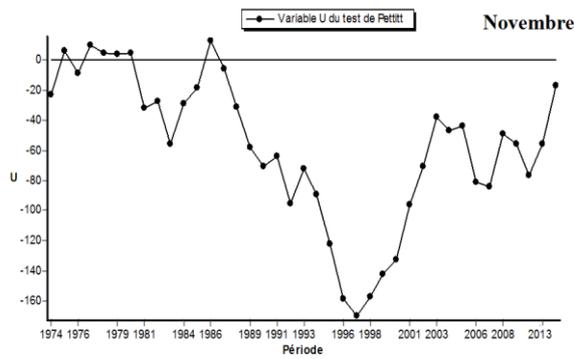
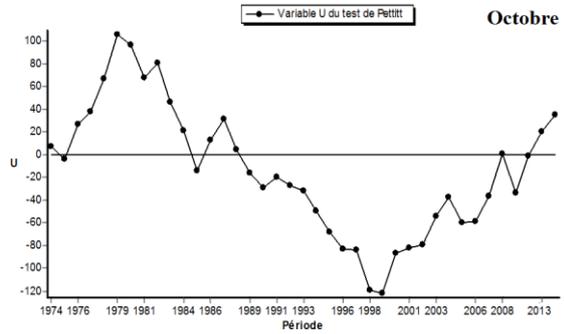
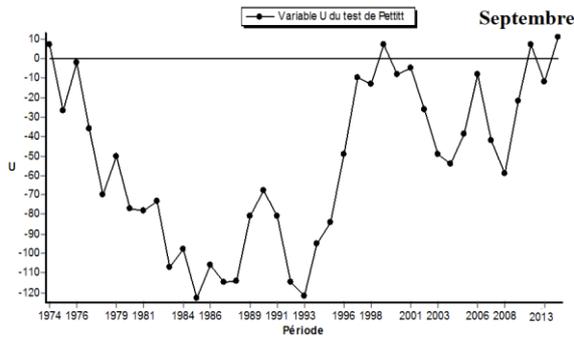


Figure 58. Evolution de la variable U du test de PETTITT des précipitations saisonnières



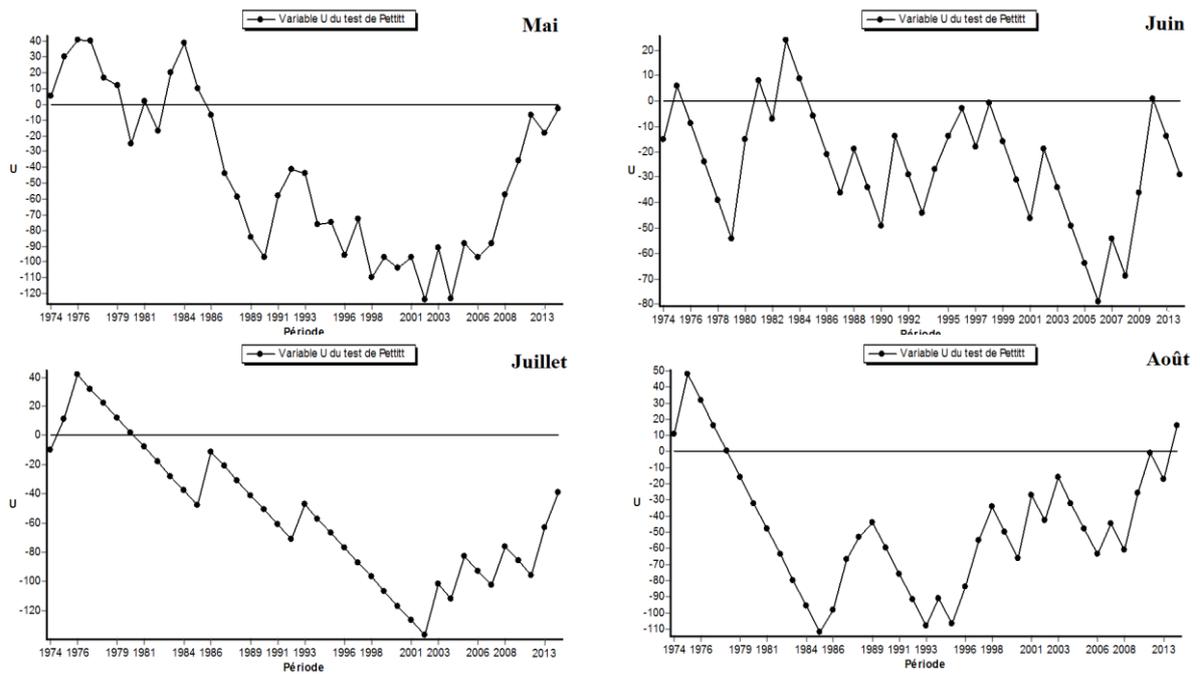


Figure 59. Evolution de la variable U du test de PETTITT des précipitations mensuelles

Tableau 44. Evolution de la variable U du test de PETTITT des Précipitations

Station	Echelle de temps		Hypothèse	Probabilité de dépassement	Date de rupture	Seuil de confiance (Rejetée)		
						99%	95%	90%
Dj. Chouachi	Annuelle	1974-2016	Nulle	$9.99.10^{-2}$	2000	Acceptée	Rejetée	
	Périodique	Sèche	Nulle	/	/	Acceptée		
		Humide						
	Saisonnaire	Automne	Nulle	$9.45.10^{-2}$	1998	Acceptée	Rejetée	
		Hiver		/	/	Acceptée		
		Printemps						
		Eté						
	Mensuelle	septembre	Nulle	/	/	Acceptée		
		octobre						
		novembre						
		décembre						
		Janvier						
		Février						
Mars								
Avril								
Mai								
Juin								
Juillet								
Aout								

IV.3.1.2 Analyse des Températures

Une rupture peu significative enregistrée durant l'année 1986 dans la série annuelle des températures (fig. 60).

Une rupture pendant la période humide en 1993 avec un seuil de 90%. 95% et une probabilité de déplacement >20% (série homogène et une autre durant la période sèche peu significative est enregistrée (5 % < probabilité de dépassement > 20 %) avec un seuil de confiance de 90 %, 95% et 99 (fig.61) et tableau 47.

Des ruptures dans les saisons d'Automne, Printemps et Eté respectivement en 1982, 1985 et 1987 (fig.62). Alors que pour la saison d'Hiver aucune rupture n'a été détectée (tableau.45).

Les résultats d'analyse de la figure 63, montrent la présence des ruptures dans les mois de Janvier, Février, Mars, Avril, Mai, Juin, Juillet et Août de 1984 à 1994. Le reste des mois n'ont enregistré aucune rupture.

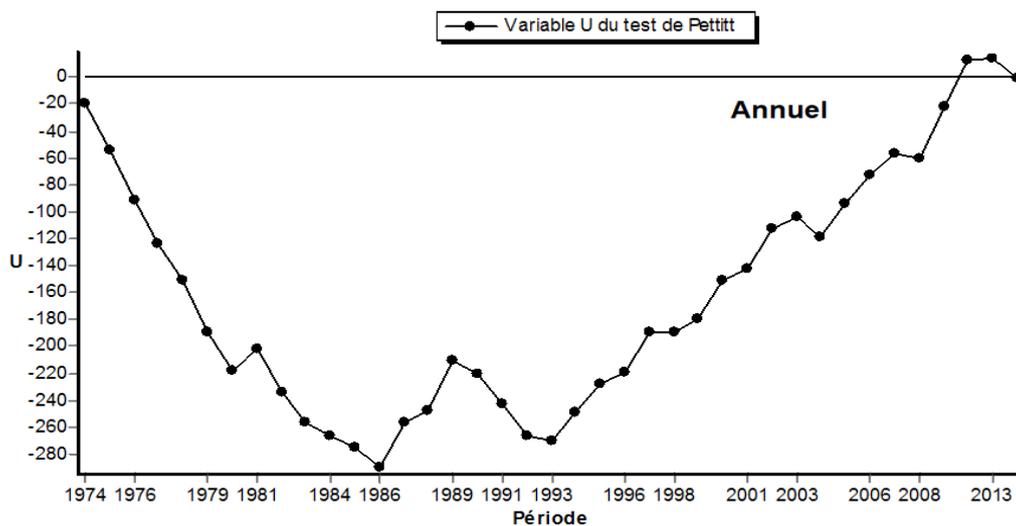


Figure 60. Evolution de la variable U du test de PETTITT des températures annuelles

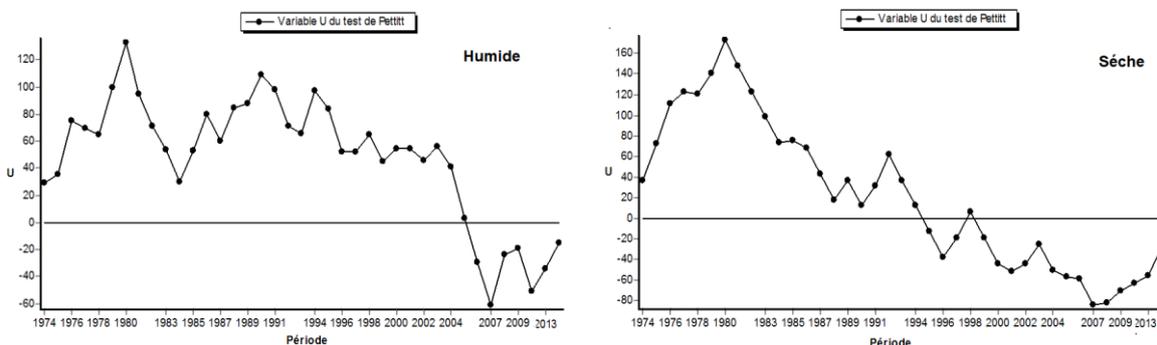


Figure 61. Evolution de la variable U du test de PETTITT des températures au cours des périodes humide et sèche.

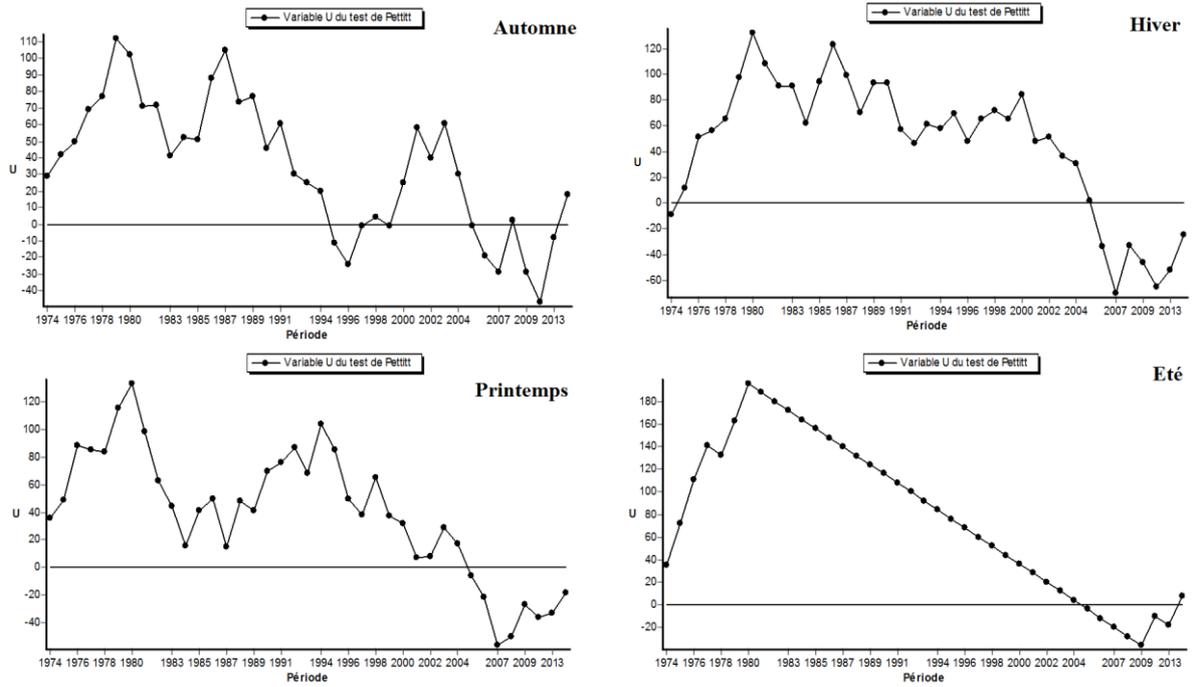


Figure 62. Evolution de la variable U du test de PETTITT des Températures saisonnières

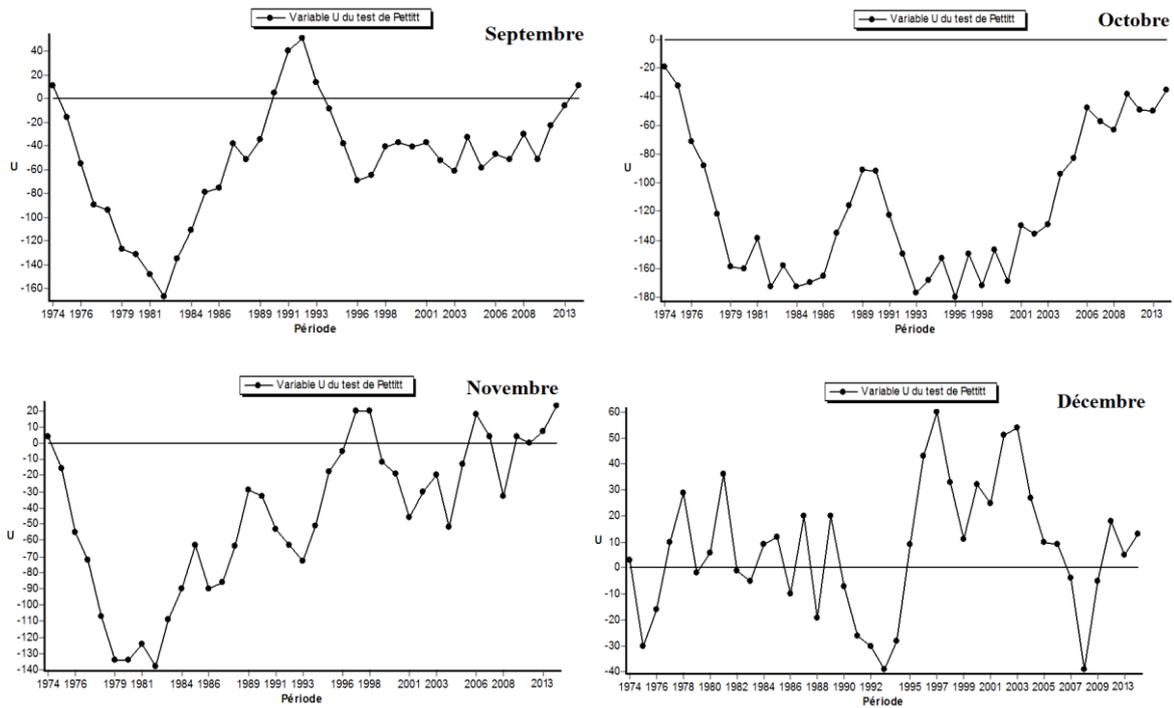




Figure 63. Evolution de la variable U du test de PETTITT des températures mensuelles

Tableau 45. Evolution de la variable U du test de PETTITT des températures

Station	Echelle de temps		Hypothèse	Probabilité de dépassement	Date de la rupture	Seuil de confiance (rejetée)		
						99%	95%	90%
Dj. Chouachi	Annuelle	1974-2016	Nulle	$9,13.10^{-4}$	1986	Rejetée		
	Périodique	Sèche	Nulle	$4,61.10^{-2}$	1993	Acceptée	Rejetée	
		Humide		$7,37.10^{-4}$	1985	Rejetée		
	Saisonnaire	Automne	Nulle	$4,28.10^{-2}$	1982	Acceptée	Rejetée	
		Hivers		/	/	Acceptée		
		Printemps		$1,01.10^{-3}$	1985	Acceptée		
		Eté		$2,95.10^{-3}$	1987	Acceptée		
	Mensuelle	Septembre	Nulle	/	/	Acceptée		
		Octobre		/	/	Acceptée		
		Novembre		/	/	Acceptée		
		Décembre		/	/	Acceptée		
		Janvier		$2,49.10^{-2}$	1993	Acceptée	Rejetée	
		Février		/	/	Acceptée		
		Mars		/	/	Acceptée		
		Avril		/	/	Acceptée		
		Mai		$1,62.10^{-3}$	1984	Rejetée		
		Juin		$4,76.10^{-3}$	1994	Rejetée		
Juillet	$3,03.10^{-2}$	1987	Acceptée	Rejetée				
Aout	$1,25.10^{-3}$	1986	Rejetée					

IV.3.1.3 Analyse des lames d'eau écoulées

Les résultats du tableau 46 ne montrent aucune rupture sur notre série de données au pas de temps annuel (fig.64).

Aussi, la figure 65 et le tableau 46, n'ont fait apparaître aucune rupture sur la chronique des lames d'eau durant la période sèche et humide.

Pour la saison d'été une seule rupture a été enregistrée en 1980 avec un seuil de confiance de 90% et une probabilité de dépassement >20% (série homogène) illustrée dans la figure 66.

Pour la chronologie mensuelle, un point de rupture est mis en évidence en 1980 au mois de Juin avec un seuil de 90%, par contre, aucune rupture n'est identifiée pour le reste des mois (fig.67).

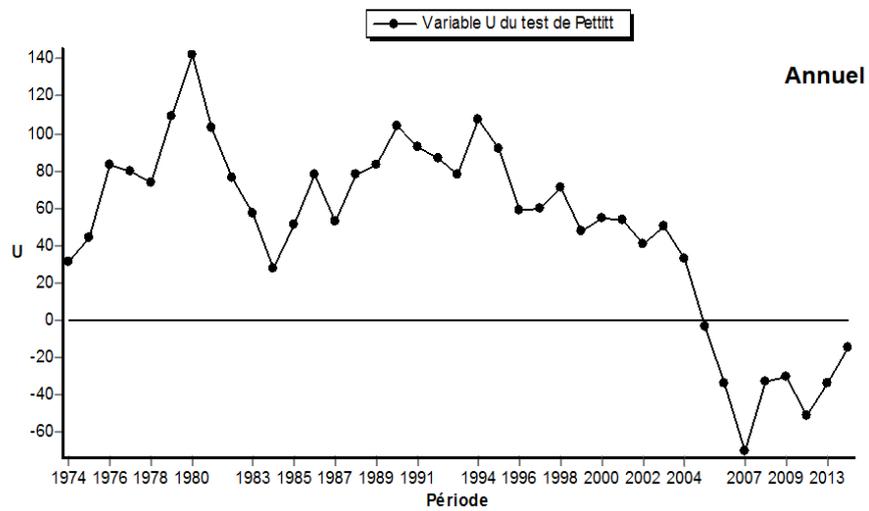


Figure 65. Evolution de la variable U du test de PETTITT des lames d'eau écoulées annuelles

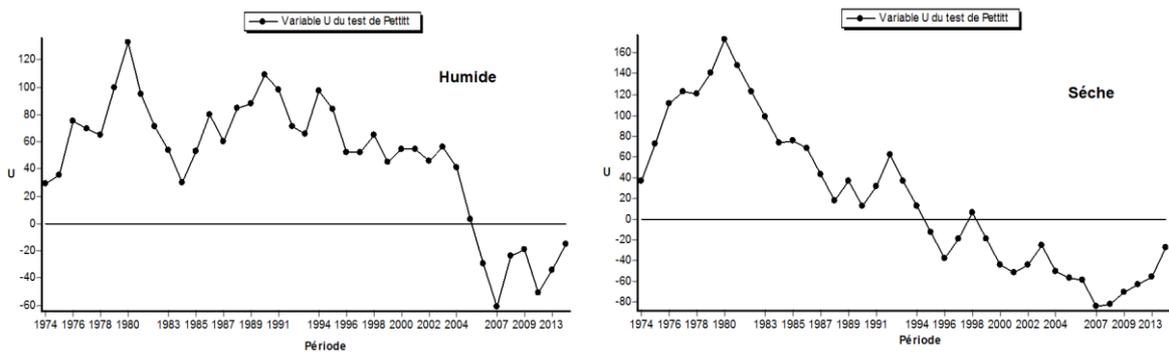
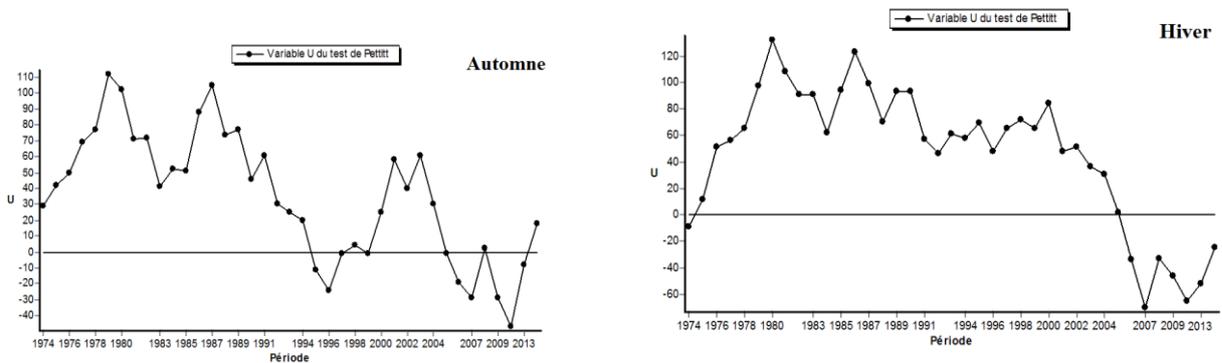


Figure 64. Evolution de la variable U du test de PETTITT des lames d'eau écoulées au cours des Périodes humide et sèche.



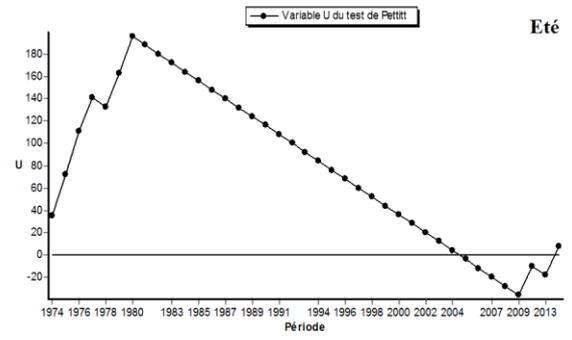
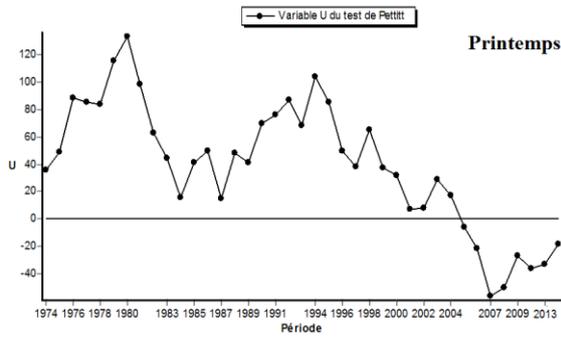
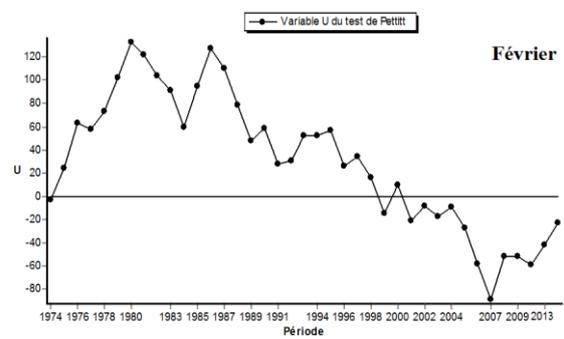
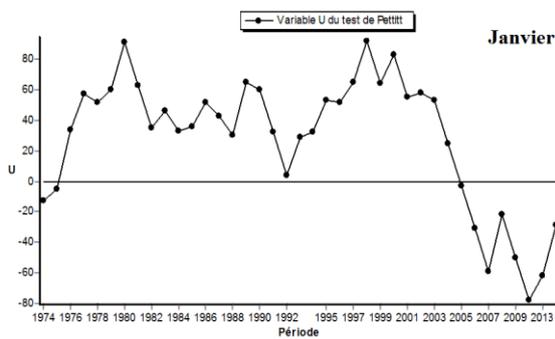
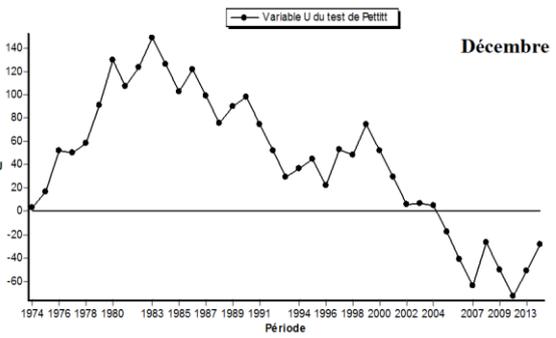
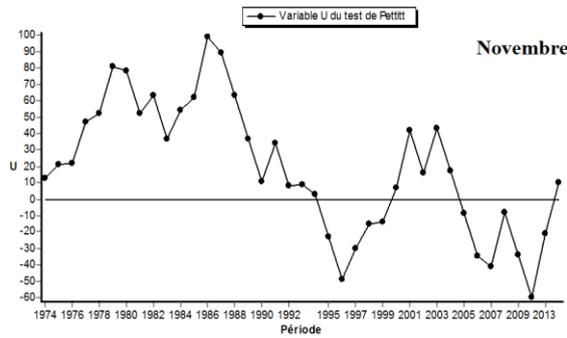
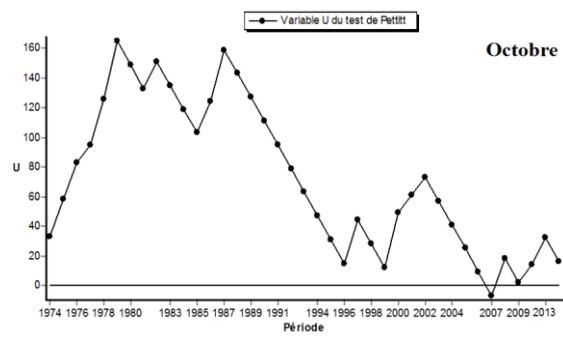
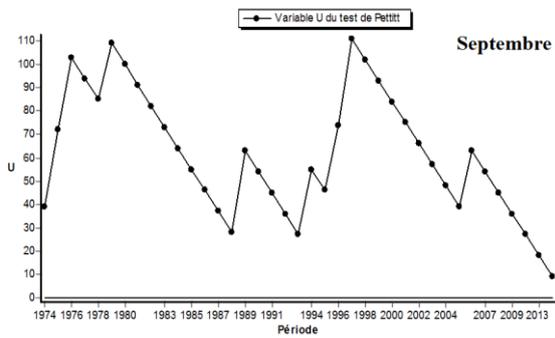


Figure 66. Evolution de la variable U du test de PETTITT des lames d'eau écoulées saisonnières



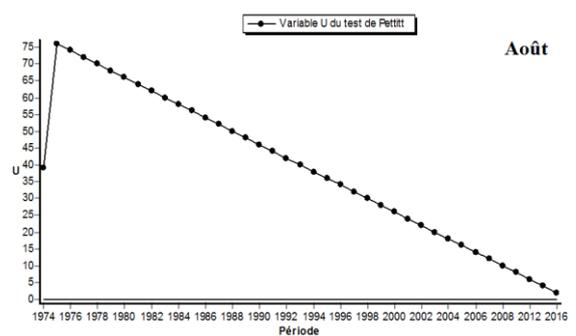
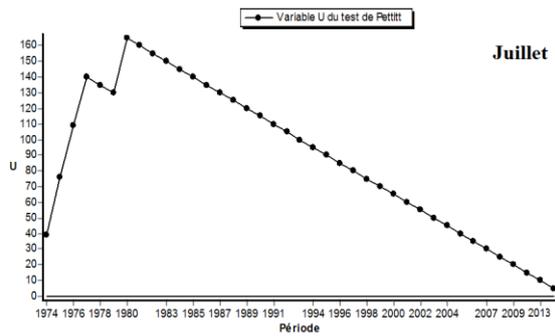
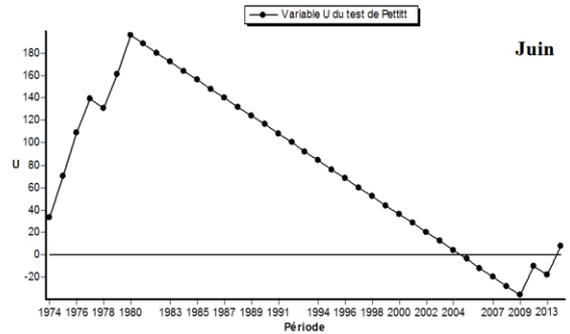
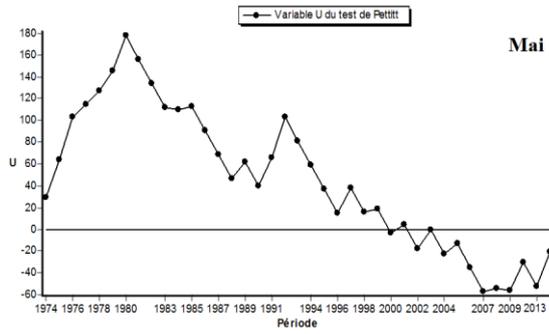
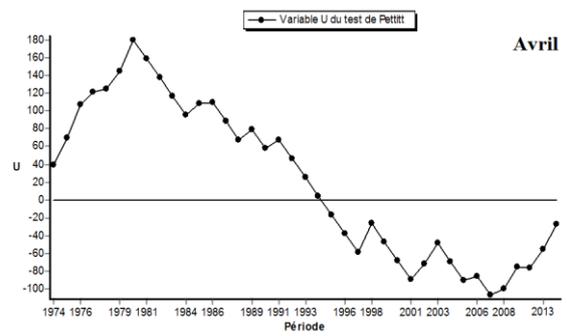
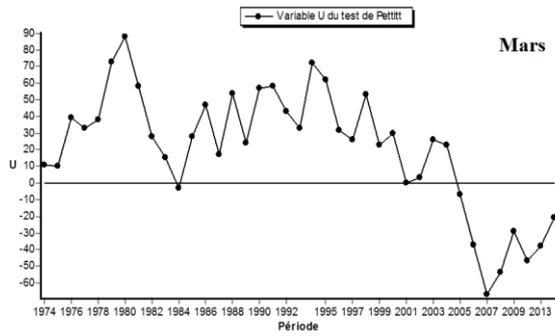


Figure 67. Evolution de la variable U du test de PETTITT des lames d'eau écoulées mensuelles

Tableau 46. Evolution de la variable U du test de PETTITT des lames d'eau écoulées

Station	Echelle de temps		Hypothèse	Probabilité de dépassement	Date de la rupture	Seuil de confiance (rejetée)		
						99%	95%	90%
Dj. Chouachi	Annuelle	1974-2016	Nulle	/	/	Acceptée		
	Périodique	Sèche	Nulle	/	/	Acceptée		
		Humide				Acceptée		
	Saisonnaire	Automne	Nulle	/	/	Acceptée		
		Hivers				Acceptée		
		Printemps				Acceptée		
		Eté				8.96.10 ⁻²	1980	Acceptée
	Mensuelle	Septembre	Nulle	/	/	Acceptée		
		Octobre				Acceptée		
		Novembre				Acceptée		
		Décembre				Acceptée		
		Janvier				Acceptée		
		Février				Acceptée		
		Mars				Acceptée		
Avril		Acceptée						
Mai		Acceptée						
Juin		5.96.10 ⁻²				1980	Acceptée	Rejetée
Juillet	/	/	Acceptée					
Août	Acceptée							

IV.3.2 Test de segmentation de P. HUBERT

IV.3.2.1 Analyse des précipitations

Les résultats de la segmentation d'Hubert appliquée aux séries pluviométriques annuelles de la station du Dj. Chouachi sur la période 1974/1975 à 2015/2016 (tableau.47), propose un découpage de 1974 - 2007 et 2008 - 2013.

D'après le tableau 47, le découpage proposé est différent d'une période à une autre.

* Période sèche : 1974-1975 et 1976-2013.

* Période humide : 1974-2007 et 2008-2013 (le même découpage de la série pluviométrique annuelle).

La procédure de segmentation (tableau 49) propose des segments commençant par l'année 1974. Deux pour les saisons Automne, Printemps, Hiver et un seul pour l'Eté.

Les résultats du test de segmentation (tableau 49), montre que le découpage proposé pour la majorité des mois de la séries pluviométrique est de (1974/1975-2015/2016).

Tableau 47. Résultat de la segmentation d'Hubert des Précipitations

Station	Echelle Temps		Début	Fin	Moyenne	Ecart Type	Niveau de signification du test descheffé
Dj. Chouachi	Annuelle	1974-2016	1974	2007	272,4	75,4	1%
			2008	2013	403,5	102,26	1%
	Périodique	Sèche	1974	2007	34,262	11,665	1%
			2008	2013	53,017	17,885	1%
		Humide	1974	1975	29,750	4,031	1%
			1976	2013	10,674	6,635	1%
	Saisonnière	Automne	1974	1999	64,515	35,109	1%
			2000	2013	109,079	56,636	1%
		Hivers	1974	2001	101,696	40,577	1%
			2002	2013	147,008	58,843	1%
		Printemps	1974	1974	291,2	0,000	1%
			1975	2013	83,003	42,492	1%
		Eté	1974	2013	9,427	14,481	1%
		Mensuelle	Septembre	1974	2013	11,498	10,702
	Octobre		1974	2013	23,183	21,893	1%
	Novembre		1974	2011	44,413	34,675	1%
			2012	2013	124,800	79,620	1%
	Décembre		1974	2013	32,020	28,710	1%
	Janvier		1974	2011	34,668	27,764	1%
			2012	2013	90,550	8,273	1%
	Février		1974	2013	48,808	32,223	1%
	Mars		1974	2013	38,478	31,573	1%
	Avril		1974	1975	126,100	51,053	1%
	Mai		1976	2013	22,668	21,851	1%
	Juin		1974	2011	34,668	27,764	1%
	Juillet	2012	2013	90,550	8,273	1%	
	Aout	1974	2013	4,772	10,001	1%	

IV.3.2.2 Analyse des Températures

Les résultats de la segmentation d'Hubert appliquée aux séries des températures annuelles de la station du Dj. Chouachi sur la période 1974/1975 à 2013/2014 (tableau 48), propose un découpage de 1974-1980 et 1981-2013.

D'après le même tableau, le découpage proposé pour les périodes est différent d'une période à l'autre.

- Période sèche : 1974-1983 et 1984-2013.
- Période humide : 1974-1979 et 1980-2013.

La procédure de segmentation par contre pour le pas de temps saisonnier, propose des segments commençant par l'année 1974, deux pour les saisons Automne, Printemps et Eté et un seul pour l'Hiver.

La méthode de segmentation (tableau.48) propose des segments commençant par l'année 1974. Au minimum deux découpages pour chaque mois, sauf pour le mois d'Août où, un seul découpage a été proposé 1974-2013.

Tableau 48. Résultat de segmentation d'Hubert des Températures

Station	Echelle de temps		Début	Fin	Moyenne	Ecart Type	Niveau de signification du test de scheffé
Dj. Chouachi	Annuelle	1974-2016	1974	1980	16,757	0,702	1%
			1981	2013	18,170	0,451	1%
	Périodique	Humide	1974	1979	12,917	0,581	1%
			1980	2013	14,026	0,812	1%
		Sèche	1974	1983	20,780	0,899	1%
			1984	2013	22,397	0,488	1%
	Saisonnière	Automne	1974	1979	17,9	1,056	1%
			1980	2013	19,709	0,733	
		Hivers	1974	2013	11,608	1,071	1%
			1974	1985	14,90	0,873	1%
		Printemps	1986	2013	16,254	0,626	1%
			1974	1983	23,450	1,218	1%
		Eté	1984	2013	25,273	0,801	1%
			1974	1982	22,611	1,181	1%
	Mensuelle	Septembre	1983	1991	24,811	1,234	
			1992	2013	23,450	0,849	1%
			1974	1979	17,867	0,995	1%
		Octobre	1980	2013	19,994	1,257	1%
			1974	1979	13,567	1,335	1%
		Novembre	1980	2013	15,365	1,375	1%
			1974	2013	12,223	1,392	1%
		Décembre	1974	1993	10,135	1,323	
			1994	2013	11,460	1,353	1%
		Janvier	1974	2013	11,818	1,380	1%
			1974	1985	12,858	1,230	
		Mars	1986	2013	13,896	0,831	1%
			1974	1981	14,350	1,103	1%
		Avril	1982	2013	15,803	1,111	1%
			1974	1984	19,873	0,850	1%
		Mai	1985	2013	18,983	1,051	1%
			1974	1994	21,790	1,297	1%
		Juin	1995	2013	23,237	1,072	1%
			1974	1982	24,656	1,092	1%
		Juillet	1983	2013	26,152	1,011	1%
			1974	1978	25,060	1,704	1%
		Août	1979	1979	17,40	0	1%
			1980	1983	24,575	0,499	
			1984	2013	26,893	0,924	1%
			1974	2013	26,893	0,924	1%

IV.3.2.3 Analyse des lames d'eau écoulées

Selon les résultats du test (tableau.49), la procédure de segmentation propose trois découpages sur la série des lames d'eau annuelles : 1974/1975,1976/1976 et 1977/2013.

Les résultats de ce test sont résumés dans le tableau 49, montrant que les deux périodes humide et sèche possèdent trois découpages similaires : 1974-1975,1976-1976 et 1977-2013

Les résultats de la segmentation d'Hubert sont consignés dans le tableau .49), cette procédure propose un seul découpage pour l'Automne et l'Hiver : 1974-2013, deux découpages pour le Printemps et cinq segments pour l'Eté

Selon les résultats de ce test (Tableau.49), la procédure propose un seul segment identique aux mois de Novembre, Janvier, Février et Mars (1974/1975-2015/2016).

Tableau 49. Résultats de la segmentation d'Hubert des lames d'eau écoulées

Station	Echelle de temps		Début	Fin	Moyenne	Ecart Type	Niveau de signification du test de scheffé
Dj. Chouachi	Annuelle	1974-2016	1974	1975	43,550	22,557	1%
			1976	1976	166,100	0,000	1%
			1977	2013	21,189	23,077	1%
	Périodique	Humide	1974	1975	5,950	3 182	1%
			1976	1976	19,000	0,000	1%
			1977	2013	3,884	3 263	1%
		sèche	1974	1974	9,500	0,000	1%
			1975	1975	3,100	0,000	1%
			1976	1976	11,500	0,000	1%
			1977	2013	1,341	0,451	1%
	Saisonnaire	Automne	1974	2013	4,123	5,247	1%
		Hiver	1974	2013	11,402	18,726	1%
		Printemps	1974	1976	24,100	26,778	1%
			1977	2013	10,368	13,314	1%
		Eté	1974	1975	3,850	0,2120	1%
			1976	1976	18,600	0,000	1%
			1977	1979	1,267	0,231	1%
	1980		1980	2,900	0,000	1%	
	Mensuelle	Septembre	1974	1974	4,900	0,000	1%
			1975	2013	1,136	0,455	1%
		Octobre	1974	1978	1,700	0,561	1%
			1979	1979	11,20	0,000	1%
			1980	2013	1,253	0,781	1%
		Novembre	1974	2013	3,337	4,804	1%
		Décembre	1974	1979	6,050	7,454	1%
			1980	1980	31,40	0,000	1%
			1981	2013	2,385	3,893	1%
		Janvier	1974	2013	4,525	8,172	1%
		Février	1974	2013	5,228	6,578	1%
		Mars	1974	2013	8,560	12,775	1%
		Avril	1974	1974	43,30	0,000	1%
			1975	1975	5,000	0,000	1%
			1976	1976	24,200	0,000	1%
			1977	2013	2,103	1,536	1%
		Mai	1974	1975	4,600	1,838	1%
			1976	1976	23,10	0,000	1%
			1977	2013	1,746	1,583	1%
		Juin	1974	19774	2,100	0,000	1%
			1975	1975	2,800	0,000	1%
			1976	1976	18,30	0,000	1%
			1977	1979	1,267	0,231	1%
			1980	1980	2,5	0,000	1%
		Juillet	1981	2013	1,006	0,024	1%
			1974	1974	1,900	0,000	1%
			1975	1975	1,800	0,000	1%
			1976	1976	1,300	0,000	1%
	1977		1977	1,100	0,000	1%	
	Août	1978	1979	1,000	0,000	1%	
		1980	1980	1,500	0,000	1%	
		1981	2013	1,000	0,000	1%	
	Août	1974	1975	1,550	0,212	1%	
		1976	2013	1,000	0,000	1%	

IV.3.3 Test de la méthode bayésienne de A.F.S. LEE et S.M. HEGHINIAN

IV.3.3.1 Analyse des précipitations

L'analyse de la figure 68, révèle que le mode de la fonction densité de probabilité à posteriori de la position du point de rupture des précipitations est en 2007/2008, c'est une période de retour d'humidité avec un volume de 183.4 mm correspondant au maximum observé sur la série.

Les résultats du test de rupture de Lee et Heghinian appliqué aux séries pluviométriques annuelles (tableau 50) montrent la présence de rupture dans la série pluviométrique.

L'analyse de la variation des densités de probabilité au pas de temps périodique met en évidence deux années de rupture :

- Pour la période humide, le point de rupture est en 2007/2008 avec une valeur de 183.4 mm,
- Et pour la période sèche, le point de rupture est en 1975/1976 avec 404.7 mm (fig.69).

Le dénivelé de probabilité saisonnière identifie l'année 1998 comme année de rupture avec 290.5 mm pour l'Automne, et pour le Printemps le point de rupture est en 1974 avec 406.4 mm (fig.70)

Une présence des ruptures dans la série pluviométrique mensuelle (fig.71), correspondant au maximum de volume observé varie de mois en mois, sauf pour les mois de Novembre et Janvier qui présentent la même rupture (tableau 50).

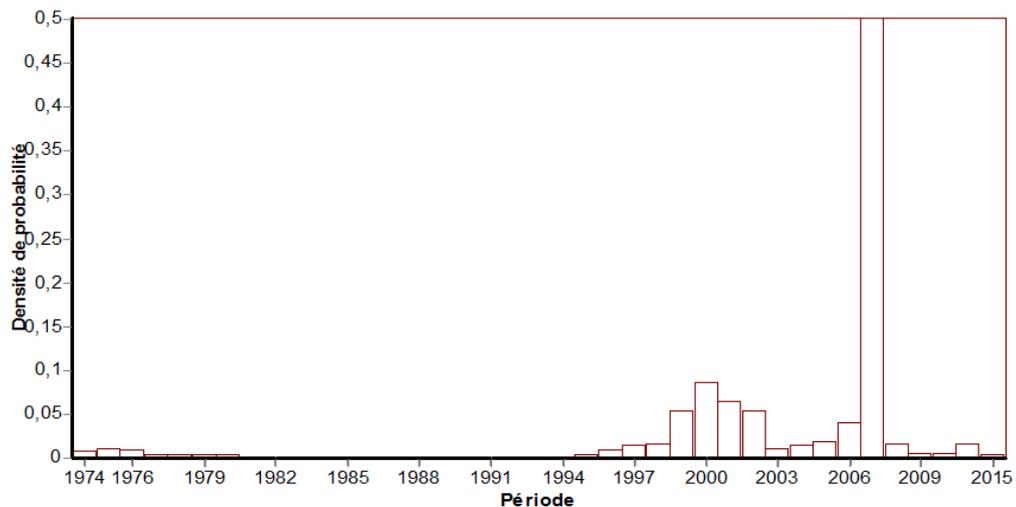


Figure 68. Procédure de Lee et Heghinian-Densité de Probabilité à posteriori de la position d'un changement des précipitations annuelles.

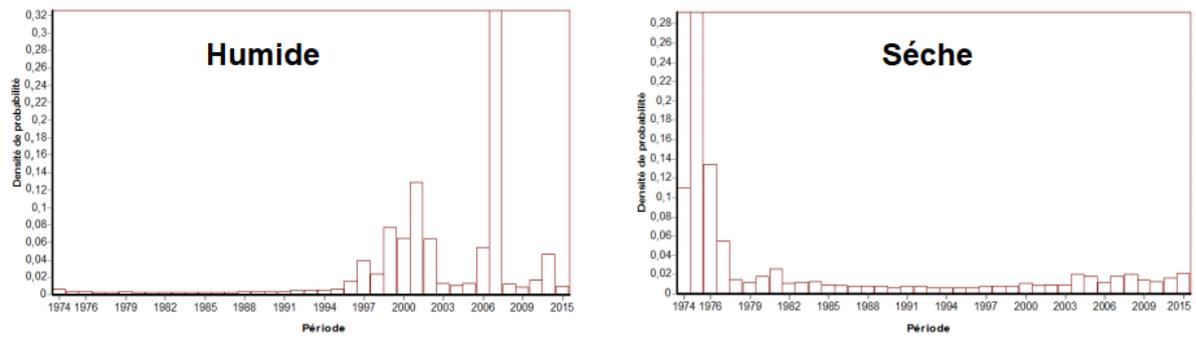


Figure 69. Procédure de Lee et Heghinian-Densité de Probabilité à posteriori de la position d'un changement au cours des périodes humide et sèche.

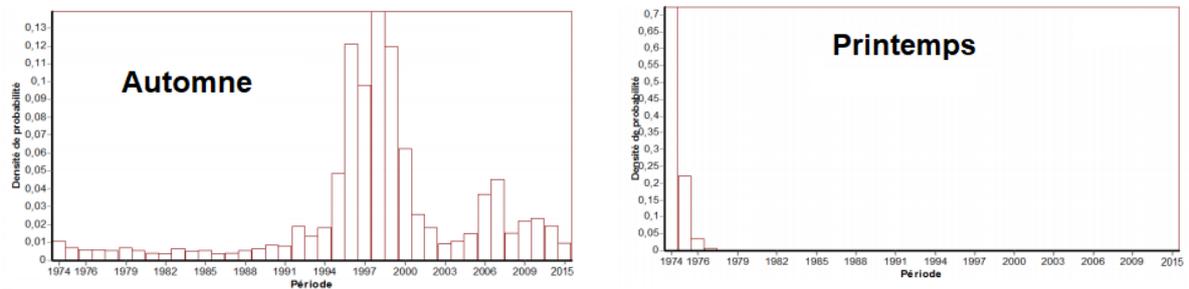
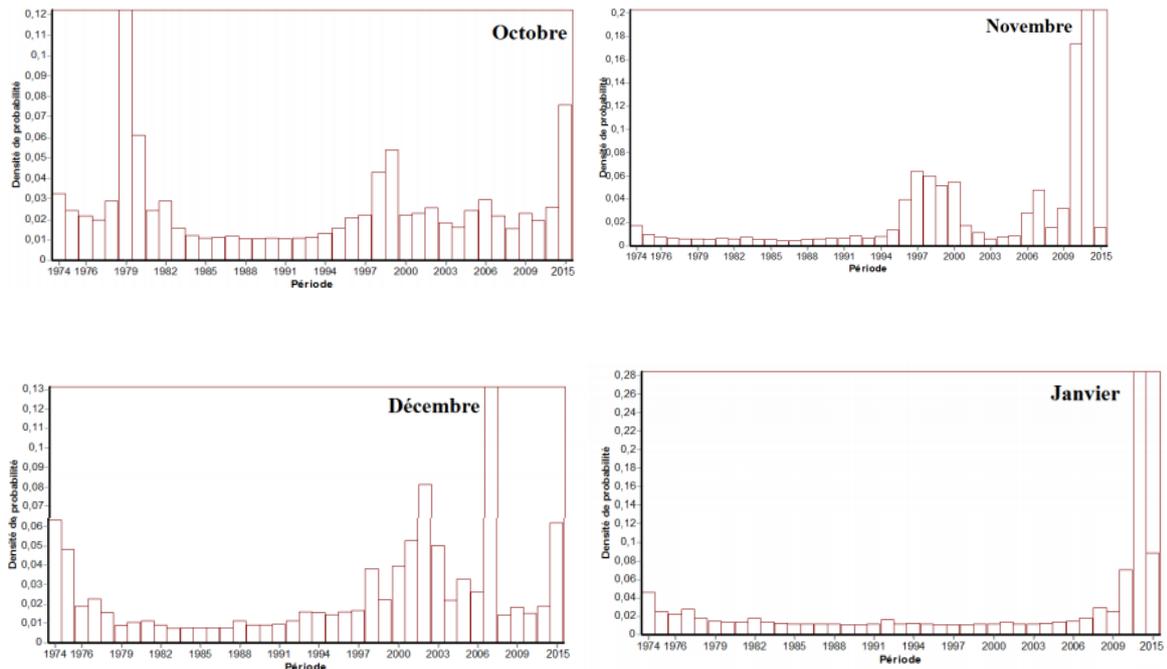


Figure 70. Procédure de Lee et Heghinian-Densité de Probabilité à posteriori de la position d'un changement des précipitations saisonnières



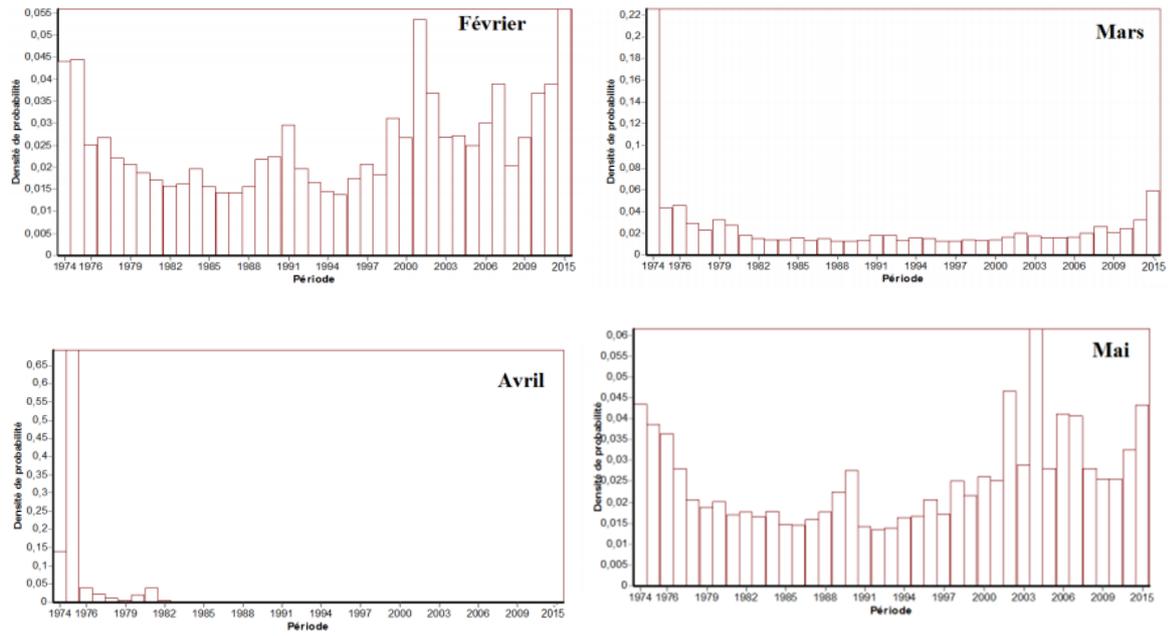


Figure 71. Procédure de Lee et Heghinian-Densité de Probabilité à posteriori de la position d'un changement des précipitations mensuelles

Tableau 50. Résultat de la méthode bayésienne et Heghinian des précipitations

Station	Echelle de temps		Date de rupture	Point de rupture
Dj. Chouachi	Annuelle	1974-2016	2007	0,502
	Périodique	Sèche	1975	0,2922
		Humide	2007	0,3258
	Saisonnaire	Automne	1998	0,1392
		Printemps	1974	0,7233
	Mensuelle	Octobre	1979	0,1224
		Novembre	2011	0,203
		Décembre	2007	0,1315
		Janvier	2011	0,2847
		Février	2012	0,056
		Mars	1974	0,2257
		Avril	1975	0,6926
		Mai	2004	0,0615

IV.3.3.2 Analyse des Températures

Les résultats de la segmentation d’Hubert appliquée aux séries des températures annuelles de la station du Dj. Chouachi sur la période 1974/1975 à 2015/2016 proposent un découpage de 1974-1980 et 1981-2013 (tableau 51).

