

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان-
Université ABOU BEKR BELKAID



Faculté de Technologie

Département d'Hydraulique

MEMOIRE

Projet de Fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique
Option : Ouvrage Hydraulique

Theme

Effet du réchauffement climatique sur oued Boukiou

Soutenue publiquement le :

Présenté par :

BENDIMERAD NASSIM

Devant le jury:

MR MEGNOUNIF A.

Président

MME FANDI W.

Examineur

MME BOUKLI C.

Encadrant

MME TADLAOUI S.

Encadrant

Année Universitaire 2020/2021

Remerciements

Tous d'abord je tiens à remercier Dieu le tout-puissant de m'avoir accordé santé, patience et courage pour accomplir ce projet.

Je remercie mes encadreurs **M^{me} TADLAOUI** et **M^{me} BOUKLI** pour la direction technique de ce travail, leurs orientations, leurs conseils et encouragements qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

Je remercie **Mr MEGNOUNIF** le président du jury pour avoir accepté de présider le jury.

Je remercie également **M^{me} W. FANDI** d'avoir accepté de juger mon travail.

Je remercie mes parents pour leurs soutiens moral et financier.

Un grand merci à tout le personnel de la Direction des Ressources en Eaux (DRE) pour leur aide précieuse.

Un remerciement spécial à toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide et conseil de près ou de loin.

Enfin un grand remerciement à tous les enseignants du département d'hydraulique de la faculté de technologie de l'université ABOUBAKR BELKAID.

Merci

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes très chers parents qui m'ont soutenu et encouragé et conseillé durant tout mon parcours et dans toute ma vie, qu'Allah les garde en bonne santé.

A ma sœur à qui je souhaite tout le bonheur du monde.

A toute ma famille.

Mes amis avec lesquels j'ai partagé des moments inoubliables.

Tous mes enseignants et collègues qui m'ont accompagné durant toute ma période d'étude.

Tous ceux qui m'ont aidé de près et de loin.

Résumé

Le bassin de la Tafna a connu à partir des années 80 une longue période de sécheresse, pour une meilleure compréhension du comportement climatique et hydrologique du bassin versant de l'oued Boukiou nous avons tenté dans la présente étude l'application d'un modèle climatique et d'un modèle hydrologique.

La méthode de la descente d'échelle statistique (SDSM) pour réduire les variables pluviométrique et thermométrique a été appliquée.. Afin d'explorer la méthode de SDSM sur le bassin de l'Oued BOUKIOU on a utilisé la Station de DJEBEL ELCHOUACHI (Nord-Ouest de l'Algérie). L'étude comprend le calage et la validation avec des variables atmosphériques à grande échelle englobant les données journalières par le modèle HadCm3 avec une estimation future à l'aide des scénarios climatiques (A2 et B2).

Selon le scénario (A2 et B2) et sur une période allant jusqu'à l'horizon 2100, le modèle montre une augmentation constante de la température et des précipitations annuelles très irrégulières au niveau de la station étudiée.

En parallèle, le modèle hydrologique pluie-débits global à deux paramètres le GR2m a été étudié pour évaluer les performances du modèle à simuler les débits de l'Oued Boukiou. Les résultats obtenus montrent un bon calage et une validation avec un critère de Nash de 71%.

Mots clés : Oued Boukiou – réchauffement climatique- SDSM- HadCm3- GR2m

Abstract

The Tafna basin experienced a long period of drought from the 1980s onwards, for a better understanding of the climatic and hydrological behavior of the watershed of the Boukiou wadi we attempted in this study to apply a climate model. and a hydrological model.

The statistical downscaling method (SDSM) To reduce the rainfall and thermometric variables was applied. In order to explore the SDSM method on the Oued BOUKIOU basin using the DJEBEL ELCHOUACHI Station (North West of Algeria). The study includes calibration and validation with large-scale atmospheric variables encompassing daily data by the HadCm3 model with future estimation using climate scenarios (A2 and B2).