Le mode de la fonction densité de probabilité à posteriori donne la position du point de rupture des températures en 1979/1980 illustré dans la figure 72, il correspond au maximum des températures observé sur la série.

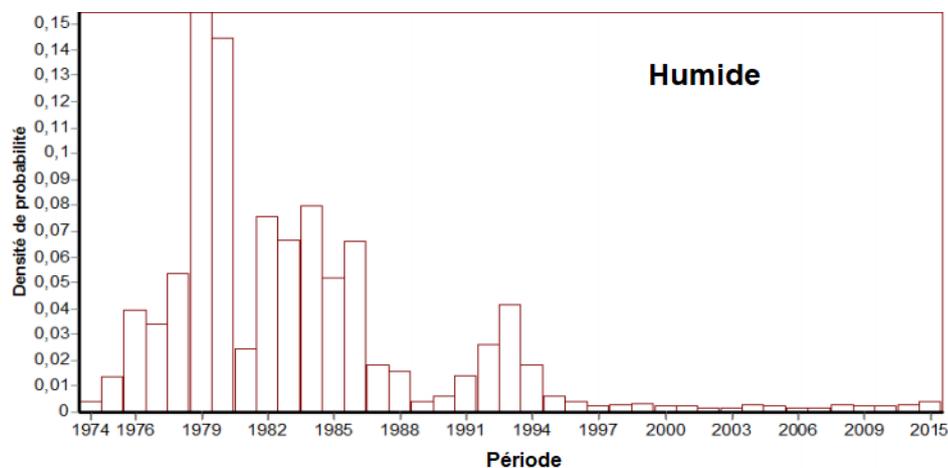


Figure 72. Procédure de Lee et Heghinian-Densité de Probabilité à posteriori de la position d’un changement des températures au cours de la période humide

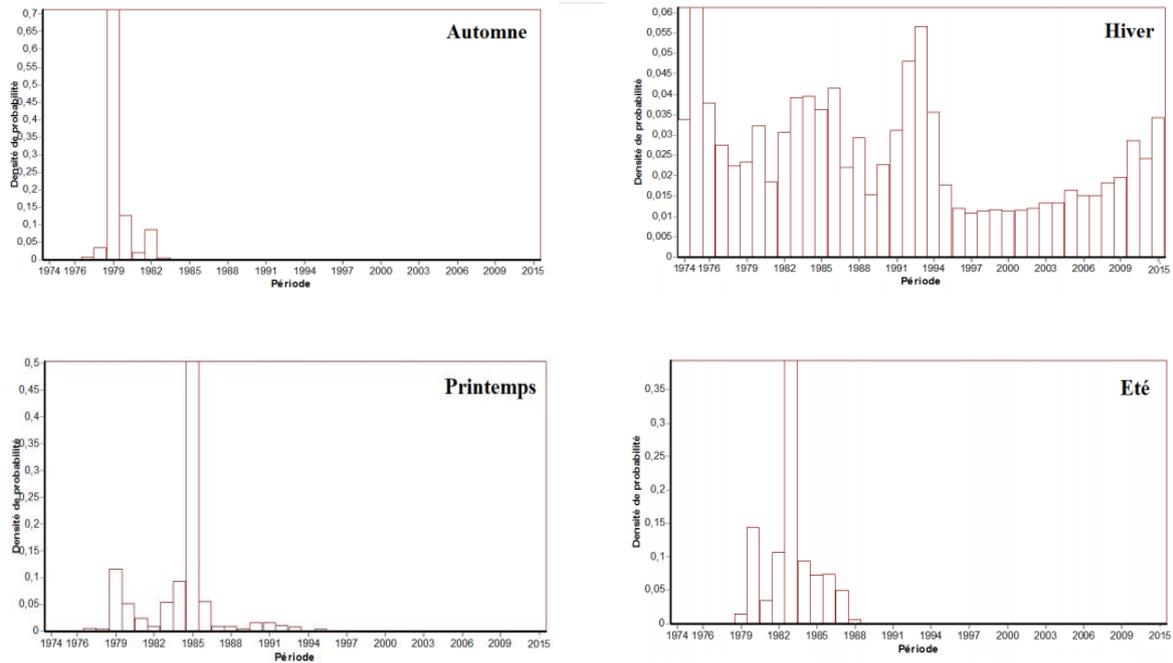


Figure 73.Procédure de Lee et Heghinian-Densité de Probabilité à posteriori de la position d'un changement des Températures saisonnières

Tableau 51.Résultat de la méthode bayésienne et Heghinian des températures

Station	Echelle de temps		Date de rupture	Point de rupture
Dj. Chouachi	Périodique	Humide	1979	0,1547
	Saisonnaire	Automne	1979	0,7141
		Hiver	1975	0,0613
		Printemps	1985	0,5031
		Eté	1983	0,3941
		Octobre	1979	0,3874
	Mensuelle	Novembre	1979	0,245
		Décembre	2012	0,0631
		Janvier	1993	0,1516
		Février	2010	0,1041
		Mars	1985	0,1681
		Avril	1981	0,1572
		Mai	1984	0,5665
		juin	1994	0,1324
juillet		1982	0,2974	

IV.3.3.3 Analyse des Lames d'eau écoulées

L'analyse de la figure 74, montre que le mode de la fonction densité de probabilité à Posteriori de la position du point de rupture des lames d'eau écoulées se situe en 1980, correspondant au maximum observé sur la série.

Le test Heghinian marque 1980 comme année de rupture pour la saison d'Hiver (tableau 52), qui correspond au maximum de volume observé sur la série.

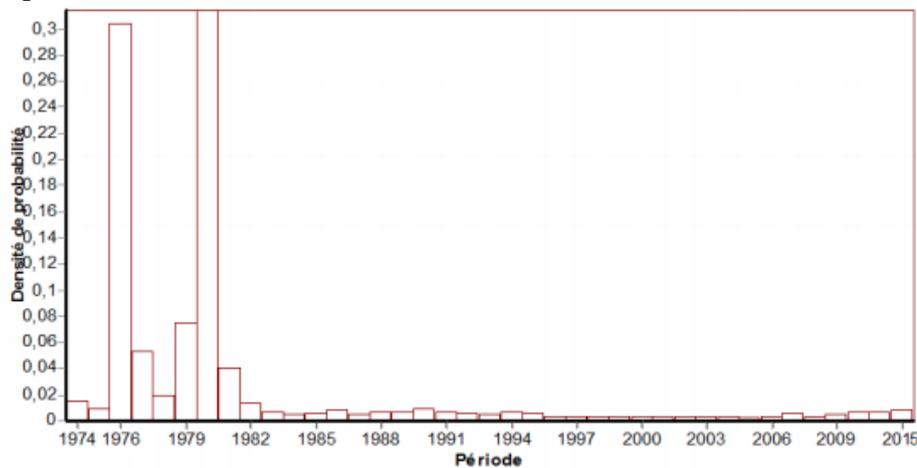


Figure 74. Procédure de Lee et Heghinian-Densité de Probabilité à posteriori de la position d'un changement des lames d'eau écoulées annuelles.

Tableau 52. Résultat de la méthode bayésienne et Heghinian des lames d'eau écoulées

Station	Echelle de temps		Date de rupture	Point de rupture
Dj. Chouachi	Annuelle	1974-2016	1980	0,3146
	Saisonnière	Hiver	1980	0,1975

IV.3.4 Test de BUISHAND et ellipse de BOIS

IV.3.4.1 Analyse des précipitations

D'après la figure 75, l'hypothèse est rejetée au seuil de confiance de 90%, 95% et acceptée au seuil 99%, la série des pluies de Dj. Chouachi au cours de la période 1974/1975 à 2015/2016 présente une rupture au cours de l'an 2000.

Le test de Buishand (fig. 76) présente une rupture en 2001 au cours de la période humide avec un seuil de confiance de 90%, 95% rejeté et un seuil de 99% accepté et pour la période sèche aucune rupture n'a été détectée,

L'année 1996 est mise en évidence par le test de Buishand au seuil de confiance de 95% et 90% pour l'Automne et pour le Printemps aucune rupture n'a été détectée. (fig. 77).

Selon le test de Buishand appliqué sur la série pluviométrique mensuelle, aucune rupture n'a été remarquée (fig. 78).

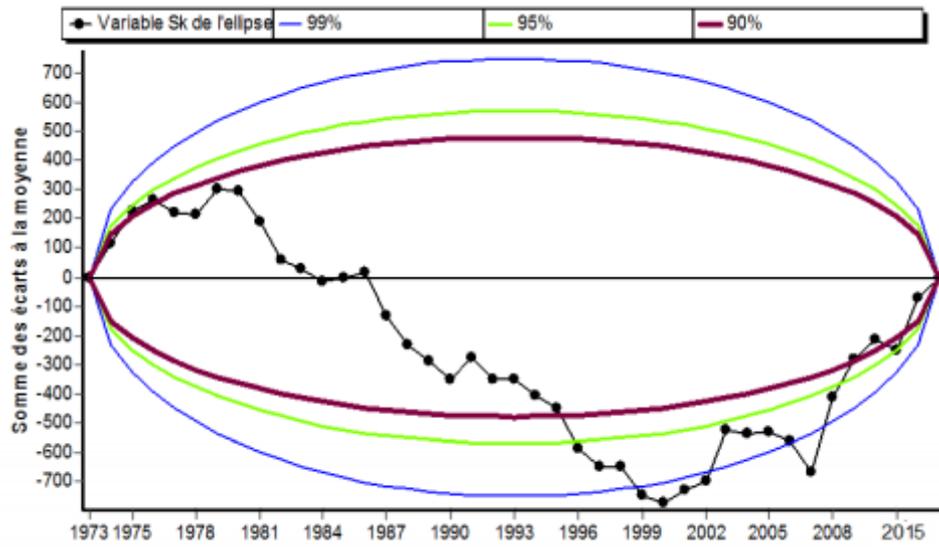


Figure 75. Ellipse de contrôle des précipitations annuelles.

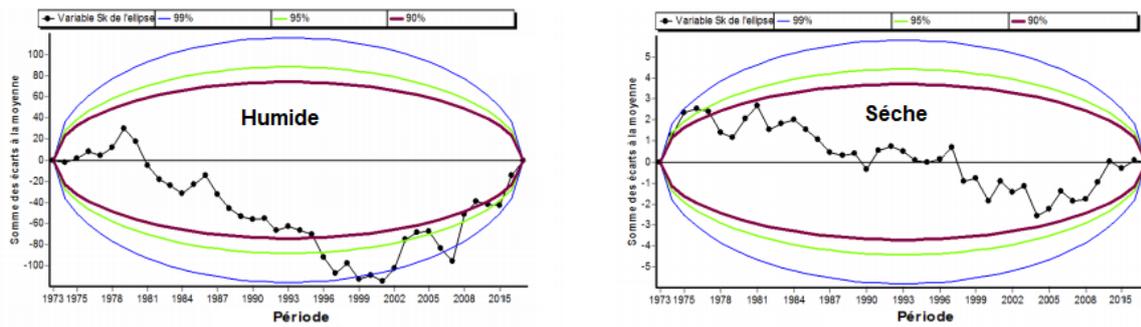


Figure 76. Ellipses de contrôle au cours des périodes humide et sèche.

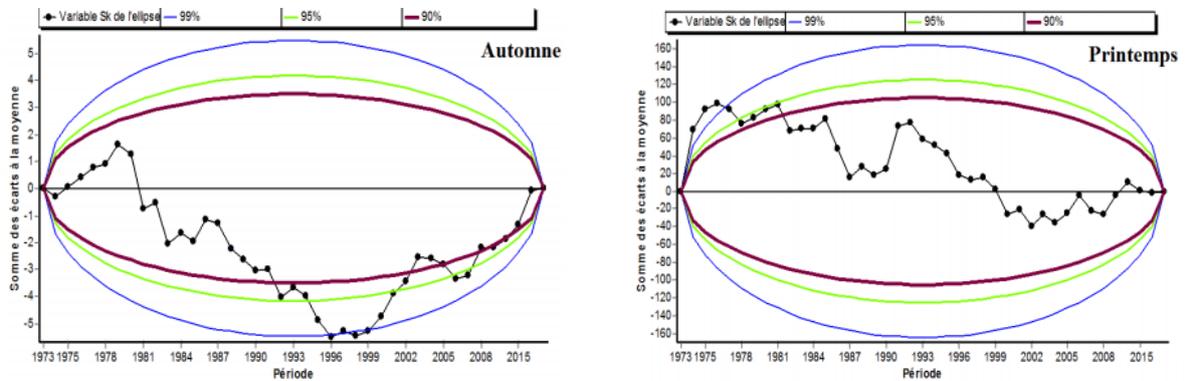


Figure 77. Ellipses de contrôle des précipitations saisonnières.

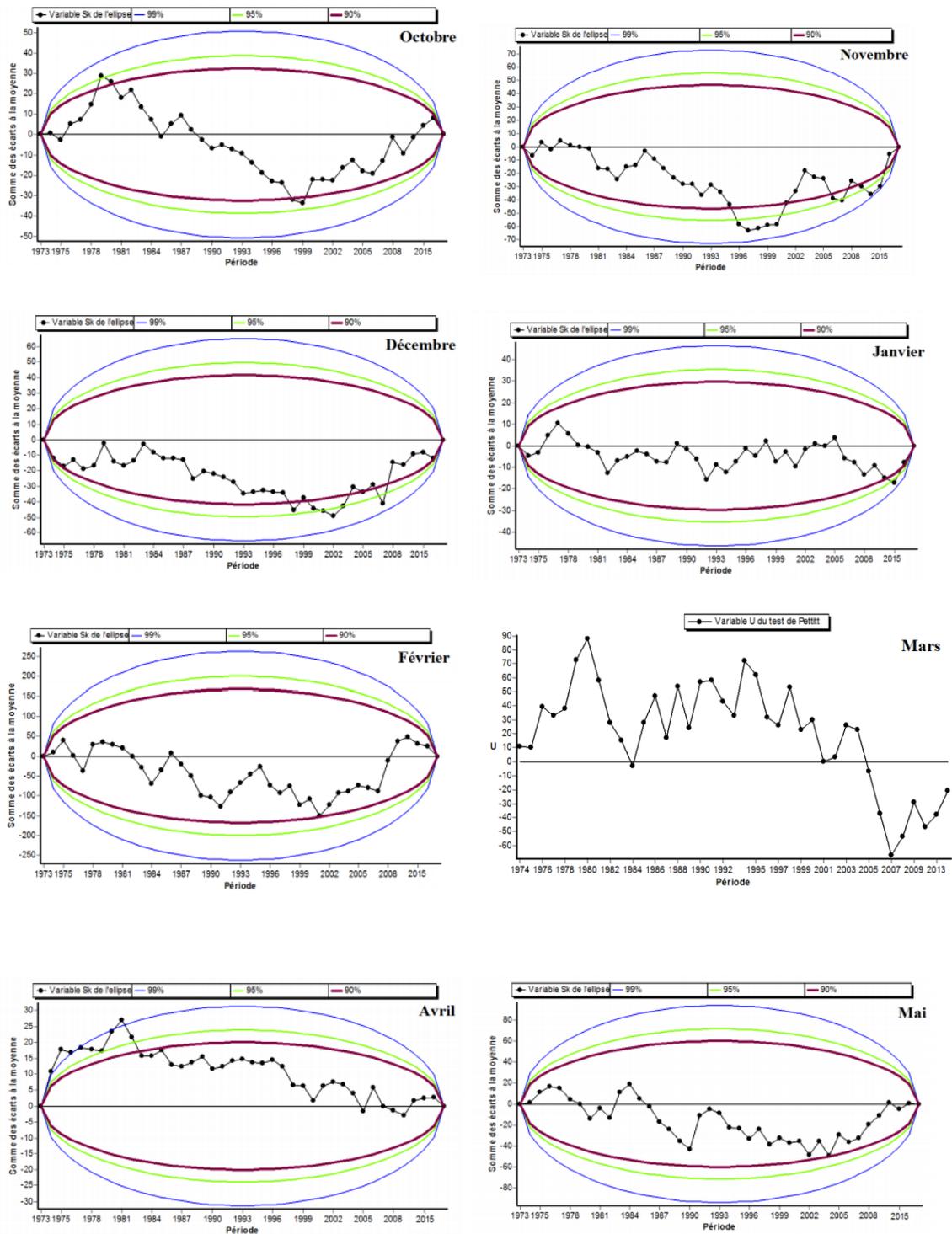


Figure 78 Ellipses de contrôle des précipitations mensuelles

Tableau 53.Résultat du Test de BUISHAND et l'ellipse de BOIS des précipitations

Station	Echelle de temps		Date de rupture	Seuil de confiance		
				99%	95%	90%
DJ CHOUACHI	Annuelle	1974-2016	2000	Acceptée	Rejetée	
	Périodique	Sèche	AUCUNE RUPTURE			
		Humide	2001	Acceptée	Rejetée	
	Saisonnière	Automne	1996	Acceptée	Rejetée	
		Printemps	Aucune rupture			
		Octobre	Aucune rupture			
		Novembre	Aucune rupture			
		Décembre	Aucune rupture			
		Janvier	Aucune rupture			
		Février	Aucune rupture			
		Mars	Aucune rupture			
		Avril	Aucune rupture			
		Mai	Aucune rupture			

IV.3.4.2 Analyse des Températures

D'après le test de Buishand illustré dans la figure 79, pour la période humide, l'année 1986 est mise en évidence avec un seuil de confiance de 95% et 90%.

Selon l'ellipse de contrôle des températures saisonnières (fig.80), nous remarquons qu'il n'y a aucune rupture détectée au cours de la saison d'Hiver, néanmoins pour les autres saisons, des années de rupture se distinguent en Automne (1982), Printemps (1985) et en Eté (1987) avec respectivement un seuil de confiance de 99%, 95 % et 90%.

Pour la série des températures mensuelles, aucune rupture n'a été remarquée aux mois de Décembre, Novembre et Février. Par contre, Des ruptures ont été mises en évidence au cours des 7 mois restants avec un seuil de confiance de 99% ,95 % et 90% : Octobre en 2000, Janvier en 1993, Mars et Avril en 1985, Mai en 1984, Juin en 1994 et Juillet en 1987(fig. 81).

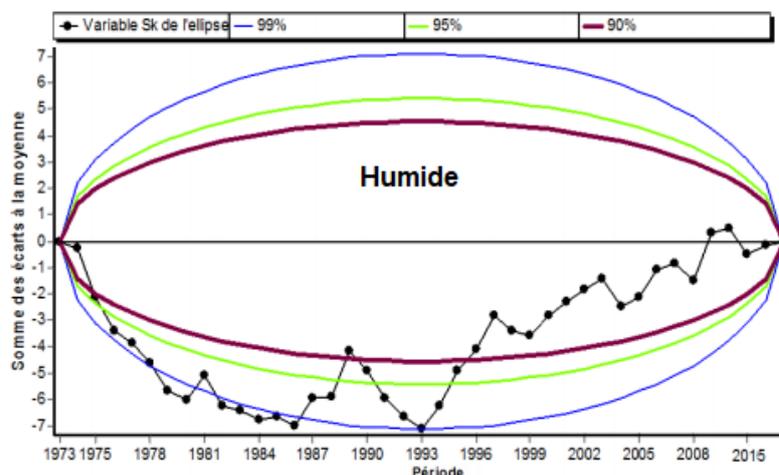


Figure 79.Ellipses de contrôle des Températures en période humide

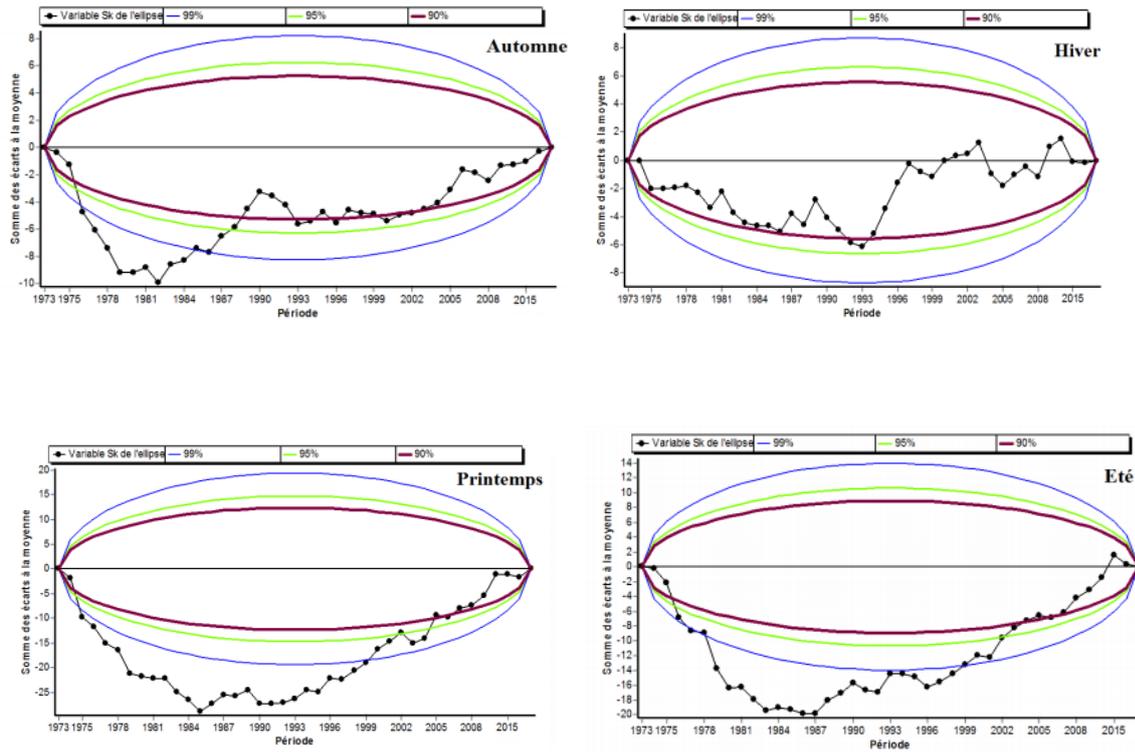
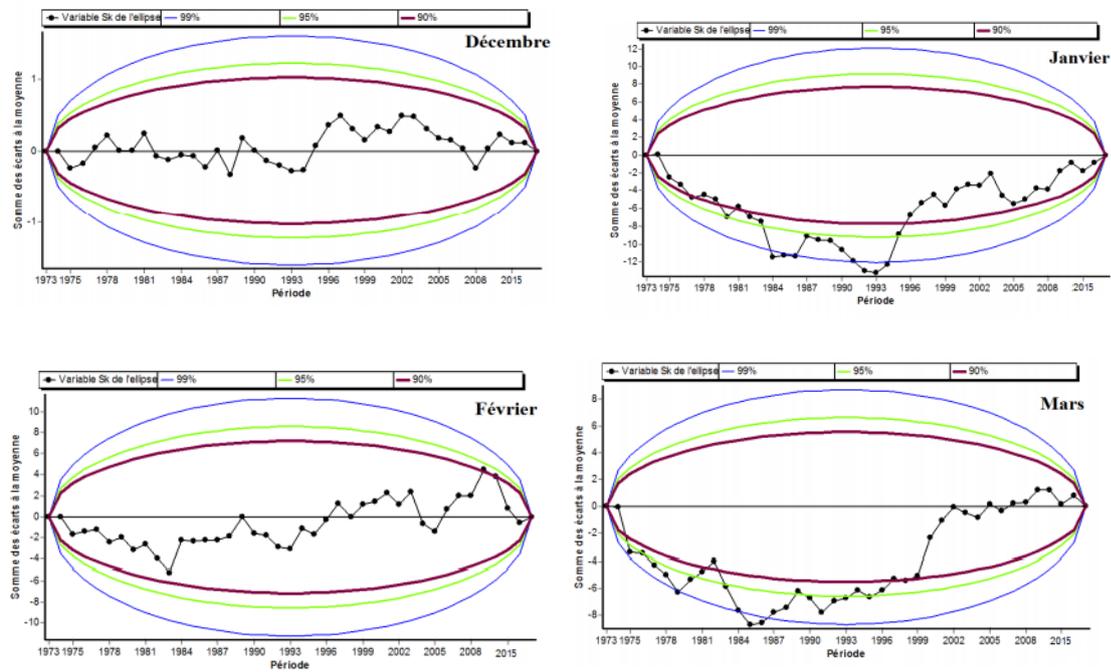


Figure 80. Ellipses de contrôle des températures saisonnières



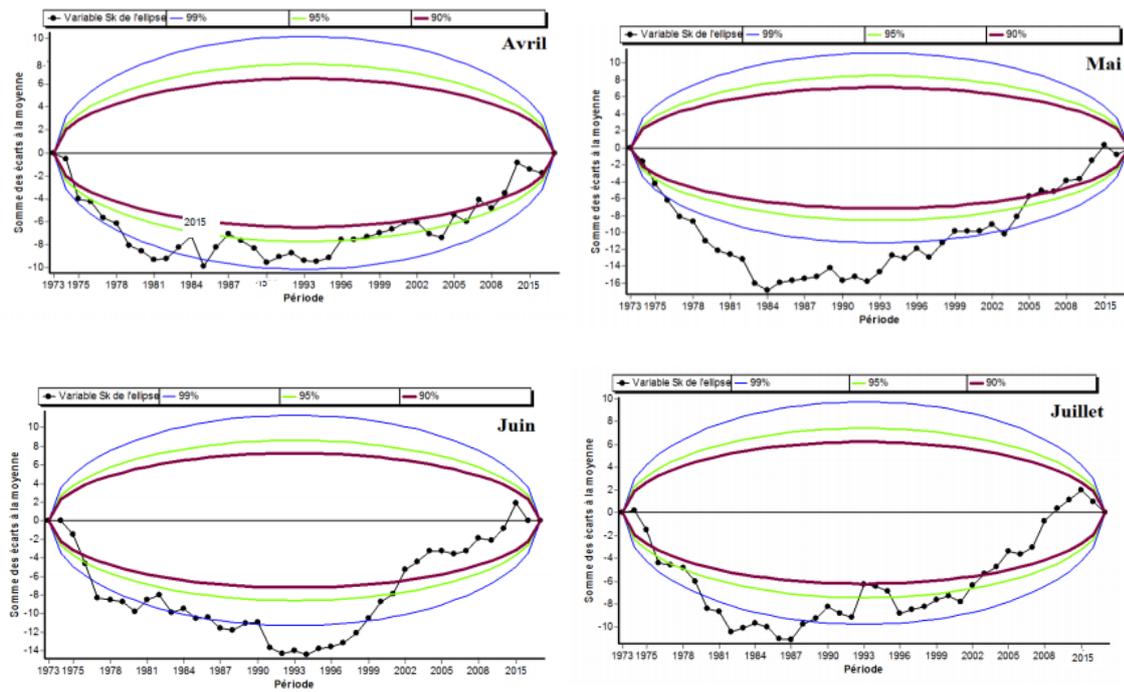


Figure 81. Ellipses de contrôle des températures mensuelles

Tableau 54. Résultat du Test de BUIHAND et l'ellipse de BOIS des températures

Station	Echelle de temps		Date de rupture	Seuil de confiance		
				99%	95%	90%
Dj. Chouachi	Annuelle	1974-2016		Aucune rupture		
		Périodique	Sèche		Aucune rupture	
	Humide		1986	Acceptée	Rejetée	
	Saisonnnière	Eté	1987	Rejetée		
		Automne	1982	Rejetée		
		Hiver		Aucune rupture		
		Printemps	1985	Rejetée		
	Mensuelle	Octobre	2000	Rejetée		
		Novembre		Aucune rupture		
		Décembre		Aucune rupture		
		Janvier	1993	Rejetée		
		Février		Aucune rupture		
		Mars	1985	Rejetée		
		Avril	1985	Rejetée		
		Mai	1984	Rejetée		
Juin		1994	Rejetée			
Juillet	1987	Rejetée				

IV.3.4.3 Analyse des lames d'eau écoulées

Sur la série chronologique des lames d'eau écoulées annuelles, l'hypothèse est acceptée au seuil de confiance 90%, 95% et 99 %. Aucune rupture n'a été détectée par le test de Buishand comme le montre la figure 82.

Pour le pas de temps saisonnier, nous remarquons selon la figure 83 des lames d'eau écoulées, l'absence de rupture au cours de la saison d'Hiver.

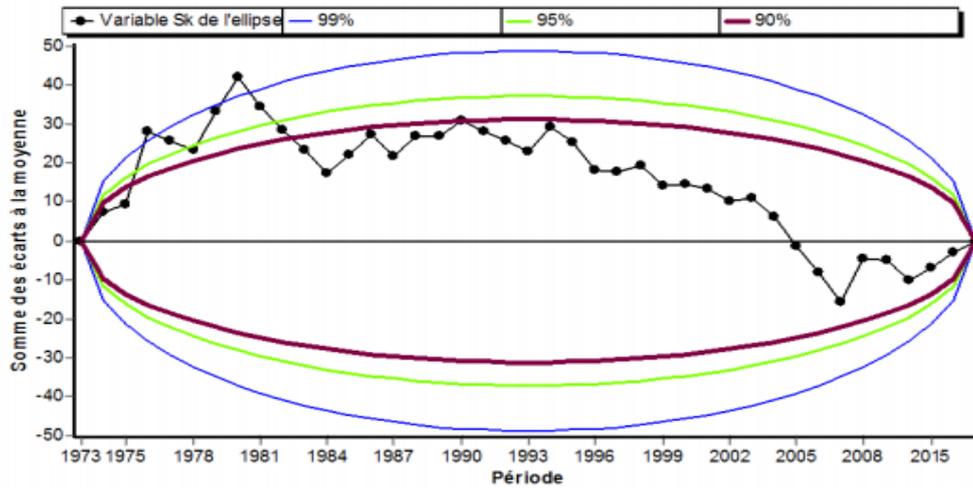


Figure 82. Ellipses de contrôle des lames d'eau écoulées annuelles

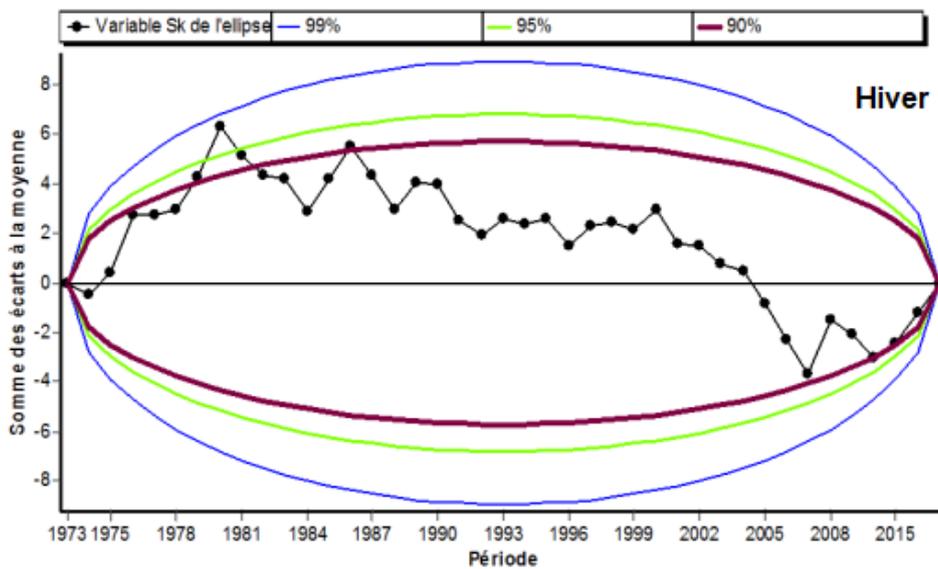


Figure 83. Ellipses de contrôle des lames d'eau au cours de l'Hiver

Tableau 55. Résultat du Test de BUISSHAND et l'ellipse de BOIS
Lames d'eau écoulées

Station	Echelle de temps		Date de rupture	Seuil de confiance		
				(rejetée)		
				99%	95%	90%
Dj. Chouachi	Annuelle	1974-2016		Aucune rupture		
	Périodique	Sèche		Aucune rupture		
		Humide		Aucune rupture		
	Saisonnaire	Automne		Aucune rupture		
		Printemps		Aucune rupture		
		Octobre		Aucune rupture		
		Novembre		Aucune rupture		
		Décembre		Aucune rupture		
		Janvier		Aucune rupture		
		Février		Aucune rupture		
		Mars		Aucune rupture		
		Avril		Aucune rupture		
		Mai		Aucune rupture		

IV.4 Conclusion

L'étude de la variabilité climatique à la station de Djebel Chouachi située dans le bassin versant de l'oued Boukiou nous a permis de conclure :

- Une tendance à la baisse de la pluviométrie annuelle durant la période des années 2000, par contre une tendance à la hausse pendant la période des années 80. Cette tendance est marquée par des ruptures identifiées entre 2007/2008 déjà approuvé dans le bassin versant d'oued Isser (Gherissi, 2018).
- En ce qui concerne les saisons humides des précipitations annuelles, le point de rupture est détecté en 2007. Par contre, pour les saisons sèches, la rupture est détectée aux alentours de l'année 1974/1975.
- Pour les régimes hydrologiques, la baisse de la pluviométrie a provoqué une diminution des apports du cours d'eau du bassin. Cette diminution est marquée par une rupture identifiée autour des années 1976/1977 et 2007/2008.
- Les ruptures décelées correspondent aux lames d'eau écoulées dans les saisons humides, sont distinguées autour des années 1976/1977 et 2007/2008, et pour les saisons sèches en 1976/1977.
- À l'échelle annuelle, une variabilité de la température marquée par une tendance de baisse identifiée en 1986, à l'échelle mensuelle, la chronique des températures moyennes mensuelles des mois de Mars, Avril, Mai et Juillet ont des dates de rupture qui coïncident avec la date de rupture des températures moyennes annuelles.

La rupture des précipitations et la hausse des températures jouent un rôle sur la variabilité des volumes d'eau s'écoulant dans le bassin. C'est ce que nous essayerons de confirmer par l'étude de la modélisation hydrologique du fonctionnement de la relation pluie-débit au niveau de notre bassin versant.

Chapitre 5 :
MODELISATION
HYDROLOGIQUE

V Introduction

La modélisation est la conception d'un modèle, elle consiste à mettre au point un ensemble d'équations ou de règles pour décrire un phénomène de façon reproductible et simulable. Elle nécessite généralement d'être calée par des vérifications in-situ, qui passent par le paramétrage et le calibrage des modèles utilisés. Le modèle issu de la modélisation sert à prédire le comportement d'un système en fonction de sollicitations connues. Il fournit des valeurs de sortie en fonction de valeurs d'entrée. Par ailleurs, la modélisation du fonctionnement des bassins versants à travers des modèles conceptuels est basée sur la représentation des processus simulés à travers des équations à paramètres. Cette conceptualisation ne permet la reproduction physique des processus du milieu naturel que pour les modèles à base physique. D'une part, seuls les modèles distribués peuvent garantir la prise en compte des variations spatiales de ces processus, d'autre part, la mise en œuvre d'un modèle distribué et à base physique des processus, revient à résoudre les différentes équations du modèle en cherchant à déterminer les valeurs optimales des paramètres de ces équations tout en protégeant la signification physique et la distribution spatiale de ces paramètres (Higy, 2000). Sur la modélisation conceptuelle, ces paramètres sont généralement inaccessibles par la mesure directe in-situ et ne peuvent être déterminés qu'à travers la procédure du calage du modèle. La mise en œuvre d'un modèle conceptuel suit généralement les étapes suivantes :

- Détermination et identification des phénomènes à modéliser,
- Définition des formules et des méthodes pour la représentation des processus composant les phénomènes étudiés,
- Collecte et structuration des données d'entrée du modèle,
- Analyse de sensibilité des paramètres du modèle,
- Calage du modèle,
- Validation du modèle,
- Lecture et interprétation des résultats.

Parmi les différents modèles conceptuels les plus utilisés ces dernières années avec succès dans le cadre des recherches au niveau des bassins versants, nous distinguons (SENEQUE (Billen & Garnier, 1996), BASINS (EPA, 1996), GIBSI (Mailhot et al., 1997)), Soil and Water Assessment Tool (SWAT, Arnold et al., 1998) couplé au logiciel de Système d'Informations Géographiques (SIG). Ce dernier est basé sur une approche conceptuelle semi distribuée, paraît plus adapté compte tenu de son utilisation et de sa rapidité d'exécution (Rollo, 2012).

La modélisation a pour finalité la construction et l'utilisation d'un modèle qui est une représentation simplifiée de la réalité pour montrer les aspects importants du système étudié (OQLF, 2005). En effet, un modèle est souvent basé sur une formalisation mathématique des lois et des concepts traduisant le comportement du système modélisé. Il s'agit donc d'une simplification formalisée d'un système ou d'un phénomène réel en vue de le simuler à travers la reproduction de ses acteurs, ses processus et ses relations (Boudhraa, 2007). Le processus de construction d'un modèle est basé sur l'adoption d'un ensemble d'hypothèses et d'approximations pour la traduction de la réalité en un modèle (Ambroise, 1998). D'après

Dassargues (1995), les principaux objectifs ciblés à travers la mise en place d'un processus de modélisation sont :

- Le développement d'une chaîne de connaissances permettant de mieux comprendre le fonctionnement et les interactions du système,
- La communication et la mise à disposition de l'information au profit des tiers,
- La mise en œuvre des procédures pour l'optimisation et l'orientation des interventions sur le système représenté par le modèle,
- La réalisation des prédictions sur le comportement du système étudié en réponse à diverses sollicitations.

En résumé, l'utilisation des modèles a pour but de faciliter la compréhension de phénomènes généralement complexes ainsi que leurs effets, et au final, prévoir et évaluer des propositions de mesures pour pallier aux effets non souhaités.

La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants est incontournable dès lors que l'on s'intéresse à des problématiques relatives à la gestion des ressources en eau, à l'aménagement du territoire, ou à l'une des différentes facettes du risque hydrologique.

Connaitre le débit des oueds, c'est une évidence, de première importance pour la gestion de la ressource en eau et la maîtrise du risque hydrologique.

Au cours de ces dernières décennies grâce aux développements de l'informatique, les modèles mathématiques de l'hydrologie des bassins versants ont été largement utilisés pour une variété d'applications. Ces modèles sont basés sur des descriptions mathématiques générales des processus des bassins versants qui transforment le forçage naturel (par exemple, les précipitations) en réponse (par exemple, les eaux de ruissellement dans les cours d'eau).

L'utilisateur d'un modèle hydrologique de bassins versants doit préciser les paramètres du modèle afin que ce modèle soit capable de simuler correctement le comportement des bassins versants (Gherissi R.2018).

V.1 Modélisation hydrologique

L'hydrologie, au sens le plus strict, est la science qui étudie le cycle de l'eau dans la nature. Elle examine la distribution géographique et temporelle de l'eau dans l'atmosphère, en surface et dans le sol et le sous-sol (Anctil et al., 2005). Pourtant, la modélisation des systèmes hydrologiques est l'application d'expressions mathématiques et logiques qui définissent les relations quantitatives entre les caractéristiques des variables de sortie et les facteurs influant sur ces variables (autrement dit les entrées comme la température, les précipitations, la durée d'ensoleillement...). En outre, un modèle hydrologique n'est qu'une simplification d'un système complexe (Payraudeau, 2002). La plupart des modèles mathématiques conceptuels en hydrologie étudie les processus de transformation des précipitations (liquides ou solides) en ruissellement. Ils essaient de représenter le mieux possible le cheminement de l'eau atmosphérique du moment où elle atteint la surface du sol jusqu'au moment où elle arrive à l'exutoire. Pendant ce parcours, l'eau est soumise à divers processus assez complexes, mais qui peuvent toujours être représentés par des équations mathématiques plus ou moins simplifiées. En effet, il existe de nombreux modèles

hydrologiques ayant chacun leurs spécificités qui conditionnent son domaine de validité et son champ d'application (Ambroise, 1998). Le choix et la mise en œuvre d'un modèle hydrologique doivent alors être définis selon les objectifs visés par le modélisateur (Refsgaard, 1997). Une fois le modèle choisi, il faut évaluer sa capacité à représenter la réalité. Ceci se fait le plus souvent à travers une étape très délicate en comparant les résultats du modèle avec les observations. D'après De Marsily (1986), l'élaboration d'un modèle hydrologique comporte certaines étapes à savoir: (i) l'identification du modèle, (ii) l'élaboration de l'algorithme répondant aux questions scientifiques, (iii) calibrer – valider et optimiser.

On distingue quatre types de variables qui peuvent exister en totalité ou en partie dans chaque modèle:

- Variables d'entrées: le modèle fait appel à ces variables qui sont liées au temps et/ou à l'espace (précipitations, ETP, ...),
- Variables de sorties: le modèle répond par un ensemble de variables (débits, flux ou concentration en polluants, ...),
- Variables d'état: elles permettant de caractériser l'état du système modélisé et peuvent évoluer en fonction du temps (niveau de remplissage des réservoirs d'eau d'un bassin versant, taux de saturation des sols, ...),
- Paramètres de calage: en plus des variables, la modélisation fait intervenir des variables dont la valeur doit être déterminée par calage (conductivité hydraulique à saturation, ...).

Selon Girard & Villeneuve (1981), la modélisation hydrologique fait intervenir des variables à travers deux fonctions: (i) une fonction de production qui a pour rôle de répartir les précipitations entre l'infiltration, le ruissellement, l'évapotranspiration et le stockage dans le sol et (ii) une fonction de transfert (routage) qui a pour objet d'acheminer par isochronisme l'eau superficielle, en distinguant un domaine de ruissellement pur (sur les versants) et un domaine d'écoulement (concentré) en rivière, ainsi de calculer les échanges réciproques entre le réseau hydrographique et les aquifères. L'ensemble est articulé dans des programmes informatiques écrits en plusieurs langages (soft).

V.1.1 Utilisation des Systèmes d'Information Géographiques (S.I.G)

Grâce au développement prodigieux qu'a connu l'informatique au cours des dernières années, des chercheurs ont suggéré d'utiliser les Systèmes d'Information Géographique (SIG) dans les études de modélisation. La Société française de photogrammétrie et télédétection (1989) cité par Habert (2000), définit le système d'information géographique comme étant un système informatique autorisant, à partir de diverses sources, de rassembler et d'organiser, de gérer, d'analyser et de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement, contribuant surtout à la gestion de l'espace. Yemefack (2005) va dans le même sens en assimilant le SIG à un système informatique capable de collecter, conserver, traiter et visualiser les données spatiales du monde réel pour satisfaire un ensemble particulier d'objectifs. Un système d'information géographique est donc, comme son nom l'indique, un outil informatisé dédié à la gestion de l'information géographique. C'est un outil de

représentation d'une réalité, de compréhension des phénomènes et des conditions dans lesquelles ils se réalisent, de simulation d'alternatives et de leurs effets. En plus, c'est un outil de dialogue et de communication entre disciplines par un constant aller-retour entre observation, interprétation, hypothèse et validation (Cheggour, 2008). L'utilisation de ce genre de système offre un moyen simple, rapide et efficace à l'utilisateur, pour les études d'aménagement et de prise de décision.

V.1.2 Description des trois modèles utilisés

L'objectif de ce chapitre est la comparaison entre un ensemble de modèles conceptuels (GR (modèle global du Génie Rural), Gardénia (modèle global à réservoirs pour la simulation des débits et des niveaux aquifères)) et d'un modèle semi distribué SWAT (Soil and Water Assessment Tool).

V.2.1 Modèle GR

V.2.1.1 Description du modèle pluie-débit annuel GR1

Le modèle GR1A (modèle du Génie Rural à 1 paramètre annuel) est un modèle pluie-débit global à un seul paramètre. Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1990, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie-débit robuste et fiable en vue d'utilisations pour des applications d'évaluation et de gestion de la ressource en eau (Perrin et al., 2007).

La principale version que nous présentons ici, est celle proposée par Mouelhi (2003) et Mouelhi et al.,(2006).

La structure du modèle est très simple puisqu'elle se résume à une simple équation, le débit Q_k de l'année k étant proportionnelle à la pluie P_k de la même année, avec un coefficient d'écoulement dépendant de P_k de la pluie P_{k-1} de l'année $k-1$ et de l'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne E . le modèle s'écrit :

$$Q_k = P_k \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{0.7P_k + 0.3P_{k-1}}{X.E} \right)^2 \right]^{0.5}} \right\} \quad \text{Eq. 27}$$

Où X est l'unique paramètre du modèle, il traduit l'influence d'une ouverture du bassin sur l'extérieur non atmosphérique (par exemple échange avec des nappes profondes ou avec des bassins adjacents dans le cas d'une non-superposition des limites topographiques et géologiques).

Si le paramètre X est supérieur à 1, le système perd de l'eau et s'il est plus petit que 1, le système en gagne, le tout exprimé en fraction de l'ETP.

Le modèle ne comporte qu'un paramètre optimisable, qui apparaît comme un coefficient modulateur de l'évapotranspiration potentielle. Sur un large échantillon de bassins versants, la médiane de X vaut 0.7 et un intervalle de confiance à 90% est donné par [0.13 - 3.5].

V.2.1.2 Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres mensuels) est un modèle pluie-débit global à deux paramètres optimisables :

X1 : Capacité du réservoir de production (mm),

X2 : Coefficient d'échanges souterrains (-).

Son développement à été initié au Cemagref à la fin des années 1980, avec des objectifs d'applications dans le domaine des ressources en eau et des étiages.

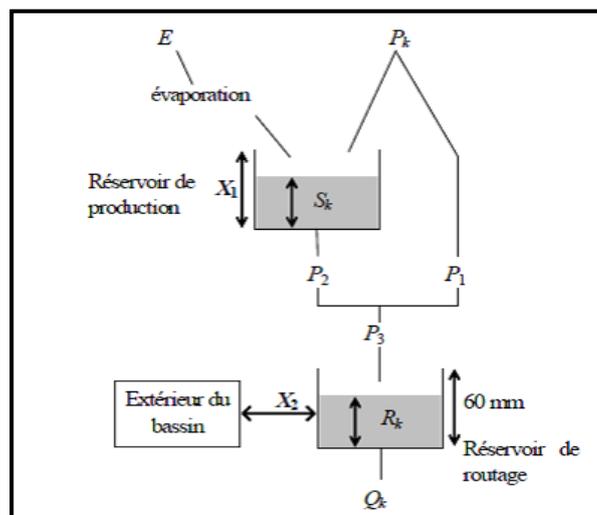
Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement par Kabouya (1990), Kabouya et Michel (1991), Makhlouf (1994), Makhlouf et Michel (1994), Mouelhi (2003), Mouelhi et al., (2006).

Le fonctionnement s'effectue autours de deux réservoirs, un de production (ou réservoir sol) et un de routage sur lesquels les ajustements et interception se font différemment sur les entrées. Le modèle utilise en entrée la pluie moyenne et l'ETP, et fournit en sortie le débit. Un schéma de la structure est donné à la Figure.84, P_k est la pluie mensuelle du mois k et E l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même mois calendaire. La version présentée ici est celle de Mouelhi et al., (2006) qui paraît la plus performante.

Sur un large échantillon de bassins versants, on obtient les valeurs données dans le Tableau 56.

Tableau 56. Valeurs des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants (Andreassian et al., 2007).

Paramètres	Médiane	Intervalle de confiance à 90%
X1 (mm)	380	140 – 2640
X2 (-)	0.92	0.21 – 1.31



P_1 : Pluie en excès : écoulement de surface, P_2 : Percolation du réservoir de production : saturation du réservoir, S_k : Contenu du réservoir au début du mois k ,
 Q_k : Débit de l'année k .

Figure 84. Structure du modèle GR2M (Perrin et al., 2007)

V.2.1.3 Description du modèle Pluie-Débit journalier GR4J

Le modèle GR4J est un modèle pluie-débit global à quatre paramètres. Son développement a été initié au Cemagref au début des années 1980. Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement par Edijatno et Michel (1989), Edijatno (1991), Nascimento (1995), Edijatno et al., (1999), Perrin (2000, 2002) et Perrin et al., (2003), qui ont permis d'améliorer progressivement les performances du modèle. C'est la version de Perrin et al., (2003) qui est présentée dans cette étude.

Le modèle GR4J ne comporte que quatre paramètres à caler:

X1 : Capacité du réservoir de production (mm),

X2 : Coefficient d'échanges souterrains (mm),

X3 : Capacité à un jour du réservoir de routage (mm),

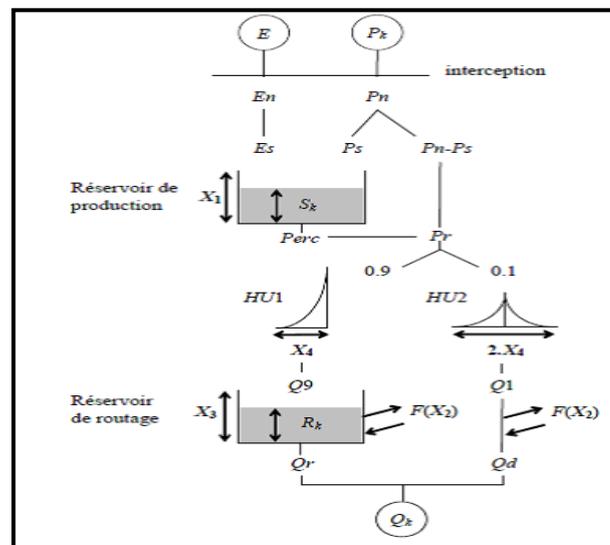
X4 : Temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 (j).

Le modèle utilise en entrée la hauteur de pluie moyenne sur le bassin versant P (mm) et l'évapotranspiration potentielle E (mm). Son module de routage est cependant plus sophistiqué qu'au pas de temps mensuel. Un schéma de la structure est donné à la figure 85. Ces modèles ne nécessitent pas une description fine du bassin versant. Les variables d'entrée sont limitées aux séries de pluies, de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et des débits pour le calage.

Sur un large échantillon de bassins versants, Andreassian et al., (2007) ont obtenu les valeurs données dans le tableau 57.

Tableau 57 . Valeurs des paramètres du modèle GR4J obtenues sur un large échantillon de bassins versants.

Paramètres	Médiane	Intervalle de confiance à 80%
X1 (mm)	350	100 – 1200
X2 (mm)	0	-5 à 3
X3 (mm)	90	20 à 300
X4 (jours)	1.7	1.1 à 2.9



P_n : Pluie nette, S_k : Contenu du réservoir au début du mois k , E_s : Quantité d'eau évaporée à partir du 1^{er} réservoir (réservoir de production), Q_9 : Débit de sortie du réservoir de production, Q_1 : Débit de sortie issu de l'écoulement de surface, Q_d : Composante d'écoulement, R_k : Réservoir de routage, la quantité d'eau infiltrée du réservoir de production.

Figure 85. Schéma de la structure du modèle GR4J

V.2.2 Modèle Gardénia

Le code de calcul Gardénia (Modèle Global à Réservoirs pour la simulation des Débits et des Niveaux Aquifères) (Thiery, 2009, 2013, 2015), est un modèle hydrologique global à réservoirs pour la simulation de l'hydrologie des bassins versants.

A partir de la séquence des données météorologiques (précipitations, évapotranspiration potentielle) sur un bassin d'alimentation, il permet de calculer :

- Le débit à l'exutoire d'un cours d'eau (ou celui d'une source),
- Le niveau piézométrique en un point de la nappe libre sous-jacente.
- Les effets d'un pompage, ou d'un ensemble de pompages, situés dans le bassin versant peuvent être pris en compte.

Gardénia est un modèle qui simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, écoulement) par des lois physiques simplifiées qui correspondent à un écoulement à travers une succession de réservoirs.

Les calculs peuvent être réalisés au pas de temps journalier, décadaire (dix jours) ou mensuel. Il est également possible d'utiliser des pas de temps fins au choix de l'utilisateur : par exemple 5 mn ou ½ heure. Il est possible de prendre en compte la fonte de la neige.

Gardénia est utilisé de façon courante pour l'extension de données, tant dans l'espace que dans le temps. Il permet les fonctionnalités suivantes :

- Génération de longues séries de débits ou de niveaux piézométriques à partir d'historiques de pluies, après calibration préalable sur une période relativement courte,
- Analyse de cohérence entre observations climatiques et observations de débits ou de niveaux piézométriques,

- Analyse des différents termes du cycle hydrologique (infiltration, évapotranspiration, écoulement).

Dans la pratique, Gardénia permet d'analyser le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant, d'étendre des données de débits et / ou de niveaux. Il peut ainsi aider au dimensionnement de différents types d'ouvrages (barrages) ou d'aménagements (parkings, ouvrages de captage en rivière, microcentrales électriques), etc.

En effet, le modèle, une fois calibré, est en mesure de :

- Reconstituer, pour un bassin versant donné, les débits d'une rivière ou d'une source, et / ou les niveaux piézométriques en un point d'une nappe, durant une période pendant laquelle on ne possède pas de mesures.
- Simuler des débits résultant de périodes de sécheresse (pour le calcul de débits d'étiage ou le dimensionnement de barrages) ou de séquences de précipitations exceptionnelles (pour le dimensionnement de fondations, de parkings, d'ouvrages enterrés),
- Simuler des niveaux piézométriques ponctuels de nappe à partir de précipitations effectivement observées, prolongées par des scénarios de précipitations prévisionnels (sécheresses, périodes de hautes eaux).

Enfin, le code de calcul Gardénia est conçu pour enchaîner le traitement de plusieurs bassins avec des options communes. Il constitue donc un outil tout particulièrement adapté aux synthèses régionales pour lesquelles on désire réaliser, avec une certaine cohérence, l'analyse de plusieurs bassins versants. (THIERY D, 2014].

Le modèle Gardénia annuel et mensuel utilise des données de pluie mensuelles, ETP mensuelle et débit mensuel de format séquentiel et le modèle Gardénia journalier utilise des données de pluie journalière (mm), ETP journalière (mm) et débit journalier (m^3/s) de format Excel_Date. Nous illustrons dans la figure 86 résume les étapes de simulation du modèle Gardénia.

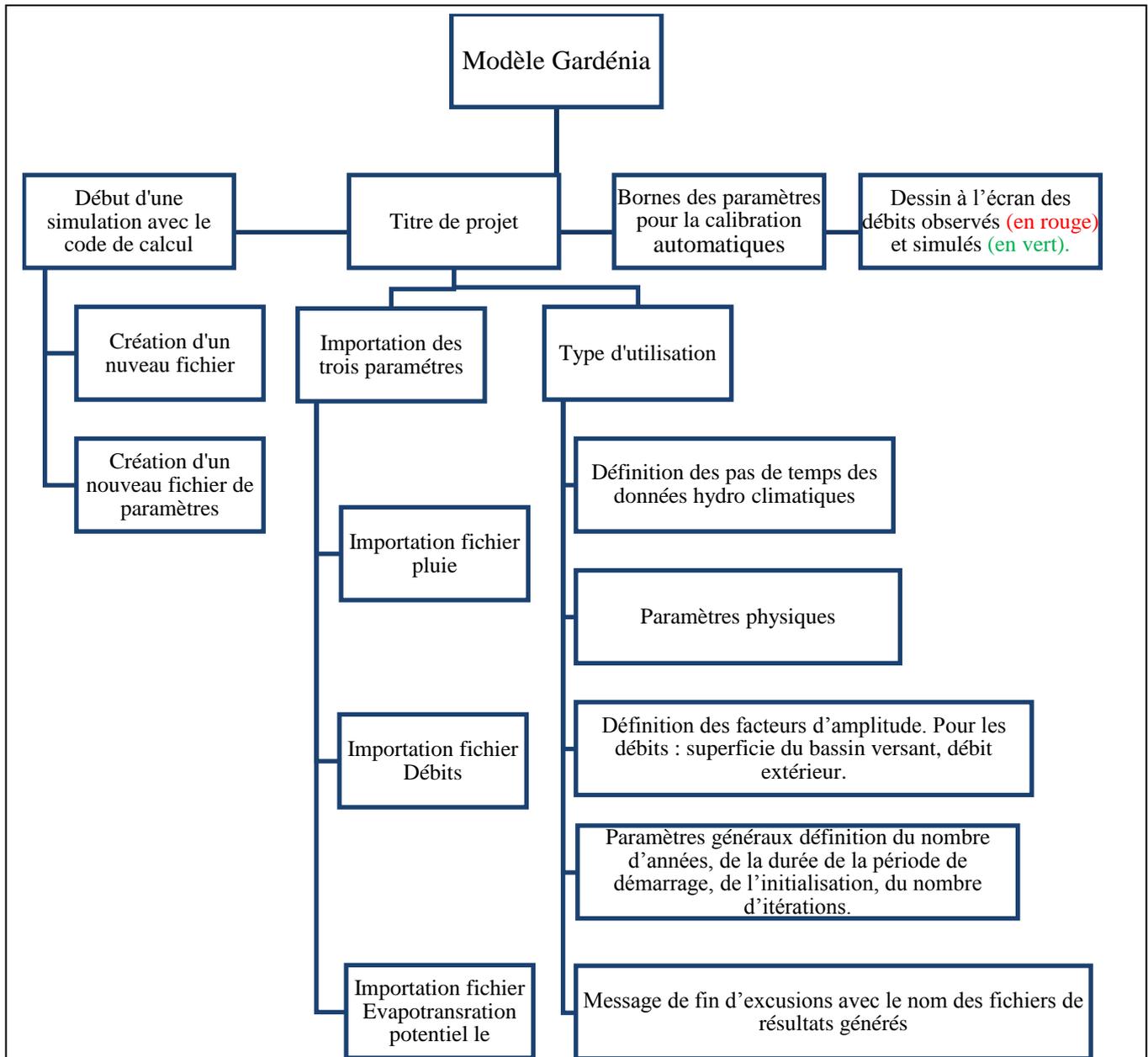


Figure 86. Organigramme montrant les étapes de simulation de Gardénia

V.2.3 Modèle SWAT

Largement utilisé dans le monde de plus de 15ans, SWAT (Soil and Water Assessment Tool) a été développé par l'ARS (Agricultural Research Service) de l'USDA (United State Department of Agriculture), c'est un modèle agro-hydrologique pour évaluer les sédiments, les nutriments, l'impact de l'utilisation des terres, la qualité de l'eau dans les cours d'eau, le changement climatique et la variation de la qualité et de la quantité des eaux. SWAT peut déterminer l'échelle du bassin fluvial, un modèle en temps continu qui fonctionne sur une étape quotidienne ou sous-quotidienne, efficace computationnellement et capable d'estimer les

rendements à long terme dans les grands bassins hydrographiques. C'est un modèle distribué à base physique, semi-empirique et fonctionnant à un pas de temps journalier. Il permet de simuler les principaux processus des bassins versants tels que l'hydrologie, la sédimentation, le transfert d'éléments nutritifs, la croissance des cultures, l'environnement et le changement climatique (Arnold et al., 1998). L'impact des changements climatiques ou des pratiques de gestion des terres sur le transport des sédiments et la réponse hydrologique de surface durant de longues périodes de temps pour les grands bassins hydrographiques complexes qui ont différents types de sols, d'utilisation des terres et des pratiques de gestion est anticipé par ce modèle (Neitsch et al., 2005).

Associé par un réseau de flux, le bassin est subdivisé en plusieurs sous-bassins dans le modèle SWAT, chaque sous-bassin est divisé en unités de réponse hydrologique (URH) qui consistent en des combinaisons uniques d'homogénéité de sols et de propriétés d'utilisation des terres dans chaque sous-bassin (Arnold et al., 2012). Le but principal du modèle SWAT consiste à décrire le fonctionnement physique de ces différentes composantes et leurs interactions d'une façon simple et réaliste que possible par des équations conceptuelles et l'utilisation des données d'entrée disponibles de manière à le rendre utile dans la planification et la prise de décision pour la gestion des bassins versants (Ogden et al., 2001). Ce modèle dispose d'une interface ArcMap (ArcSWAT) qui utilise le modèle numérique de surface (MNS), les coordonnées des stations climatiques et de jaugeage, le réseau hydrographique, des couvertures de sols et d'occupation de sol en grille ou polygone, comme entrées au modèle. Par ailleurs, il permet de faciliter l'extraction des paramètres d'entrée et de visualiser les résultats (Di Luzio et al., 2002).

V.2.3.1 Processus modélisés

Deux phases sont modélisées par SWAT :

- La première constitue la phase terrestre du cycle hydrologique qui contrôle la quantité d'eau, les charges de sédiments, de nutriments et de pesticides déversées au canal principal dans chaque sous-bassin.
- Et la deuxième, concerne le transport aquatique, autrement dit, les mouvements de l'eau, des sédiments, des nutriments et autres à travers le réseau fluvial du bassin jusqu'à l'exutoire (Neitsch et al., 2005).

V.2.3.2 Hydrologie

Selon Neitsch et al. (2005), les processus impliqués dans l'évaluation de la quantité de l'eau par SWAT comprennent les précipitations, l'évapotranspiration, le ruissellement de surface, l'écoulement sub-surface ou latéral et l'écoulement souterrain. La simulation de la phase terrestre, selon un pas de temps journalier, est basée sur le bilan en eau suivant :

$$SW_t = SW_0 + \sum_{n=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad \text{Eq. 28}$$

- SW_t : Contenu final en eau du sol (mm),
- SW_0 : Contenu initial en eau du sol (mm),
- R_{day} : Précipitations journalières (mm),
- Q_{surf} : Ruissellement de surface (mm),
- E_a : Evapotranspiration réelle (mm),
- W_{seep} : Percolation (mm),
- Q_{gw} : Débit de base (mm),
- t : Temps (j).

V.2.3.2.1 Ruissellement (Q_{surf})

Il est calculé par la méthode du numéro de courbe de SCS (Service de Conservation du Sol) (SCS, 1972).

V.2.3.2.2 Evapotranspiration (a)

le modèle offre trois options pour estimer l'évapotranspiration potentielle (Neitsch et al., 2005):

- La méthode de Penman-Monteith (Monteith, 1965; Allen, 1986; Allen et al., 1989),
- La méthode de Priestley-Taylor (Priestley & Taylor, 1972),

La méthode d'Hargreaves (Hargreaves & Riley, 1985).

V.2.3.2.3 Percolation (W_{seep})

Elle est calculée pour chaque couche de sol dans le profil. L'eau est permise pour percoler si la teneur en eau dépasse la teneur en eau de capacité de champ pour cette couche et la couche ci-dessous n'est pas saturée. Lorsque la couche de sol est gelée, aucun écoulement d'eau hors de la couche n'est calculé (Neitsch et al., 2005).

V.2.3.2.4 Débit de base (Q_{gw})

Il est défini comme la partie du débit d'un cours d'eau qui provient essentiellement des nappes souterraines (Musy, 2005). SWAT calcule cet élément en se basant sur l'équation de Smedema et Rycroft (1983).

V.2.3.2.5 Phase fluviale ou aquatique

L'acheminement des eaux dans les rivières est affecté par un ensemble de procédés et d'ajouts qui font varier les volumes transportés tout au long des tronçons des cours d'eau. Les pertes sont dues aux processus d'évaporation, de transmission et de prélèvement d'eau pour des usages domiciles ou agricoles. Pour la modélisation de cette phase, SWAT commence d'abord par le calcul du débit et la vitesse dans chaque bief, ce calcul est effectué par l'équation de Manning en supposant un écoulement uniforme (Neitsch et al., 2005).

$$Q = \frac{1}{n} S * R_h^{2/3} * \sqrt{I} \quad \text{Eq. 29}$$

- Q: Débit d'écoulement (m³/s),
- S: Section de bief (m²),
- Rh: Rayon hydraulique (m) (c'est le rapport de la section mouillée sur le périmètre mouillé),
- I: Pente de bief (m/m),
- η: Coefficient de rugosité de Manning (-).

SWAT achemine par la suite le volume d'eau sur le long du réseau en se basant sur la méthode de routage de Muskingum (Cunge, 1969):

$$S_{t+\Delta t} - S_t = K [X * (Q_{e(t+\Delta t)} - Q_{e(t)}) + (1-X) * (Q_{s(t+\Delta t)} - Q_{s(t)})] \quad \text{Eq. 30}$$

- S: Volume de l'eau stocké (m³),
- Q_e: Débit entrant (m³/s),
- Q_s: Débit sortant (m³/s),
- X: Facteur de pondération (-),
- K: Paramètre du modèle de muskingum (s),
- Δt: Pas de temps (h).

V.3. Choix du modèle SWAT

L'utilisation des modèles consiste à mieux prévoir les risques afin de prendre des mesures efficaces de gestion des ressources naturelles avec un minimum de temps et de moyens. Pourtant, le choix du type de modèle à appliquer dépend souvent de l'objectif de modélisation ainsi que des données d'entrées disponibles. Pour mener à bien cette étude et atteindre les objectifs proposés, le modèle doit posséder un certain nombre de caractéristiques. Tout d'abord, la forte diversité du relief, du climat et de la géomorphologie, et donc du comportement hydrologique, a imposé le choix d'un modèle conceptuel de système distribué, capable de calculer la contribution hydrique de différentes unités de terrain et de changements possibles dus, par exemple, à la mise en œuvre de projets de développement (scénarios). Soulignons cependant que le manque d'information exclut un modèle complètement distribué. Ensuite, le modèle à choisir doit être continu, c'est-à-dire assurer une simulation continue sur plusieurs années avec un pas de temps régulier des processus terrestres et fluviaux qui régissent les débits et les sédiments. Et enfin, il doit permettre la compréhension des processus menant à un certain débit en exploitant les informations disponibles (Patoul, 2008). À l'issue de ces étapes successives de sélection, le choix s'est alors porté sur le modèle agro-hydrologique Soil and Water Assessment Tool (SWAT) version 2012 (Arnold et al., 1995, 1998), qui est disponible gratuitement sur le Web* (* :<http://swat.tamu.edu/>).

Cette version était la plus récente lors du démarrage de l'étude. La théorie du modèle est décrite par Neitsch et al. (2002, 2005). Ce modèle permet un découpage du bassin versant en sous bassins ou en cellules carrées afin de rendre compte de la variabilité spatiale des caractéristiques du paysage. Les processus qui décrivent le mouvement de l'eau, des

sédiments, des éléments nutritifs et la croissance des cultures sont directement simulés par les algorithmes de SWAT en utilisant des informations spécifiques sur le climat, les propriétés du sol, la topographie, la végétation et les pratiques de gestion du territoire du bassin versant. En plus, ce modèle est en plein développement et il est piloté, sous la direction du département d'agriculture américain, par une communauté d'utilisateurs très active. Ainsi, une conférence internationale sur le modèle SWAT se tient annuellement. Le modèle est mis à jour d'une façon continue (en moyenne une version par an) et il est bien documenté (deux manuels de référence comportant plus de 1500 pages et qui sont mis à jour avec l'évolution des versions du modèle). Il est couplé aux outils SIG (ArcGIS et WindowMap) ce qui facilite son utilisation. Il est utilisé partout dans le monde dont Gassman et al. (2010) ont recensé plus de 800 articles référencés portant sur des applications autour du modèle.

Bien que le modèle ait été créé pour des conditions nord-américaines, SWAT a été implémenté et validé à des échelles et dans des conditions environnementales très variées à travers le monde et dans plus de 37 pays (Arnold & Fohrer, 2005, Gassman et al., 2007, Arnold et al., 2009, Gassman et al., 2014). Par contre, SWAT n'a pas été encore suffisamment testé sur le contexte Algérien.

V.3.1 Fonctionnement du modèle SWAT

La zone d'étude est délimitée par rapport à un exutoire principal qui définit le bassin versant drainé par ce point. Ce bassin est divisé par la suite en sous-bassins selon les points remarquables du site comme les points de confluence des oueds, les barrages, les points de décharge, les points d'apport ...etc. À l'intérieur des sous-bassins, une combinaison unique de types de sols, d'occupations de terres et de pentes forme des unités homogènes de calculs (fig. 87).

Ces unités nommées Unités de Réponse Hydrologique (URHs), constituent la résolution spatiale du modèle SWAT. Chaque unité est envisagée comme un espace ayant un comportement hydrologique propre et homogène et forme l'unité spatiale de référence pour les calculs effectués par le modèle (Arnold et al., 2012). Lors d'une simulation et avant d'être sommés à l'échelle des différents contributeurs, les transferts sont estimés quotidiennement pour valeur globale cumulée à l'exutoire des bassins. Pour la résolution temporelle, le modèle SWAT fonctionne à un pas de temps journalier. Les données d'entrée sont renseignées à cette échelle (Neitsch et al., 2005). Toutefois, les processus modélisés par le modèle SWAT sont simulés donc à une résolution journalière au niveau des URHs. La mise en œuvre du modèle SWAT est basé sur la délimitation des bassins versants, le choix de modèle Numérique de surface (MNS), la cartographie d'occupation du sol et des types de sol, la discrétisation du bassin en unités élémentaires puis la résolution des équations décrivant les processus au niveau des URHs (Cao et al., 2006; Bouraoui et al., 2005).

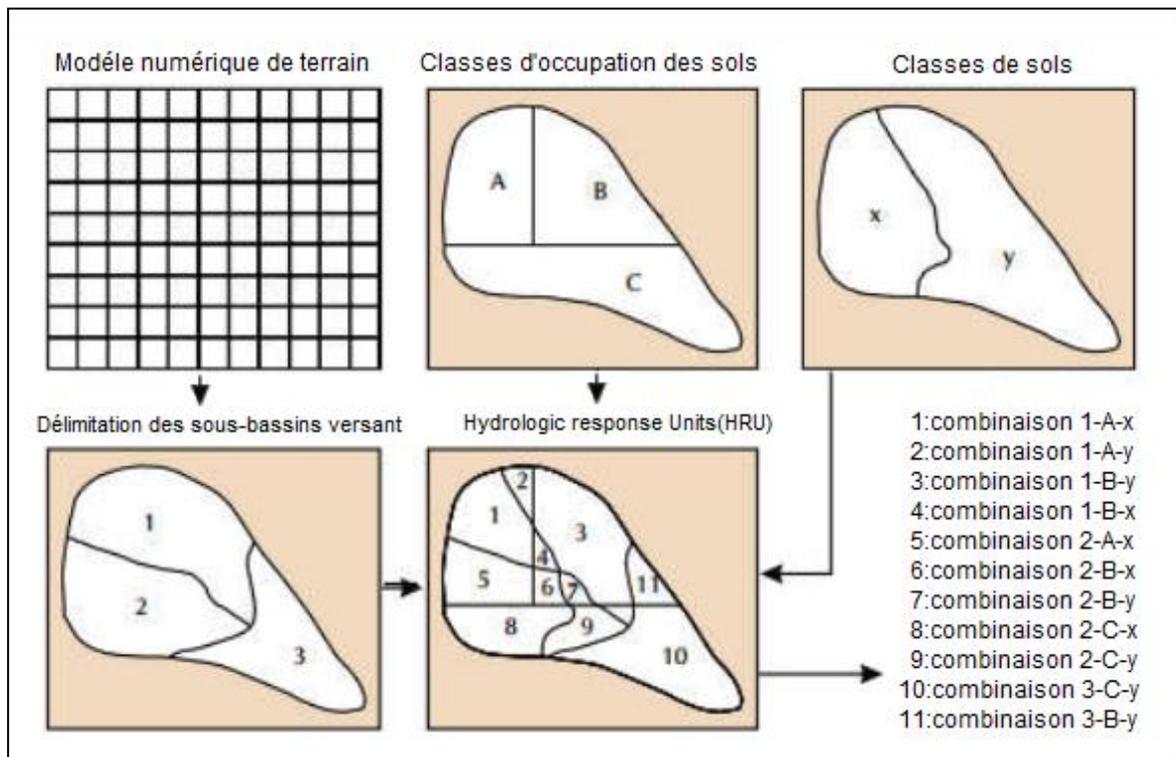


Figure 87.Principe de discrétisation des Unités de Réponse Hydrologiques (URH)
(Ruelland et al., 2004 d’après Bioteau et al., 2002)

V.3.2 Principe du Modèle SWAT

Développé par Arnold et al. (1998) pour le compte du département américain pour l’agriculture (USDA), le modèle est supporté par une large communauté internationale. C’est un modèle agro hydrologique à bases physiques semi-distribué permettant d’intégrer des données climatiques, hydrologiques et biologiques ainsi que des phénomènes complexes tels que l’érosion, l’infiltration et les pratiques agricoles (Arnold & Fhorer, 2005). SWAT estime différents processus à l’échelle des bassins versants et de façon continue dans le temps pour prédire les flux d’eau, de matières en suspension (MES) et d’intrants agricoles (nitrates, pesticides, etc.) sur le long terme. Le bassin versant modélisé est discrétisé en sous-bassins contenant chacun un bief principal. À l’intérieur de ces sous-bassins, une combinaison unique d’utilisation du sol, du type de sol et de la pente du terrain forme les Unités de Réponse Hydrologiques (URH). Le modèle suppose que chaque URH présente un comportement homogène.

V.3.3 Mise en œuvre du modèle

L’approche générale du travail est présentée dans la figure 88 afin de construire une procédure d’utilisation de ce modèle pour permettre la reproduction de la démarche de modélisation dans différents bassins versants. L’application du modèle est effectuée en utilisant des données s’échelonnant sur 40ans. Les périodes des différentes phases de la mise en œuvre du modèle SWAT sur le bassin versant de l’oued Boukiou sont réparties alors

comme suit : 5ans pour l'initialisation du modèle, 25ans pour la calibration et 10ans pour la validation.

Le modèle SWAT doit tout d'abord être mis en œuvre sur le bassin versant à l'étude pour ensuite être calé et validé. Lorsque ces étapes sont accomplies, le modèle peut être utilisé pour effectuer les simulations en pratiques de gestion bénéfiques (PGB). Ce modèle fonctionne avec des unités spatio-temporelles fines. Le pas de temps est mensuel et la résolution spatiale est l'URH. Les URHs sont des unités géographiques considérées comme homogènes du point de vue hydrique, pédoclimatique et de l'usage du sol (Gassman et al., 2007). Ces URHs ne sont pas spatialisées mais sont réparties au sein de sous bassins versants par segments de cours d'eau. Les URHs sont basés sur de multiples équations issues de recherches nombreuses (Neitsch et al., 2011). À partir des données à sa disposition, le modèle calcule successivement chaque variable.

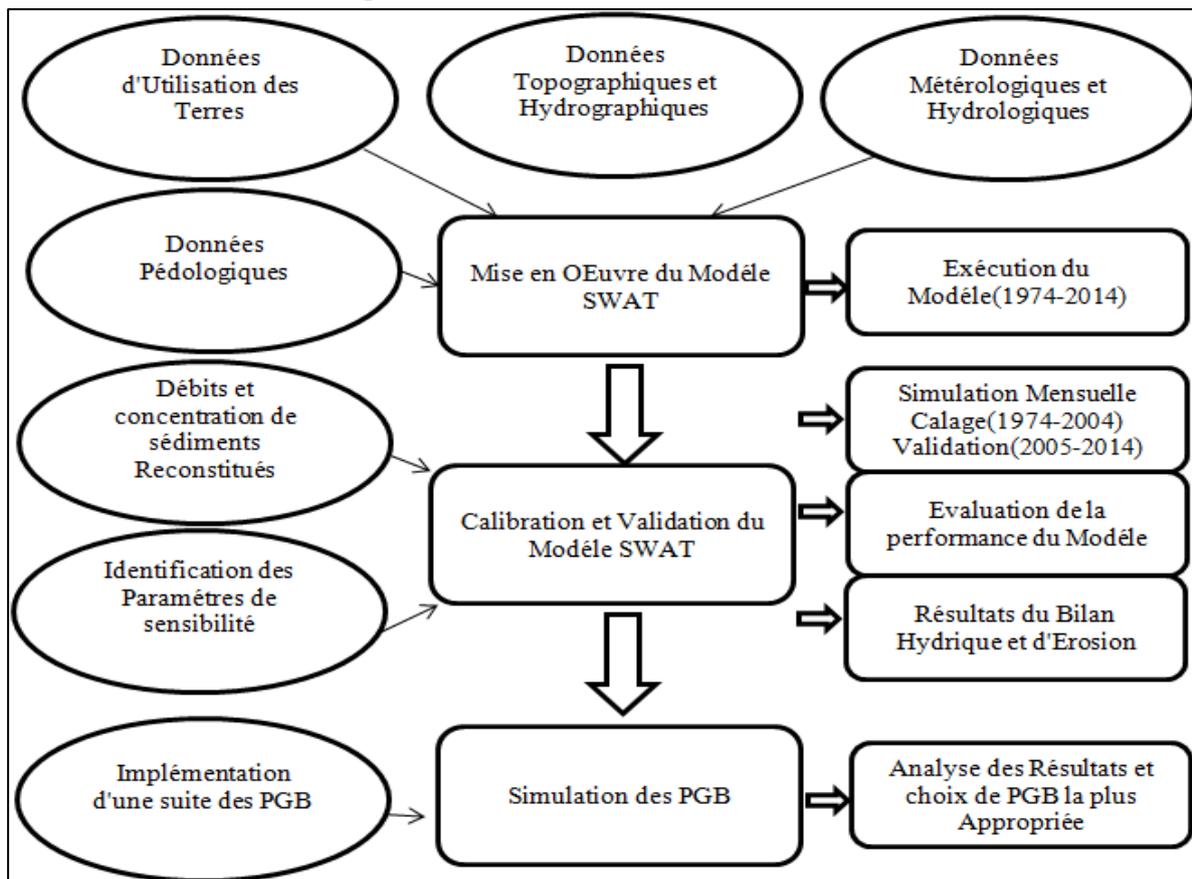


Figure 88.Méthodologie générale de l'utilisation du modèle SWAT

V.3.4 Outil d'exécution du modèle

L'utilisation du modèle SWAT a été rendue accessible et plus facile grâce au couplage du modèle aux SIG. La préparation des données d'entrée sera mise en œuvre dans l'outil d'ArcGIS"10.1" et SWAT "version 2012" en utilisant l'extension ArcSWAT2012 (fig.89), qui simplifie la gestion et l'utilisation des données préparés. Les sections suivantes décrivent les fonctionnalités des différents menus disponibles dans la barre d'outils ArcSWAT.

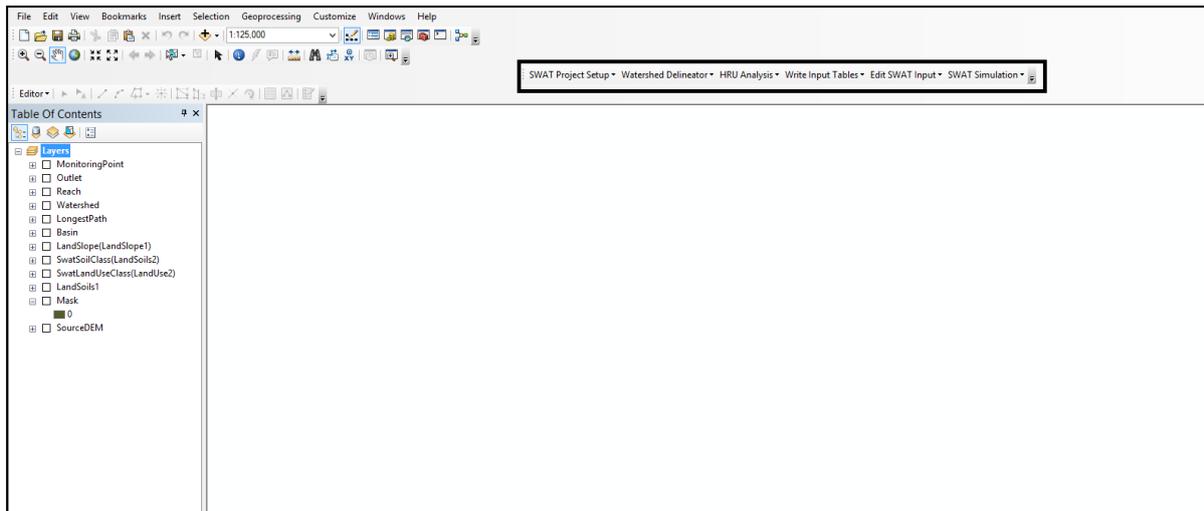


Figure 89. Interface de l'extension ArcSWAT, 2012

V.3.5 Menu de configuration du projet SWAT

Contient des éléments qui contrôlent la configuration et la gestion des projets SWAT. Ce menu comprend un répertoire de projet qui contient un document ArcMap, deux géo data bases, une structure de sous-répertoire pour stocker des ensembles de données SIG temporaires et des fichiers d'entrée SWAT 2012.

V.3.6 Menu de délimitation des bassins

Contient toutes les commandes nécessaires pour effectuer la délimitation des sous-bassins et évaluer les résultats.

V.3.7 Menu d'analyse de l'URH

Contient toutes les commandes qui accomplissent l'occupation du sol, les types de sol et l'analyse de pente utilisée pour générer les URHs du modèle SWAT.

V.3.8 Menu d'enregistrement des tables d'entrée

Contient les commandes qui génèrent les fichiers de géodatabases ArcSWAT utilisés par l'interface pour stocker les valeurs d'entrée pour le modèle SWAT.

V.3.8.1 Menu de modification d'entrée

Permet d'éditer les bases de données du modèle SWAT et les fichiers de base de données du bassin versant contenant les entrées courantes pour le modèle SWAT.

V.3.8.2 Menu SWAT simulation

Permet d'exécuter le modèle SWAT et d'effectuer une analyse de sensibilité et un étalonnage.

V.3.8.3 Préparation des données d'entrée

Cette étape présente la procédure de création et de préparation des différentes données d'entrée du modèle SWAT. Elle détaille le travail effectué pour le diagnostic et la correction des données de base telles que le Modèle Numérique de Surface (MNS) utilisé, la création de la carte d'occupation du sol et la carte pédologique ainsi que la collecte et la structuration des données hydro-climatiques à savoir les précipitations, les débits et les matières en suspension. La mise en œuvre du modèle SWAT nécessite donc une série de données spatio-temporelles de différentes natures. La préparation, la constitution et le contrôle des différents types de données disponibles sont indispensables afin de choisir l'information la plus adéquate à intégrer dans le modèle.

- **Relief**

Le relief est défini par le MNS qui décrit l'élévation dans chaque point couvrant la zone d'étude par une résolution spécifique. C'est un élément fondamental déterminant les caractéristiques physiographiques et géométriques du bassin, ainsi qu'il est le facteur principal régissant ou influençant l'ensemble des processus du bassin. Dans SWAT, on utilise le MNS d'une part, pour la délimitation du bassin versant, la discrétisation spatiale des sous-bassins ainsi que la génération du réseau hydrographique. Et, d'autre part, pour déterminer certains paramètres du bassin tels que le degré de la pente et sa longueur qui seront utilisés dans l'estimation du taux de sédiments livré par le bassin. Le MNS choisi pour cette étude a été extrait du satellite GDEM – ASTER caractérisé par sa résolution spatiale 3 fois plus fine que celle de SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission). L'utilisation de ce relief qui se caractérise par une résolution spatiale de 30m dans la modélisation des bassins versants est largement étudiée et démontrée (Hirt et al., 2010).

- **Occupation du sol**

Dans la modélisation, l'occupation du sol est largement utilisée pour l'estimation des degrés de perméabilité (écoulement / infiltration) et du taux d'érosion, la simulation des besoins et de la consommation de l'eau ...etc. Elle est aussi l'élément le plus souvent invoqué lorsqu'il est question des effets anthropiques sur le cycle de l'eau (Fritsch, 1995). La cartographie d'utilisation de la terre a été réalisée sur ArcGIS en digitalisant la carte d'occupation du sol du bassin versant de l'oued Boukiou produite par le Haut-Commissariat aux Eaux, Forêts et la Lutte Contre la Désertification (HCEFLCD, 2015). La quasi-totalité de la surface du bassin de l'oued Boukiou est couverte par les zones agricoles, cela résulte de l'activité humaine très prononcée dans la zone.

- **Pédologie**

L'information pédologique est l'une des composantes principales utilisées pour la discrétisation des bassins versants en unités élémentaires. En effet, l'étude menée par Baudez et al. (1999) sur quinze bassins versants français jaugés, a conclu que le degré d'hétérogénéité de la couverture pédologique s'est avéré le facteur le plus discriminant dans le choix de la discrétisation ou non d'un bassin versant.

Le modèle SWAT nécessite d'autres paramètres tels que la conductivité électrique (CE), la teneur en carbone (C), la réserve utile en eau d'un sol (RU), la conductivité hydraulique (K) ...etc. Pour ce faire, on a utilisé la base de données du sol Harmonized World Soil Database

(HWSD) délivrée par FAO (Food and Agriculture Organisation) et IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis). Cette base de données est constituée d'une couche cartographique numérique couplée à une table attributaire comportant les principales caractéristiques de types du sol (Nachtergaele & Velthuis, 2009). Les attributs décrivant les caractéristiques de chaque type du sol requis par le modèle SWAT sont illustrés dans le tableau 58.

Tableau 58. Paramètres requis par le modèle SWAT pour les caractéristiques des sols

Paramètres	Unités	Signification
SNAM	-	Nom du type de sol
NLAYERS	-	Nombre de couche de sol
HYDGRP	-	Groupe hydraulique du sol
SOL_ZMX	mm	Profondeur racinaire maximum du profil de sol
TEXTURE	-	Texture du sol
SOL_ZI	mm	Profondeur de la surface du sol au mur de la couche
SOL_BD	g/cm ³	Densité apparente humide(Da)
SOL_AWC	Mm H ₂ O/mm sol	Réserve utile en eau d'un sol(RU)
SOL_K	Mm/h	Conductivité hydraulique à saturation(K)
SOL_CBN	% en masse	Teneur en carbone organique(C)
CLAY	% en masse	Teneur en argile
SILT	% en masse	Teneur en limon
SAND	% en masse	Teneur en sable
ROCK	% en masse	Quantité de fragments rocheux contenus dans la couche
SOL_ALB	Nombre en 0 et 1	Albédo du sol humide
USLE_K	Sans dimensions	Facteur d'érodibilité du sol
SOL_EC	dS/m	Conductivité électrique du sol(CE)

- **Climat**

Les données climatiques constituent la principale variable d'entrée des modèles hydrologiques. Elles constituent également les composantes fondamentales du bilan hydrologique (Arnold et al., 2012). Les variables climatiques requises par le modèle SWAT sont les précipitations, la température, la vitesse du vent, l'humidité relative et le rayonnement solaire (Neitsch et al., 2005). Ces données doivent être d'un pas de temps journalier durant la période d'étude, ce qui est difficile à collecter. Pourtant, on a pu collecter les données des précipitations et pour un pas de temps journalier afin d'exécuter le modèle. Les pluies sont des données fondamentales sur lesquelles se base le modèle. Les données des précipitations sont collectées alors auprès de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) Elles sont mesurées au niveau de la station pluviométrique Djebel Chouachi située à l'exutoire. En effet, on a préparé 40ans (1974-2014). Le dépouillement, l'analyse et la vérification de l'homogénéité de la série des données collectées (pluie journalière) ont été effectuées à l'échelle annuelle afin de conserver le principe de la représentativité et de la répartition spatio-temporelle de ce paramètre sur toute la zone d'étude.

V.3.9 Intégration des données d'entrée

L'intégration des données est réalisée grâce à l'outil ArcSWAT qui est une extension applicative développée dans l'environnement ArcGIS, afin d'adopter à ce dernier, l'ensemble des modules et les fonctions nécessaires pour l'exécution du modèle SWAT. Cette extension est développée par la société américaine « STONE Environmental Engineering & Science, Inc.» en collaboration avec les équipes de recherche du département d'agriculture américain (USDA) travaillant sur le modèle SWAT (Arnold, 2012).

V.3.9.1 Discretisation spatiale

La discrétisation spatiale est la première étape à effectuer pour faire tourner le modèle. Elle consiste à extraire à partir du MNS les limites du bassin versant de l'oued Boukiou ainsi que son réseau hydrographique. Le relief a été intégré alors dans le modèle SWAT sous forme d'un Raster des élévations. Ce dernier serait utilisé pour la délimitation des sous-bassins et la génération du cours d'eau en utilisant l'algorithme D8 de Jenson et Domingue (1988). Le principe de fonctionnement de l'algorithme D8 consiste à évaluer les pentes afin de créer une matrice des directions d'écoulement, qui permet d'identifier les lieux de convergence de l'eau et donc d'en extraire le réseau hydrographique (Arnold et al., 2012). Pour délimiter le bassin versant, on identifie l'emplacement de l'exutoire. L'algorithme D8 procède alors de l'amont vers l'aval, en incluant les cellules qui convergent vers l'exutoire selon la matrice des directions d'écoulement. Après l'intégration du modèle numérique de surface, le bassin versant de l'oued Boukiou a été discrétisé en 15 sous-bassins (fig. 90).

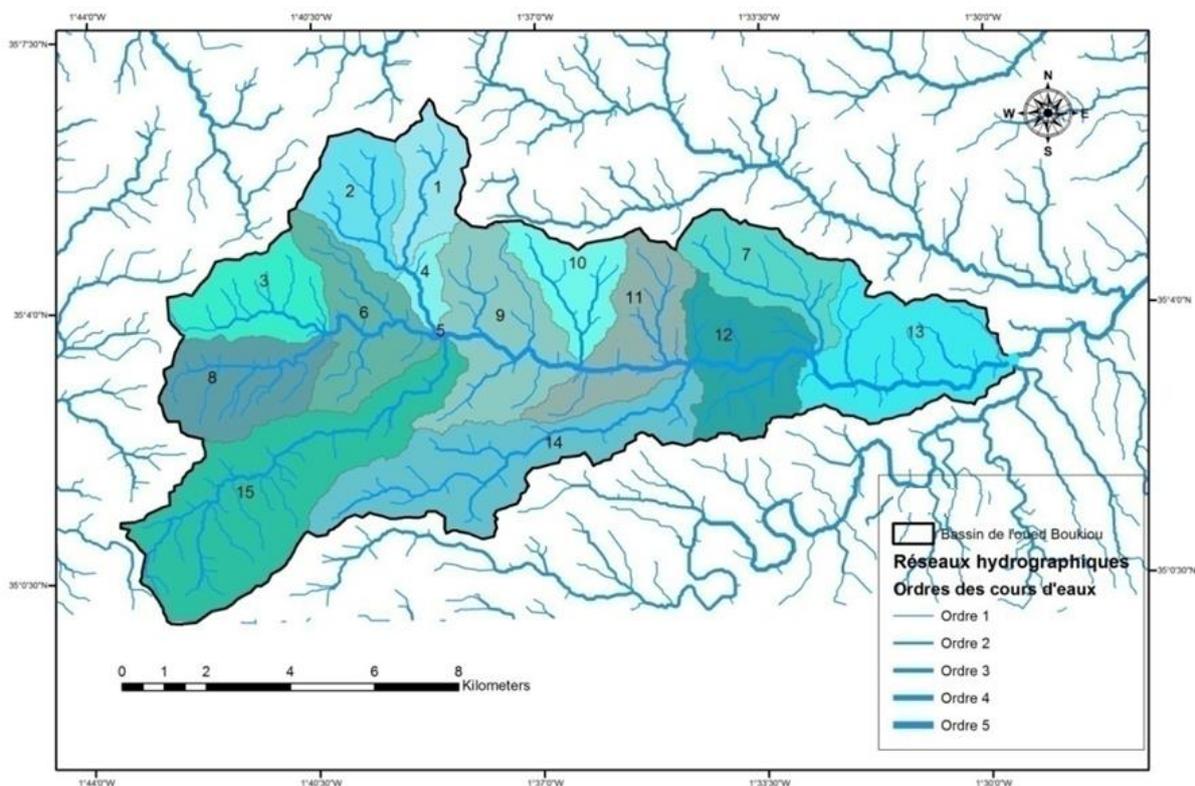


Figure 90. Délimitation des sous-bassins du bassin versant de l'oued Boukiou

V.3.9.2 Données d'occupation du sol

L'intégration de la carte d'occupation du sol dans les processus de la modélisation permet de bien représenter le fonctionnement physique et naturel du milieu. En plus, une fois le modèle intégrant cette composante est calibré et validé, il est possible d'évaluer et de simuler l'impact du changement d'occupation du sol sur les différents processus du bassin (écoulement, érosion, transfert de pollution ...etc.) en intégrant la dynamique ou les scénarios d'évolution de cette information (Fohrer et al., 2002). Toutefois, l'intégration de l'information sur l'occupation du sol dans le modèle SWAT a été effectuée en premier lieu par la conversion de la carte d'occupation du sol élaboré en format Raster de résolution spatiale de 30m. Et, en deuxième lieu par l'association des classes d'occupation du sol recensés dans la zone d'étude avec les catégories d'occupation du sol de la base de données SWAT selon la table de correspondance représentée dans le tableau 59.

Tableau 59. Table de correspondance entre les classes d'occupation du sol de la zone d'étude et la base de données SWAT

Valeur	Code	Classe d'occupation du sol
1	AGRL	Zones agricoles
2	FRST	Forêt de feuillus dégradée
3	SWRN	Zones fortement dégradées
4	RNGB	Végétations sclérophylls
5	URBN	Zones urbaines
6	AGRR	Terres arabes

- **Données du sol**

L'intégration de la carte pédologique dans le modèle SWAT s'est effectuée en créant dans la base de données du modèle SWAT neuf nouveaux types de sol faisant partie de la carte pédologique de la zone d'étude. Le tableau 60, montre les codes attribués à ces classes et leur signification.

Tableau 60. Classes de sols intégrées dans la base de données SWAT

Valeur	Code	Classe Du Sol
1	PORDEVS	Sols peu évolués
2	VRS	Vertisols
3	CREGPORDEVSVER	Complexe : régosols et sols peu évolués vertiques
4	CCALCABRS	Complexe : sols bruns calcaires
5	BRS	Sols brunifiés
6	PVRS	Paravertisols
7	CLITFERS	Complexe : lithosols et sols fersiallitiques
8	CCOLALS	Complexe : sols alluviaux et colluviaux
9	CCALCIBRSLEAS	Complexe : sols bruns calciques et sols lessivés

La base de données SWAT donne une description détaillée de l'ensemble de ces informations mais juste pour les types de sols américains. On a ajouté alors dans la table des sols du modèle, l'ensemble des données relatives aux types de sols recensés au niveau du bassin

versant de l’oued Boukiou L’intégration des caractéristiques de ces sols dans la base de données SWAT a été effectuée par la suite en utilisant l’interface d’édition des sols illustrée dans la figure 91.

Tables	OBJECTID	SNAM	SSID	CMPPT	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EXI	SOL_CRK	TEXTURE	SOL_Z1	SOL_BD1	SOL_AWC1	SOL_A
ppring	203	Calcsols			2	D	1000	0.5	0.5	LOAM	300	1.5	0.08	
ppring	204	Cambisols			2	C	910	0.5	0.5	LOAM	300	0.9	0.158	
ppring	205	Fluvisols			2	C	1000	0.5	0.5	LOAM	300	1.2	0.175	
resmg	180	CHARLTON	CT0002		6	B	1651	0.5	0.5	L-FSL-GR-SL	203.2	1.13	0.16	
ribmg	128	STOCKBRIDGE	CT0011		8	C	1651	0.5	0.5	L-SIL-SIL-GRV	254	1.13	0.16	
rtmg	76	SACO	CT0013		3	D	1524	0.5	0.5	SIL-VFSL-VFSL	304.8	1.2	0.23	
SelectedObjects	16	WINDSOR	CT0014		3	A	1651	0.5	0.5	L-S-L-S	50.8	1.1	0.15	
Selections	85	WALPOLE	CT0015		4	C	1651	0.5	0.5	FSL-SL-GRV-C	177.8	1.13	0.19	
seprng	107	NINIGRET	CT0018		6	B	1524	0.5	0.5	FSL-FSL-GRV-V	203.2	1.13	0.16	
seprng	62	GROTON	CT0046		6	A	1828.800049	0.5	0.5	GR-SL-GR-SL	203.2	1.15	0.13	
seprng	66	HERO	CT0047		1	B	1524	0.5	0.5	L-GR-FSL-GRV	228.6	1.25	0.16	
seprng	74	TISBURY	CT0053		4	B	1524	0.5	0.5	SIL-VFSL-GRV	203.2	1.15	0.21	
seprng	79	PAXTON	CT0061		3	C	1651	0.5	0.5	STV-FSL-FSL-I	50.8	1.13	0.08	
seprng	61	POOTATUCK	CT0064		13	B	1651	0.5	0.5	FSL-FSL-GRV-V	101.6	1.23	0.18	
seprng	77	RIPPOWAM	CT0065		3	C	1651	0.5	0.5	FSL-FSL-GRV-V	127	1.23	0.2	
soilus	169	BEACHES	DC0002		2	D	1524	0.5	0.5	S-COS	152.4	1.6	0.03	
soilng	199	ROCK OUTCR	DC0015		5	D	1524	0.5	0.5	UWB	1524	2.5	0.01	
submg	179	URBAN LAND	DC0035		8	D	152.3999939	0.5	0.5	VAR	152.4	1.5	0.1	
swqmg	201	WATER	DC0038		3	D	25.39999962	0.5	0.5		25.4	1.72	0	
tblMETADATA	162	FLUVAQUENT	DE0202		2	D	25.39999962	0.5	0.5		25.4	0	0	
tblOutputVars	178	UDIFLUVENT	DE0209		2	D	25.39999962	0.5	0.5		25.4	0	0	
tbl	89	UDIPSAMMEN	DE0211		4	D	25.39999962	0.5	0.5		25.4	0	0	
tbl	129	UDORTHENT	DE0214		2	D	25.39999962	0.5	0.5		25.4	0	0	
tbl	110	AGAWAM	MA0001		4	B	1651	0.5	0.5	FSL-FSL-FSL-C	279.4	1.15	0.16	
tbl	82	PITTSTOWN	MA0008		2	C	1524	0.5	0.5	STV-SIL-VFSL	254	1.15	0.11	
tbl	193	BERNARDST	MA0010		3	C	1651	0.5	0.5	STV-SIL-CN-S	152.4	1.1	0.12	
tbl	95	DEERFIELD	MA0013		1	B	1651	0.5	0.5	LFS-S-S	228.6	1.1	0.12	
tbl	43	PITTSFIELD	MA0015		2	B	1651	0.5	0.5	STV-FSL-FSL-I	228.6	1.5	0.09	
tbl	114	HADLEY	MA0022		8	B	1828.800049	0.5	0.5	VFSL-VFS-S	279.4	1.35	0.16	
tbl	28	WINDOSKI	MA0023		2	B	1524	0.5	0.5	SIL-LVFS	203.2	1.25	0.21	

Figure 91. Interface d’addition des caractéristiques des sols dans la base de données SWAT

V.3.9.4 Classes des pentes

La carte des classes de pente a été générée à partir du MNS corrigé en utilisant les outils de l’analyse spatiale sur ArcGIS. Cette carte montre que le bassin versant de l’oued Boukiou se compose essentiellement de plaines, et la majorité de ce bassin à des pentes faibles. Les pentes du bassin ont été regroupées en quatre classes (fig.92).