According to the scenario (A2 and B2) and over a period up to the horizon 2100, the model shows a constant increase in temperature and very irregular annual precipitation at the level of the studied station.

In parallel, the global two-parameter rainfall-flow hydrological model, the GR2m, was studied to assess the performance of the model in simulating the flows of the Oued Boukiou. The results obtained show good calibration and validation with a Nash criterion of 71%.

Keywords: Oued Boukiou - global warming- SDSM- HadCm3- GR2m

ملخص

شهد حوض Tafna فترة جفاف طويلة من الثمانينيات فصاعدًا ، من أجل فهم أفضل للسلوك المناخي والهيدرولوجي لمستجمعات المياه في وادي بوكيو ، حاولنا في هذه الدراسة تطبيق نموذج مناخي ونموذج هيدرولوجي.

تم تطبيق طريقة المصغر الإحصائي (SDSM) لتقليل هطول الأمطار والمتغيرات الحرارية من أجل استكشاف طريقة SDSM في حوض واد بوكيو باستخدام محطة جبال الشواشي (شمال غرب الجزائر). تتضمن الدراسة المعايرة والتحقق من صحة المتغيرات الجوية واسعة النطاق التي تشمل البيانات اليومية بواسطة نموذج HadCm3 مع التقدير المستقبلي باستخدام سيناريوهات المناخ (A2 و B2).

وفقًا للسيناريو (A2 و B2) وعلى مدى فترة تصل إلى الأفق 2100 ، يُظهر النموذج زيادة ثابتة في درجة الحرارة وهطول الأمطار السنوي غير المنتظم على مستوى المحطة المدروسة.

بالتوازي مع ذلك ، تمت دراسة النموذج الهيدرولوجي العالمي لتدفق الأمطار ، GR2m ، لتقييم أداء النموذج في محاكاة تدفقات واد بوكيو. النتائج التي تم الحصول عليها تظهر معايرة جيدة والتحقق من صحة مع معيار ناش 71٪.

الكلمات المفتاحية: واد بوكيو - الاحتماس الحراري - GR2m - HadCm3 - SDSM -

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Classification climatique.....	6
Tableau II.1 : Répartition Hypsométrique du bassin versant de Oued Boukiou.....	27
Tableau II.2 : Altitude moyenne par rapport à une classe d'altitude donnée.....	29
Tableau II.3 : Altitudes caractéristiques du bassin versant de oued Boukiou.....	29
Tableau II.4 : Classification du relief selon l'indice global et la dénivelée spécifié après l'ORSTOM.....	31
Tableau II.5 : Classification des bassins versants selon la superficie	31
Tableau II.6 : Distinction hydrogéologique des formations d'oued Boukiou.....	35
Tableau II.7 : Paramètres morphométriques du bassin versant de Oued Boukiou	38
Tableau II.8 : Rapport de confluence du bassin versant de oued Boukiou :.....	39
Tableau II.9 : Rapport des longueurs du bassin versant de oued Boukiou	40
Tableau II.10 : Rapport des aires du bassin versant de oued Boukiou.....	41
Tableau II.11 : Distribution de la couverture végétale sur le bassin versant de Oued Boukiou	44
Tableau II.12 : Caractéristiques morphométriques du bassin versant de oued Boukiou	45
Tableau III.1 : Caractéristique de la station de mesure Djebel chouachi	48
Tableau III.2 : caractéristique de la station de mesure de Zenata	53
Tableau IV.1 : classe des SPI.....	71
Tableau IV.2 : Résultats du calage du modèle GR2m sur Oued Boukiou	81
Tableau IV.3 : Résultats de la validation du modèle GR2m sur Oued Boukiou.....	83