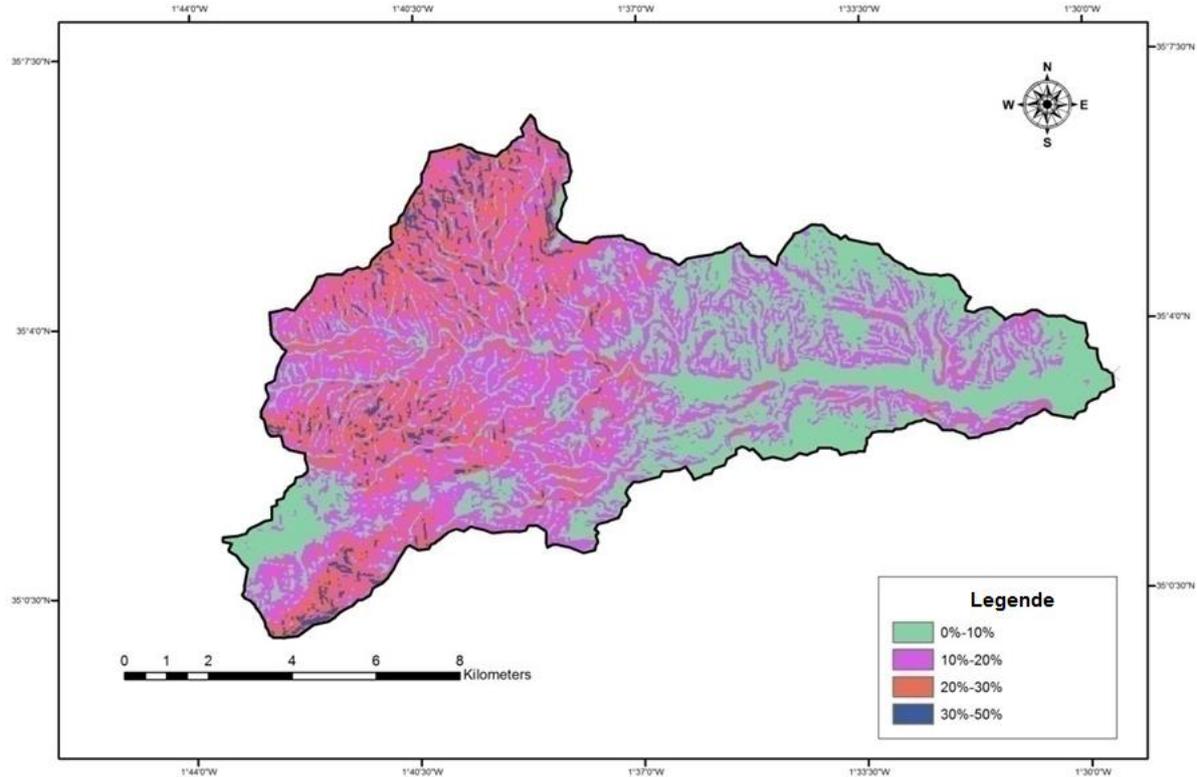


Figure 92. Carte des classes de pente

V.3.9.5 Distribution des Unités de Réponse Hydrologiques (URH)

Dans la carte de la répartition spatiale des sous-bassins (fig.90), 15 sous-bassins ont été générés par la discrétisation du bassin versant de l'oued Boukiou. Ils sont définis principalement par référence à la confluence du système de drainage et de la station hydrométrique. Cette segmentation permettra de simuler les opérations principales dans ces bassins et d'estimer la contribution de chacune de ces entités. D'autre part, l'analyse du bassin hydrographique est permise par SWAT dans son ensemble ou en la subdivisant en sous-bassins contenant les mêmes portions appelées unités de réponse hydrologiques (URH) où l'occupation du sol, le sol et la pente dominantes dans le bassin sont considérées comme étant l'utilisation du sol, le sol et la pente de chaque sous-bassin (Arnold et al., 2011). Tous les processus modélisés par SWAT sont simulés à la mesure locale de ces unités. Une meilleure estimation du débit et de la concentration des sédiments est donnée par les multiples scénarios qui représentent 10% de l'utilisation des terres, 10% du sol et 10% de la combinaison du seuil de la pente. Le bassin de l'oued Boukiou aboutit à 90 URH dans tout le bassin. Ce scénario aboutit à la base détaillée de l'utilisation des terres, du sol et de la pente, contenant de nombreuses URH qui représentent à leur tour l'hétérogénéité de la zone d'étude. Cependant, les caractéristiques des URH sont les facteurs clés qui influent sur le flux et la concentration des sédiments.

V.3.9.6 Données climatiques

Une fenêtre spéciale a été activée directement après la distribution des URH, afin d'intégrer les données climatiques. Toutefois, l'implantation des données de précipitations nécessite l'édition de deux fichiers. Le premier concerne les coordonnées exactes de la station (nom, latitude, longitude et élévation), et le deuxième contient la date de la première observation suivie par les valeurs de toute la série (40ans des pluies journalières). Par la suite, on intègre les données des précipitations journalières (mm) de la station de Djebel Chouachi. et pour le reste des variables climatiques font défaut.

V.3.9.7 Création des tables d'entrée par le modèle

Lorsque l'intégration des données d'entrée a été achevée et le bassin étudié a été découpé en URH, on prépare dans SWAT les tables de base contenant les informations nécessaires à la création des données d'entrée par défaut. Cette étape consiste à paramétrer les différents fichiers d'entrée du modèle et d'ajuster les valeurs nécessaires au niveau des différents sous-bassins ou bien URH.

V.3.10 Simulation

Une fois que toutes les données sont intégrées au modèle (MNS, type de sol, type de couvert végétal et le climat) et la création des tables d'entrée de ces données sont effectuées, on procède directement à la simulation. Le modèle offre une boîte de dialogue contenant plusieurs options de simulation. Il propose également trois pas de temps de simulation, journalier, mensuel et annuel. Puisqu'on possède des mesures mensuelles des débits qu'on

doit utiliser par la suite pour le calage et la validation du modèle, on a choisi un pas de temps mensuel afin de pouvoir comparer de manière correcte les simulations avec les observations. La période de simulation est définie sur 40 ans (01/09/1974 – 31/08/2014), elle se subdivise alors comme suit :

- Les premiers 5 ans (01/09/1974 – 31/08/1979) ont été utilisés pour l'initialisation du modèle « Warm-up », cette période a pour objectif de laisser le modèle faire son premier cycle hydrologique complet,
- 35 ans (01/09/1979 – 31/08/2004) pour la phase de calibration,
- 10 ans (01/09/2004 – 31/08/2014) pour la phase de validation.

Après l'exécution, le modèle a mis à notre disposition un fichier nommé (SWATOutput.mdb) contenant tous les résultats de calcul sous forme de tableaux pour chaque sous-bassin durant la période entière de simulation. Les résultats obtenus englobent plusieurs variables tels que les débits, les concentrations des sédiments, la dégradation spécifique des sols, le ruissellement, l'évapotranspiration ... etc

V.3.10.1 Calibration du modèle

V.3.10.1.1 Principe du calage

Le calibrage d'un modèle conceptuel consiste à ajuster les variables d'entrée du modèle pour faire coïncider au maximum la réponse du modèle à des observations mesurées représentant la réalité du terrain (Vrugt et al., 2004). Il vise donc à reproduire le plus fidèlement possible le comportement du système considéré et identifié lui-même par des mesures directes (Vidal, 2005). En effet, la procédure générale de calage avec SWAT est de caler à la fois les débits de façon multi-variable, avec les paramètres influant sur les variables uniquement. Cette procédure nous permet d'améliorer la performance des variables et de déterminer les valeurs optimales des paramètres du modèle SWAT sur la zone d'étude, contrairement à l'optimisation uni-variable qui donne rarement de bonne performance notamment pour les variables de qualité de l'eau (Gassman et al., 2007). La calibration qui représente alors une phase indispensable dans la modélisation, peut être effectuée soit manuellement ou à partir des algorithmes préprogrammés. Dans notre étude, on a choisi d'appliquer les algorithmes relatifs à ces processus afin de minimiser le temps et augmenter la précision d'optimisation. Il s'agit de l'outil SWAT-CUP (SWAT Calibration and Uncertainty Procedures) développé par Abbaspour et al. (2007) qui propose une gamme de fonctions et d'interfaces plus étendues et plus riches pour le paramétrage et le calibrage du modèle. Cet outil intègre la version 2 baptisée SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting) développée aussi par Abbaspour et al. (2007), qui est une méthode stochastique associant le calage à l'analyse séquentielle d'incertitudes.

V.3.10.1.2 SWAT-CUP

L'outil SWAT-CUP (SWAT Calibration and Uncertainty Procedures) développé par Abbaspour et al. (2007), est un programme qui interagit avec ArcSWAT pour effectuer l'étalonnage, la validation et l'analyse de sensibilité du modèle SWAT. Il a été conçu pour apporter plus de flexibilité et de performance quant à la calibration du modèle SWAT pour

faire face aux limites des fonctions d'étalonnage ArcSWAT dans l'environnement ArcGIS. Ainsi, l'avantage de l'application est sa capacité à offrir un large choix de fonctions et des interfaces plus larges et généreuses pour le paramétrage, l'étalonnage et la validation du modèle. L'exécution du modèle SWAT- CUP implique l'utilisation des fichiers de sortie générés par le modèle SWAT dans ArcSWAT (Abbaspour, 2011). Cinq différentes procédures d'algorithmes sont associées à SWAT tels que GLUE "Generalized Likelihood Uncertainty Estimation" (Beven & Binley, 1992), PSO "Particle Swarm Optimization" (Eberhart & Kennedy, 1995), ParaSol "Parameter Solution" (Alamirew, 2006), MCMC "Mark Chain Monte Carlo" (Kassa & Foerch, 2007) and SUFI-2 "Sequential Uncertainty Fitting" (Abbaspour et al., 2004; Abbaspour et al., 2007). La stratégie SUFI-2 a été choisie et appliquée dans cette recherche parce qu'elle peut fournir de plus larges intervalles d'incertitudes des paramètres marginaux du modèle parmi les cinq approches. Aussi elle est largement utilisée pour la calibration du modèle SWAT et l'analyse des processus liés à la gestion des bassins versants à cause de sa fiabilité au niveau des résultats. Elle présente une facilité d'implantation et un nombre réduit de simulations nécessaires afin d'avoir des meilleurs résultats (Yang et al., 2008). Cette méthode stochastique utilise l'échantillonnage par Latin Hypercube (LHS Latin Hypercube Sampling") pour discrétiser le domaine de variation des paramètres et définir leurs valeurs optimales (Abbaspour et al., 2011).

La qualité de l'ajustement dans le SUFI-2 est quantifiée par le coefficient de corrélation linéaire (R), le coefficient de performance de Nash - Sutcliffe (NSE "Nash-Sutcliffe Efficiency" : Nash & Sutcliffe, 1970) et le pourcentage de biais (PBIAS "Percent BIAS" : Gupta et al., 1999) entre les données observées et la meilleure simulation. L'interface de l'outil SWAT- CUP avec la version baptisé SUFI-2 est exemplifiée dans la figure 93.

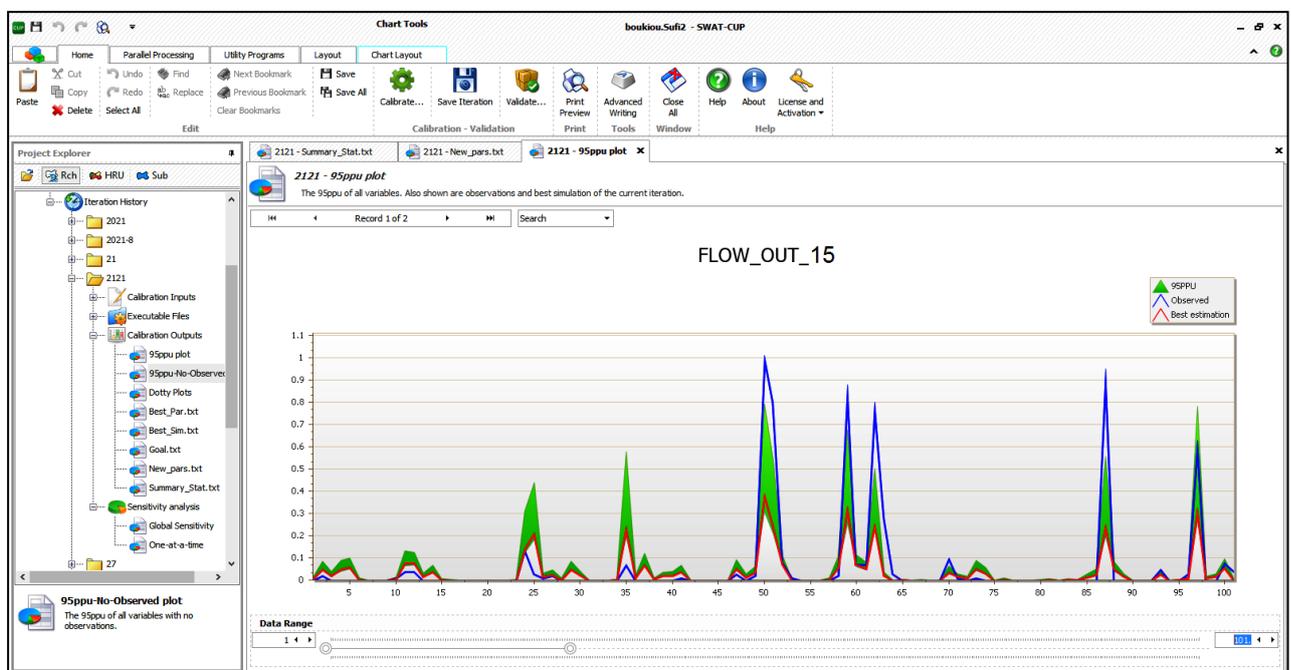


Figure 93. Interface de SWAT CUP 2012

➤ Paramètre du modèle à calibrer

En tant que modèle conceptuel, le modèle SWAT décrit l'ensemble des processus simulés à travers une série d'équations à paramètres (Arnold et al., 2012). Le tableau 61 représente les principaux paramètres du modèle SWAT avec leurs descriptions et leurs fourchettes de variation, régissant les deux phénomènes étudiés dans le cadre de ce travail à savoir l'hydrologie. Ils ont été choisis d'une façon judicieuse afin de mieux calibrer les débits. Le choix des bornes a été suivi par les études antérieures et le manuel d'utilisateur de SWAT (Neitsch et al., 2005). Ces paramètres ont été considérés alors dans l'analyse de sensibilité, puisqu'ils sont susceptibles d'influencer le cycle hydrologique (processus terrestres) et le cheminement de l'eau dans le bief (processus fluviaux).

➤ Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité, qui est une phase primordiale dans la modélisation, a pour objectif de réduire le nombre de paramètres à inclure dans la calibration, ce qui a pour effet de diminuer les efforts requis en calibration et d'augmenter les probabilités de converger vers une combinaison performante. Elle consiste à étudier l'impact de la variabilité des paramètres d'entrée sur les paramètres de sortie du modèle, et vise à déterminer les paramètres qui ont une forte influence sur la sortie du modèle et qui nécessitent une estimation précise (plus la variation des sorties est grande, plus le paramètre a une influence importante) (Saltelli et al., 2000). Elle s'effectue en calculant des indices de sensibilité qui permettent de classer les paramètres d'entrée selon leur degré d'influence sur la variable de sortie. En effet, l'analyse de sensibilité a été menée sur le bassin étudié en utilisant la méthode AOT (One-At-Time) implantée sur la méthode SUFI-2 et basée sur la technique du Latin Hypercube. Cette méthode consiste à faire varier un seul paramètre et fixer les autres paramètres à leurs valeurs de référence puis observer le comportement de la réponse du modèle (Van Griensven & Bauwens, 2001).

Tableau 61. Paramètres de calage qui influent les débits (Arnold et al., 2012; modifié)

Range	Paramètre	Type	Description	Unité	Processus ou composante	Fourchette de variation
1	r_CN2.mgt	R	Numéro de courbe de ruissellement	-	Écoulement de surface	-0.2 – 0.2
2	r_SLSUBBSN.hru	R	Longueur de pente moyenne du sous-bassin	M	Tous les processus	0 – 0.2
3	r_SOL_AWC.sol	R	Réserve utile en eau d'un sol	mm H ₂ O/mm sol	Écoulement souterrain	-0.1 – 0.1
4	r_SOL_BD.sol	R	Densité apparente humide	g/cm ³	Routage de l'eau dans le bief	-0.5 – 0.6
5	r_SOL_K.sol	R	Conductivité hydraulique à saturation	mm/h	Écoulement hypodermique	-0.2 – 0.2

6	r_USLE_K.sol	R	Facteur d'érodibilité du sol	-	Erosion	0 – 0.65
7	v_ADJ_PKR.bsn	V	Facteur d'ajustement du débit de pointe pour le transport terrestre des sédiments (sous-bassins)	-	Erosion	0.5 – 2
8	v_CH_K2.rte	V	Conductivité hydraulique effective dans les cours d'eau principaux	mm/h	Écoulement fluvial	-0.01 – 500
9	v_CH_N2.rte	V	Coefficient de Manning "n" du canal principal	-	Écoulement fluvial	0 – 0.15
10	v_EPCO.hru	V	Facteur de compensation d'évaporation de la plante	-	ETP et ET	0.01 – 1
11	v_ESCO.hru	V	Facteur de compensation d'évaporation du sol	-	Temps de concentration	0 – 1
12	v_GW_REVAP.gw	v	Coefficient permettant le transfert d'eau de l'aquifère vers les horizons sus-jacents et non saturés du sol.	-	Eau dans le sol	0 – 0.2
13	v_SPCON.bsn	V	Paramètre linéaire pour l'estimation du taux maximum d'arrachement des sédiments dans les cours d'eau principaux	-	Erosion	0.0001 – 0.01
14	v_SPEXP.bsn	V	Paramètre exponentiel pour l'estimation du taux maximum d'arrachement des sédiments dans les cours d'eau principaux	-	Erosion	1 – 1.5
15	v_SURLAG.bsn	V	Temps de réponse dû au ruissellement de surface	-	Écoulement de surface	0.5 – 10
16	v_USLE_P.mgt	V	Facteur de pratique de soutien d'USLE	-	Erosion	0 – 1

R : Valeur du paramètre sera multipliée par (1 + la valeur spécifiée par la méthode de calage),

V : Valeur du paramètre sera remplacée par la valeur spécifiée par la méthode de calage.

➤ Critères d'évaluation du calage

Le calage du modèle n'est jamais parfait, il est toujours entaché d'une imprécision associée à la complexité de la nature, et parfois à la structuration du modèle lui-même (représentation des processus dans le modèle), aux données d'entrée (erreur dans les observations mesurées), au calage des paramètres du modèle ... etc. (Abbaspour, 2011). En effet, la procédure du calage doit être suivie certainement par une étape de contrôle et d'évaluation qui consiste à s'assurer de la fiabilité et la performance du calibrage effectué afin d'estimer le degré d'adaptabilité des valeurs obtenues lors du calage du modèle à représenter les différents contextes et situations climatiques subis par le bassin. Cette étape est effectuée souvent en évaluant la performance d'un modèle graphiquement et par des critères statistiques qui permettent d'estimer le degré de corrélation des sorties du modèle avec les observations mesurées (Moriassi et al., 2007). La modélisation a donc été jugée à l'aide des indicateurs statistiques et d'une évaluation visuelle des hydrogrammes journaliers ainsi que des séries mensuelles des débits. Les indicateurs statistiques utilisés sont le critère d'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE) et le pourcentage de biais (PBIAS).

➤ Coefficient d'Efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE)

NSE est une statistique adimensionnelle normalisée qui met en œuvre la taille comparative de la distinction résiduelle par rapport à la variance des données mesurées (Nash & Sutcliffe, 1970). Il montre à quel point la parcelle des données observées par rapport aux données simulées correspondent à la ligne 1:1. Les valeurs du coefficient de Nash vont de $-\infty$ à 1, 1 étant la valeur optimale (Arnold et al., 2012). Sevat & Dezetter (1991) ont trouvé ce critère comme la meilleure fonction-objective pour un ajustement global d'un hydrographe. Ce coefficient est défini par l'équation suivante :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{Obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{Obs} - Y_i^{mean})^2} \quad \text{Eq. 31}$$

➤ Pourcentage de Biais (PBIAS)

PBIAS mesure la tendance moyenne des données simulées à être plus grande ou plus petite que leurs homologues observés (Gupta et al., 1999). C'est la perversion de l'information évaluée, exprimée en pourcentage. Une valeur optimale du pourcentage de biais est nulle, ce qui indique une parfaite simulation du modèle. Un pourcentage de biais positif indique une sous-estimation du modèle tandis qu'un pourcentage négatif démontre une surestimation du modèle (Moriassi et al., 2007). La formule de ce critère est présentée par l'équation suivante:

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{Obs} - Y_i^{sim}) \times 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{Obs})} \quad \text{Eq. 32}$$

En outre:

- Y_i^{obs} : Valeurs observées,

- Y_i^{sim} : Valeurs simulées,
- n : Nombre d'observations.

Par ailleurs, Moriasi et al. (2007) ont pu établir une grille d'évaluation de la performance mensuelle, récapitulée dans le tableau 62.

Tableau 62. Critères d'évaluation de la performance du modèle recommandés pour un pas de temps mensuel (Moriasi et al., 2007)

Evaluation de la performance du modèle SWAT	NSE	PBIAS
		Débits
Très bonne	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 10$
Bonne	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Satisfaisante	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Non Satisfaisante	$NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 25$

V.3.10.2 Procédure au calage

Le calage des modèles continus porte souvent sur une période de temps assez longue et qui doit dépasser dans le cas du modèle SWAT trois ans, car la phase du calage représente la pièce maîtresse de tout le processus de la modélisation conceptuelle des bassins versants (Srinivasan et al., 1998).

Pour cette raison, le calage du modèle au niveau du bassin versant de l'oued Boukiou est effectué sur une période de 35ans et qui s'étale du 01/09/1979 – 31/08/2004. Cette phase a été précédée certainement par la phase d'initialisation du modèle (Warm-Up) qui a été réalisée pour une durée de 5 ans (01/09/1974 – 31/08/1979) pour tenir compte des conditions initiales du milieu et initialiser ainsi les valeurs des paramètres du modèle. Une fois la phase d'initialisation a été spécifiée et la liste des paramètres est fixée, on a donc procédé au calibrage semi-automatique basé sur des méthodes d'optimisation implanté sur SUFI-2. La démarche suivie pour le calage du modèle SWAT consiste à:

- Définir la fonction-objectif (R^2 , Nash et PBIAS) que la méthode de calage optimisera,
- Déterminer la liste des paramètres à caler et ses fourchettes de variation qui principalement doivent avoir une signification physique,
- Les paramètres qui ne font pas partie de cette liste sont fixés sur leurs valeurs initiales,
- Lancer la première itération du calibrage qui contient un nombre large de simulations supérieur à 50,
- Après la fin de la première itération, on a pu extraire les valeurs optimales et les fourchettes de variation, ainsi que les valeurs de la fonction objective.
- Les résultats obtenus de la première itération n'étaient pas satisfaisants. On a ajusté les paramètres d'entrées et relancé d'autres itérations jusqu'à l'obtention des résultats acceptables.

V.3.10.3 Validation du modèle

Un modèle est dit validé lorsqu'il permet de reproduire les observations d'une manière correcte et satisfaisante. La procédure de calage d'un modèle doit être nécessairement suivie

par une phase de contrôle et d'évaluation afin de garantir la fiabilité et la performance du calibrage réalisé. Cette phase s'appelle période de validation et consiste alors à évaluer la performance du modèle calibré en utilisant les valeurs optimales des paramètres obtenues lors de la phase du calage sur une autre période de temps (Arnold et al., 2012). La procédure de validation a pour objectif principal de vérifier la cohérence et la robustesse des valeurs attribuées aux paramètres du modèle suite à la procédure de calibrage, d'examiner le degré d'adaptabilité et de généralisation possible de ces valeurs à d'autres périodes temporelles et de tester la capacité du modèle à reproduire différents contextes et situations climatiques subis par le bassin. Cette période doit être assez longue et non intégrée dans la phase de calage, elle constitue l'étape la plus décisive quant à la simulation du fonctionnement hydrologique et de l'érosion d'un bassin versant. Comme le calage, la validation consiste également à comparer les sorties simulées avec les données observées. La validité et la fiabilité des résultats dépendent en grande partie du degré de corrélation du modèle avec les observations mesurées, ce qui reflète le fonctionnement réel de l'hydrosystème. L'évaluation des résultats de la phase de validation doit être principalement jugée à travers les indicateurs statistiques (R^2 , NSE et PBIAS). La période considérée dans le cas du bassin de l'oued Boukiou est de 10 ans et qui s'étale du 01/09/2004 au 31/08/2014.

V.4 Implémentation d'une suite des pratiques de gestion bénéfiques PGB

Sur la base de la fonction d'une pratique de conservation, une méthode a été suggérée pour représenter différentes pratiques de gestion bénéfique avec SWAT. Dans cette représentation, on s'est basé sur une discussion des paramètres spécifiques qui doivent être modifiés. La définition et le but des pratiques ont été obtenus à partir des normes de pratiques de conservation (USDA-NRCS, 2005). Nous nous sommes concentrés alors sur la représentation de trois pratiques intéressantes et les plus utilisables par le modèle SWAT à savoir, le contouring et les cultures en bandes et terrassement. Les paramètres généraux du modèle ont été modifiés pour refléter la mise en œuvre de différents PGB agricoles utilisées. La modification de ces paramètres repose sur des recherches antérieures et des efforts de modélisation menés sur les bassins hydrographiques et présentés en Neitsch et al. (2005) et en Arabi, et al. (2008). En effet, l'implémentation des PGB utilisées a été basée principalement sur la modification de deux principaux paramètres, le premier est le numéro de courbe ou curvenumber (CN) qui est un paramètre primaire utilisé pour l'étalonnage de la composante hydrologique du modèle SWAT dont les recommandations ont servi à établir une relation plus générale entre le CN avant et après la mise en œuvre des aménagements (fig. 94). Le deuxième est le facteur des pratiques de soutien USLE (USLE_P) pour les champs sous contours, les cultures en bandes et les terrasses parallèles (tableau 63). Ces valeurs ont été utilisées pour simuler la réduction de la production de sédiments due à la mise en œuvre des pratiques correspondantes.

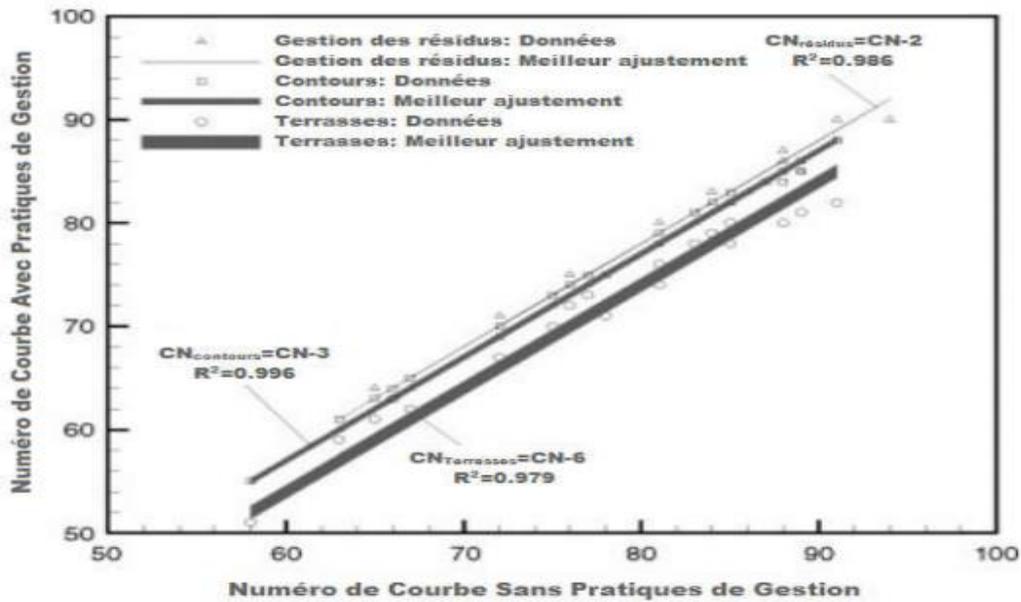


Figure 94. Effet du contour, du terrassement et de la gestion des résidus sur le numéro de courbe (CN) (Arabi, et al., 2008).

Tableau 63. Valeurs de facteur P pour les contours, les cultures en bandes et les terrasses parallèles (Adapté depuis Wischmeier & Smith, 1978, in Arabi et al., 2008)

Pente %	USLE_P		
	Contours	Cultures en bandes	Terrasses
1 to 2	0.6	0.3	0.12
3 to 5	0.5	0.25	0.1
5 to 6	0.5	0.25	0.1
9 to 12	0.6	0.3	0.12
13 to 16	0.7	0.35	0.14
17 to 20	0.8	0.4	0.16
21 to 25	0.9	0.45	0.18

V.4.1 Contours (Contouring)

La simulation d'aménagement en contours dans un champ se traduira par:

- la réduction du ruissellement de surface en retenant l'eau dans les petites dépressions,
- la réduction de l'érosion en nappe et en rigole, en réduisant la puissance érosive du ruissellement de surface et en prévenant ou minimisant le développement des rigoles.

D'après la figure 94, le CN a été réduit de 3 unités par rapport à la valeur calibrée. En plus, les valeurs de facteur P pour le contour qui sont représentées dans le tableau 65 ont été utilisées afin de simuler la réduction de l'érosion.

V.4.2 Cultures en bandes (Strip Cropping)

La mise en œuvre des pratiques de cultures en bandes dans un champ se traduira par:

- la réduction du ruissellement de surface en retenant l'eau dans les petites dépressions,

- la réduction du taux d'écoulement de pointe en augmentant la rugosité de surface et en ralentissant le ruissellement de surface,
- la réduction de l'érosion en nappe et en rigole, en prévenant le développement des rigoles.

Alors, semblable à l'utilisation des contours, dans les champs où la culture en bandes est pratiquée, le CN a été réduit de la valeur calibrée par 3 unités (fig. 94). Ainsi, le tableau 63 fournit des recommandations pour les valeurs USLE_P dans les conditions de culture en bandes. En plus de ces deux paramètres, la simulation d'aménagement en culture en bandes nécessite l'ajustement de deux autres paramètres tels que le coefficient de rugosité de Manning du sol (OV_N) et le facteur de couverture des cultures (USLE_C). Ces derniers ont été ajustés en fonction des valeurs moyennes pondérées pour les bandes. La moyenne pondérée peut être calculée en fonction de la superficie de chaque bande dans le champ. Les valeurs utilisées donc ont été basées sur des recherches scientifiques qui concernent la modélisation des pratiques agricoles (Neitsch et al., 2005, Bracmort, et al., 2006, Arabi et al., 2008, El Garouani et al., 2008, Rasolomanana et al., 2012).

V.4.3 Terrasses (Terracing)

L'implémentation des terrasses parallèles dans un champ se traduira par:

- ❖ la réduction du volume de ruissellement de surface en retenant l'eau dans les petites dépressions,
- ❖ la réduction du taux d'écoulement de pointe en réduisant la longueur de la pente,
- ❖ la réduction de l'érosion en nappe et en rigole par une augmentation de décantation des sédiments dans les eaux de ruissellement, en réduisant la puissance érosive des eaux de ruissellement, et en prévenant la formation des rigoles et des ravines.

Toutefois, la simulation d'aménagement en terrasses a été fondée sur l'ajustement du numéro de courbe (CN), le facteur des pratiques de soutien USLE (USLE_P) et la moyenne de la longueur de pente (SL). En se basant sur la figure 94, la valeur du CN a été réduite de 6 unités par rapport à sa valeur calibrée afin de représenter l'impact des terrasses parallèles sur le volume d'écoulement de surface. Le tableau 63 présente les valeurs du facteur P pour les terrasses. La moyenne de la longueur de pente SL devrait être réglée à un maximum de la distance entre les terrasses. Cette valeur a été modifiée d'après ASAE (ASAE, 2003).

V.5 Application de la modélisation sur l'oued Boukiou

V.5.1 Calage et validation des deux modèles GR et GARDENIA

V.5.1.1 Le calage

A- Pas de temps annuel

✓ Pour le pas de temps annuel **GR1A**, nous avons utilisé une période comprise entre 1974-1975 et 2003-2004 avec comme données d'entrées la pluie, l'évapotranspiration calculée par la méthode Turc et Thornthwaite, et la lame d'eau écoulées observée. Nous avons procédé manuellement au changement de la valeur du paramètre X toute en respectant l'intervalle du modèle [0.13, 3.5] et en l'augmentant de 0.001 pour chaque manipulation jusqu'à l'obtention des valeurs optimales du coefficient du critère de Nash-Sutcliffe et du coefficient de détermination R^2 de la corrélation entre les débits calculés et ceux observés.

✓ Pour le modèle **Gardénia** avec le pas de temps annuel, nous avons utilisé la même période de données 1974-1975 et 2003-2004, le procédé de calibration est de type semi-automatique.

B- Pas de temps mensuel

✓ L'application du modèle mensuel GR2M sur les données des pluies mensuelles, L'évapotranspiration calculée par la méthode Turc et Thornthwaite et lames d'eau mensuelles écoulées sur une période qui s'étale de Septembre 1974 à Août 2004, nous avons modifié les valeurs des deux paramètres

X_1 : Capacité du réservoir de production (mm),

X_2 : Paramètre d'échanges (mm) après plusieurs simulations, toute en prenant compte des intervalles jusqu'à l'obtention des valeurs optimum.

Pour le modèle Gardénia avec le pas de temps mensuel, nous avons utilisé la même période de Septembre 1974 jusqu'à Août 2004.

C- Pas de temps journalier

- Comme pour le modèle GR1A et GR2M lors du calage du modèle GR4J, nous avons procédé au changement des valeurs des paramètres X_1 , X_2 , X_3 et X_4 (tableau 57) sur deux périodes, de deux séries durant une période excédentaire (1 Septembre 1974 au 31 Août 1975) et (1 Septembre 2009 au 31 Août 2010) et deux autres séries durant une période déficitaire (1 Septembre 1989 au 31 Août 1990) et (1 Septembre 1994 au 31 Août 1995).
- Pour le modèle Gardénia avec le pas de temps journalier, nous avons utilisé les mêmes périodes que le modèle GR4J.

V.5.1.2 Validation

A- Pas de temps annuel

✓ Pour la validation du modèle, de nouvelles données des précipitations et d'évapotranspiration correspondant à la période (2004/2005-2013/2014) ont été utilisées. Le calcul est lancé en prenant pour le paramètre X la valeur trouvée lors du calage. Les valeurs trouvées des débits sont alors comparées aux valeurs observées par corrélation linéaire simple.

✓ Pour le modèle Gardénia après le calage, nous allons introduire les paramètres optimisés après le calage pour la phase de validation en prenant la continuité de la série 2004-2014.

B- Pas de temps mensuel

✓ Pour la validation du modèle de nouvelles données des précipitations et d'évapotranspiration correspondant à la période de Septembre 2004 à Août 2014 et qui n'ont pas été utilisées lors du calage sont introduites. Le calcul est lancé en prenant pour les paramètres X_1 et X_2 les valeurs optimisées lors du calage. Les valeurs des débits issues du modèle sont alors comparées aux valeurs observées par corrélation linéaire simple.

✓ Pour le modèle gardénia après le calage suivant des paramètres optimisés, nous avons procédé à la validation du modèle par de la période septembre 2004 à Aout 2014.

C- Pas de temps journalier

✓ Pour la validation du modèle GR4J de nouvelles données des précipitations et d'évapotranspiration correspondant aux deux périodes, deux séries durant une période excédentaire (1Septembre 1975 au 31 Août 1976) et (1Septembre 2010 au 31 Août 2011) et deux autres séries durant une période déficitaire (1Septembre 1990 au 31 Août 1991) et (1Septembre 1995 au 31 Août 1996). Le calcul est lancé en prenant pour les paramètres X_1 , X_2 , X_3 et X_4 les valeurs optimisées lors du calage. Les valeurs des débits issues du modèle sont alors comparées aux valeurs observées par corrélation linéaire simple.

✓ Pour le modèle Gardénia le même processus de la validation que le modèle GR4J.

V.6 Résultats et discussions

Les deux modèles qui viennent d'être choisis, ont été recensés comme les modèles les plus utilisés et les plus performants vu les résultats obtenus lors de leurs applications sur un grand nombre de bassins versants méditerranéens.

Tableau 64. Justificatif du choix des modèles.

Modèles	Applications
GR	Existence de multiples applications : (Kabouya, 1990 ; Bouanani et al., 2010 ; Berezzoug, 2013) Gherissi, 2017 ; Djellouli, 2017 ; Baahmed, 2015 ; Bakriti, 2014 ; Abdi, 2015, Meddane, 2012 ; Bourek, 2010 ; Otmame, 2015, 2019, Amiar, 2014, 2021, Haddour, 2021, Zennaki, 2021, Bougara, 2022.
GARDENIA	Roche et Thiéry, 1984 ; Thiéry, 1991, 2003, 2013, 2014 et 2015 ; Gaaloul, 1992 et 2008, Djellouli, 2017 ; Gherissi, 2018 ; Bendjema, 2020 ; Amiar, 2021

V.6.1 Le modèle GR

V.6.1.1 Le modèle annuel GR1A

A partir la superposition des deux courbes celle des débits simulés et observés pour les deux méthodes Thorntwaite et Turc (fig.95 & fig. 97), et des valeurs des coefficients de corrélation supérieure à 85% (fig.96 & fig.98). Le calage parait correct, les valeurs du critère de Nash obtenues sont bonnes, elles sont comprises entre (75.4% et 71.1%) (tab.65). Le bilan est assez équilibré, il est de 108.6% pour la formule de Thorntwaite. Toutefois, l'évapotranspiration résultante de la formule de Thorntwaite donne de meilleurs résultats que celle de Turc.

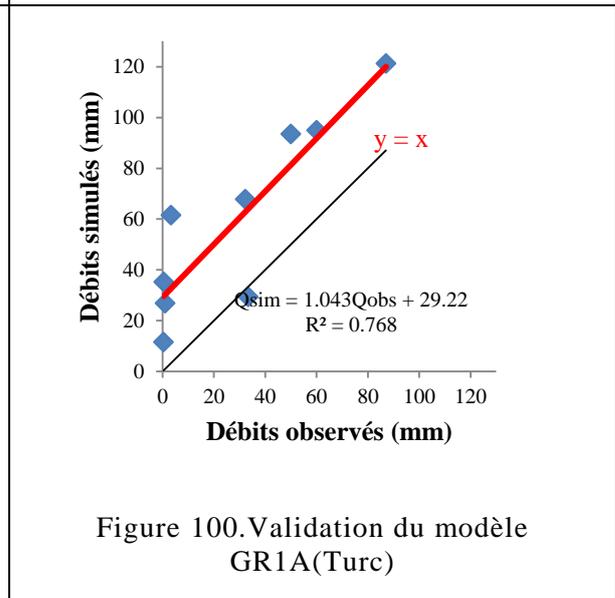
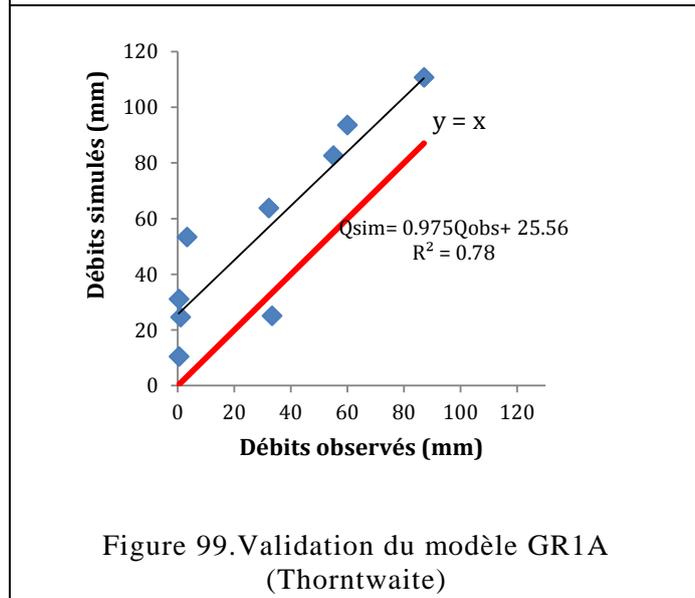
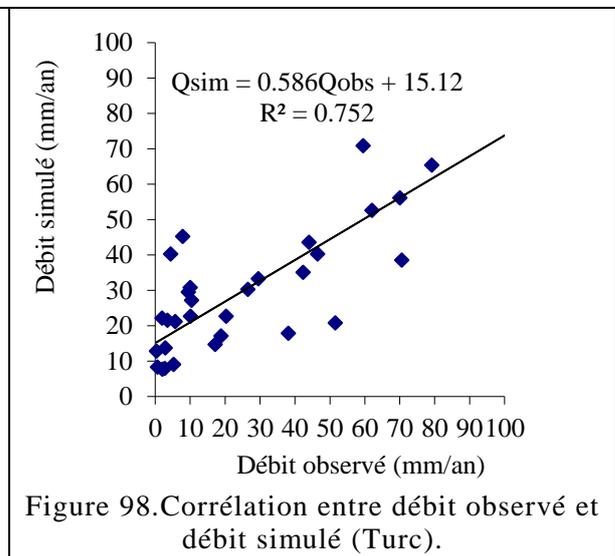
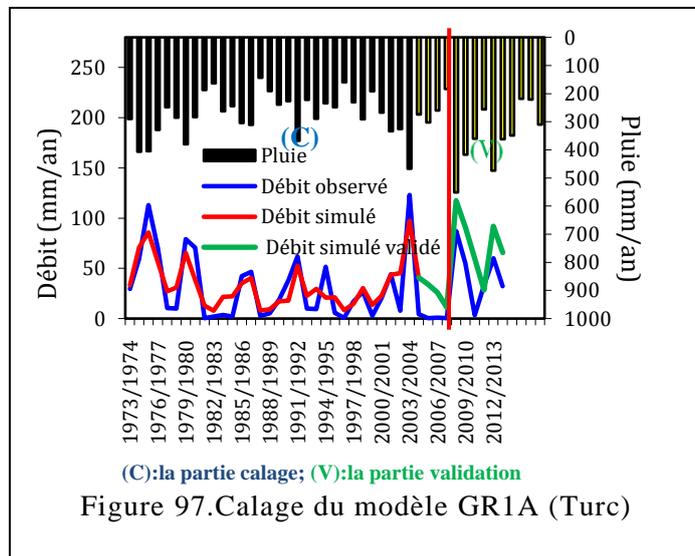
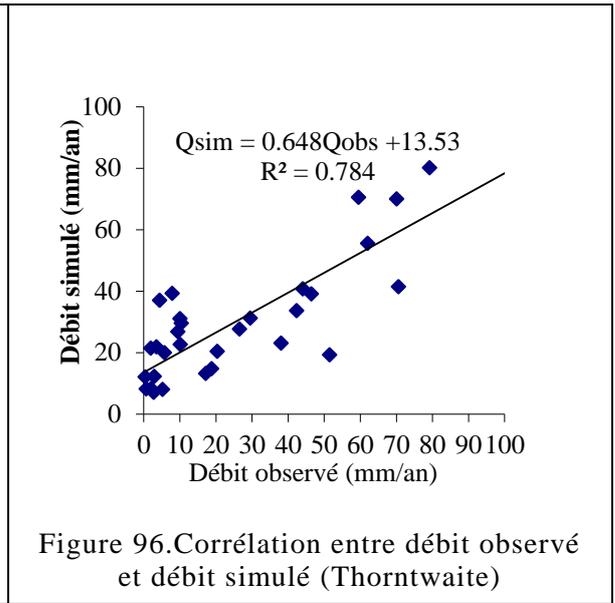
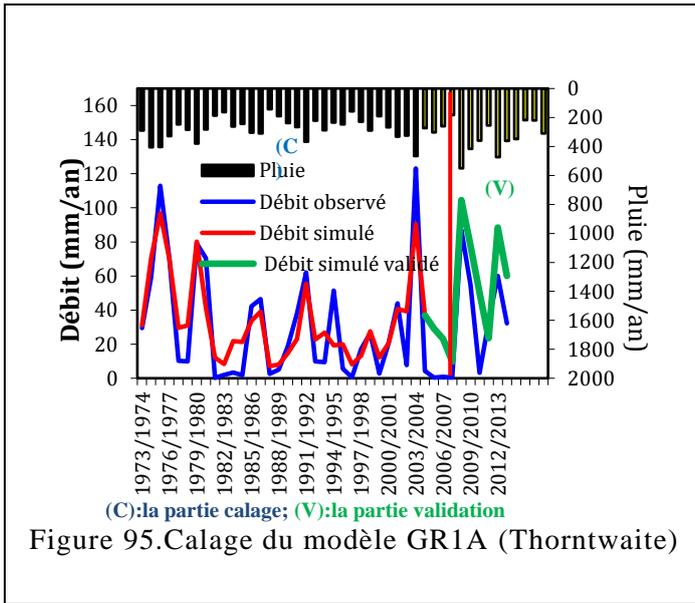
Le coefficient de correction de l'évapotranspiration $X1 < 1$, ce qui nous laisse penser que le système en gagne de l'eau cela indique que le modèle simule un apport d'eau provenant des bassins voisins. En effet, on peut considérer qu'avec l'arrivée de la pluie au sol, les échanges avec les nappes profondes se déclenchent, d'où une infiltration souterraine vers l'alimentation des nappes tout au long de l'oued

Pour la validation, A partir des résultats obtenus (tab.65), la modélisation pluie-débit élaborée par utilisation du GR1A sur nos données donne des résultats 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.99 & fig. 100).

Tableau 65. Résultats obtenus des phases de calage et validation par le GR1A

Thornthwaite				Turc					
Calage			Validation	Calage				Validation	
X	Nash (Q)%	Bilan (%)	R (%)	R (%)	X	Nash (Q)%	Bilan (%)	R (%)	R (%)
0.62	75.41	108.57	88.54	88.31	0.56	71.1	107.46	86.71	87.63



V.6.1.2 Le modèle mensuel GR2M

A partir des résultats obtenus (tableau 66), les valeurs du critère de Nash de 72.3 et 74,2%, les valeurs du coefficient de corrélation $R=83.7$ et 84.9% (fig.102 & 104), le bilan assez équilibré de 92 et 90% et la bonne superposition des deux courbes (fig. 101 & 103), celle des débits simulés et calculés permettent de dire que le modèle est bien calé. Les valeurs des paramètres de calage X1 et X2, respectent les bornes de l'intervalle de confiance.

La valeur du paramètre X2 est positive, cela indique que le modèle simule un apport d'eau provenant probablement des échanges avec les nappes d'eau profondes confirmant ainsi les résultats du GR1A.

L'allure générale des courbes des débits mensuels simulés semble proche de celles des débits observés sur le bassin (fig.101 & 103). La distinction se fait particulièrement au niveau des périodes de crue (Avril 1975, Février 1987, Février 2001 et Novembre 2001) où le modèle enregistre une sous-estimation des débits simulés par rapport aux débits observés. Cette sous-estimation est due à l'écoulement qui n'a pas atteint rapidement son maximum dû à la réponse tardive du bassin causée par les pertes en profondeur par infiltration au niveau des failles que le modèle ne prend pas en compte dans sa conception.

La corrélation entre les débits observés et ceux simulés (fig.102 & 104) donne de bons résultats avec un R égal à 0.84 et 0.83, la majorité des points s'alignent autour de la droite à l'exception de quelques points qui se trouvent soit au-dessus ou au-dessous de la droite donc ces débits sont soit sur ou sous-estimés. Ces écarts sont du principalement aux périodes sèches ou humides, généralement en période sèche les pluies sont rares, le sol est à l'état sec et l'alimentation du cours d'eau se fait uniquement par la vidange des nappes ou par les échanges avec les autres bassins, ce qui rend le débit observé supérieur au débit simulé.

Au passage à la validation (tab.66) et (fig. 101 & 103 (V)), une dégradation dans les valeurs d'optimisation a été enregistrée. Pour les périodes humides ((fig. 101 et 103) (Avr 75, Mars 86, Fév 87, Fév 01 et Fév 03) le modèle a bien simulé les débits observés, contrairement aux périodes d'étiages où l'hydrogramme simulé semble sous-estimer les débits observés. Cette dégradation est due d'une part à la sécheresse qui a affecté la région durant la fin des années 1980 et qui a considérablement affecté les écoulements de surface et l'apport des sources, d'autre part à l'importante de faibles valeurs de débits et/ou de précipitations influençant la qualité de la validation, le modèle réagit mal aux valeurs faibles des précipitations et débits.

Tableau 66. Résultats obtenus calage et validation par le GR2M

Septembre 1974 à Août 2004	Critères	Valeurs calage	Valeurs Validation
ETP (Turc)	X ₁ (mm)	141.46	141.46
	X ₂ (mm)	0.67	0.67
	S ₀ (mm)	70.73	70.73
	R ₀ (mm)	30	30
	Nash%	72.32	72.32
	Bilan%	92	92
	R%	83.66	83.78
ETP (Thornthwaite)	X ₁ (mm)	142.45	142.45
	X ₂ (mm)	0.541	0.541
	S ₀ (mm)	71.23	71.23
	R ₀ (mm)	30	30
	Nash%	74.16	74.16
	Bilan%	90.24	90.24
	R%	84.91	87.97

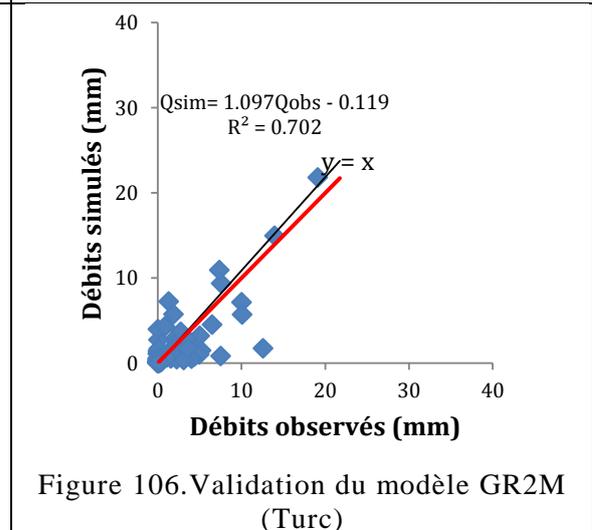
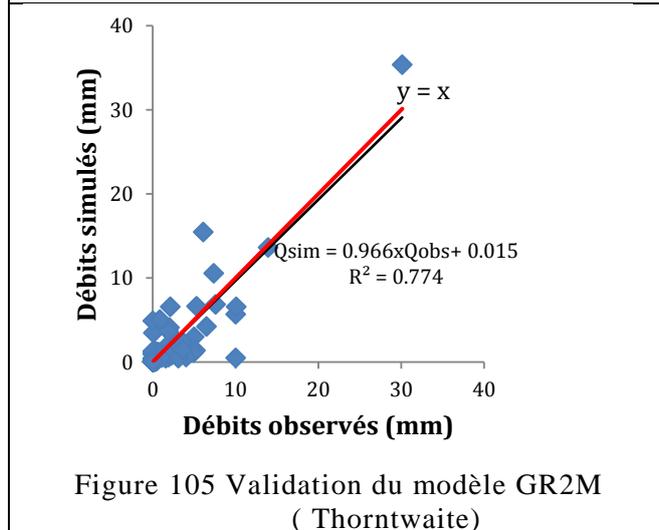
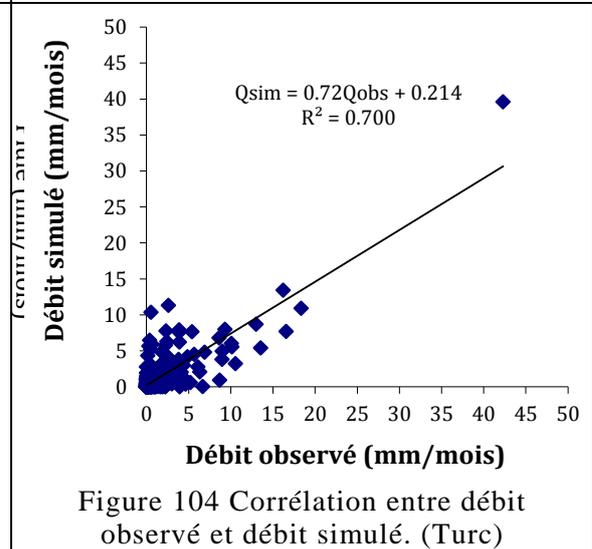
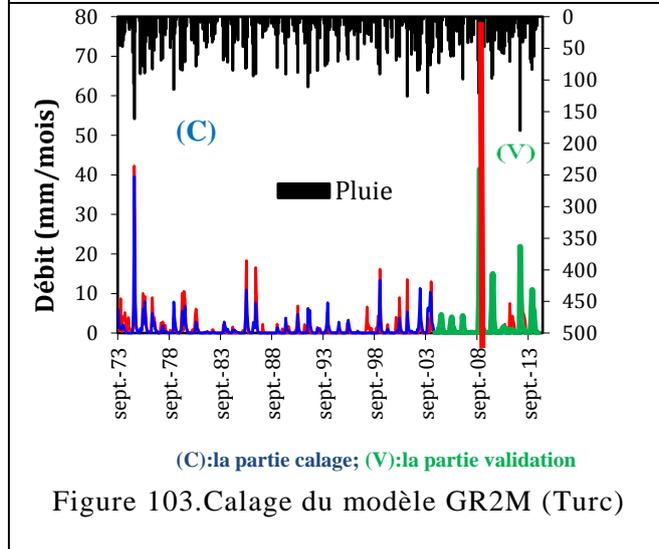
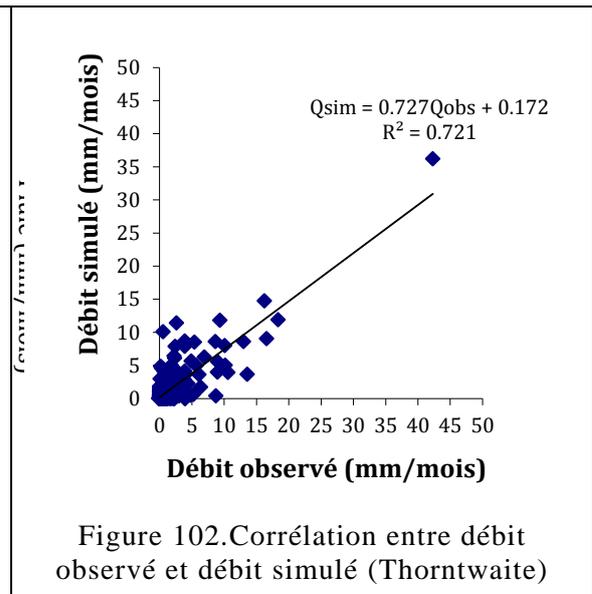
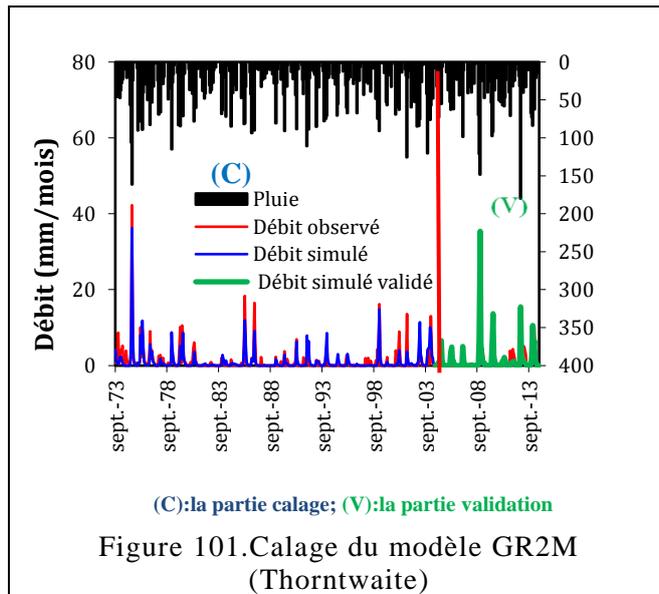
X₁ : Capacité du réservoir de production (mm),

X₂ : Paramètre d'échange (mm),

S₀ : Niveau de remplissage initial du réservoir de routage,

R₀ : Niveau de remplissage initial du réservoir de production (max. : 60mm),

R% : Coefficient de corrélation.



V.6.1.3 Le modèle journalier GR4J

Avec une valeur de Nash égale à 83% et 87.9% (tab.67), un bilan assez équilibré égal à 92% et 93.1% (tab. 67), un coefficient de corrélation $R=83.6\%$ et 88.31% (fig. 108 & 109) et une bonne concordance des deux courbes, celle des débits simulés et calculés (fig. 107(C)), nous pouvons dire que le modèle est assez bien calé.

Les valeurs des paramètres d'optimisation X_1 , X_3 et X_4 respectent les bornes de l'intervalle de confiance. Le paramètre d'échange (X_2) est négative pour la période excédentaire, ce qui indique que le modèle simule une perte d'eau, en effet, on peut considérer qu'avec l'arrivée de la pluie au sol, les échanges avec les nappes profondes se déclenchent, d'où une infiltration souterraine vers l'alimentation des nappes tout au long de l'oued.

En analysant les hydrogrammes des débits observés et ceux des débits simulés pour la période de calage (fig. 107 (V)), nous assistons à une reconstitution des débits journaliers assez satisfaisante avec généralement une tendance à la sous-estimation (01/02/2001, 27/02/2001, 09/10/2002 et 25/11/2002) ou surestimation (18/11/2001, 15/04/2002 et 11/05/2002) des pics. Cette surestimation est due à l'écoulement qui n'a pas atteint rapidement son maximum dû à la réponse tardive du bassin, en effet, les pertes en profondeur par infiltration au niveau du réseau de failles caractérisant le bassin fait retarder la réponse au niveau de la station hydrométrique.

Les résultats du tableau 67, reflètent la faculté du modèle GR4J à représenter les débits observés dans des conditions meilleures.

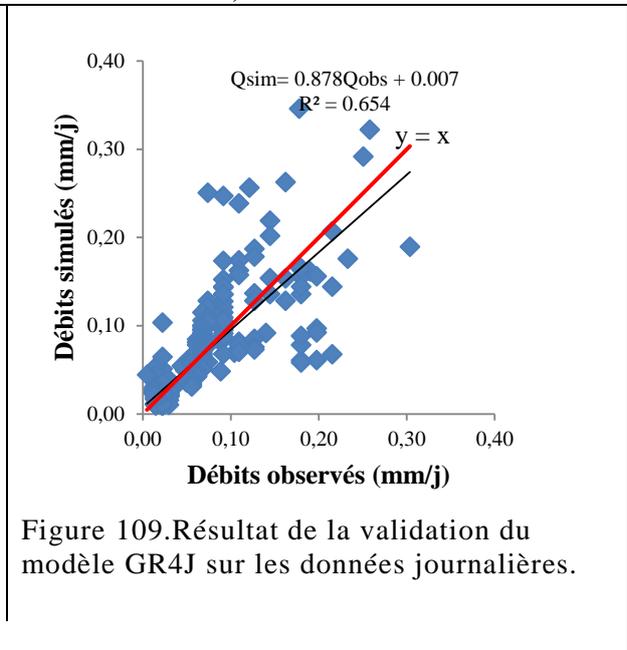
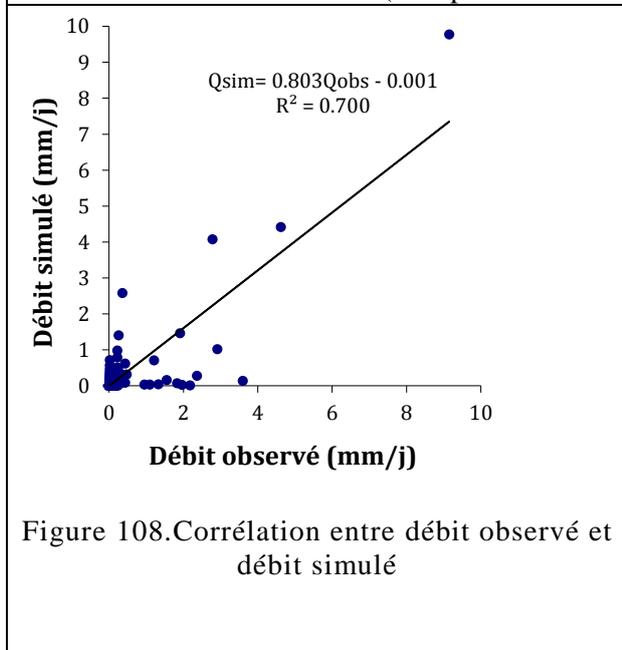
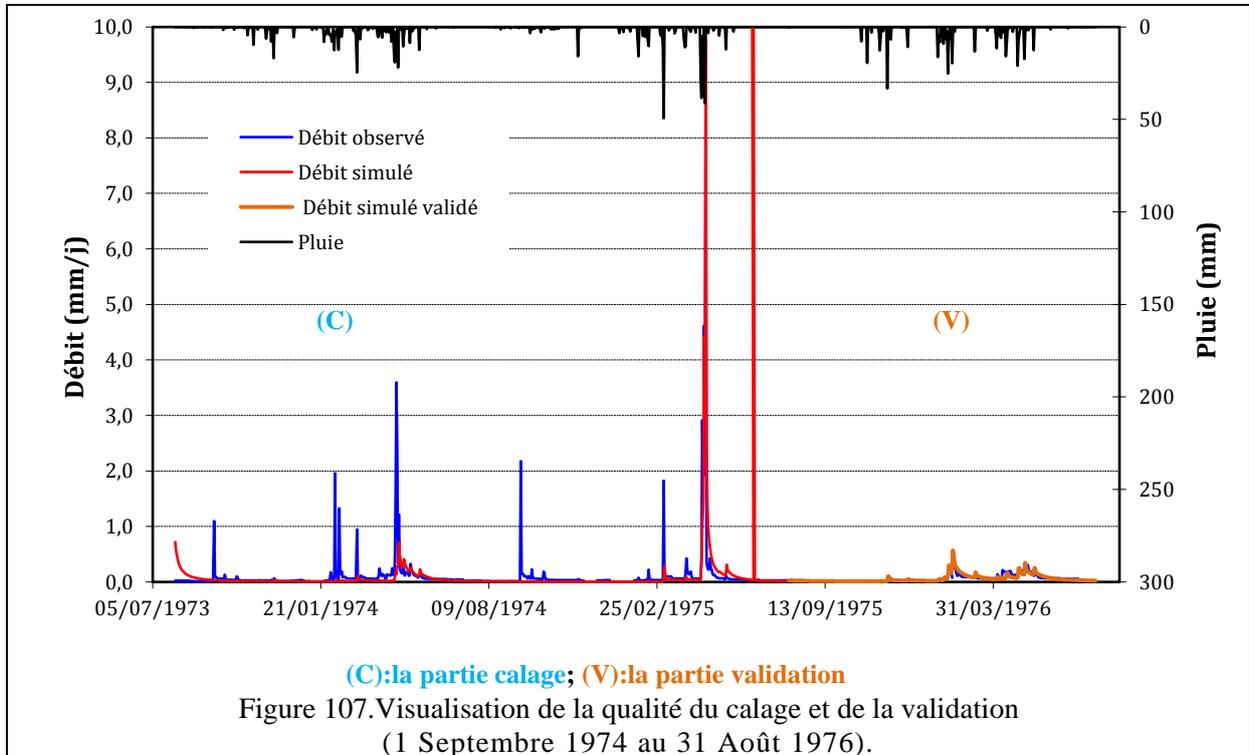
Une dégradation dans les valeurs des paramètres d'optimisation a été enregistrée lors de la phase de validation (tab. 67) avec une valeur de Nash égale à 69.3% et un coefficient de corrélation $R = 0.80$ (fig. 111) ceci peut s'expliquer par l'irrégularité des précipitations au cours des jours et surtout de l'état du sol (saturation et occupation) et des conditions géologiques.

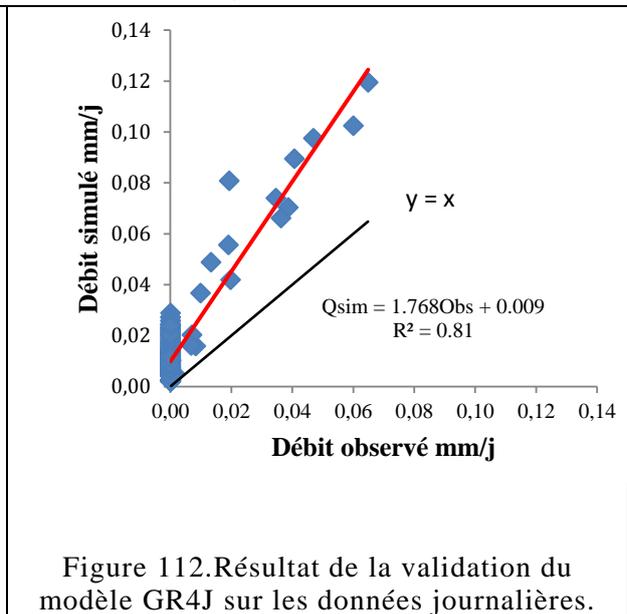
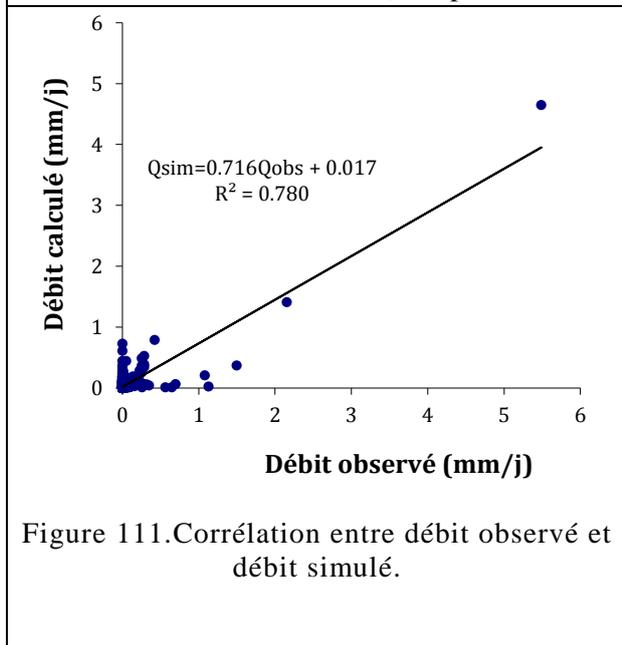
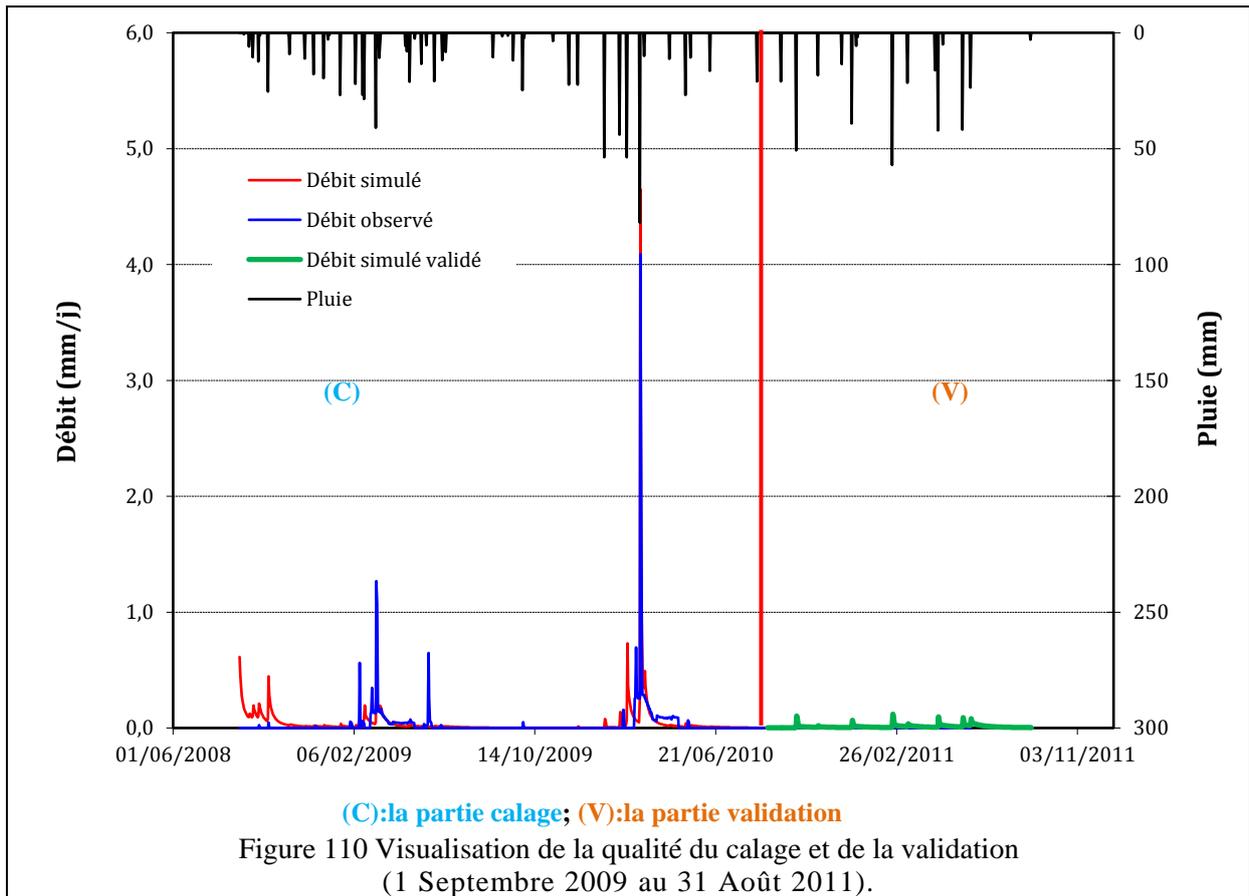
L'hydrogramme simulé montre des fluctuations importantes entre les débits observés et ceux simulés (fig. 113(V) et 116(V)), il n'arrive pas à bien reconstituer la majorité des crues avec une tendance générale à sous-estimer les pics. Cette sous-estimation est notable pour toute la période de validation.

Tableau 67. Résultats du calage et validation GR4J.

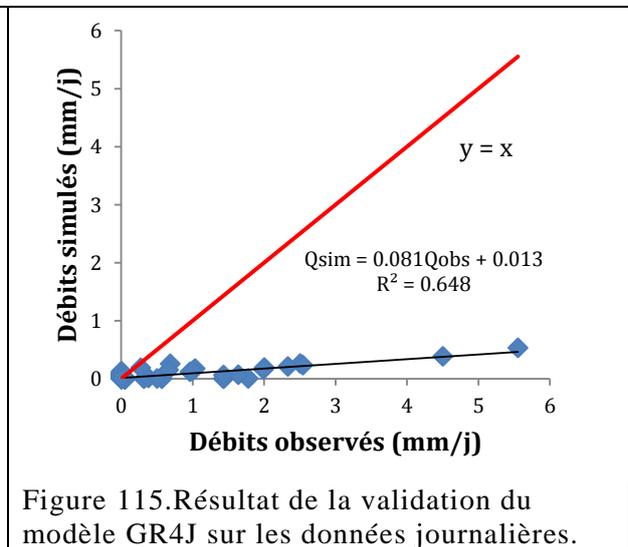
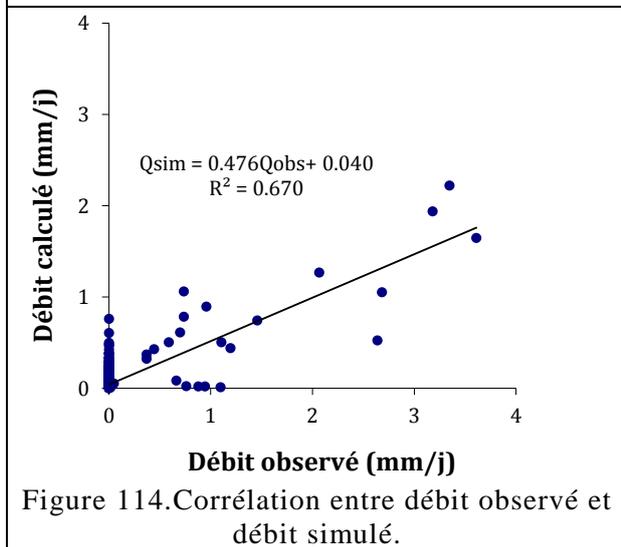
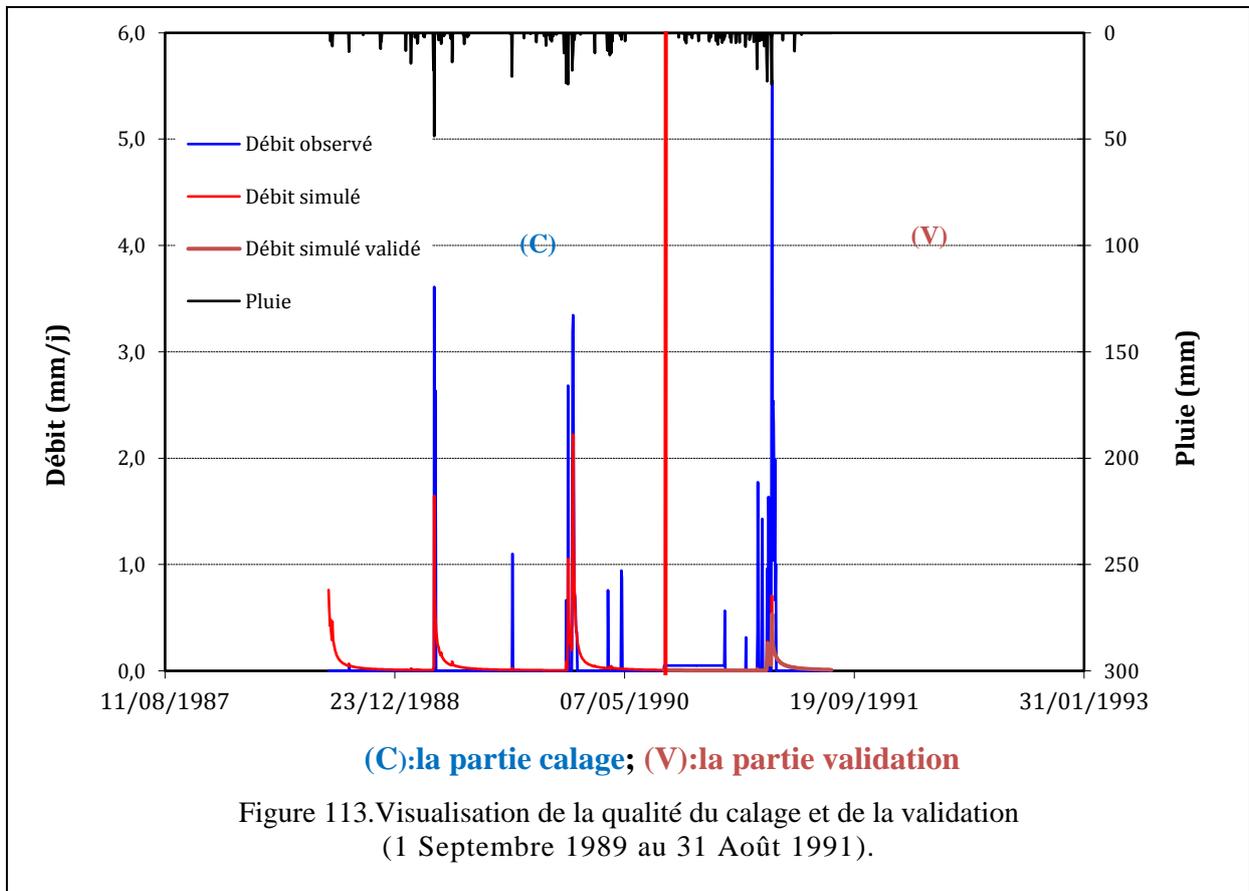
Période		Paramètres				Critères de qualité et d'optimisation (Calage)			Validation
		X_1 (mm)	X_2 (mm)	X_3 (mm)	X_4 (jour)	Nash (%)	Bilan (%)	R (%)	R%
Période Excédentaire	1 Septembre 1974 au 31 Août 1976	194.42	-0.53	20.29	1.70	83.0	92	83.66	80.87
	1 Septembre 2009 au 31 Août 2011	239.85	-2.06	20.09	1.95	87.9	93.1	88.31	90
Période Déficitaire	1 Septembre 1989 au 31 Août 1991	100.48	0.02	20.09	0.69	71.2	102.8	81.85	80.49
	1 Septembre 1994 au 31 Août 1996	101.49	0.05	20.09	1.05	69.3	93.5	84.67	80

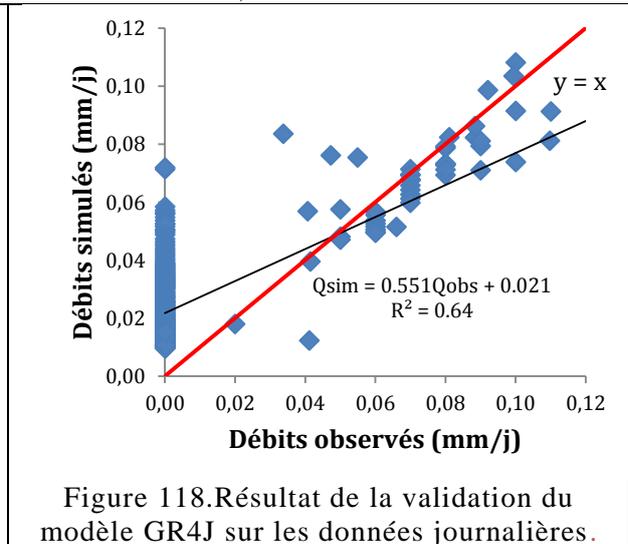
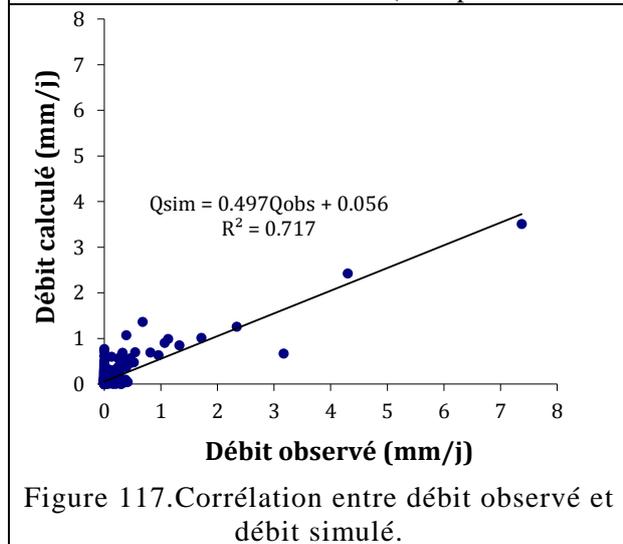
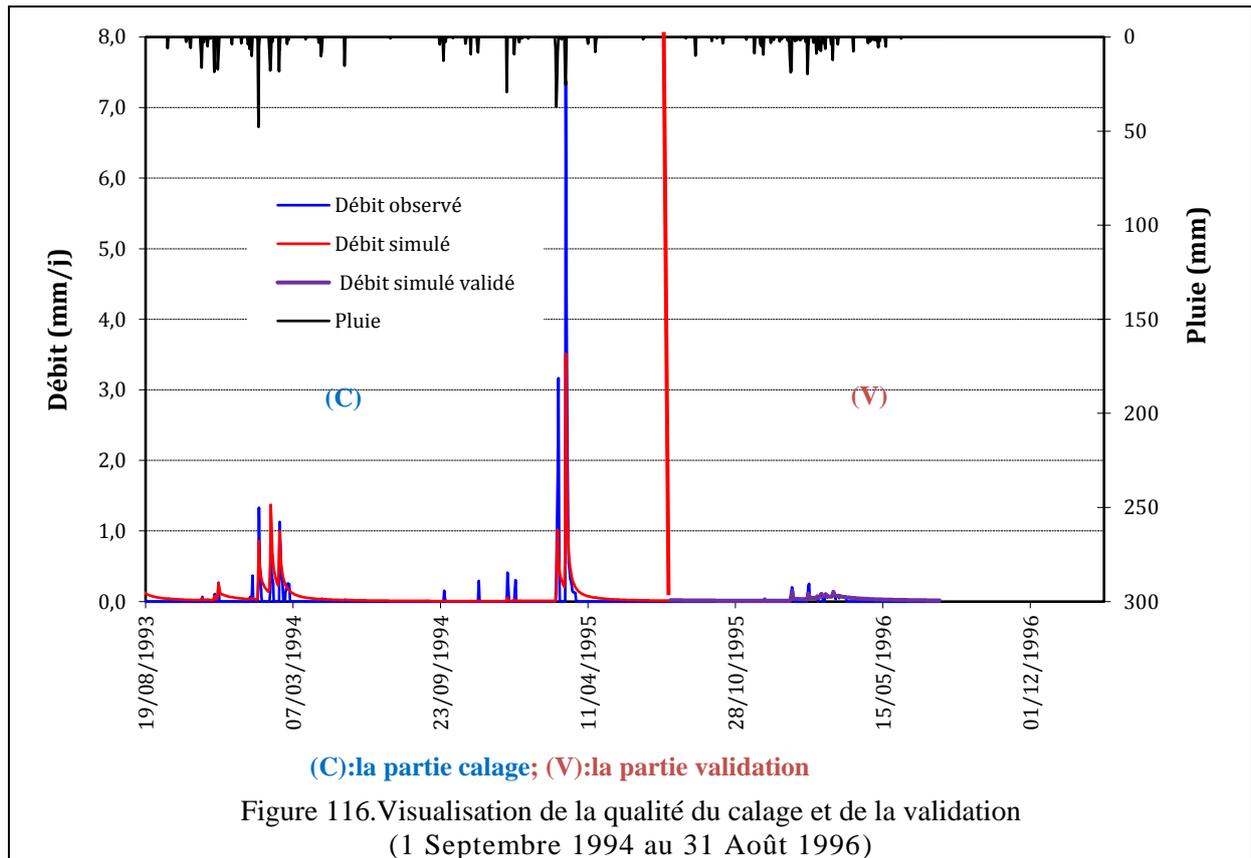
V.6.1.3.1 Périodes excédentaires





V.6.1.3.2 Périodes déficitaires





V.6.2 Le modèle Gardénia

V.6.2.1 Le modèle Gardénia annuel

Après plusieurs essais de calibration de type semi-automatique, le Gardénia annuel est bien calé, les paramètres dans les deux méthodes Thorntwaite et Turc sont déterminés et ont pu être introduits dans la phase de la validation, aussi les critères de qualité sont bien optimisés (tableau 68-71).

L'application du modèle nous donne une représentation graphique qui illustre les débits observés et les débits simulés en fonction des années pour les deux phases calage et validation pour les deux méthodes (fig. 119-122)

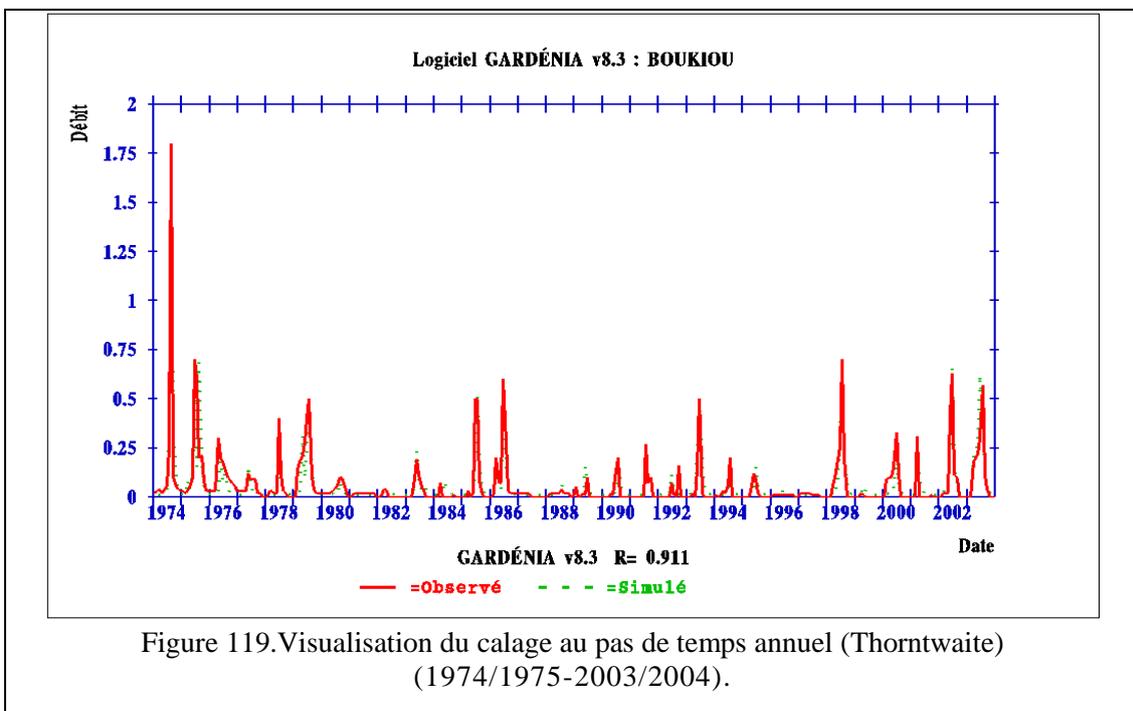
V.6.2.1.1 Annuel (Thorntwaite)

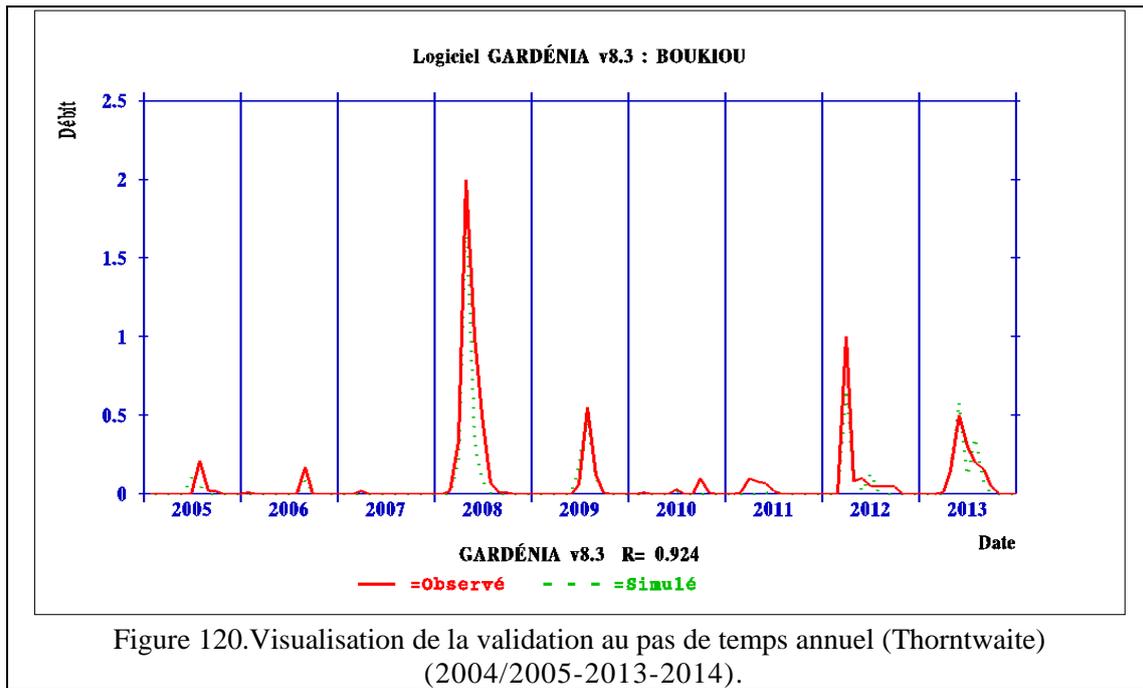
Tableau 68.Résultats du calage des paramètres au pas de temps annuel.

Période de calage et validation (Thorntwaite) (1974/1975 - 2013/2014)	
Paramètres hydrologiques	Valeurs
Correction globale des pluies (%)	6.0725
Correction globale de l'ETP	-2.8451
Capacité de la réserve superficielle (mm)	0.0000
Capacité de la réserve superficielle progressive (mm)	126.02
Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation (mm)	294.14
Temps de ½ montée (temps de ½ percolation) (mois)	0.1000
Temps de ½ tarissement souterrain 1 (mois)	0.52660
Retard (propagation) des débits (en pas de temps)	1.0000E-02
Facteur d'échange externe (%)	-57.400
Déficit initial de la réserve superficielle (mm)	0.0000
Déficit initial de la réserve superficielle progressive (mm)	328.00

Tableau 69.Critères de qualité et d'optimisation.

Mode	Nash (%)	R
Calibration	83.05	91.10
Validation	85.39	92.40





V.6.2.1.2 Annuel (Turc)

Tableau 70. Résultats du calage des paramètres au pas de temps annuel.

Période de calage et validation (Turc) (1974/1975 - 2013/2014)	
Paramètres hydrologiques	Valeurs
Correction globale des pluies (%)	7.7086
Correction globale de l'ETP	-15.000
Capacité de la réserve superficielle (mm)	0.0000
Capacité de la réserve superficielle progressive (mm)	156.02
Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation (mm)	43.404
Temps de ½ montée (temps de ½ percolation) (mois)	0.1000
Temps de ½ tarissement souterrain I (mois)	0.55708
Retard (propagation) des débits (en pas de temps)	9.76600E-03
Facteur d'échange externe (%)	-2.3993
Déficit initial de la réserve superficielle (mm)	0.0000
Déficit initial de la réserve superficielle progressive (mm)	328.00

Tableau 71. Critères de qualité et d'optimisation.

Mode	Nash (%)	R
Calibration	79.61	89.20
Validation	74.89	86.50

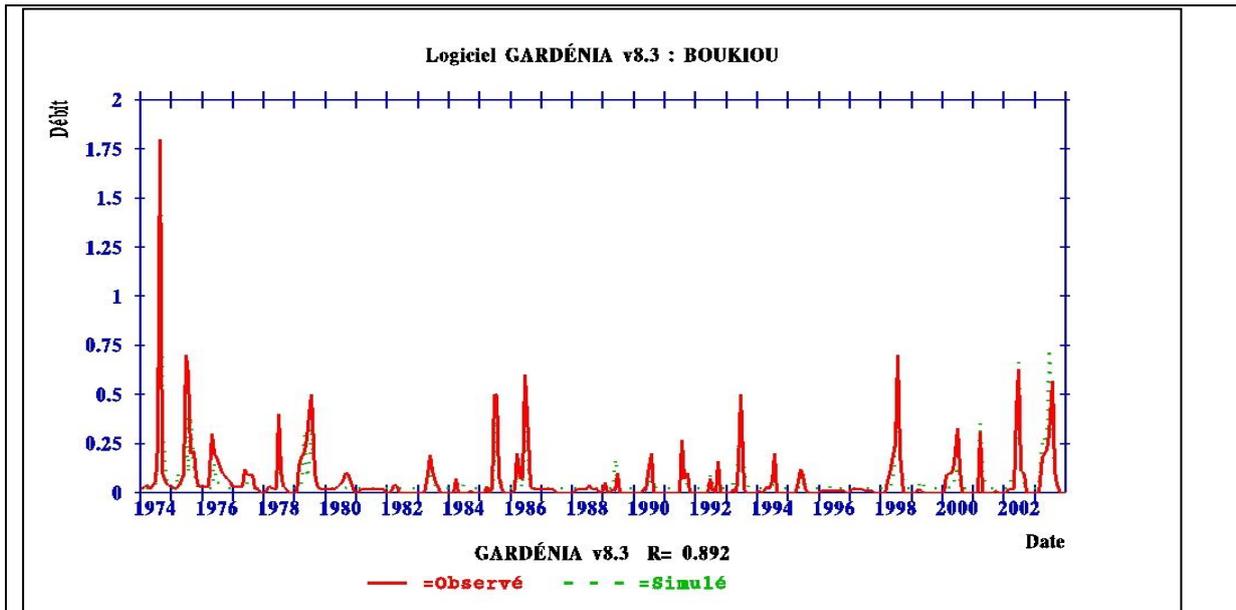


Figure 121. Visualisation du calage au pas de temps annuel (Turc) (1974/1975-2003/2004).

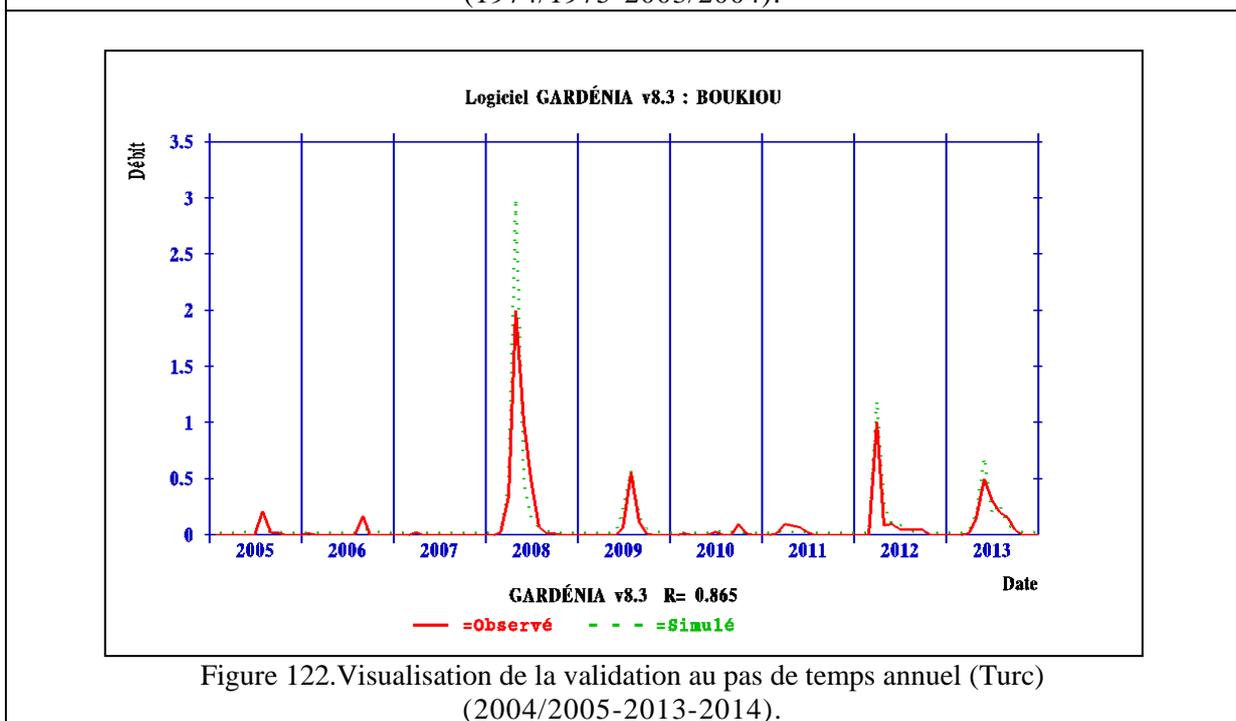


Figure 122. Visualisation de la validation au pas de temps annuel (Turc) (2004/2005-2013/2014).

V.6.2.2 Le modèle Gardénia mensuel

Les paramètres hydrologiques de la phase de calibration semi-automatique du modèle montrent une optimisation satisfaisante permettant la validation de notre modèle. Les critères de qualité pour les deux méthodes durant les deux phases (calibration et validation) s'avèrent excellents (tableau 72-75)

D'autre part les figures 123-126, illustrent une excellente superposition entre les débits observés et simulés durant les deux phases (calage et validation).

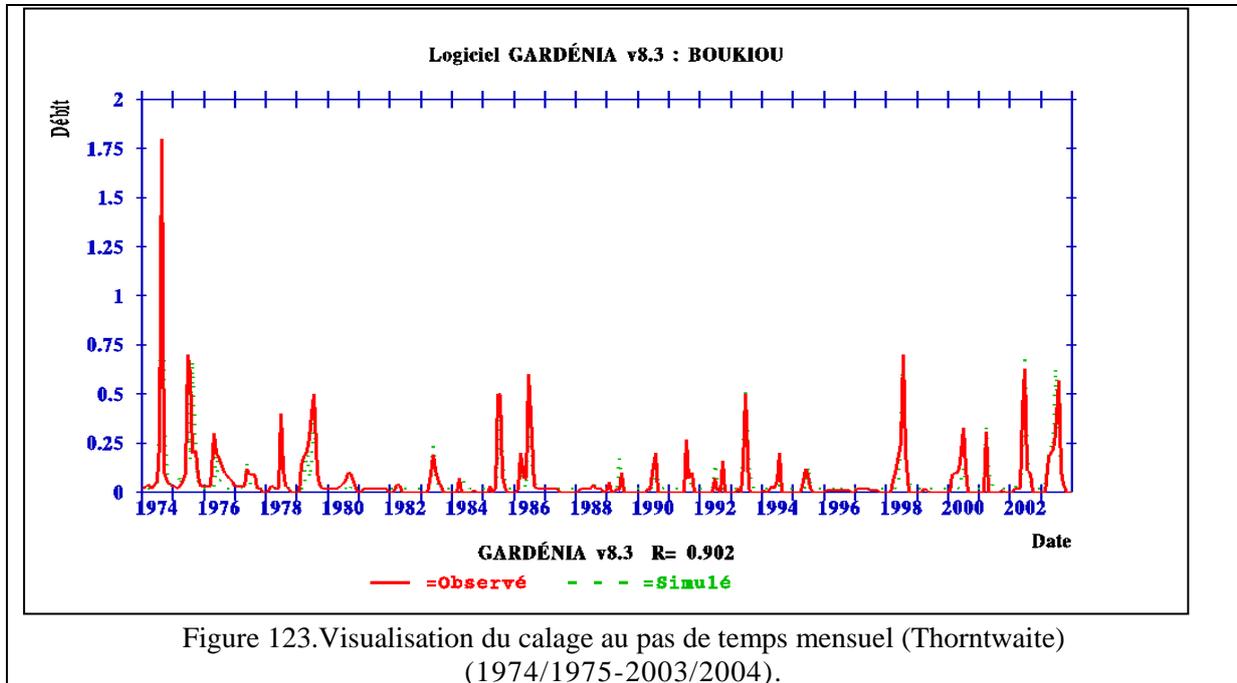
V.6.2.2.1 Mensuel (Thorntwaite)

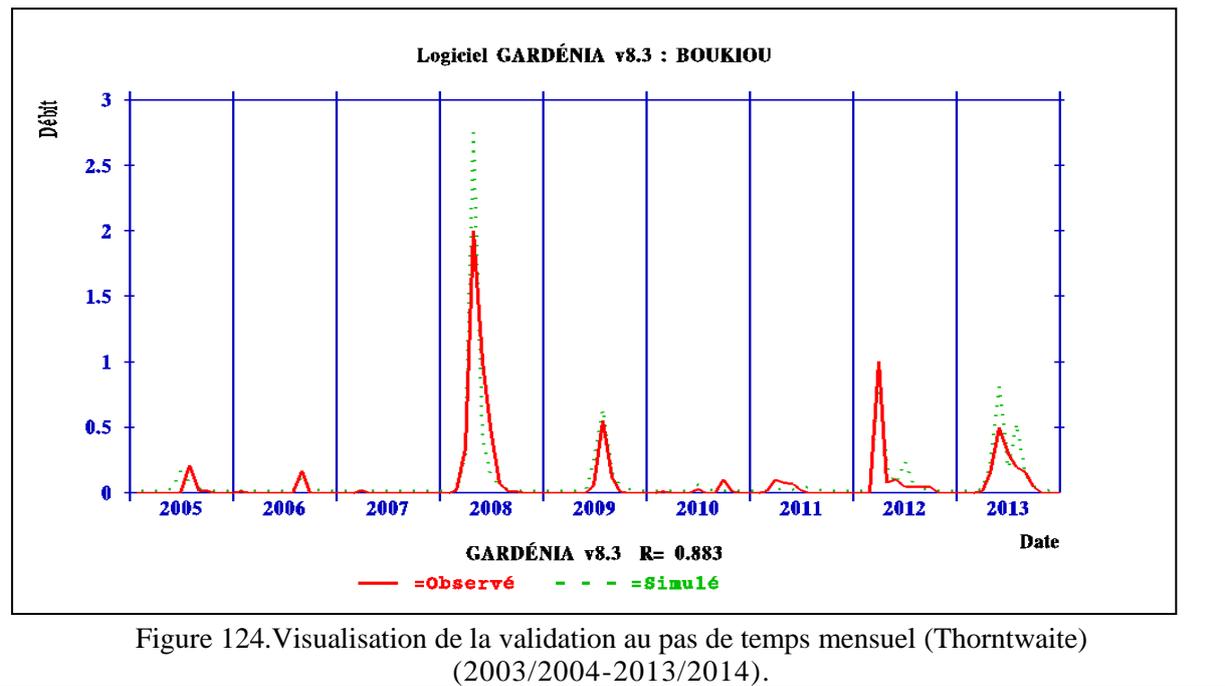
Tableau 72. Résultats du calage des paramètres au pas de temps mensuel.

Période de calage et validation (du 1 Septembre 1974 au 31 Août 2014)	
Paramètres hydrologiques	Valeurs
Correction globale des pluies (%)	-10.000
Correction globale de l'ETP	3.6105
Capacité de la réserve superficielle (mm)	0.0000
Capacité de la réserve superficielle progressive (mm)	80.946
Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation (mm)	214.79
Temps de ½ montée (temps de ½ percolation) (mois)	0.38661
Temps de ½ tarissement souterrain 1 (mois)	0.36254
Retard (propagation) des débits (en pas de temps)	0.0000
Facteur d'échange externe (%)	-45.000
Déficit initial de la réserve superficielle (mm)	0.0000
Déficit initial de la réserve superficielle progressive (mm)	328.00

Tableau 73. Critères de qualité et d'optimisation.

Mode	Nash (%)	R
Calibration	81	90.2
Validation	77.9	88.3





V.6.2.2.2 Mensuel (Turc)

Tableau 74. Résultats du calage des paramètres au pas de temps mensuel.

Période de calage et validation (de 1 Septembre 1974 au 31 Août 2014)	
Paramètres hydrologiques	Valeurs
Correction globale des pluies (%)	10.000
Correction globale de l'ETP	-15.000
Capacité de la réserve superficielle (mm)	0.0000
Capacité de la réserve superficielle progressive (mm)	128.65
Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation (mm)	354.43
Temps de ½ montée (temps de ½ percolation) (mois)	0.10000
Temps de ½ tarissement souterrain 1 (mois)	0.4438
Retard (propagation) des débits (en pas de temps)	8.59100 ^{E-03}
Facteur d'échange externe (%)	-31.896
Déficit initial de la réserve superficielle (mm)	0.0000
Déficit initial de la réserve superficielle progressive (mm)	328.00

Tableau 75. Critères de qualité et d'optimisation.

Mode	Nash (%)	R
Calibration	80.2	89.55
Validation	74.89	86.5

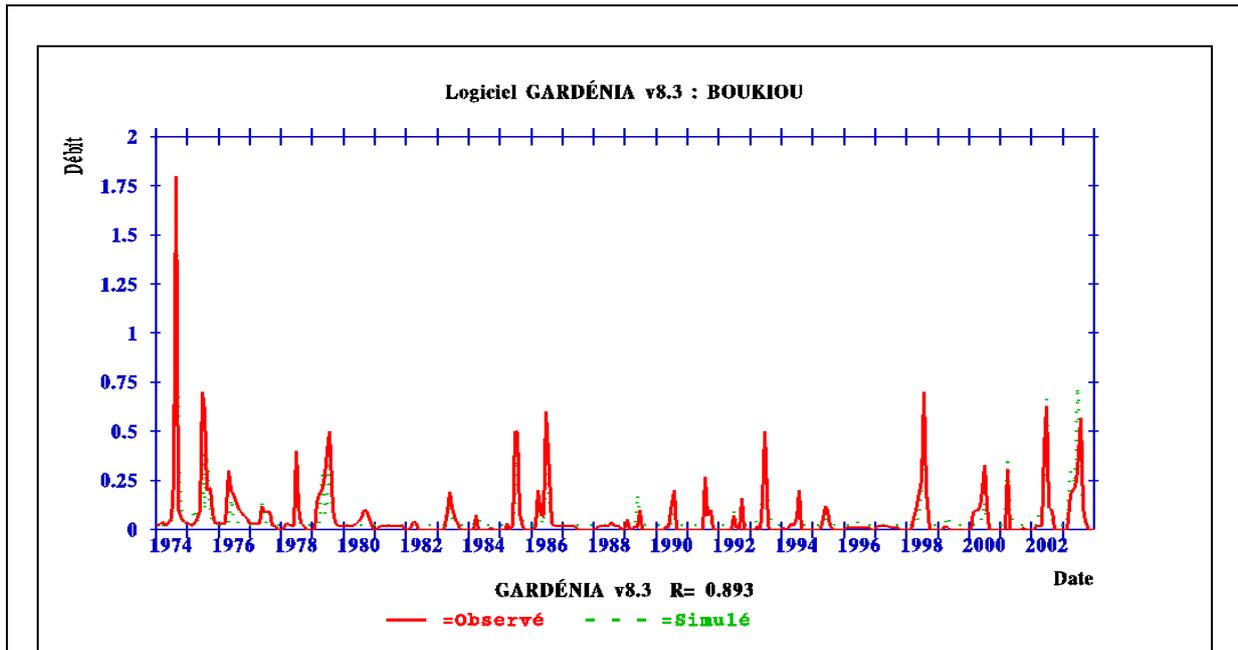


Figure 125. Visualisation du calage au pas de temps mensuel (Turc) (1974/1975-2003/2004).

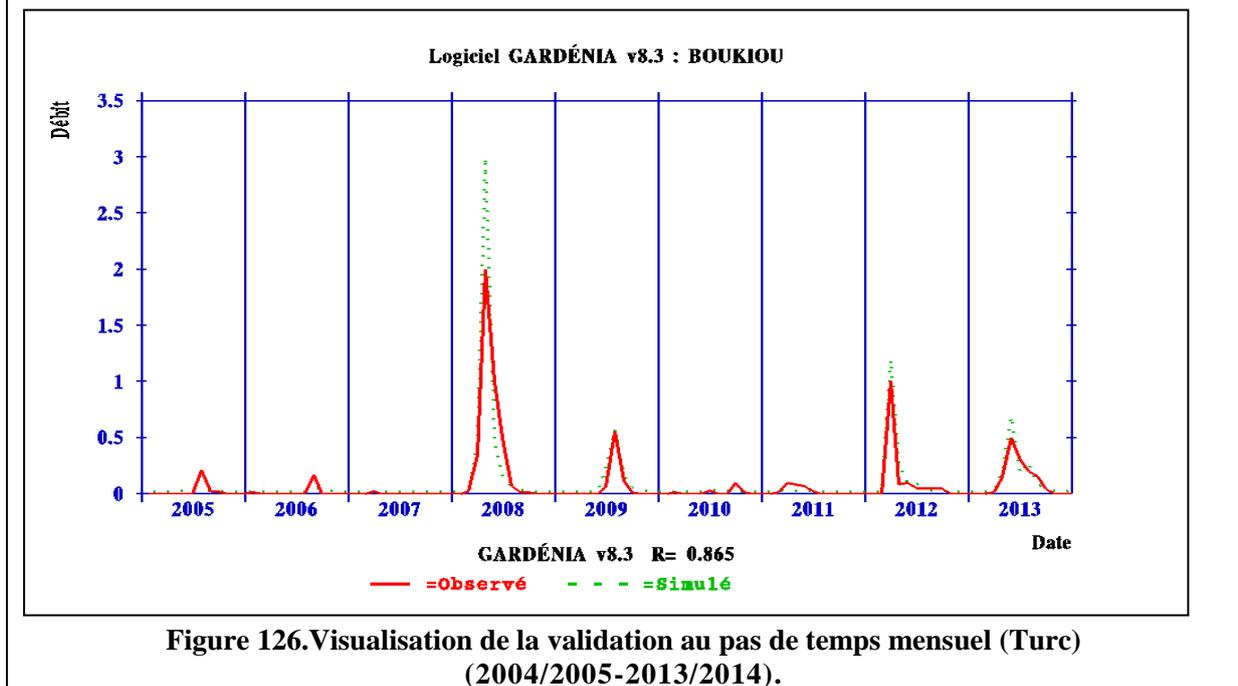


Figure 126. Visualisation de la validation au pas de temps mensuel (Turc) (2004/2005-2013/2014).

V.6.2.3 Le modèle Gardénia journalier

Les résultats du modèle journalier Gardénia après un calage semi-automatique apparaissent dans le tableau 76 :

Tableau 76. Résultats du calage des paramètres au pas de temps journalier.

Paramètres hydrologiques	Période excédentaire		Période déficitaire	
	(1 Septembre 1974 / 31 Août 1976)	1Septembre 2009/ 31 Août 2011)	(1 Septembre 1994 / 31 Août 1996)	(1Septembre 1989 / 31 Août 1991)
Correction globale des pluies (%)	6.5449	9.6021	10.00	8.00
Correction globale de l'ETP	-15.000	-5.4506	-15.00	-7.4947
Capacité de la réserve superficielle (mm)	2.1207	25.906	19.362	0.000
Capacité de la réserve superficielle progressive (mm)	160.40	132.566	36.836	32.82
Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation (mm)	13.060	13.566	1.0000	1.000
Temps de ½ montée (temps de ½ percolation) (mois)	5.00000E-02	5.00000E-02	0.18382	0.20037
Temps de ½ tarissement souterrain 1 (mois)	14.960	14.990	5.0000E-02	5.0000 E -02
Retard (propagation) des débits (en pas de temps)	0.81197	1.0470	0.45000	0.65329
Facteur d'échange externe (%)	-70.000	-70.00	17	11.679
Déficit initial de la réserve superficielle (mm)	1.3000	36.400	0.000	0.1000
Déficit initial de la réserve superficielle progressive (mm)	328.00	329.30	109.3	109.3

L'analyse des paramètres de qualité pour les deux phases calage et validation a déterminé une bonne optimisation des critères sur les périodes excédentaires avec un Nash dépassant les 80% et un Nash apprivoisant les 70% pour les périodes déficitaires (tableau 77) :

Tableau 77. Critères de qualité et d'optimisation

Critère de qualité et d'optimisation	Phase calage			
	(1 Septembre 1974 / 31 Août 1975)	(1Septembre 2009 / 31Août 2010)	(1 Septembre 1994 / 31 Août 1995)	1Septembre 1989 / 31 Août 1990
Nash (%)	91.93	96.61	73.59	77.49
R (%)	95.90	98.29	85.8	88.03
Critère de qualité et d'optimisation	Phase validation			
	(1Septembre 1975/ 31 Août 1976)	1Septembre 2010 / 31Août 2011)	(1 Septembre 1995/ 31 Août 1996)	1Septembre 1990 / 31 Août 1991
Nash (%)	70.65	82.06	70.19	66.36
R (%)	84.10	90.59	83.78	81.46

Les résultats de cette étude sont illustrés par la superposition des courbes des débits observés et simulés comme le montrent les figures 138, 139,140 et 141.

V.6.2.3.1 Le calage et validation de la période excédentaire

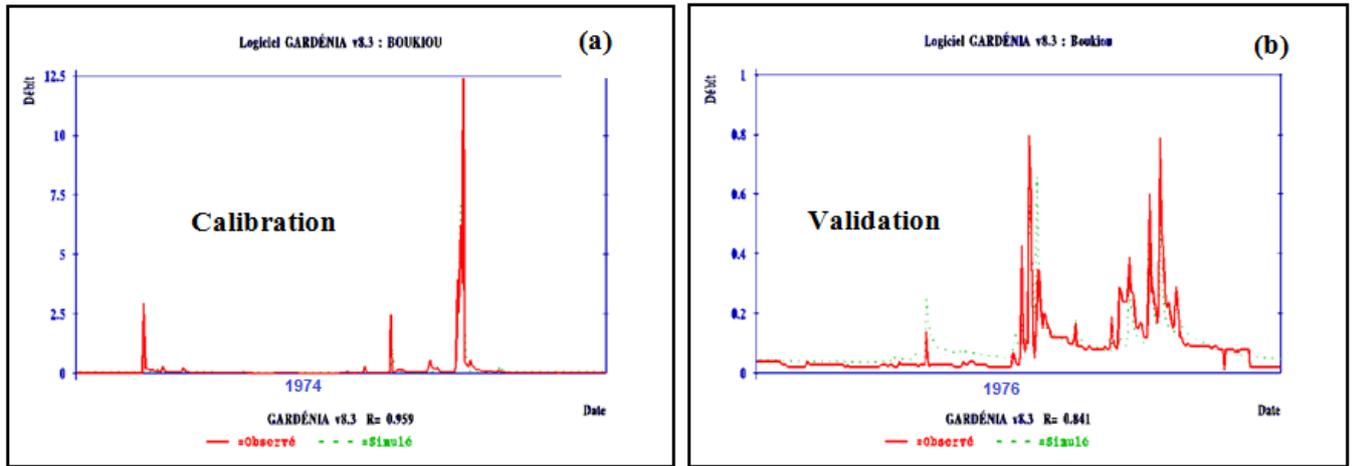


Figure 127 Résultats du calage (a) et validation (b) sur les données journaliers (1974/1976).

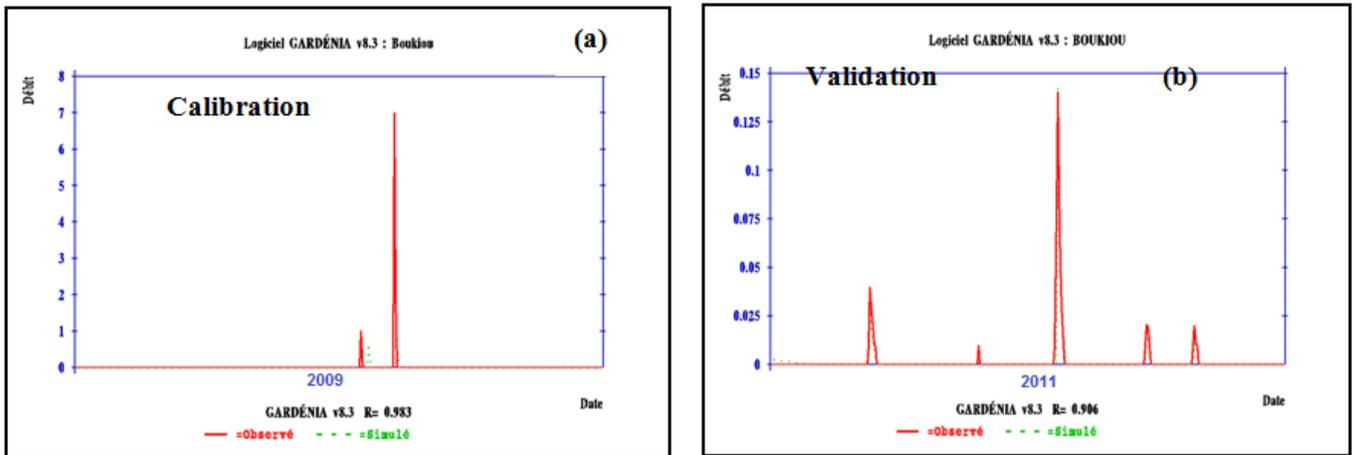


Figure 128 Résultats du calage (a) et validation (b) sur les données journaliers (2009/2011).

V.6.2.3.1 Le calage et validation de la période déficitaire

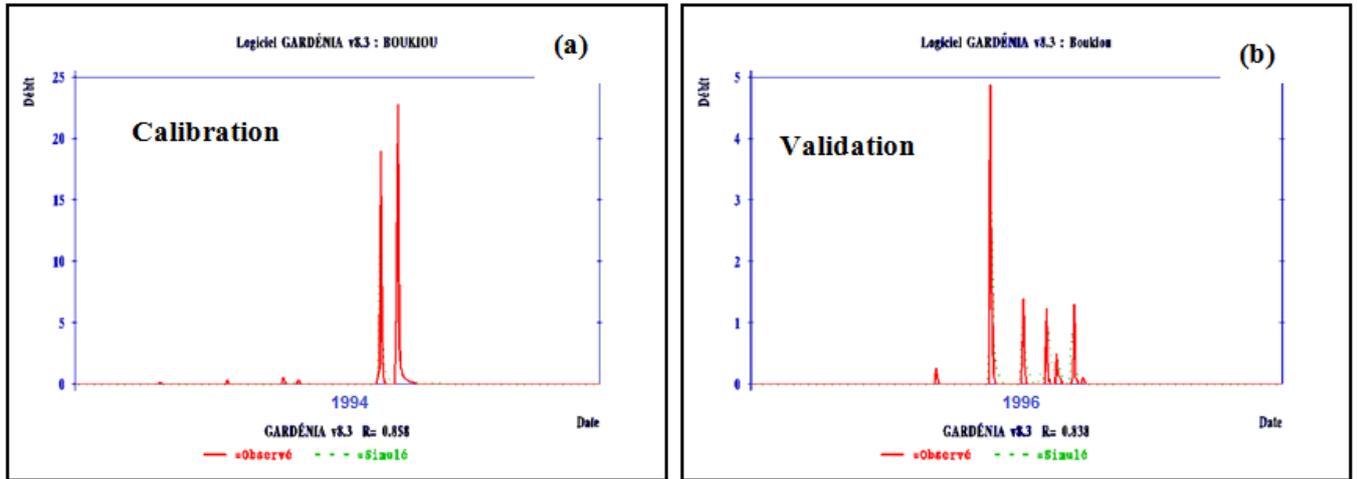


Figure 129. Résultats du calage (a) et validation (b) sur les données journaliers (1994/1996).

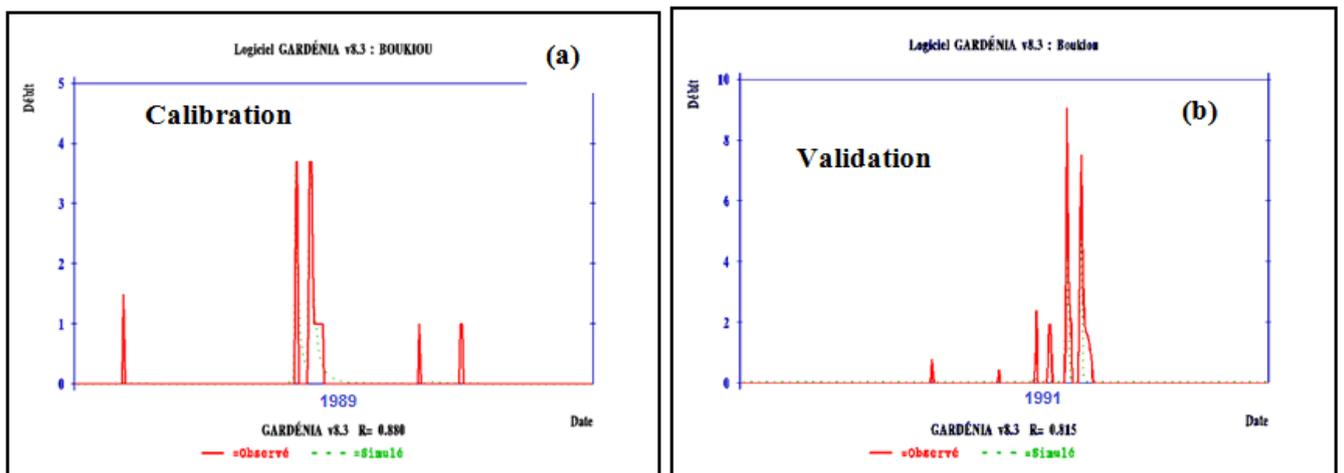


Figure 130. Résultats du calage (a) et validation (b) sur les données journaliers (1989/1991).

Les valeurs des paramètres d'optimisation obtenues en phase de calage sont meilleures (sont supérieures à 70%) que celles obtenues en phase de validation pour l'ensemble des périodes étudiées (fig. 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, et 130).

Les courbes des débits simulés et celles des débits observés ont généralement une allure qui semble proche sur toutes les périodes étudiées. Le système traduit bien ce qui se passe en réalité, en période de pluies, le bassin gagne de l'eau, il emmagasine puis libère à la fin de chaque événement. Nous remarquons que le modèle enregistre une surestimation des débits simulés par rapport aux débits observés surtout en périodes de crues (cas des années 1975 et 2008 (fig. 123 et 124 cette constatation n'est pas stable sur toute la période étudiée, il arrive parfois que certains débits simulés soient très importants correspondant même à des crues, alors que sur les débits observés aucune crue n'a été notée).

Nous avons enregistré lors de la validation une légère dégradation dans les valeurs des paramètres d'optimisation surtout pour les pas de temps mensuel et journalier, ceci est dû probablement à l'irrégularité des précipitations au cours des mois et des jours et surtout de l'état du sol (saturation et occupation) et des conditions géologiques.

Pour la période excédentaire du pas de temps journalier, le modèle a mieux simulé les débits observés pour des périodes humides (fig.127 et 128) et à un degré moindre pour les périodes déficitaires (fig.129 et 130). Donc l'hydrogramme simulé semble sous-estimer les débits simulés pour les événements extrêmes.

Durant certaines périodes de l'année, nous remarquons que la simulation des débits présente des imperfections due probablement à la difficulté que semble rencontrer le modèle à simuler les petites crues pendant la période de reprise des écoulements en Automne.

D'après le tableau 78, les coefficients de corrélation obtenus lors du calage entre les débits simulés des deux modèles, présentent de bonnes corrélations pour les trois pas de temps. La corrélation définit bien une similitude entre les débits simulés avec un R Annuel= 88.54% 86.71%, R Mensuel= 84.91% et 83.66% et un R Journalier = 83.66%, 88.31%, 81.85% et 84.67%, la majorité des points entourent la droite à l'exception de quelques points. Cela veut dire que les modèles simulent bien les débits et qu'ils n'ont pas produit des erreurs systématiques en termes de surestimation ou de sous-estimation.

Lors de la validation (Tab.80), les valeurs des coefficients de corrélation se dégradent surtout pour le pas de temps mensuel et journalier. Cette dégradation est due à la difficulté rencontrée par l'un des modèles à reconstruire les débits simulés. L'un des modèles surestime (GR4J) ou sous-estime (GARDENIA) les débits simulés.

Les résultats obtenus par comparaison des deux modèles (Tab78), montrent la robustesse du modèle GARDENIA par rapport au modèle GR, avec une nette amélioration de la corrélation de Nash et Sutcliffe entre les apports simulés et observés (Nash = 88.2%).

Tableau 78. Comparaison des performances entre GR et GARDENIA.

Pas de temps		Calage				Validation				
		GR		Gardénia		GR		Gardénia		
		Nash (%)	R (%)	Nash (%)	R (%)	Nash (%)	R (%)	Nash (%)	R (%)	
Annuel	Thorntwaite	75.4	88.54	83.05	91.1	75.41	88.31	85.39	92.4	
	Turc	71.1	86.71	79.61	89.2	71.1	87.63	74.89	86.5	
Mensuel	Thorntwaite	74.16	84.91	81	90.2	74.16	87.97	77.9	88.3	
	Turc	72.32	83.66	80.2	89.55	72.32	83.78	74.89	86.5	
Journalier	Déficitaire	1974-1976	83	83.66	91.93	95.9	83	80.87	70.65	84.1
		2009-2011	87.9	88.31	96.61	98.29	87.9	90	82.06	90.59
	Excédentaire	1989-1991	71.2	81.85	73.59	85.8	72.1	80.49	70.19	83.78
		1994-1996	69.3	84.67	77.49	88.03	69.3	80	66.36	81.46

V.6.3 Modèle SWAT

V.6.3.1 Calibration du modèle

La calibration d'un modèle conceptuel consiste à fixer les variables d'entrée du modèle pour correspondre au maximum la réponse du modèle aux observations mesurées représentant la réalité sur le terrain délibéré dans le but de définir les valeurs ou les gammes souhaitables des paramètres du modèle qui dépendent largement de la nature et des propriétés spécifiques de la zone d'étude. En fait, l'étalonnage du modèle SWAT dans le bassin de l'oued Boukiou par la méthode SUFI-2 a été réalisé sur une période de 30ans en comparant les débits mesurés aux débits simulés dans la station hydrométrique considérée (fig131).

L'analyse de la figure montre que la variation d'écoulement dans la station est simulée avec succès par le modèle qui représente convenablement les pics mensuels marquant cet état. Selon les critères d'évaluation de la performance du modèle recommandé pour un pas de temps mensuel (Moriasi et al., 2007), l'étalonnage nous a permis d'obtenir une bonne performance du modèle pour les débits avec un coefficient de NSE de l'ordre de 0,66 et PBIAS de l'ordre de -10.7 (fig.132). Cela diminue les doutes liés à cette calibration avec d'autres modèles car il fournit une meilleure estimation du processus étudié.

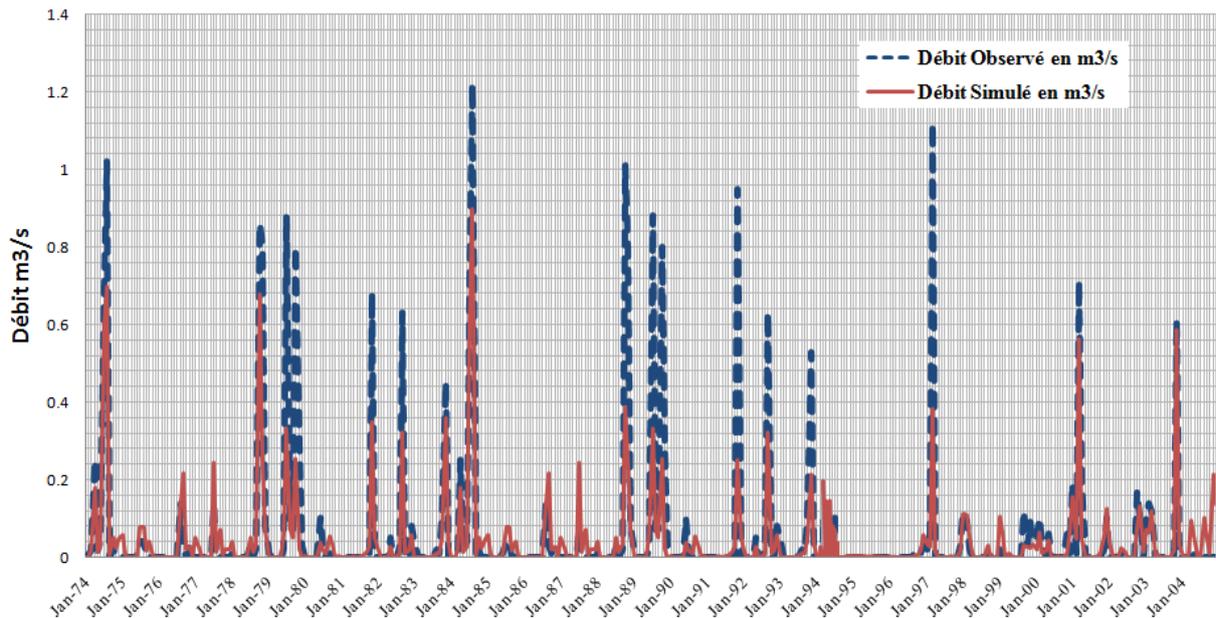


Figure 131. Hydrogramme des débits mensuels observés et simulés durant la phase de calibration (1974-2004)

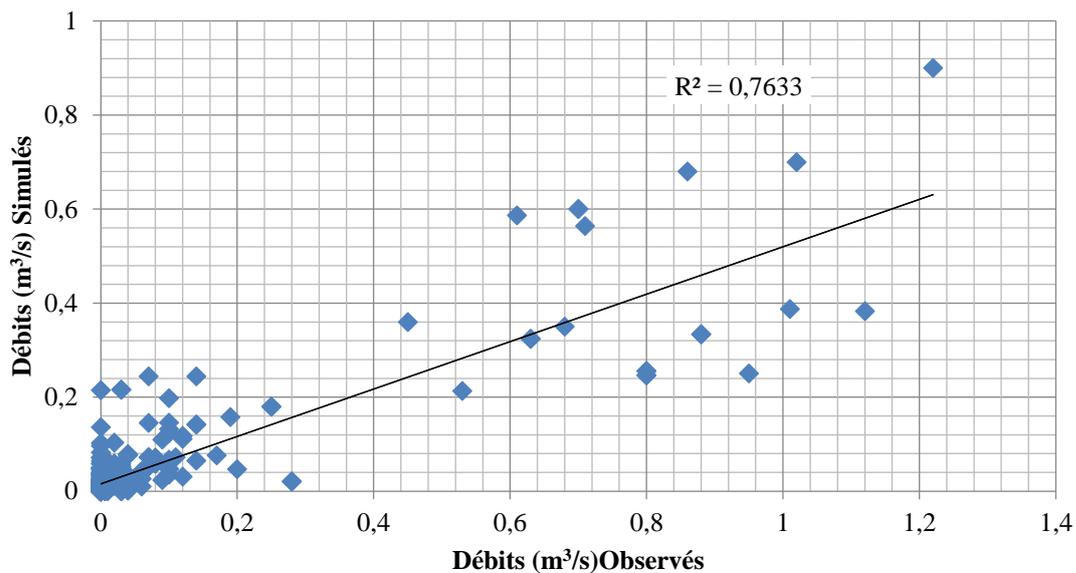


Figure 132. Corrélation entre les débits mensuels observés et simulés durant la phase de calibration (2005-2014)

V.6.3.2 Validation du modèle

Un modèle est valide lorsqu'il permet de reproduire les observations d'une manière appropriée et satisfaisante. Toute procédure d'étalonnage d'un modèle doit être nécessairement contrôlée pour vérifier sa fiabilité et sa performance. La validation du modèle SWAT a été réalisée sur une autre période d'étalonnage (10 ans) en comparant les débits mesurés aux débits simulés dans la station hydrométrique considérée (fig.133). Selon les critères d'évaluation de la performance du modèle recommandé pour un pas de temps mensuel

(Moriassi et al., 2007), la validation nous a permis d'obtenir une performance satisfaisante de modèle pour les débits avec un coefficient NSE de l'ordre de 0,54 et PBIAS de l'ordre de -15.10 (fig.134). La bonne concordance entre les simulations et les observations à travers la phase de validation montre également une performance satisfaisante de l'étalonnage du modèle et sa capacité à représenter diverses situations climatiques.

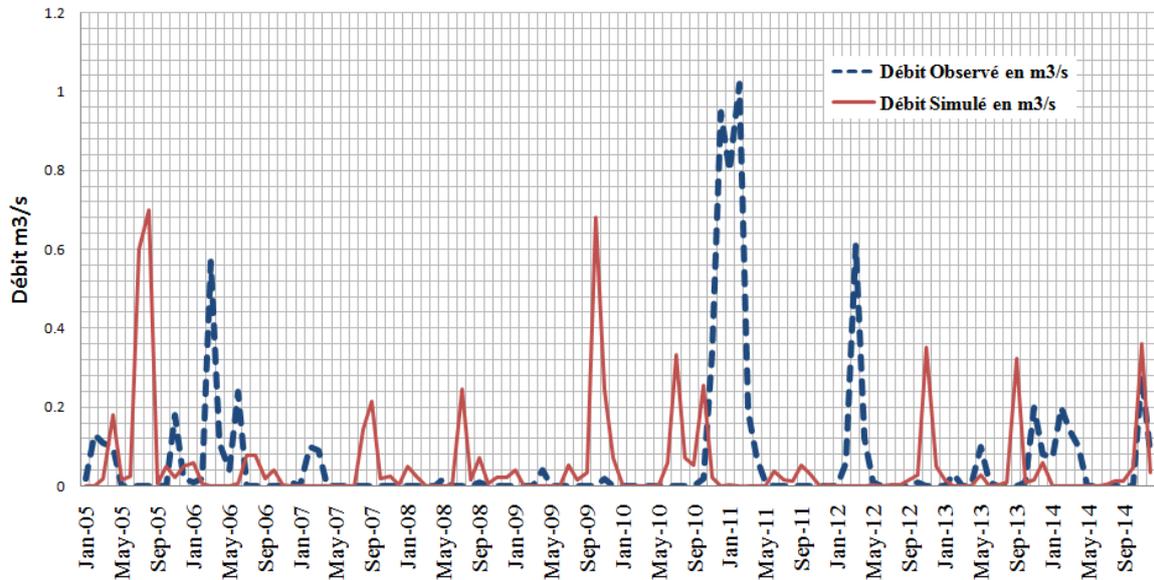


Figure 133. Hydrogramme des débits mensuels observés et simulés durant la phase de validation (2005-2014)

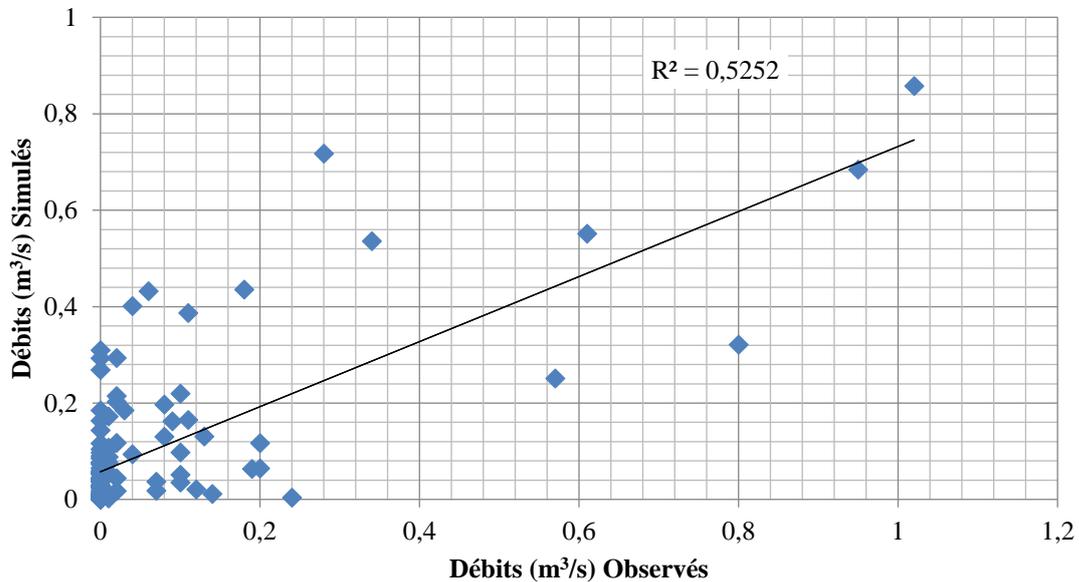


Figure 134. Corrélation entre les débits mensuels observés et simulés durant la phase de la Validation (2005-2014)

V.6.3.3 Analyse d'incertitude

Les valeurs optimales trouvées pour les paramètres calibrés sont indiquées dans le tableau suivant :

Tableau 79. Valeurs des paramètres calibrés

Rang et nom du paramètre	Valeur ajustée	Valeur maximale	Valeur minimale
1:R__CN2.mgt	0.200246	0.180096	0.228456
2:V__ALPHA_BF.gw	0.770593	0.684444	0.794422
3:V__GWQMN.gw	4407.026367	3383.404541	4500.083008
4:V__GW_REVAP.gw	0.14886	0.137008	0.153546
5:V__SURLAG.bsn	21.398113	20.86887	22.249504
6:V__RCHRG_DP.gw	0.96592	0.964813	0.974305
7:V__OV_N.hru	17.566614	15.216661	18.495665
8:V__SLSUBBSN.hru	137.621719	137.035217	140.94519
9:V__CH_N2.rte	0.216117	0.199594	0.246802
10:V__ESCO.hru	1.171451	1.095242	1.400078
11:V__TRNSRCH.bsn	0.443916	0.359963	0.467137
12:V__LAT_TTIME.hru	108.744049	99.922745	127.779495
13:R__SOL_AWC(..).sol	0.063087	0.053106	0.081622
14:V__CH_K2.rte	130.71402	63.302219	172.618652
15:R__USLE_K(..).sol	0.169279	0.095496	0.215144
16:V__EPCO.hru	0.214996	-0.501768	0.25272
17:V__USLE_P.mgt	0.467509	0.056281	0.489153

Après la première itération, 5 paramètres qui sont CH_K2, USLE_P, CH_N2, SURLAG et SOL_AWC ont été révélés les paramètres les plus sensibles pour la modélisation du bassin versant de l'oued Boukiou (fig.136).

La méthode de définir automatiquement les valeurs optimales des variables du modèle prend un peu de temps, mais elle a été assurée plus fonctionnelle et plus fiable que la procédure qui se fait manuellement (Fadil et al., 2011). L'analyse de sensibilité du modèle à la délimitation des sous-bassins et les seuils de définition d'URH montrent que le débit est plus sensible aux seuils de définition d'URH que l'effet de discrétisation du sous-bassin.

Les résultats de ce bassin sont de 90 URH dans l'ensemble du bassin. Les bons résultats de la simulation des étapes de temps mensuelles sont produits par le modèle SWAT et qui sont utiles pour la gestion des ressources en eau et de la dégradation des sols dans le bassin de l'oued Boukiou.

V.6.3.4 Bilan hydrique généré par le modèle SWAT

Le bilan hydrologique annuel, calculé avec le modèle SWAT de 1974 à 2014 montre des précipitations moyennes annuelles de 247 mm (100%), qui se répartissent entre l'évapotranspiration (203.3 mm, 82.31%), l'écoulement dans les rivières (37.85mm, 15.32%) et la recharge des réservoirs souterrains (5.85mm, 2.37%). Ces résultats mettent en exergue l'importance de l'évapotranspiration et celle de la recharge (fig.135).

Tableau 80. Résultat du bilan hydrologique calculé par SWAT pour le bassin versant de l'oued Boukiou (1974-2004)

Composantes du bilan hydrique			Valeurs
Précipitations			242mm (100%)
Débit de surface	31.23 mm (12.90%)	Écoulement total	37.85mm (15.64%)
Débit Hypodermique	3.86 mm (1.59%)		
Débit de base	2.76 mm (1.15%)		
Percolation			8.85mm (3.65%)
Evaporation réelle			195.3mm (80.57%)
Evaporation potentielle			1144.2 mm

Tableau 81. Résultat du bilan hydrologique calculé par SWAT pour le bassin versant de l'oued Boukiou (2005-2014)

Processus hydrologique			Valeurs
Précipitations			215 mm (100%)
Débit de surface	24.3 mm (11.30%)	Écoulement total	29 mm (14.48%)
Débit Hypodermique	2.86 mm (1.33%)		
Débit de base	1.84 mm (0.85%)		
Percolation			12.18 mm (5.96%)
Evaporation réelle			173.82 mm (79.56%)
Evaporation potentielle			1139.2 mm

Les éléments essentiels du bilan hydrique d'un bassin versant sont les précipitations, l'évapotranspiration, le ruissellement de surface, l'écoulement latéral et le débit de base. La quantité la plus importante de perte d'eau dans le bassin hydrographique est représentée par l'évapotranspiration réelle (ET) dont les valeurs moyennes annuelles de l'évapotranspiration en pourcentage relatif par rapport à la moyenne annuelle des précipitations sont de 80.57% pour la période calage et 79.56% pour la validation cela peut s'expliquer par les températures élevées associées à la zone.

Le ruissellement de surface s'écoule à travers le relief de surface en profondeur dans les sols (Strelkov et al., 2016). Le moyen annuel du ruissellement de surface simulé (SUR_Q) est de 12.90% pour la période calage et 11.30% pour la validation.

En revanche, la percolation de la nappe phréatique peut se produire et affecter de manière significative le bilan hydrique (Chen & Hu, 2004). Le rapport moyen annuel de la percolation simulée (PERC) est de 3.65% pour la calibration et 5.96% pour la validation.

L'écoulement latéral (LAT_Q) est le mouvement de l'eau sous des forces gravitationnelles généralement parallèles à la pente (Waring et al., 1981). L'écoulement latéral calculé est de 1.59% en calage et 1.33% en validation.

La contribution des eaux souterraines à l'écoulement fluvial (GW_Q) est l'eau de l'aquifère peu profond qui revient à la portée pendant le temps et varie considérablement entre les cours d'eau, elle affecte la quantité et la qualité de l'eau de surface (Wiebe et al., 2015). Dans notre cas (GW_Q) a le pourcentage faible avec des valeurs de 1.15% en période de calage et 0.85% en période de validation. (fig. 137 et 138).

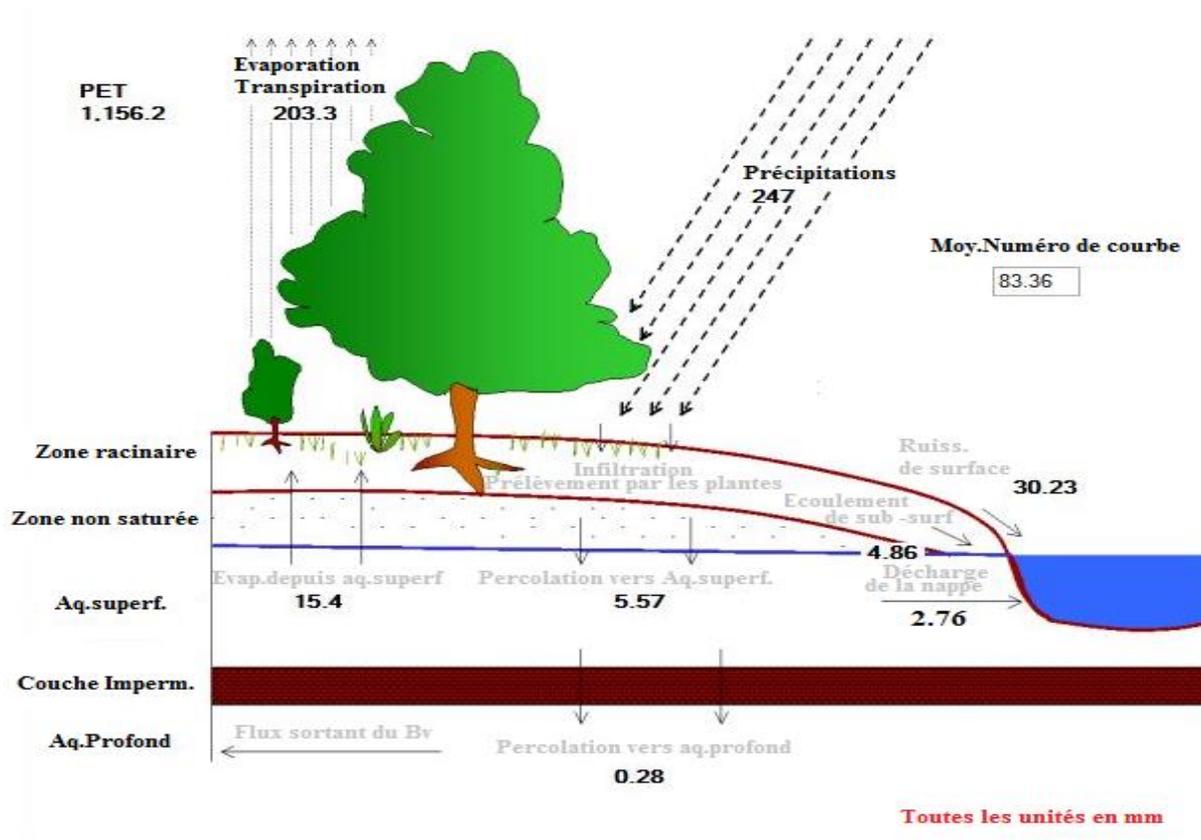


Figure 135. Bilan hydrique généré par le modèle SWAT durant toute la période d'étude

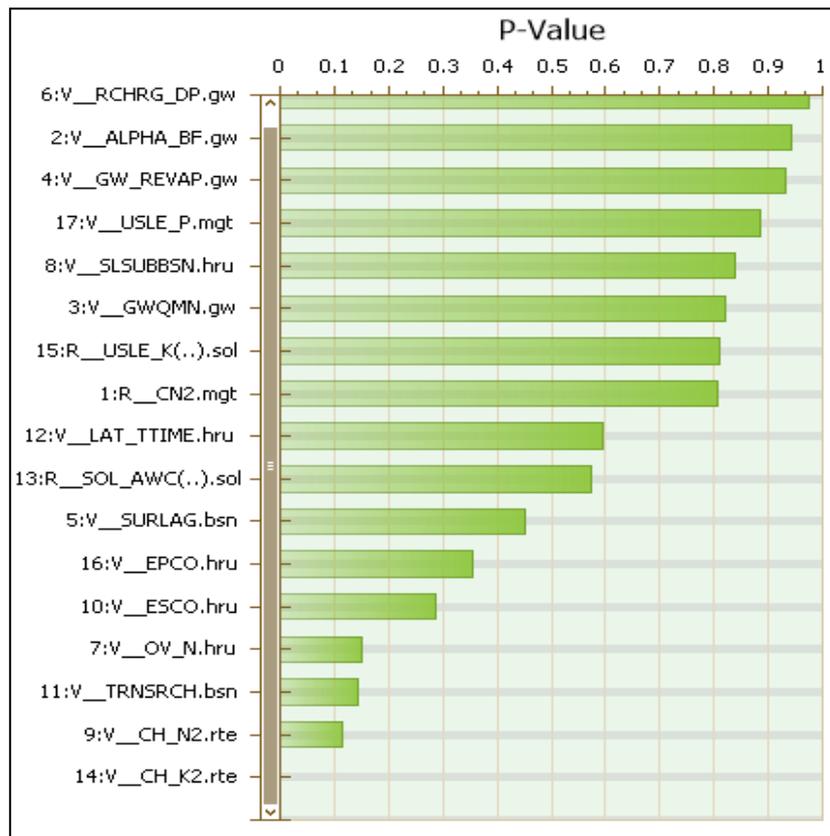


Figure 136. Classement des paramètres utilisés selon leurs degrés de sensibilité à l'aide de la valeur P.

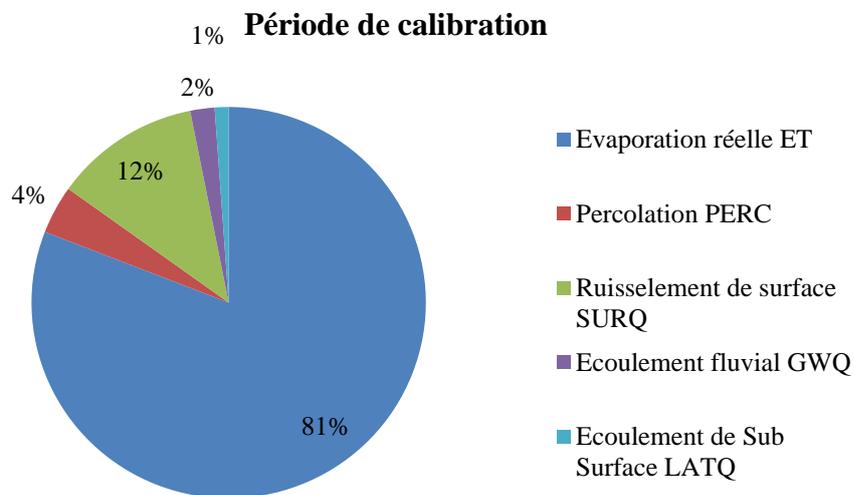


Figure 137. Le moyen annuel du bilan hydrique en pourcentage par rapport aux précipitations pour les années de calibration

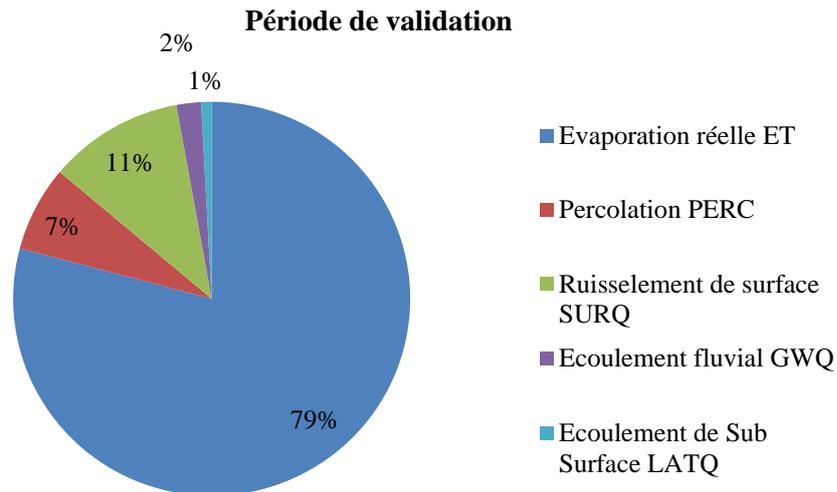


Figure 138. Le moyen annuel du bilan hydrique en pourcentage par rapport aux précipitations pour les années de validation

V.7 Conclusion

La première partie du travail, a pu déterminer la relation pluie-débit du bassin versant d'oued Boukiou sur une série de donnée allant de 1974/1975 jusqu'à 2013/2014, où nous avons modélisé le comportement hydrologique du bassin en utilisant le modèle du Génie Rural (GR) et le modèle Gardénia à différents pas de temps (annuel, mensuel et journalier).

Les deux modèles ont prouvé leurs performances dans le domaine de la modélisation. En effet, leur optimisation a été obtenue pour des valeurs élevées de qualité. La phase du calage a donné de très bons résultats (presque la même simulation) exprimés par le critère de Nash compris entre à 69.3% et 96.6% et le coefficient de détermination compris entre 80% et 98.3% pour l'ensemble des périodes. Au passage à la validation, une perte de performance a été notée sur les deux modèles avec un critère de Nash faible enregistré durant le pas de temps journalier. De même pour les coefficients de corrélation et dont la plus faible valeur a été fournie par le modèle GR.

Toutefois, nous notons que le modèle à réservoirs Gardénia est plus performant que le modèle du Génie Rural pour le bassin versant d'oued Boukiou. Cette distinction se traduit par le nombre important des paramètres hydrologiques qu'utilise le modèle Gardénia par rapport au GR.

Le modèle GARDENIA possède des avantages majeurs par rapport aux modèles GR et SWAT tels que :

L'Utilisation de plusieurs aquifères et réservoirs assurant la fonction de production et de transfert, ce n'est pas le cas pour le modèle GR qui n'utilise que deux réservoirs.

La capacité d'établir le bilan hydrologique et de quantifier ces différentes composantes.

La deuxième partie de ce chapitre consiste à effectuer une modélisation à travers une approche spatialisée sur le fonctionnement hydrologique de notre bassin versant afin de mieux orienter les aménagements futurs et rationaliser la gestion intégrée des ressources en eau et en sol à l'échelle du bassin versant.

Il semble donc, que la méthode de simulation de pluie, est une approche très utile, permettant dans des brefs délais d'avoir des résultats significatifs sur le comportement du sol et sur les facteurs en cause. Pour effectuer un diagnostic détaillé de l'état du bassin versant, la modélisation hydrologique spatialisée s'avère comme une approche rigoureuse pour pouvoir représenter les différents processus du bassin d'une manière fiable et précise. Dans ce contexte, le modèle SWAT choisi et utilisé dans cette étude a été considéré comme un outil très utile et capable d'étudier les stratégies alternatives de gestion des bassins versants sur la réponse hydrologique.

En effet, la modélisation réalisée avec le modèle SWAT a pu déterminer, avec plus de finesse et de précision, l'évolution de certains paramètres, ce qui a permis une meilleure compréhension des différentes composantes du cycle hydrologique

Cette modélisation contribuera à la gestion des ressources en eau et en sol dans le bassin d'étude, et qui est donc utile pour le développement durable de la région.

L'étalonnage et la validation du modèle sont un facteur clé pour réduire l'incertitude et accroître la confiance de l'utilisateur dans ses capacités prédictives, ce qui rend l'application du modèle très efficace. Toutefois, le modèle a été correctement calibré et validé sur le bassin versant d'étude en utilisant l'approche multi-variable, et ce pour une période de 40ans (5ans pour le routage du modèle, 25ans pour le calage et 10ans pour la validation). Aussi, l'analyse de sensibilité de paramètres influençant la simulation du débit et la détermination de la valeur calibrée pour chaque paramètre, ont été effectuées avec succès. En outre, le modèle SWAT a généré un ensemble de résultats sur le fonctionnement hydrologique du bassin et ses unités spatiales ainsi que sur les processus de production dans la zone d'étude. Tout compte fait, la phase de paramétrage a été l'une des phases les plus laborieuses de ce travail, elle a nécessité de passer par plusieurs tests, approches et simulations en vue de mettre au point, une méthodologie de création de règles de décision applicables dans le contexte du bassin versant étudié. Cependant, des informations sur l'analyse de sensibilité, l'étalonnage et la validation de modèles SWAT ont été fournies pour aider les modélisateurs de bassins versants à développer leurs modèles afin d'atteindre les objectifs de gestion des bassins versants. En plus, ce modèle nous a permis de reproduire avec succès le cycle hydrologique et le rendement de l'eau en calculant les différentes composantes de ce cycle selon l'équation du bilan hydrique. Les résultats ont montré que l'évapotranspiration est la composante prédominante du bilan hydrique. L'estimation des composantes du bilan hydrique nous a permis de mieux comprendre les différents processus hydrologiques dans le bassin versant de l'oued Boukiou. Au terme de cette analyse, cette étude serait utile aux décideurs locaux pour élaborer des stratégies de gestion des ressources en eau.

- Comparaison des trois modèles au pas de temps mensuel

D'après le tableau 82, Les trois modèles sont performants sauf que le modèle SWAT a donné une faible valeur du coefficient à cause de la sensibilité de ses paramètres.

Le modèle a été appliqué dans des bassins versants dépassant le 2000km², tans dis que notre bassin versant a une superficie de 117Km², et il a prouvé sa fiabilité avec un Nash supérieur à 66%.

Tableau 82. Performance des trois modèles utilisés

Performance	GR		GARDENIA		SWAT	
	Nash %	R%	Nash %	R%	Nash %	R%
Calage	72.32	83.66	80.2	89.55	66	87
Validation	72.32	83.78	74.38	86.5	54	72

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La prévision des catastrophes naturelles impose une modélisation pluie-débit bien aussi élaborée et réaliste que possible.

Ce travail sur le bassin versant de l'oued Boukiou situé dans le Nord ouest algérien, nous a permis de bien spécifier la variabilité climatique et son impact sur la ressource en eau grâce à l'utilisation de la modélisation hydrologique.

Cette thèse a pour but d'analyser et de comprendre les tendances des variables hydroclimatiques afin d'identifier le comportement hydrologique du bassin versant en utilisant trois modèles hydrologiques (GR, GARDENIA ET SWAT), les données météorologiques sont les pluies, températures, évapotranspiration, vitesse de vent et hydrologiques sont les débits.

Les valeurs obtenues du bilan hydrologique confirment bien l'impact de la variabilité climatique sur la ressource en eau. La comparaison entre les différentes périodes étudiées a montré que c'est à partir de 1977 que la diminution de la ressource en eau a été ressentie. La diminution des précipitations a conduit à la diminution de tous les paramètres du bilan hydrologique.

La morphologie du bassin : Le bassin de l'oued Boukiou possède une forme relativement compacte reflétant une érosion linéaire et régressive, La superficie indique que ce bassin est petit, son indice de compacité a une grande influence sur le débit global de la rivière et notamment sur la forme de l'hydrogramme à la sortie du bassin avec un K_c égal à 1,50. La courbe hypsométrique reflète bien l'aspect vallonné de la zone.

L'étude géologique et hydrogéologique de la région d'étude : la lithostratigraphie et la tectonique affectant les différentes formations, montrent que les seuls niveaux présentant un intérêt hydrogéologique sont pour le Primaire : le granite de Nedroma, le Secondaire : les calcaires du Lias moyen et les dolomies de Tlemcen et la dépression miocène : les conglomérats de base, les basaltes et les alluvions occupant la vallée de l'Oued Boukiou.

La tectonique joue un rôle important dans l'hydrogéologie de la région. Les jeux de la plupart des failles favorisent l'apparition de nombreuses sources.

Dans la région étudiée, nous avons deux types d'accidents principaux :

- **Accident NE-SW :** ces accidents de regroupement en faisceaux à la tectonique complexe (plis, plis-faille, pincées) séparant des panneaux rigides à tectonique beaucoup plus simple.
- **Accident NNE-SSW :** la plupart de ces accidents fonctionnent en décrochement senestre.

Le Bassin versant du Boukiou est partagé entre deux grands domaines géologiques clairement différents :

- Le massif primaire et secondaire occupant les hautes altitudes.
- Le Mio-plio-quaternaire occupant la plaine à basse altitude.

La climatologie du la région : L'analyse des paramètres climatiques de la région de l'oued Boukiou montre que notre bassin a un climat méditerranéen semi-aride avec un hiver tempéré.

CONCLUSION GENERALE

- Les précipitations sont variables, la moyenne enregistrée sur une période de 42 ans (1972 / 1973-2015/2016) est de 291,7 mm / an, tandis que la température correspondante est égale à 18 ° C.

- En général, les températures maximales sont enregistrées dans les mois de Juillet et Août, et les températures minimales sont observées au cours des mois allant de Décembre à Février.

- En ce qui concerne les écoulements, l'étude hydrologique a montré que cet oued est caractérisé par un régime d'écoulement irrégulier en raison de l'irrégularité du régime pluviométrique. L'évolution des débits d'eau saisonniers ont montré que c'est au Printemps que se produit la majeure partie de l'écoulement, c'est là où l'intensité et les volumes des précipitations y sont les plus importants.

L'étude de la variabilité climatique : Une tendance à la baisse de la pluviométrie annuelle durant la période des années 2000, par contre une tendance à la hausse pendant la période des années 80. Cette tendance est marquée par des ruptures identifiées entre 2007/2008.

Pour les saisons humides des précipitations annuelles, le point de rupture est détecté aux environs de l'année 2007, avec une tendance à l'augmentation des pluies. Cette évolution apparaît comme un phénomène régional qui indique un changement dans le profil des précipitations annuelles et saisonnières après une longue durée de sécheresse intensifiée durant les années 70. Pour les saisons sèches, les dates de rupture sont détectées aux alentours de l'année 1974/1975.

Pour les régimes hydrologiques, la baisse de la pluviométrie a provoqué une diminution des apports du cours d'eau du bassin. Cette diminution est marquée par une rupture identifiée autour des années 1976/1977 et 2007/2008.

Les ruptures décelées correspondent aux lames d'eau écoulées au cours des saisons humides, elles sont détectées autour des années 1976/1977 et 2007/2008, et pour les saisons sèches en 1976/1977.

À l'échelle annuelle, une variabilité de la température marquée par une tendance de baisse identifiée en 1986, à l'échelle mensuelle, la chronique des températures moyennes mensuelles des mois de Mars, Avril, Mai et Juillet ont des dates de rupture qui coïncident avec la date de rupture des températures moyennes annuelles.

La modélisation : La relation pluie-débit du bassin versant d'oued Boukiou sur une série de donnée allant de 1974/1975 jusqu'à 2013/2014, où nous avons modélisé le comportement hydrologique du bassin en utilisant le modèle du Génie Rural (GR) et le modèle Gardénia à différents pas de temps (annuel, mensuel et journalier).

Les deux modèles ont prouvé leurs performances dans le domaine de la modélisation. En effet, leur optimisation a été obtenue pour des valeurs élevées des critères de qualité. La phase de calage a donné de très bons résultats (presque la même simulation) exprimés par le critère de Nash compris entre à 69.3% et 96.6% et le coefficient de corrélation compris entre 80% et 98.3% pour l'ensemble des périodes. Au passage à la validation, une perte de performance a été notée sur les deux modèles avec un critère de Nash faible enregistré durant le pas de temps journalier. Aussi pour les coefficients de corrélation, sa plus faible valeur a été fournie par le modèle GR.

CONCLUSION GENERALE

Toutefois, nous notons que le modèle à réservoirs Gardénia est plus performant que le modèle du Génie Rural pour le bassin versant d'oued Boukiou. Cette distinction se traduit par le nombre important des paramètres hydrologiques qu'utilise le modèle Gardénia par rapport au GR.

Le modèle Gardénia présente l'avantage de quantifier les différentes composantes du bilan hydrologique (pluie, évapotranspiration, pluie efficace et recharge, stock des réservoirs et débit simulé), de séparer l'écoulement en écoulement lent ou rapide et d'évaluer la recharge naturelle des aquifères.

Le modèle GARDENIA possède des avantages majeurs par rapport aux modèles GR et SWAT tels que :

L'Utilisation de plusieurs aquifères et réservoirs assurant la fonction de production et de transfert, ce n'est pas le cas pour le modèle GR qui n'utilise que deux réservoirs.

La capacité d'établir le bilan hydrologique et de quantifier ces différentes composantes.

L'Estimation des niveaux piézométriques par modélisation pluie-niveau piézométrique.

L'étalonnage et la validation du modèle sont un facteur clé pour réduire l'incertitude et accroître la confiance de l'utilisateur dans ses capacités prédictives, ce qui rend l'application du modèle très efficace. Toutefois, le modèle a été correctement calibré et validé sur le bassin versant d'étude en utilisant l'approche multi-variable, et ce pour une période de 40ans (5ans pour la mise en roue du modèle, 25ans pour le calage et 10ans pour la validation). Aussi, l'analyse de sensibilité de paramètres influençant la simulation du débit et la détermination de la valeur calibrée pour chaque paramètre, ont été effectuées avec succès. En outre, le modèle SWAT a généré un ensemble de résultats sur le fonctionnement hydrologique du bassin et ses unités spatiales ainsi que sur les processus de production dans la zone d'étude. Tout compte fait, la phase de paramétrage a été l'une des phases les plus laborieuses de ce travail, elle a nécessité de passer par plusieurs tests, approches et simulations en vue de mettre au point, une méthodologie de création de règles de décision applicables dans le contexte du bassin versant étudié.

Cependant, des informations sur l'analyse de sensibilité, l'étalonnage et la validation de modèles SWAT ont été fournies pour aider les modélisateurs de bassins versants à développer leurs modèles afin d'atteindre les objectifs de gestion des bassins versants. En plus, ce modèle nous a permis de reproduire avec succès le cycle hydrologique et le rendement de l'eau en calculant les différentes composantes de ce cycle selon l'équation du bilan hydrique. Les résultats ont montré que l'évapotranspiration est la composante prédominante du bilan hydrique. L'estimation des composantes du bilan hydrique nous a permis de mieux comprendre les différents processus hydrologiques dans le bassin versant de l'oued Boukiou. Au terme de cette analyse, cette étude s'avère utile aux décideurs locaux pour élaborer des stratégies de gestion des ressources en eau.

Nous jugeons important de parler des résultats intéressants de cette étude malgré la taille du bassin (superficie de 117Km²), car le modèle SWAT utilisé est une première en Algérie pour un bassin versant d'une superficie inférieure à 200km², le modèle a bien fait la simulation du bilan hydrique dans notre bassin versant, cela a nécessité des séries chronologiques à long terme d'entrées hydrologiques et climatiques pour l'étalonnage et la validation. Un certain nombre d'opérations systématiques existantes d'étalonnage automatique de validation ont été appliquées pour cette étude telle que le SWAT CUP.

RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

L'objectif principal de cette étude était d'évaluer et d'analyser les ressources en eau, et les conditions hydroclimatiques de la région de Boukiou et de déboucher sur un ensemble de stratégies, de recommandations et de plans d'action pour permettre aux autorités de mettre en œuvre et de réaliser un processus intégré de gestion des ressources hydriques. Pour atteindre ces objectifs, une composante de modélisation des ressources en eau a été introduite pour évaluer et analyser des ensembles de données hydrologiques disponibles pour estimer la variabilité spatiale et temporelle du potentiel en eau dans la région étudiée. Cela a impliqué le choix de trois outils de simulation des ressources hydrologiques / eau pour la modélisation / simulation de l'hydrologie, dans le but de renforcer la capacité supplémentaire et d'analyser d'une manière continue et efficace les ressources en eau dans la région de Boukiou, pour les conditions climatiques variées actuelles et à venir. Pour permettre la conceptualisation et le développement de plusieurs composantes de modélisation hydrologique en vue d'évaluer les ressources en eau pour notre bassin, nous proposons un certain nombre de recommandations :

- Multiplier les points d'observations (station climatique, station hydrométrique, sol, réseau piézométrique, etc.) et inventorier les points d'eau pour voir l'impact des conditions climatiques actuelles sur la ressource en eau.
- Identification des principales zones de drainage, de partage d'eau souterraines et les systèmes aquifères sur la base des informations disponibles afin de mieux gérer l'écoulement d'eau souterraine et aider les agriculteurs à réaliser des forages.
- Identification des ressources en eau et des modèles hydrologiques, y compris l'inventaire des ressources en eau, la modélisation du débit, des précipitations et la modélisation des composantes clés du cycle hydrologique. Cela conduira au développement de la pratique de la formation sur des outils de modélisation climatique et hydrologique sélectionnés. Les outils de modélisation comprennent des modèles de bilan hydrique mis en place dans un environnement GIS et l'évaluation d'un scénario d'utilisation de l'eau.
- Préparation d'un système d'archivage des ressources en eau et des données hydrologiques dans un format d'archive convenu - mis en œuvre en étroite collaboration avec le SIG/Base de données.
- Proposer un système clé de surveillance météorologique et hydrologique pour la région de Boukiou et identifier aussi les équipements hydrométéorologiques nécessaires.

A partir des résultats obtenus suite à cette étude et pour une meilleure gestion de la ressource en eau il serait nécessaire de réfléchir dans le futur à :

- Application des autres modules du modèle SWAT pour mieux représenter le cycle hydrologique et mettre au point le risque de la variabilité climatique (cycle de nutriment, transport solide, gestion des cultures...),
- L'approche satellitaire pour détecter et suivre la sécheresse afin de pouvoir approfondir l'étude de son impact sur la ressource en eau au niveau du bassin,
- Le suivi continu de l'évolution de la sécheresse par application de nouveaux indices qui permettent de mieux mettre en évidence la variabilité climatique dans la zone d'étude.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abbaspour, K. C., Johnson, C. A., & van Genuchten, M. T. (2004)** : Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal*, 3(4), 1340– 1352.
- Abbaspour, K. C., Vejdani, M. and Haghghat, S. (2007)** : SWATCUP calibration and uncertainty programs for SWAT. In Proc. Intl. Congress on Modeling and Simulation (MODSIM'07), 1603-1609. Oxley, L. and Kulasiri, D. eds. Melbourne, Australia: Modeling and Simulation Society of Australia and New Zealand.
- Abbaspour, K. C. (2011)** :User Manual for SWAT-CUP, SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Programs. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Duebendorf, Switzerland. 103 p.
- Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., Klove, B. (2015)**: A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: calibration and uncertainty of a high resolution large-scale SWAT model. *J. Hydrol.* 524, 733-752.
- Ahoussi K., Koffi Y., Kouassi A M., Soro G., Soro N., Biémi J (2013)**: Étude de la variabilité hydroclimatique et de ses conséquences sur les ressources en eau du Sud forestier et agricole de la Côte d'Ivoire : cas de la région d'Abidjan Agboville. *International Journal of Pure & Applied Bioscience*.1(6) Pp30-50.
- Allen, R.G. (1986)**: A Penman for all seasons. *J. Irrig. And Drain Engng.*, ASCE 112 (4): 348-368.
- Allen, R.G., Jensen, M.E., Wright, J.L. and Burman, R.D. (1989)**. Operational estimates of evapotranspiration. *Agron. J.* 81: 650-662.
- Ambroise, B. (1998)** : La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant: processus, facteurs, modèles. Editions H*G*A, Bucarest, 206p.
- Ameur M. (1978)** : Stratigraphique et sédimentologique du Jurassique inférieur et moyen de la partie orientale de la chaîne de Fillaoussène Thèse Doctorat 3^{ème} cycle Univ. Oran. 192 p., 76 fig. 10 p.
- Ameur M. (1988)** : Histoire d'une plate-forme carbonatée de marge Sud Téthysienne : L'autochtone des Traras (Algérie occidentale) du Trias supérieur jusqu'au Bathonien moyen Thèse Doctorat d'Etat. Lab. Géol. Lyon. t., 1-2 .551 p., 188 fig. 24 pl.
- Amiar S., (2021)** : Modélisation hydrologique pluie – débit et l'impact du changement climatique sur le cycle de l'eau. Cas Oued Cheliff. Bassin versant du Haut et Moyen Cheliff Thèse de doctorat en sciences Univ-Tlemcen 244p.
- Andreassian V., Charles P., Claude M. (2007)**: Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR). *Cemagref, UR Hydro systèmes et Bioprocédés*, 2014, 16 p.
- Anctil, F., Rousselle, J. et Lauzon, N. (2005)**. Hydrologie, cheminements de l'eau, Presses Internationales Polytechniques. 317p.
- Arnold, J.G., Allen, P.M., Muttiah, R.S. & Bernhardt, G. (1995)**: Automated base flow separation and recession analysis techniques. *Ground Water*, 33(6), 1010-1018.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Arnold J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S. & Williams, J.R. (1998): Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. *JAWRA*, 34(1), 73-89.

Arnold J. G., Fohrer, N. (2005): SWAT 2000 current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. *Hydrol. Process.* 19, 563–572.

Arnold J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R., Haney, E. B., & Neitsch, S. L. (2011): SWAT input/output file documentation, version 2009. Temple, Texas, USA: Grassland Soil and Water Research Laboratory.

Arnold J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbaspour, K.C., White, M.J., Srinivasan, R., ... Jha, M. K. (2012). SWAT: model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55, 1491–1508.

Arodoin S. (2004) : Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat. Univ Montpellier II .437p.

Baahmed dj (2015) : Bilan hydrique et évaluation des ressources en eau superficielle du bassin versant de la Macta, Thèse Doctorat, Univ. d'Oran, pp.13-19., fig. 2.1 ., tab. 2.1

Balling Et , A Neubüser, K Kratochwil. (1998): Past Temperatures Directly from the Greenland Ice Sheet Rapid Prototyping *Journal* 10(2):78-87, DOI:10.1108/13552540410526953.

Belahcen I., Chouireb F. (2018) : Contribution à l'étude de la variabilité climatique dans la steppe algérienne : Cas de la région d'El Bayadh. Mem de Master.UnivDjilali Bounaama.72p.

Beltrando, (1995) : Biays Pierre. Beltrando Gérard, Chémery Laure. *Dictionnaire du Climat.* 1995. In: *Hommes et Terres du Nord*, 1996/1. Eau des villes et eau des champs mieux connaître pour mieux gérer. p. 46.

Bendjema L., (2020) : Contribution de la Modélisation Hydrologique à L'évaluation de L'impact De la Variabilité Climatique sur La Ressource en Eau. Cas du Bassin Versant d'oued Mellah (Ne Algérien). PhD Thesis. Unversity of Tlemcen. Algeria.

Bendjema, L., Baba-Hamed, K., Bouanani, A. (2019). *Characterization of the climatic drought indices application to theMellah catchment, North-East of Algeria.* *Journal of Water and Land Development.* No. 43 (X–XII), 28–40. DOI:10.2478/jwld-2019-0060.

Benest M. (1985) : Evolution de la plateforme de l'Ouest algérien et du Nord - Est Marocain au cours du Jurassique supérieur et au Crétacé : Stratigraphie, milieux de dépôts et dynamique sédimentaire. Doc. Lab. Géol., Univ, Lyon1. fasc. I et II, 367 p.

Benhamou M. (1983) : Stratigraphie et milieux de dépôts du Jurassique inférieur et moyen des Beni-Ouarsous et Béni-Khaled (Massif des Traras, Oranie).Thèse Doctorat 3 ème cycle Univ. Oran. 168 p., 56 fig., 9 pl.

Bensalah M. (1977) : Contribution à l'étude du Djebel Sidi Sofiane (Monts des Traras, Oranie) Mém. DEA Univ. Oran.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Billen, G. & Garnier, J. (1996) : Transfert et métabolisme de l'azote et du phosphore dans l'hydro système Seine. In C. Le Coz, B. Tassin & D. Thévenot (eds), Transfert des polluants dans les hydro systèmes. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées: 121-140.

Boko M., (1988) : Climats et communautés rurales du Bénin : rythmes climatiques et rythmes de développement. Thèse de Doctorat ès d'Etat, Université de Bourgogne, Dijon, 601 p.

Bouanani A. (2004) : Hydrologie, Transport solide et modélisation. Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérien). Thèse de Doctorat d'état, Univ. Tlemcen, 250 p., 81 fig.

Boudhraa, H. (2007) : Modélisation pluie-débit à base géomorphologique en milieu semi-aride rural Tunisien: Association d'approches directe et inverse. Th/vese de Doctorat en Sciences Agronomiques. Institut National Agronomique de Tunisie, p193.

Bougara H., (2022) : Hydrological modeling in Tafna basin (North west Algeria). Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen. 338p

Bouqdaoui (2006): Modélisation de l'écoulement de la nappe de Berrechid (Maroc), journal La Houille Blanche 94(2) DOI:10.1051/lhb:2008019.

Bouraoui, F., Benabdallah, S., Jrad, A. and Bidoglio, G. (2005): Application of the SWAT model on the Medjerda River basin (Tunisia). Phys. Chem. Earth, 30(8-10), 497-507.

Brohan , J. J. Kennedy,1 I. Harris, (2006): Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850 Journal of Geophysical Research Atmospheres 111(D12):12106DOI:10.1029/2005JD006548.

Brou Y. T, Oswald Y., Bigot, S., Servat E., (2005) : Risques de déforestation dans le domaine permanent de l'État en Côte d'Ivoire : quel avenir pour ses derniers massifs forestiers ? TELA 2004004, Revue de télédétection de l'Agence Universitaire de la Francophonie, vol. 5, no 1-2-3, 2005, p 17-33.

Buishand T A. (1982): Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. J. Hydrol. 58(1-2), 11-27.

Cantat (1995) : Variabilité et variation climatiques en Normandie L'évolution récente des Températures à Caen-Carpiquet Volume 6, numéro 3, Septembre 1995.

Cao, W., Bowden, W.B., Davie, T. and Fenemor, A. 2006:Multi-variable and multi-site calibration and validation of SWAT in a large mountainous catchment with high spatial variability. Hydrol. Process., 20(5), 1057-1073.

Cavadias G. (1994): A Survey of current approaches to modeling of hydrological time series with respect to climate variability and change. WCASP, 23, WMO/TD, n° 534. Google Scholar

Cheggour, A. (2008) : Mesures de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales dans un bassin versant montagneux semi-aride et spatialisation par des S.I.G.: Application au bassin versant de la Rhéraya, Haut Atlas, Maroc. Thèse de doctorat - Faculté des Sciences Semlalia – Marrakech, Maroc. 231p.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Christensen et JH, Carter TR, Rummukainen M, (2007): Regional climate projections. In Climate Change 2007: the physical science basis. Contribution of working group 1 to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. University Press, Cambridge.

Crisci (2002): Extreme rainfall in a changing climate: Regional analysis and hydrological implications in Tuscany Hydrological Processes 16(6):1261 - 1274DOI:10.1002/hyp.1061.

Cunge J.A. (1969). On the subject of a flood propagation method (Muskingum method). Journal of Hydraulics Research, 7(2), pp. 205-230.

Dassargues, A. (1995) :Modèles mathématiques en hydrogéologie. Editions H.G.A, Burcarest, 132p.

Deltell.J, Fenet.B, Guardia.P Et Polveche., (1971) :Géodynamique de l'Algérie occidentale C.R.Som.SOC.Géol.France.Fasc.9,pages 414-417.

Depatoul, C. (2008) :Allocation, modélisation et valorisation des ressources en eau du bassin versant de la rivière Tolomosa (Bolivie). Thèse de doctorat. Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux (Belgique), 283 p.

Dessai Suraje, (2003): Defining and Experiencing Dangerous Climate Change, 64(1):11-25. DOI:10.1023/B:CLIM.0000024781.48904.45.

Diluzio, M., Srinivasan, T., Arnold, J.G., Neitsch, S.L. (2002): Soil And Water Assessment Tool. ArcviewGis Interface Manual: Version 2000: GSWRL Report 02-03, BRC Report 02-07. Published by Texas Water Resources Institute TR-193, College Station, TX. 346p.

Djellouli F., (2017): Persistance de la variabilité climatique et occurrence de la sécheresse: La modélisation « Pluie-Débit » outil d'identification. Application à un bassin versant d'oued El Hammam (Nord-ouest algérien) These doctorat en sciences Univ-Tlemcen 203p.

Douguédroit et Nourant, (2003) : L'évolution de la climatologie in Per ricordare Mario Pinna, P. Ghelardoned., Memorie Soc. Geo. Italiana, LXX, pp. 27-43.

Duplessy J.-C., (2001) : État des connaissances et incertitudes sur le changement climatique induit par les activités humaines, *Earth and Planetary Sciences* 333, p. 765-773. DOI : 10.1016/S1251-8050(01)01678-0.

Edijatno E. (1991) : « Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier ». *Thèse de Doctorat, Université de Louis Pasteur/ENGEEES*, Strasbourg, 242 p.

Edijatno E., Nascimentno N.O., Yang X., Makhlof Z., Michel C. (1999): GR3J a daily watershed model with three free parameters . *Hydrological Sciences Journal*, n° 44 (2), p 263-277.

EPA. (1996): Environmental indicators of water quality in the United States. EPA 841-R-96-002. Office of Water, Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Flageollet J.C. (2012) : Atlas du réchauffement climatique 1971-2010, *Physio-Géo* [Online], Volume 6 | 2012, Online since 04 June 2012, connection on 28 August 2021. URL : <http://journals.openedition.org/physio-geo/3328> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/physio-geo.3328>.

Fohrer, N., Möller, D., Steiner, N. (2002) : An interdisciplinary modeling approach to evaluate the effects of land use change. *Phys. Chem. Earth*, 27: 655-662.

Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H. and Arnold., J. G. (2007): The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future research directions. *Trans. ASABE* 50(4):1211– 1250.

Gassman P W, Sadeghi A M, Srinivasan R. (2014): Applications of the SWAT model special section: overview and insights. *Journal of Environmental Quality*, 43: 1–8.

Gautam (2016): Article Fast charge separation in a no fullerene organic solar cell with a small driving force.

Gentil L. 1903 : Esquisse stratigraphique et pétrographique du bassin de la Tafna (Algérie) Coll. Serv. Cart. Géol. France et Cart. Géol. Algérie 521 p., 121 fig., 2 cartes géologique.

Gherissi R., (2018) : Modélisation Hydrologique D'un Bassin Versant En Climat Méditerranéen Par L'approche Conceptuelle Globale. Cas De L'oued Lakhdar (Ex : Chouly) (Tafna Nord Ouest Algerien). PhD Thesis, University of Tlemcen, Faculty of Natural and Life Sciences and Earth and Universe Sciences, Algeria.

Gray, D. M., (1972) : Manuel des principes d'hydrologie. Comité National Canadien de la Décennie Hydrologique Internationale. Ottawa.

Guardia P. (1970) : Etude structurale du Djebel Fillaoussène et aperçu sur la tectogénèse dans l'autochtone Oranais (Algérie occidentale). *Bull. Soc. Géol. France* (7), XII, pp. 220-226.

Guardia P. (1975) : Géodynamique de la marge Alpine du continent Africain d'après l'étude de l'Oranie-Nord-Occidentale Relations structurales et paléogéographiques entre le Rif externe et le Tell. Thèse Nice N° 10. 1141., 286 p., 171 fig.

Guardia. P, (1976) : Carte géologique détaillée. Algérie au 1/50.000, Feuille. Nédroma N°269 et Notice explicative.

Guardia.P, (1976) : Carte détaillée, Algérie au 1/100.000. Oranie Nord.Occidentale.

Guardia.P, (1990) : Carte géologique détaillée ,Algérie au 1/50.000 Feuille. Bensekrane N°239 et Notice explicative.

Guiraud.R, (1973): Evolution post-Triasique de l'avant pays de la chaine Alpine en Algérie d'après l'étude du bassin de Hodna et des régions voisines. Thèse science, Nice, pages 270.

Gentil L. (1903) : Esquisse stratigraphique et pétrographique du bassin de la Tafna (Algérie) Coll. Serv. Cart. Géol. France et Cart. Géol. Algérie 521 p., 121 fig., 2 cartes géologique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Gibsi Mailhot, A., Rousseau, A. N., Massicotte, S., Dupont, J., Villeneuve, J. P. (1997) :A watershed-based System for the integrated management of surface water quality; the GIBSI System. *WaterSci. and Technol.*, 36 (5), 381-387.

GIEC, (2007) :Rapport GIEC, 2007 : Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse, ..., 103 pages.

GIEC, (2007) : Bilan de l'évolution du climat. Troisième rapport d'évaluation. *Rapport de synthèse du GIEC*. Wembley, Royaume-Unis : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 37 p.

GIEC. (2008) : Changements climatiques et impacts dans les Alpes. Résultats du WP5 du projet Climat Change Alp. *Rapport Technique* n°1 de l'ONERC, France.

Girard, G., Villeneuve, J.P. (1981) : Le modèle couplé: Simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un système hydrologique. ORSTOM.

Golubev (2001): Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: A reassessment *Geophysical Research Letters* 28:2665-2668.

Habert, E. (2000) :Qu'est-ce qu'un système d'information géographique ? Laboratoire de cartographie appliquée. IRD.

Hargreaves. G.H. & Riley, J.P. (1985): Agricultural benefits for Senegal River Basin. *J. Irrig. And Drain. Engr.*, 111(2), 113-124.

Heddi M. (1988) : Etude géologique des terrains d'Age Permien à Jurassique inférieur de la partie centrale des Traras. Djebels Annina Boudjellil et Es-Sakika en Oranie (Algérie occidentale). *Mém. Ingénieur. Etat, Univ. Oran* , 111 p., 38 fig.

Houdenou C., Hernandez K., (1998) : Modification de la saison pluvieuse dans l'Atakora (1961-1990) : un exemple de sécheresse au nord-ouest du Bénin (Afrique Occidentale). *Sécheresse*, 9(1), 23-34.

Hubert et Carbonnel, (1998) : Journal géographie physique et environnement Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest).

Hubert P., Carbonnel J P. & Chaouche A. (1989) : Segmentation des séries hydrométéorologiques-application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'ouest. *J. Hydrol.* 110(3-4), 349-367. PNUE.

Higy, C. (2000) : Modélisation conceptuelle et à base physique des processus hydrologiques: application au bassin versant de la Haute-Mentue. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 336p.

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

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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), p 569-587.

Kacemi M., Senina A. (2015) : Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe alluviale d'oued Boukiou (Nord-Ouest Algérien). Mém. master. Univ Tlemcen. p172.

Karoly, Lynn A., and Constantijn W.A. Panis, (2004): The 21st Century at Work: Forces Shaping the Future Workforce and Workplace in the United States, Santa Monica, Calif.: RAND Corporation, MG-164-DOL.

Kebir W. Et Miri A. (1992) : Contribution à l'étude hydrogéologique du bassin versant de l'Oued Boukiou affluent de la Tafna (Monts des Traras : Oranie occidentale).Mém. Ingéniorat Univ. Oran 208 p., 73 fig., 15 pl.

Koukponou A P. (2001) : Détermination de rupture statistique dans les séries chronologiques de paramètre météorologie : application aux stations du Burkina Faso. Mem de fin d'étude. Ecole Inter-états d'ingénieurs de l'Équipement Rural. 179p

IPCC (2012): Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates

Lubès H., Masson J.M., Servat E., Paturel J.E., Kouamé B., Boyer J.F., (1994) : Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par application de tests statistiques-Etude bibliographique. Rapport n° 3. ORSTOM, Montpellier.

Maheras (1981) : Situations synoptiques et types de temps journaliers à Thessalonique *Annales de géographie* Année 1984 520 pp. 649-665.

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*, 426 p.

Makhlouf Z., Michel C. (1994): A two-parameter monthly water balance model for French watersheds». *Journal of Hydrology*, n° 162, p 299-318.

Meddi M M, Assani A A, Meddi H (2010): Temporal variability of annual rainfall in the Macta and Tafna catchments, northwestern Algeria, *Water Resour. Manage.* 24, 3817–3833, 2010.

Monteith, J. L. (1965): Evaporation and the environment. In: The state and movement of water in living organisms, XIXth symposium Soc. for Exp. Biol., Swansea, Cambridge University Press, 205-234.

Moonens (2002): Climate Change in Italy Indicated by Agrometeorological Indices over 122 Years *Agricultural and Forest Meteorology* 111(1):13-27DOI:10.1016/S0168-1923(02)00012-6

Moron V., (1994) : Guinean and Sahelian rainfall anomaly indices at annual and monthly scales (1933-1990). *International Journal of Climatology*, 14(3), pp 325-341.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 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 pp.
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C. & Andréassian, V. (2006) :** Développement progressif d'un modèle de bilan hydrique mensuel à deux paramètres. *Journal of hydrology*, 318, p200 à 2014.
- Musy, A. (2005) :** Note de cours d'hydrologie générale. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne, Suisse.
- Musy, A. & Higy, C. (2004) :** Hydrologie, Une science de la nature. Presses polytechniques et universitaires romandes, 348p.
- Nachtergaele, F. & Velthuizen, H. V. (2009):** Verelst L. Harmonized World Soil Database (HWSD). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
- Najib S, (2009) :** Arab Environment: Climate Change: Impact Of Climate Change On Arab Countries.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R. (2011).** Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. Texas Water Resources Institute Technical Report 406, Texas A&M University System, College Station (Texas).
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R. & Williams, J.R. (2002):** Soil and Water Assessment Tool User's Manual, version 2000, Texas Water Resources Institute, College Station, Texas, TWRI Report TR -192.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. & Williams, J.R. (2005):** Soil and Water Assessment Tool theoretical documentation, version 2005. Grassland, Soil and Water Research Laboratory - Agricultural Research Service. Blackland Research Center-Texas Agricultural Experiment Station.
- New M, Hulme M, Jones PD (2000):** Representing twentieth century space-time climate variability. Part 2: development of 1901–96 monthly grids of terrestrial surface climate *J Clim* in press.
- Nicholson S.E., and T.M.L Wigley. (1984):** Drought in Morocco. I. The general climatology of drought. Report to the Conseil Supérieur de l'eau. Maroc.
- Nicholls S.E. (1996) :** Observed climate variability and change p132-142.
- Ogden, F.L., Garbrecht, J., DeBarry, P.A. and Johnson, L.E. (2001):** GIS and Distributed Watershed Models, II: Modules, Interfaces and Models. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 6, No. 6, 2001, p. 515-523.
- Otmane A., Baba Hamed, K., Bouanani, A., Kebir, L.W. (2018).** Mise en Évidence de la Sécheresse Par l'étude de La Variabilité Climatique Dans Le Bassin Versant de l'oued Mekerra (Nord-Ouest Algérien) (Highlighting drought by studying climate variability in the watershed of the Mekerra river (northwest of Algeria)). *Techniques sciences méthodes*, 9, 23-37.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

OQLF. 2005 : Le grand dictionnaire terminologique. Office Québécois de la Langue Française.

Pall, P., Allen, M. R. & Stone, D. A. (2006): Testing the Clausius – Clapeyron constraint on changes in extreme precipitation under CO2 warming. *Climate Dynamics*. Vol. 28. no. 4, p. 351–363.

Parker (2000): *Canadian Journal of Botany* Volume 78, Number 2 The influence of clear-cutting on ectomycorrhizal fungus diversity in a lodgepole pine (*Pinus contorta*) stand, Yellowstone National Park, Wyoming, and Gallatin National.

Paturel J.E., Servat E., Kouamé B., Boyer J.F., Lubès H., Masson J.M., (1995) : Manifestations de la sécheresse en Afrique de l'ouest non sahélienne. Cas de la Côte d'Ivoire, du Togo et du Bénin. *Sécheresse*, Vol. 6, n° 1.

Paturel J.E., Servat E., Lubès H., Kouamé B., Ouedraogo M., Masson J.M., (1997) : a. Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea - Part two : an integrated regional approach *Journal*.

Payraudeau, S. (2002) : Modélisation distribuée des flux d'azote sur des petits bassins versants méditerranéens. Thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts, Montpellier, 436p.

Pearson et Dawson, (2003): Modeling species–climate interactions, the simulation of dispersal processes in heterogeneous landscapes, and the role of scale in ecology.

Perrin C., Michel C., Andréassian V. (2003): Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology* 279 (1-4), pp. 275-289.

Perrin C., Michel C., Andréassian V. (2007) : Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR). *Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés*, <http://www.cemagref.fr/webgr>. 16 p.

Perrin C., Samie R., Hendrickx F. (2009): Les outils du projet: modélisation hydrologique et représentation des usages. Journée de restitution du projet, EDF (Toulouse) / Cemagref, 27 p.

Piervitali E. Et Colacino M., (2003): Precipitation scenarios in the Centralwestern Mediterranean Basin [dans :] *Mediterranean Climate. Variability and trends*. H.-J. Bolleed., Springer, pp. 245-258.

Priestley, C.H.B. & Taylor, R. J. (1972): On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather. Rev*, 100, 81-92.

Refsgaard, J.C. (1997) : Validation and intercomparison of different updating procedures for real-time forecasting. *Nordic Hydrology*, 28, pp. 65-84.

Roche M.1963 : Hydrologie de surface- Paris, Gauthier – Villars, 430 p.

Rollo, N. 2012 : Modélisation des dynamiques de pollution diffuse dans le bassin versant de la rivière d'Auray. Thèse de doctorat, Université de Nantes, France. 396p.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Root T., Price J., Hall K., (2003): Conserved pathways within bacteria and yeast as revealed by global protein network alignment.

Ruelland, D., Laurent, F. and Trebouet, A. (2004). Spatialisation des successions culturales à partir d'images HRV de SPOT pour une intégration dans un modèle agro-hydrologique. *Téledétection* 4(3), p. 231-250.

Sadran G., (1958) : Les formations volcaniques tertiaire et Quaternaire du Tell Oranais. Thèse Nancy.

Saidi H. (2011) : Impact des changements climatiques sur le régime des cours d'eau : cas de l'Oued Mina (W.Relizane). *Mémoire de magister*, Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique. 141 p.

Sebbar A., Hsaine M., Foughrach H., Badri W., (2012): Étude des variations climatiques de la région centre du Maroc, In : Actes du XXVème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie (Grenoble). Les climats régionaux : observation et modélisation, Édition S. BIGOT et S. ROME. pp : 709-714.

Servat, E., Paturol, J. E., Lubes, H., Kouame, B., Ouedraogo. M. & Masson, 1. M. (1997): Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea-Pan 1: detailed analysis of the phenomenon in Cote d'Ivoire. 1. *Hydrol.* 191, 1-15

Servat E., Paturol J.-E., Lubes-Niel H., Kouame B., Masson J.M., Travaglio M. et Marieu B., (1999) : De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne, *Revue des sciences de l'eau*, 12, 2, 363-387.

Sougoumi H. (2009) : Mise en évidence de la tendance climatique les pluies maximales journalières de l'ETP mensuelles au Burkina Faso. Mem de fin d'étude International Institute for water and environmental engineering.71p.

Stour (2009) : Climatic drought in Morocco during the last decades (Sécheresse climatique au Maroc durant les dernières décennies) January 2008 *Hydroécologie Appliquée* 16:215-232 DOI:10.1051/hydro/2009003.

Smedema, L.K. and Rycroft, D.W. (1983): Land drainage-planning and design of agricultural drainage systems, Cornell University Press, Ithica, N.Y., USA.

Touaibia B., (2004) : Manuel pratique d'hydrologie Editeur : Blida : Presses Madani frères 166p.

Thiery D. (1991): Lumped modelling of river catchments. Version 3.2. Reference Manual. BRGM/R32 209-EN, 139 p.

Thiery D. (2003) : Logiciel GARDÉNIA, version 6.0. Guide d'utilisation. BRGM/RP-52832-FR, 102 p., 42 fig., 3 annexes ;

Thiery D. (2014): Logiciel GARDENIA, version 8.2. Guide d'utilisation. *BRGM/RP-62797-FR*, 126 p., 65 fig., 2 ann. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-62797-FR.pdf>.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Tixeront J., (1969) : Le bilan hydrologique de la mer noire et de la mer méditerranée, International Association of Scientific Hydrology. Bulletin, 14:4, 61-69, DOI: 10.1080/02626666909493754.

Turc L. (1953): le bilan de l'eau des sols, relation entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. 3^{ème} journée de l'hydraulique. Alger pp 36-43.

Turc L. (1955) : Le bilan d'eau des sols. Relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. *Institut National de la Recherche Agronomique*, 6, pp. 5-131.

Verdeil P. (1989):Abaque pour le calcul du déficit d'écoulement en Algérie. Sem. Sci.Terre. Alger.

Vidal, J. P. (2005) : Assistance au calage de modèles numériques en hydraulique fluviale - Apports de l'intelligence artificielle. Ph.D., Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 282 p

Vinnikov.K , Groisman and K.M Lugina, (1990): Empirical Data on Contemporary Global Climate Changes (Temperature and Precipitation) Journal of Climate 3(6):662-677. DOI:10.1175/1520-0442(1990)003.

Vrugt, J. A., Schoups, G. H., Hopmans, J. W., Young, C. H., Wallender, W., Harter, T., & Bouten, W. (2004): Inverse modeling of large scale spatially distributed vadose zone properties using global optimization. Water Resour. Res. 40(6): W06503.

Wmo, (1966): Annual Report of the World Meteorological Organization 1965.

Wigley. K, Briffaand P. & Jones D., (1984): On the average value of correlated time series, with applications in dendro climatology and hydrometeorology J.Clim appl.Meteorol.23:201-2013.

Yemefack, M. (2005): Modeling and monitoring soil and land use dynamics within shifting agricultural landscape mosaic systems in Southern Cameroon. ITC Dissertation 121, ITC Enschede and Utrecht University, the Netherlands. 213 p.

Zennaki. A (2016) : Essai de modélisation hydrodynamique d'une nappe, application dans la nappe alluviale de l'oued Boukiou, mémoire de Magistère en hydraulique à université de Tlemcen, 234p.

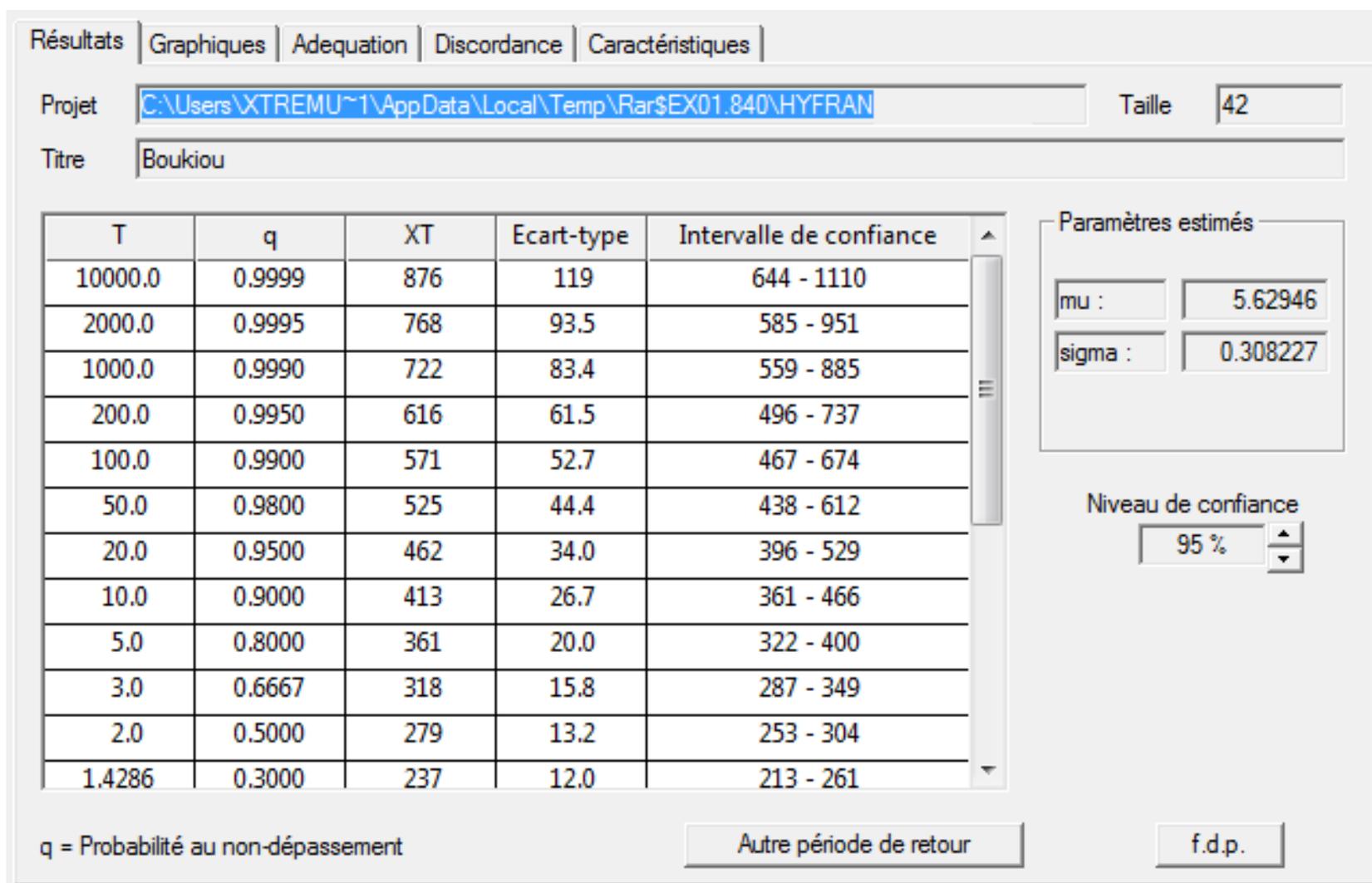
Zennaki A., (2020) : Étude comparative des modèles hydrologiques conceptuels globaux GR et Gardénia appliqués au bassin versant de l'oued Boukiou (Nord-Ouest algérien Revue TSM 12 2020.pp 53-70.

Zettam A., (2018): Transfert des nitrates du bassin versant de la Tafna (Nord-Ouest de l'Algérie) vers la mer Méditerranée - approche couplant mesures, modélisation et changement d'échelle vers les grands bassins versants Nord africains, Thèse de doctorat Université de Tlemcen, 220p.

Zhai.G Y. Sun, A Michel (2003): Synaptojanin Is Recruited by Endophilin to Promote Synaptic Vesicle Uncoating August 2003Neuron 39(2):217-25. DOI:10.1016/S0896-6273(03)00429-X.

ANNEXES

ANNEXES



Annexe 1. Résultat temps de récurrences Loi log normale des précipitations annuelles

ANNEXES

Résultats | Graphiques | Adequation | Discordance | Caractéristiques

Projet : C:\Users\XTREMU~1\AppData\Local\Temp\Rar\$EX01.840\HYFRAN Taille : 42

Titre : Boukiou

T	q	XT	Ecart-type	Intervalle de confiance
10000.0	0.9999	765	222	330 - 1200
2000.0	0.9995	576	151	281 - 871
1000.0	0.9990	505	125	260 - 750
200.0	0.9950	359	76.9	208 - 510
100.0	0.9900	305	60.4	186 - 423
50.0	0.9800	254	46.2	164 - 345
20.0	0.9500	194	30.6	134 - 254
10.0	0.9000	153	21.1	111 - 194
5.0	0.8000	114	13.6	87.3 - 141
3.0	0.6667	86.8	9.28	68.6 - 105
2.0	0.5000	65.3	6.67	52.2 - 78.4
1.4286	0.3000	46.2	5.03	36.3 - 56.0

Paramètres estimés

mu : 4.1791

sigma : 0.661707

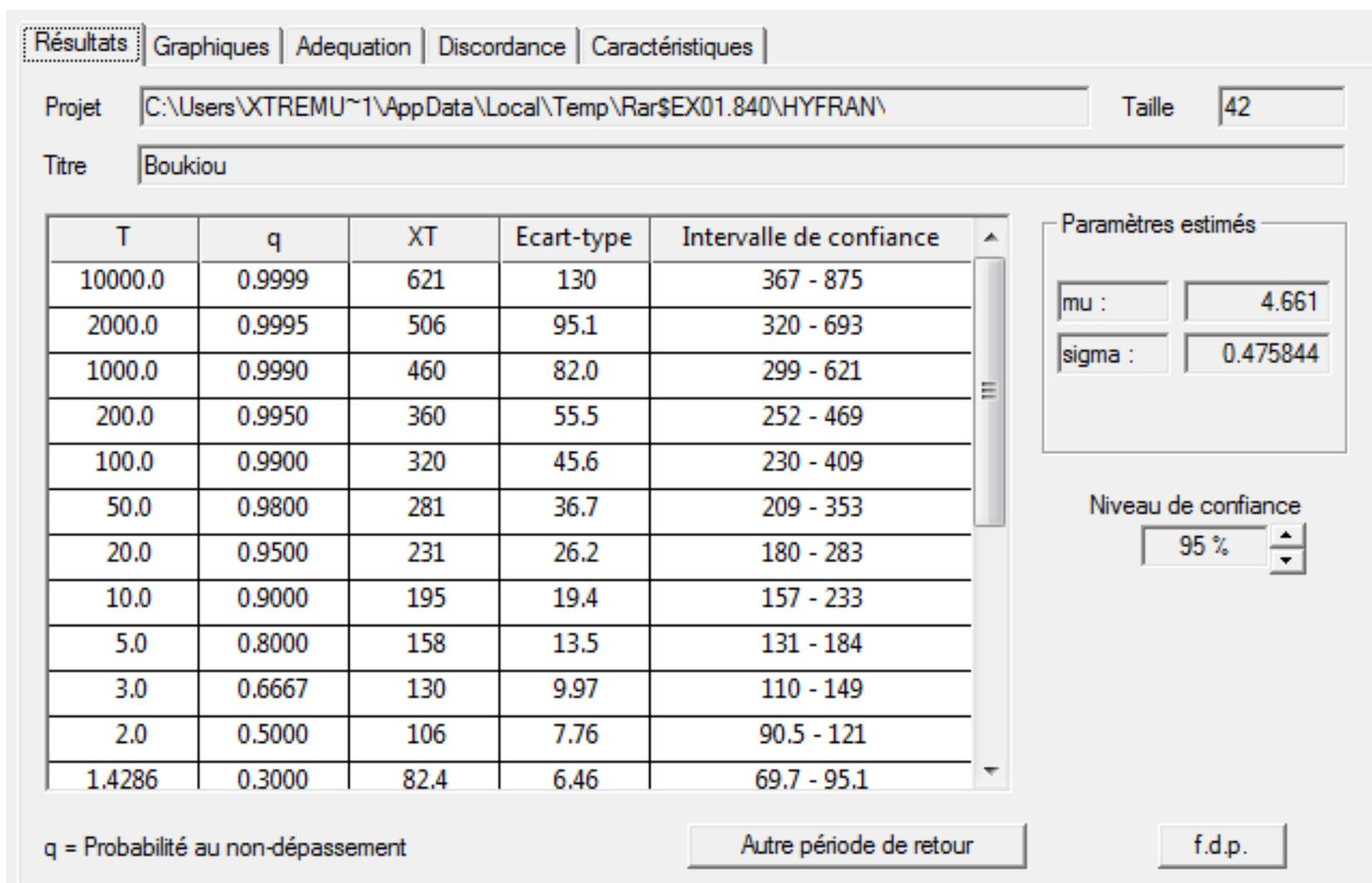
Niveau de confiance : 95 %

q = Probabilité au non-dépassement

Autre période de retour f.d.p.

ANNEXE 2. .Résultat temps de récurrences Loi log normale des précipitations saisonnières Automne

ANNEXES



ANNEXE 3. .Résultat temps de récurrences Loi log normale des précipitations saisonnières Hiver

ANNEXES

Résultats
Graphiques
Adequation
Discordance
Caractéristiques

Projet Taille

Titre

T	q	XT	Ecart-type	Intervalle de confiance
10000.0	0.9999	854	248	368 - 1340
2000.0	0.9995	643	168	314 - 973
1000.0	0.9990	564	140	290 - 838
200.0	0.9950	401	85.9	232 - 569
100.0	0.9900	340	67.4	208 - 472
50.0	0.9800	284	51.5	183 - 385
20.0	0.9500	216	34.2	149 - 283
10.0	0.9000	170	23.6	124 - 216
5.0	0.8000	127	15.2	97.4 - 157
3.0	0.6667	96.8	10.3	76.5 - 117
2.0	0.5000	72.8	7.44	58.2 - 87.4
1.4286	0.3000	51.4	5.61	40.4 - 62.5

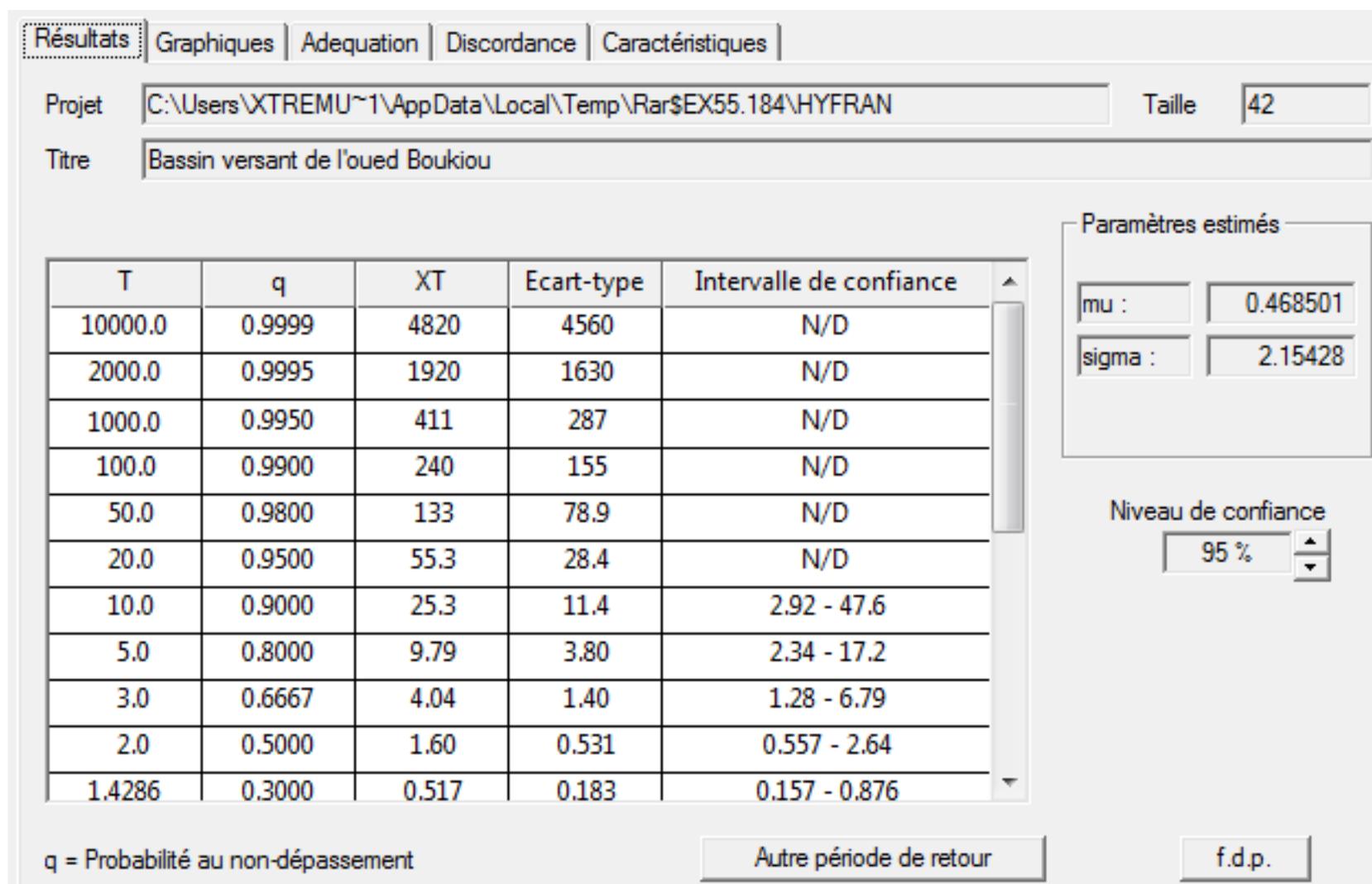
Paramètres estimés
 mu :
 sigma :

Niveau de confiance

q = Probabilité au non-dépassement

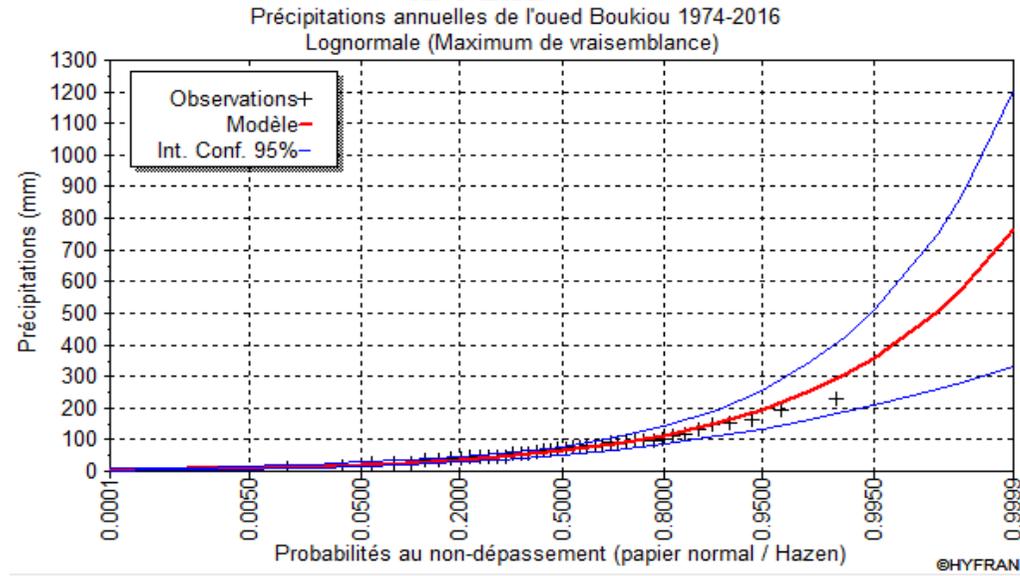
ANNEXE 4. .Résultat temps de récurrences Loi log normale des précipitations saisonnières Printemps

ANNEXES

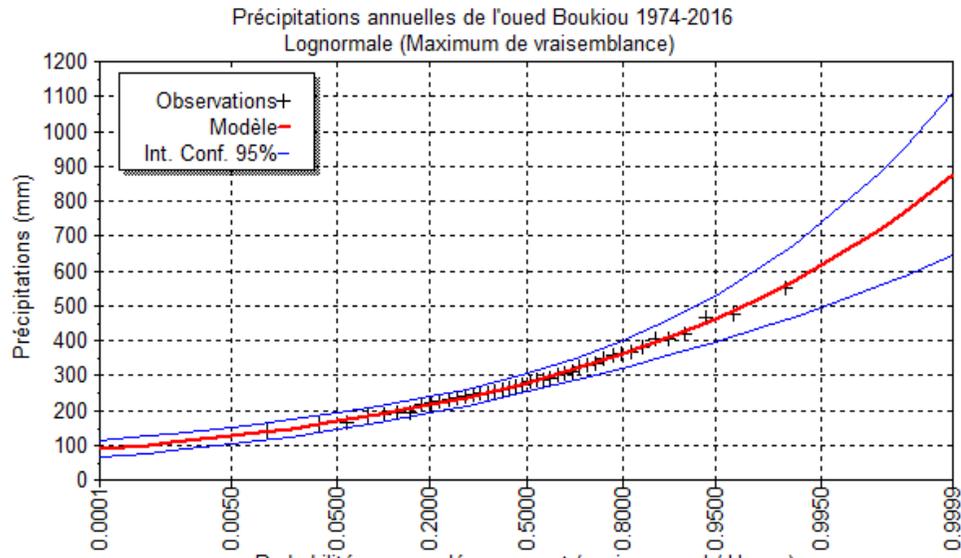


ANNEXE 5. .Résultat temps de récurrences Loi log normale des précipitations saisonnières Eté

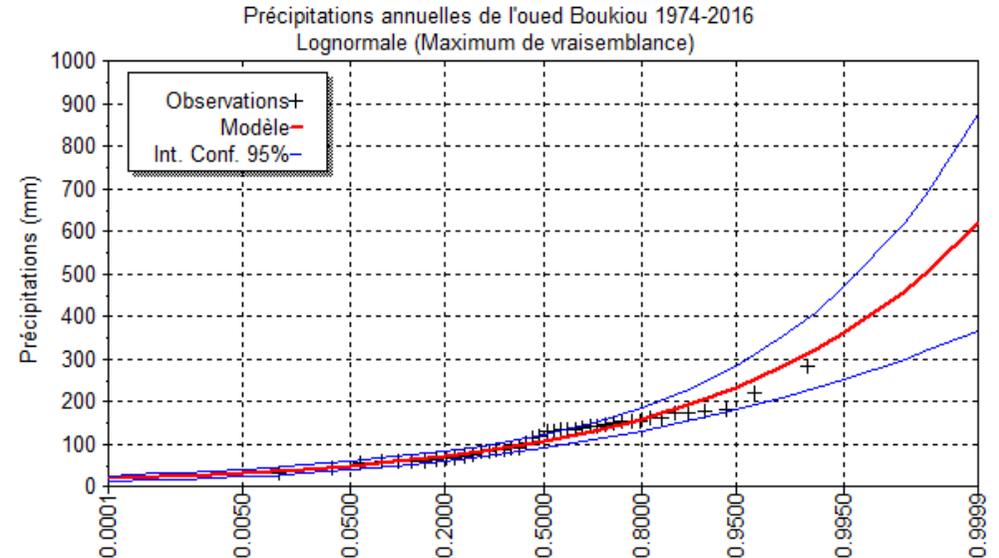
ANNEXES



ANNEXE 6 : Graphe des précipitations loi log normale ANNUEL

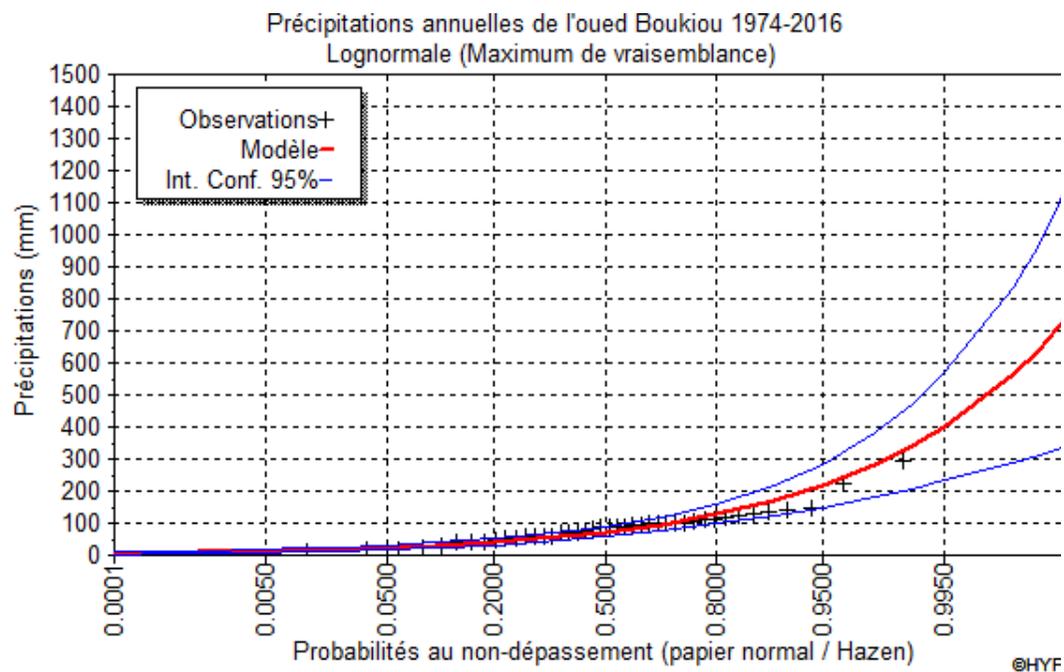


ANNEXE 7 : Graphe des précipitations loi log normale AUTOMNE

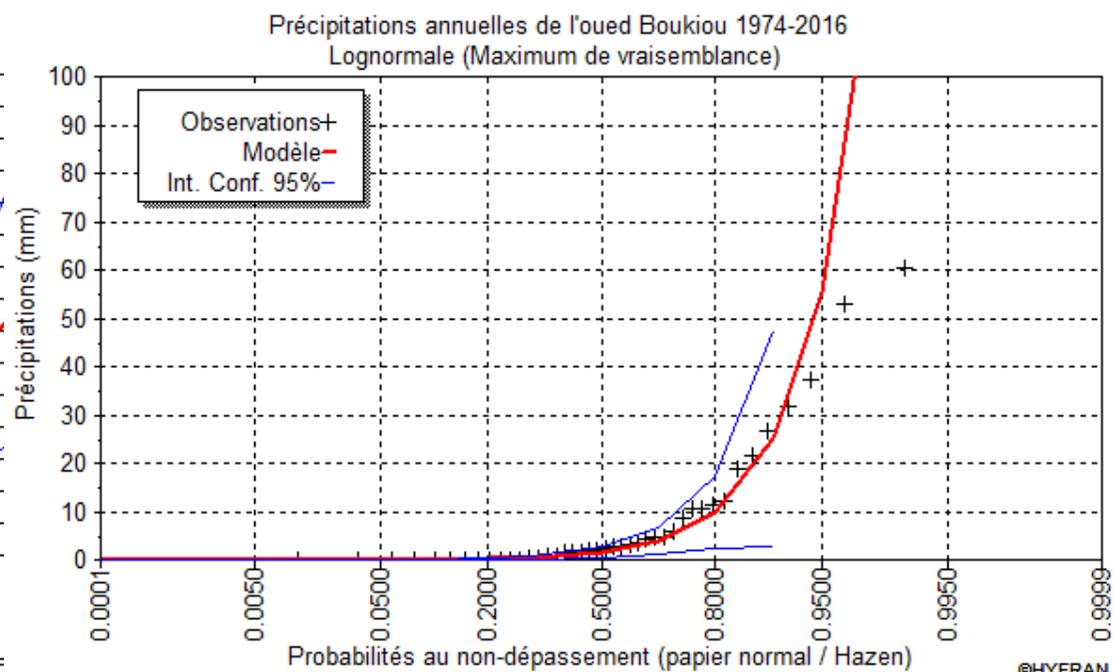


ANNEXE 8 : Graphe des précipitations loi log normale HIVER

ANNEXES

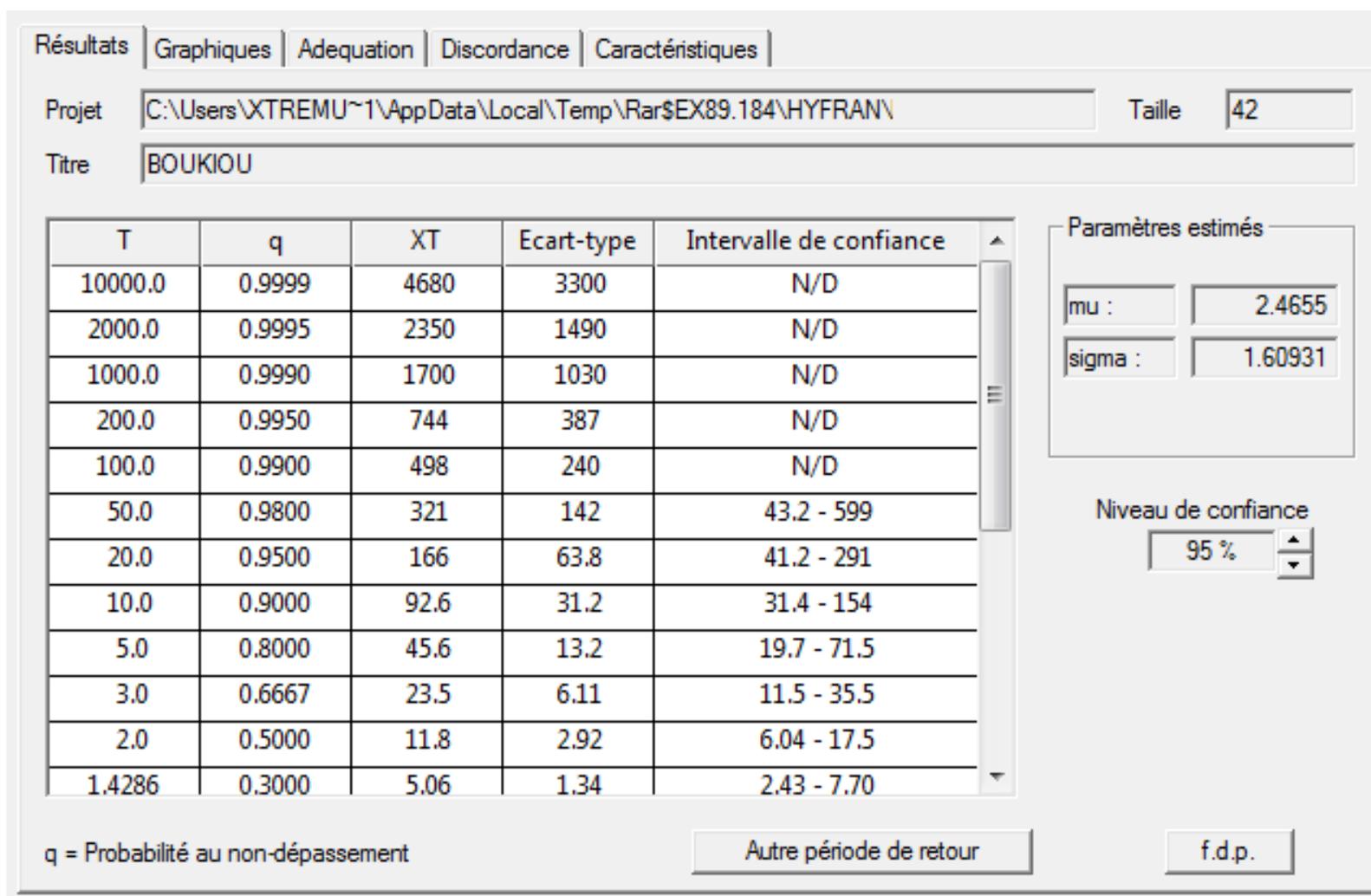


ANNEXE 8 : Graphe des précipitations loi log normale PRINTEMPS



ANNEXE 8 : Graphe des précipitations loi log normale ETE

ANNEXES



Annexe 9.loi .Résultat temps de récurrences log normale des Lames d'eau écoulées annuelles

ANNEXES

Résultats
Graphiques
Adequation
Discordance
Caractéristiques

Projet

Taille

Titre

T	q	XT	Ecart-type	Intervalle de confiance
10000.0	0.9999	57.1	83.0	N/D
2000.0	0.9995	42.1	48.4	N/D
1000.0	0.9990	36.5	36.9	N/D
200.0	0.9950	24.9	16.8	N/D
100.0	0.9900	20.5	10.8	N/D
50.0	0.9800	16.5	6.25	N/D
20.0	0.9500	11.7	2.86	6.13 - 17.3
10.0	0.9000	8.43	2.48	3.58 - 13.3
5.0	0.8000	5.35	2.52	0.415 - 10.3
3.0	0.6667	3.18	2.06	-0.863 - 7.23
2.0	0.5000	1.46	1.20	-0.893 - 3.81
1.4286	0.3000	-0.0748	0.598	-1.25 - 1.10

q = Probabilité au non-dépassement

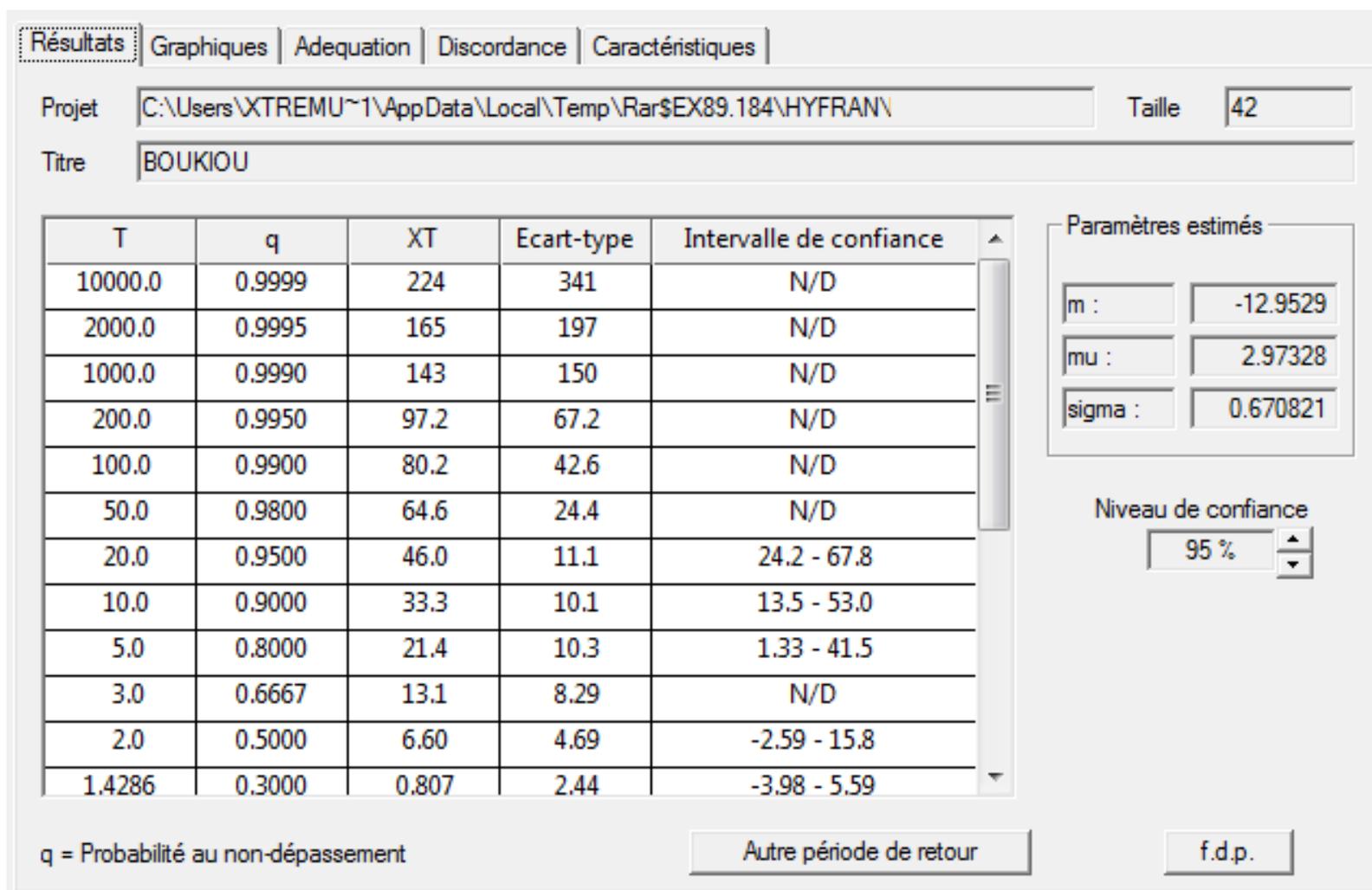
Paramètres estimés

m :	-3.79661
mu :	1.6594
sigma :	0.658782

Niveau de confiance

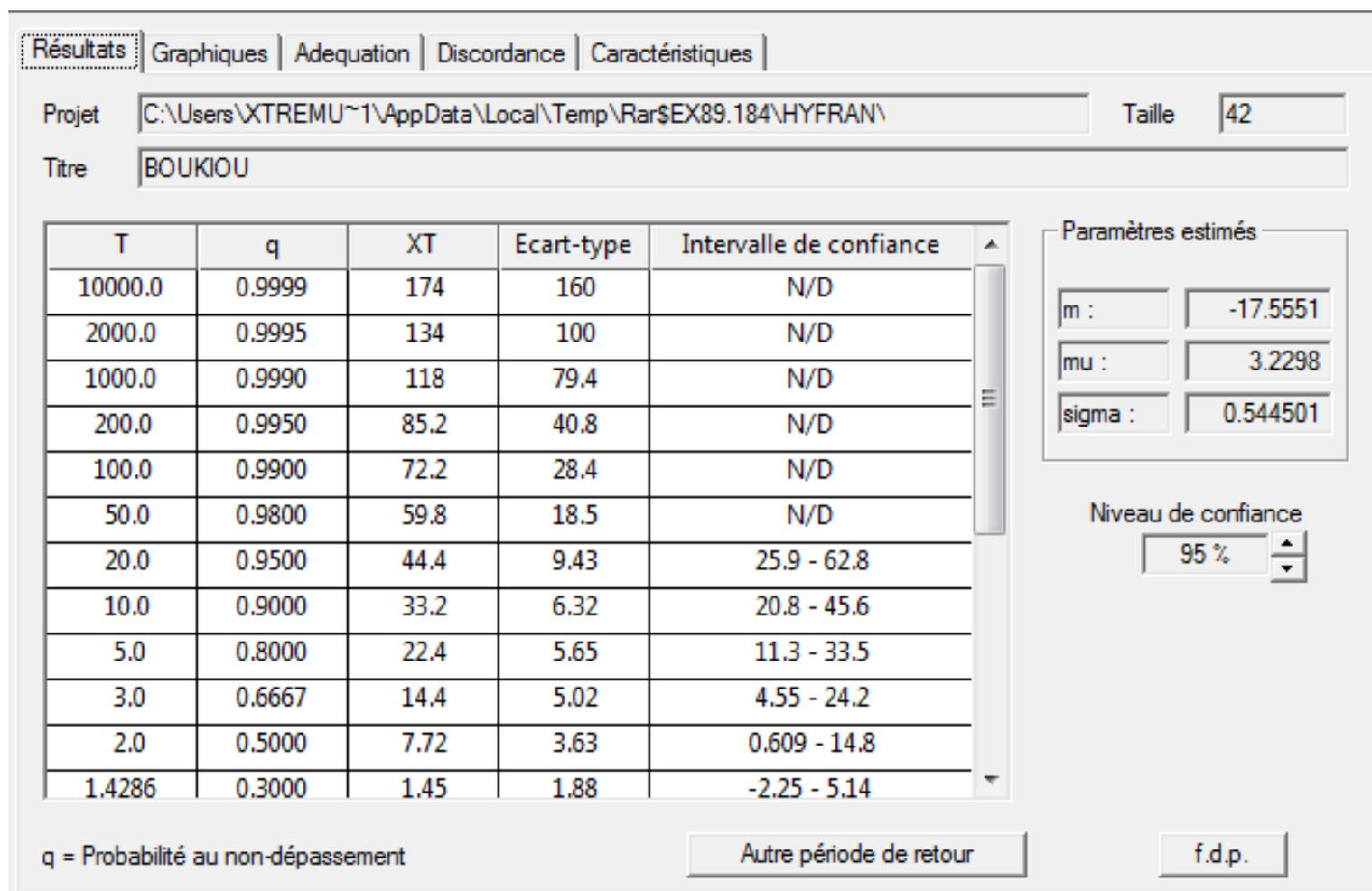
Annexe 10. Résultat temps de récurrences. loi log normale des Lames d'eau écoulées saisonnières Automne

ANNEXES



Annexe 11 .Résultat temps de récurrences loi log normale des Lames d'eau écoulées saisonnières Hiver

ANNEXES



Annexe 12. .Résultat temps de récurrences loi log normale des Lames d'eau écoulées saisonnières Printemps

ANNEXES

Résultats
Graphiques
Adequation
Discordance
Caractéristiques

Projet

Taille

Titre

T	q	XT	Ecart-type	Intervalle de confiance
10000.0	0.9999	876	118	644 - 1110
2000.0	0.9995	768	93.4	585 - 951
1000.0	0.9990	722	83.3	559 - 885
200.0	0.9950	616	61.5	496 - 737
100.0	0.9900	571	52.7	467 - 674
50.0	0.9800	525	44.4	438 - 612
20.0	0.9500	462	34.0	396 - 529
10.0	0.9000	413	26.7	361 - 466
5.0	0.8000	361	20.0	322 - 400
3.0	0.6667	318	15.8	287 - 349
2.0	0.5000	279	13.2	253 - 305
1.4286	0.3000	237	12.0	213 - 261

q = Probabilité au non-dépassement

Paramètres estimés

mu :

5.6296

sigma :

0.308166

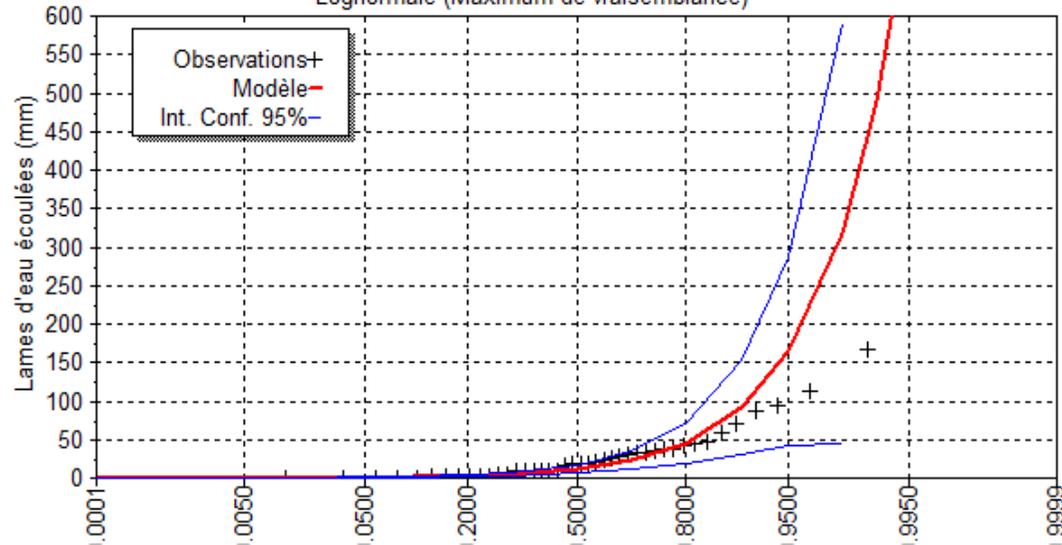
Niveau de confiance

95 %

Annexe 13. .Résultat temps de récurrences loi log normale des Lames d'eau écoulées saisonnières Eté

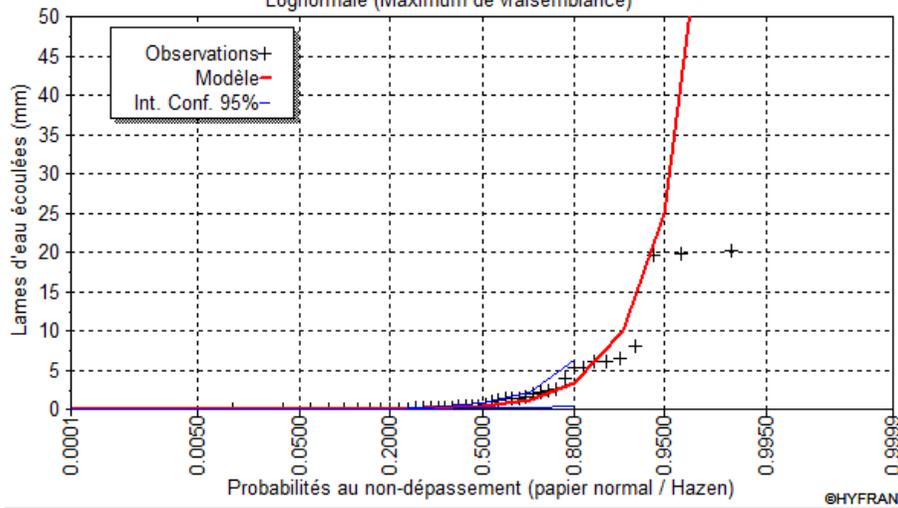
ANNEXES

Lames d'eau écoulées annuelles de l'oued Boukiou 1974-2016
Lognormale (Maximum de vraisemblance)



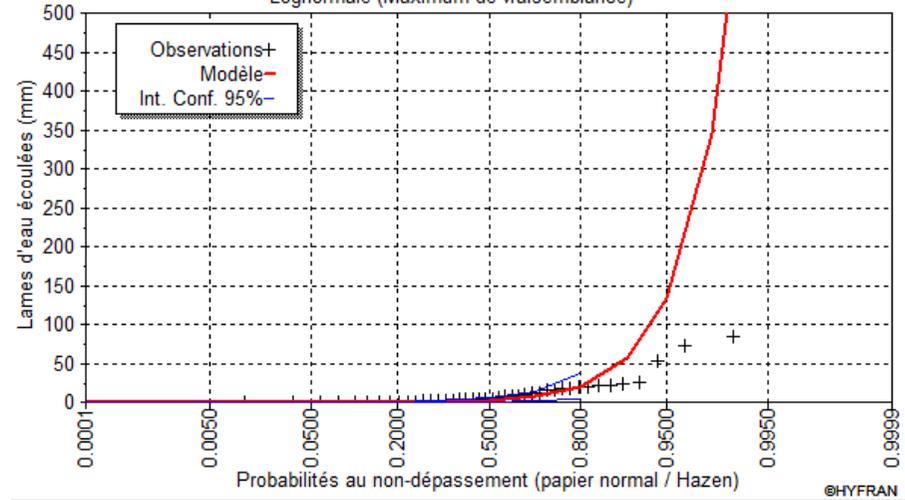
ANNEXE 14 : Graphe des lames d'eau écoulées loi log normale annuel

Lames d'eau écoulées annuelles de l'oued Boukiou 1974-2016
Lognormale (Maximum de vraisemblance)



ANNEXE 15: Graphe des lames d'eau écoulées loi log normale
automne

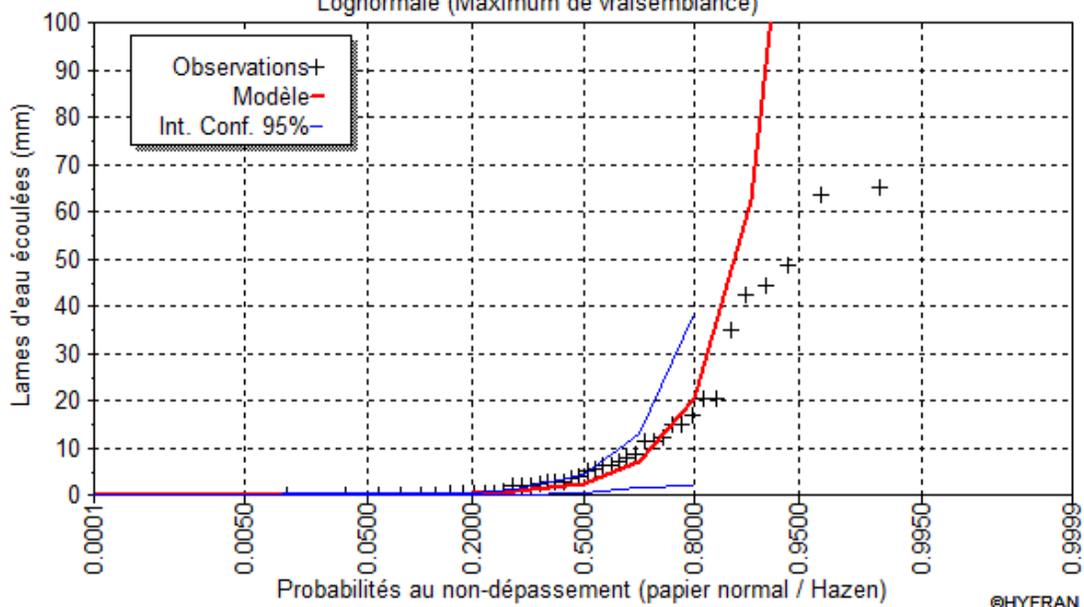
Lames d'eau écoulées annuelles de l'oued Boukiou 1974-2016
Lognormale (Maximum de vraisemblance)



ANNEXE 16 : Graphe des lames d'eau écoulées loi log normale
hiver

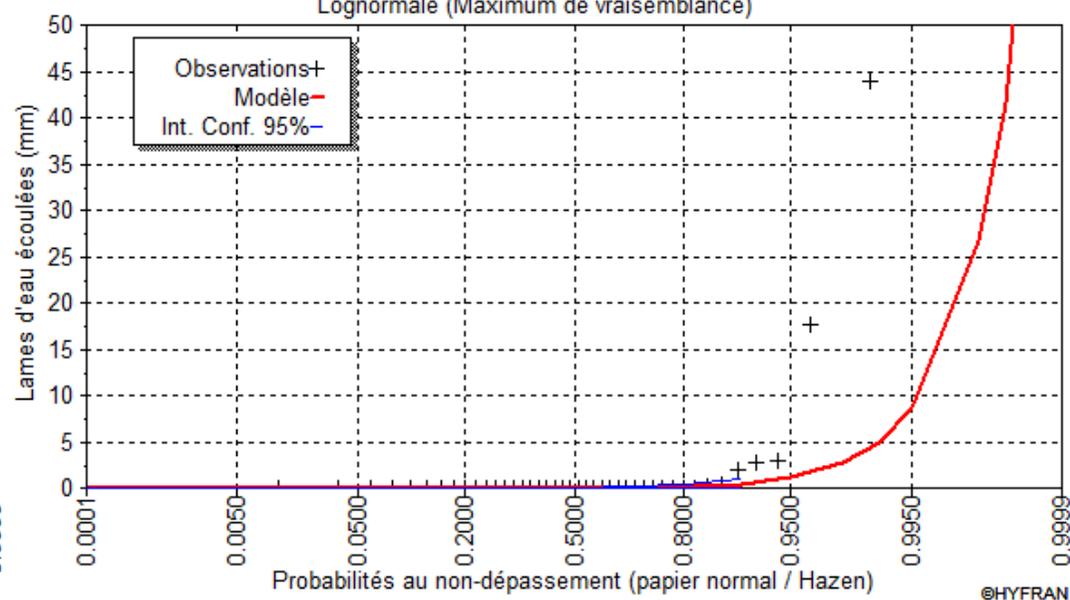
ANNEXES

Lames d'eau écoulées annuelles de l'oued Boukiou 1974-2016
Lognormale (Maximum de vraisemblance)



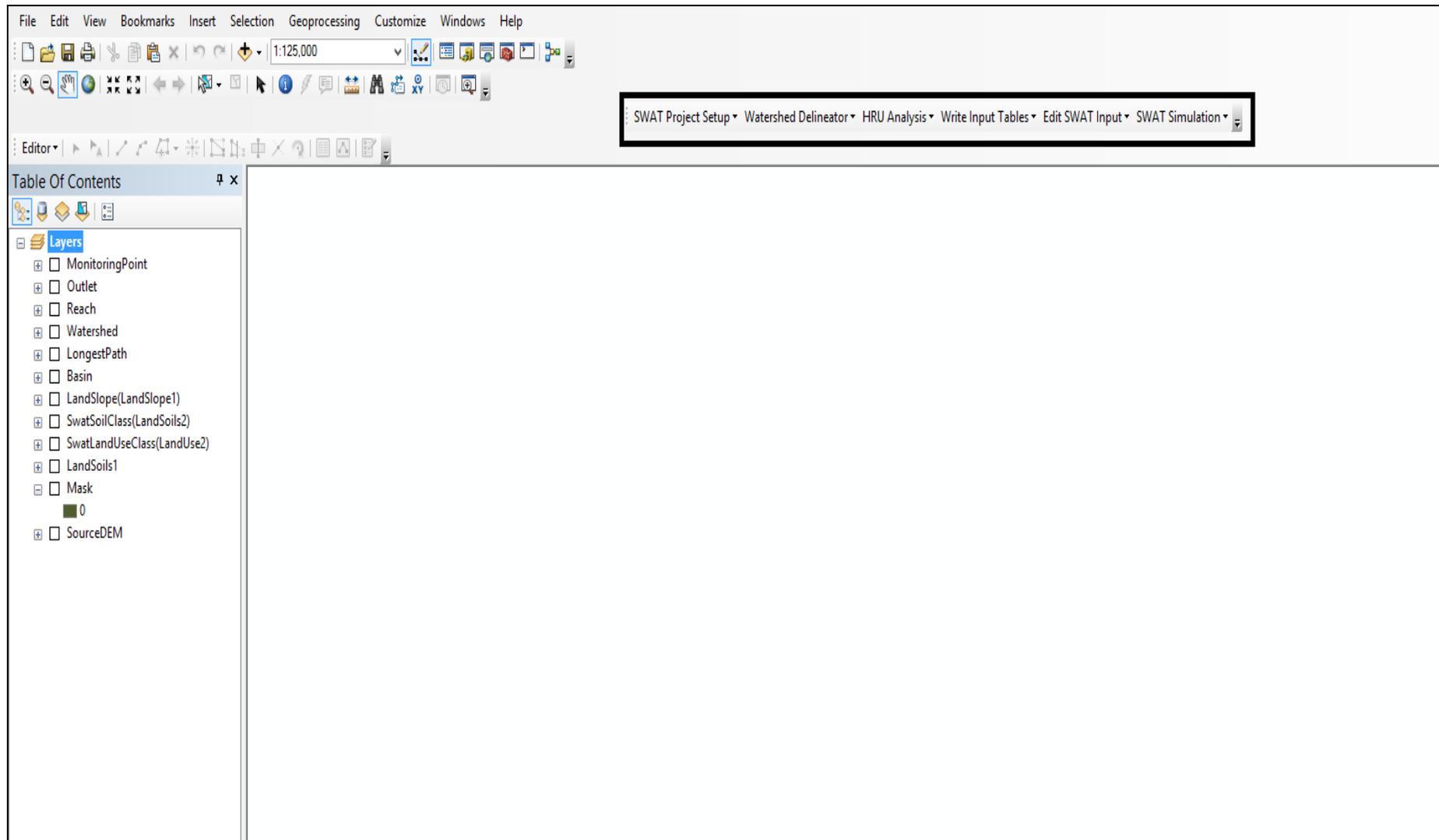
ANNEXE 17 : Graphe des lames d'eau écoulées loi log normale Printemps

Lames d'eau écoulées annuelles de l'oued Boukiou 1974-2016
Lognormale (Maximum de vraisemblance)



ANNEXE 18 : Graphe des lames d'eau écoulées loi log normale été

ANNEXES



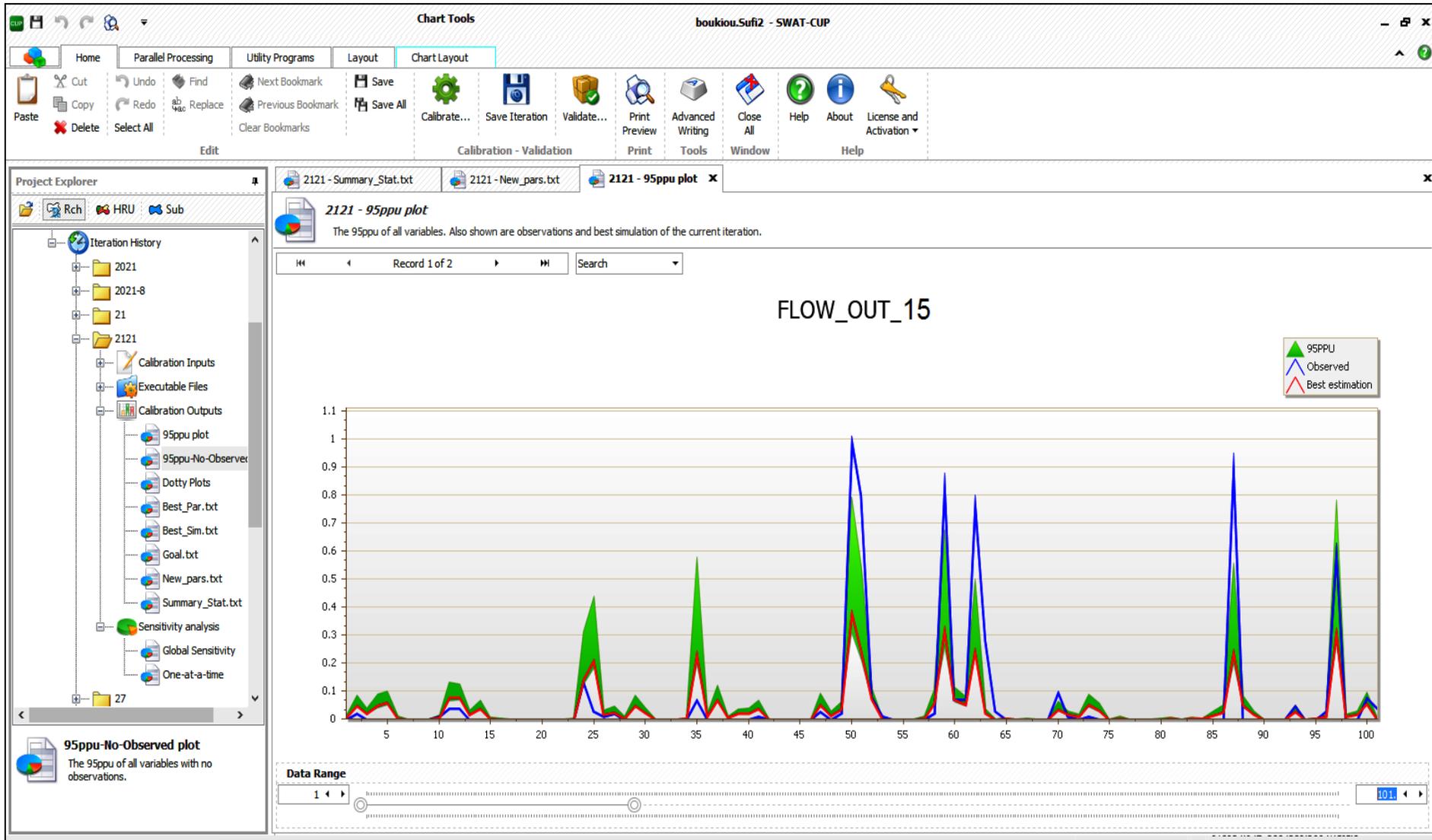
Annexe 19. .interface de l'extension Arc Swat 2012

ANNEXES

Tables	OBJECTID	SNAM	SSID	CMPPCT	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EX	SOL_CRK	TEXTURE	SOL_Z1	SOL_BD1	SOL_AWC1	SOL
PP1rng	203	Calcisols				2 D	1000	0.5	0.5	LOAM	300	1.5	0.08	
PPrng	204	Cambisols				2 C	910	0.5	0.5	LOAM	300	0.9	0.158	
resrng	205	Fluvisols				2 C	1000	0.5	0.5	LOAM	300	1.2	0.175	
ribrng	180	CHARLTON	CT0002		6	3 B	1651	0.5	0.5	L-FSL-GR-SL	203.2	1.13	0.16	
rternng	128	STOCKBRIDG	CT0011		8	4 C	1651	0.5	0.5	L-SIL-SIL-GRV	254	1.13	0.16	
SelectedObjects	76	SACO	CT0013		3	4 D	1524	0.5	0.5	SIL-VFSL-VFSL	304.8	1.2	0.23	
Selections	16	WINDSOR	CT0014		3	3 A	1651	0.5	0.5	LS-LS-S	50.8	1.1	0.15	
seprng	85	WALPOLE	CT0015		4	3 C	1651	0.5	0.5	FSL-SL-GRV-C	177.8	1.13	0.19	
septwq	107	NINIGRET	CT0018		6	3 B	1524	0.5	0.5	FSL-FSL-GRV-	203.2	1.13	0.16	
septwqdefault	62	GROTON	CT0046		6	4 A	1828.800049	0.5	0.5	GR-SL-GR-SL	203.2	1.15	0.13	
septwqrng	66	HERO	CT0047		1	3 B	1524	0.5	0.5	L-GR-FSL-GRV	228.6	1.25	0.16	
sfbrng	74	TISBURY	CT0053		4	3 B	1524	0.5	0.5	SIL-VFSL-GRV	203.2	1.15	0.21	
soilsus	79	PAXTON	CT0061		3	3 C	1651	0.5	0.5	STV-FSL-FSL-I	50.8	1.13	0.08	
solrng	61	POOTATUCK	CT0064		13	3 B	1651	0.5	0.5	FSL-FSL-GRV-	101.6	1.23	0.18	
subrng	77	RIPPOWAM	CT0065		3	3 C	1651	0.5	0.5	FSL-FSL-GRV-	127	1.23	0.2	
swqrng	169	BEACHES	DC0002		2	2 D	1524	0.5	0.5	S-COS	152.4	1.6	0.03	
tbIMETADATA	199	ROCK OUTCR	DC0015		5	1 D	1524	0.5	0.5	UWB	1524	2.5	0.01	
tblOutputVars	179	URBAN LAND	DC0035		8	1 D	152.3999939	0.5	0.5	VAR	152.4	1.5	0.1	
till	201	WATER	DC0038		3	1 D	25.39999962	0.5	0.5		25.4	1.72	0	
tilldefault	162	FLUVAQUENT	DE0202		2	1 D	25.39999962	0.5	0.5		25.4	0	0	
tillrng	178	UDIFLUVENT	DE0209		2	1 D	25.39999962	0.5	0.5		25.4	0	0	
TSType	89	UDIPSAMMEN	DE0211		4	1 D	25.39999962	0.5	0.5		25.4	0	0	
urban	129	UDORTHENT	DE0214		2	1 D	25.39999962	0.5	0.5		25.4	0	0	
urbandefault	110	AGAWAM	MA0001		4	5 B	1651	0.5	0.5	FSL-FSL-FSL-C	279.4	1.15	0.16	
urbanrng	82	PITTSTOWN	MA0008		2	3 C	1524	0.5	0.5	STV-SIL-VFSL	254	1.15	0.11	
	193	BERNARDSTC	MA0010		3	3 C	1651	0.5	0.5	STV-SIL-CN-S	152.4	1.1	0.12	
	95	DEERFIELD	MA0013		1	3 B	1651	0.5	0.5	LFS-S-S	228.6	1.1	0.12	
	43	PITTSFIELD	MA0015		2	3 B	1651	0.5	0.5	STV-FSL-FSL-I	228.6	1.5	0.09	
	114	HADLEY	MA0022		8	3 B	1828.800049	0.5	0.5	VFSL-VFS-S	279.4	1.35	0.16	
	28	WINOOSKI	MA0023		2	2 B	1524	0.5	0.5	SIL-LVFS	203.2	1.25	0.21	

Annexe 20. Interface d'addition des caractéristiques des sols dans la base de données Swat

ANNEXES



Annexe 21.Interface de Swat Cup 2012