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Composante du système climatique et interactions source.....	5
Figure I.2 : Emission de Gaz à effet de serre.....	11
Figure I.3 : Densité du NO2 avant et pendant le confinement en chine	12
Figure I.4 : Modèle climatique IPSL	14
Figure I.5 : Comparaison des scénarios RCP (traits pleins) et SRES (tirets)	16
Figure II.1 : Situation géographique du bassin versant de la Tafna	20
Figure II.2 : Situation géographique du bassin de la Tafna dans l'ensemble Oranie- Chott Chergui	21
Figure II.3 : Sous bassins de la Tafna.....	21
Figure II.4 : Situation géographique du secteur d'étude	22
Figure II.5 : Photos de Oued Boukiou.....	23
Figure II.6 : Représentation graphique du rectangle équivalent du bassin versant de oued Boukiou.....	25
Figure II.7 : Courbe hypsométrique de oued Boukiou	27
Figure II.8 : Histogramme des fréquences altimétrique de oued Boukiou	28
Figure II.9 : Carte géologique du bassin versant de oued Boukiou.....	32
Figure II.10 : Log synthétique du secteur d'étude de Oued Boukiou.....	34
Figure II.11 : Coupe en travers de la plaine alluviale de l'Oued Boukiou	36
Figure II.12 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Boukiou.....	37
Figure II.13 : Types de bassins versants source	39
Figure III.1 : Situation de la station hydropluviométrique Djebel Chouachi	49
Figure III.2 : évolution des précipitations moyennes interannuelles sur oued Boukiou enregistré la station Dj Chouachi de 1974 à 2018.....	50
Figure III.3 : Evolution des précipitations moyennes mensuelles de 1974 à 2018 sur oued Boukiou enregistrée à la station Dj Chouachi	51
Figure III.4 : Evolution des précipitations moyennes saisonnières de 1974 à 2018 sur oued Boukiou enregistrées à la station Dj Chouachi.....	51
Figure III.5 : données des variations des précipitations moyennes journalières entre 1974 et 2018 de la station Dj chouachi	52
Figure III.6 : Variation des températures moyennes interannuelles entre 1974 et 2018de la station Zenata	53

Figure III.7 : Répartition des températures mensuelles moyennes, minimales et maximales de la station Zenata entre 1974 et 2018.....	54
Figure III.8 : données de l'évolution des températures moyennes saisonnières enregistrées à la station Zenata entre 1974 et 2018.....	55
Figure III.9 : Données des températures journalières enregistrées à la station Zenata de 1974 à 2018.....	55
Figure III.10 : Données de l'évolution interannuelle moyenne des débits de oued Boukiou enregistrées à la station Zenata entre 1974 et 2014.....	56
Figure III.11:Données des variations des débits mensuelles de oued Boukiou enregistrées à la station Dj Chouachi entre 1974 et 2014	57
Figure III.12 : données sur les variations saisonnières des débits de Boukiou enregistrées à la station Dj Chouchi de 1974 à 2014	58
Figure III.13 : Données de l'évolution interannuelle moyenne des lames d'eau écoulées enregistrées à la station Dj Chouchi entre 1974 et 2014	59
Figure III.14 : Données des variations moyennes mensuelles des lames d'eau écoulées enregistrées à la station Dj Chouachi de 1974 à 2014.....	60
Figure III.15 : variation saisonnière moyenne du bassin versant de ouedBoukiou enregistrée à la station Dj Chouachi de 1974 à 2014.....	60
Figure III.16 : fonctionnement du modèle GR2M.....	66
Figure IV.1 : SPI observé de 1974 à 1984	72
Figure IV.2 : SPI observé de 1985 à1995	
Figure IV.3 : SPI observé de 1996 à 2006	72
Figure IV.4 : SPI observé de 2007 à 2016	
Figure IV.5 : Diagramme ombrothermique.....	73
Figure IV.6 : Extraction de BOX du Modèle climatique HadCm3	74
Figure IV.7 : fenêtre du logiciel SDSM	75
Figure IV.8 : application de la réduction d'échelle	76
Figure IV.9 : application des scénarios	77
Figure IV.10 : scénario A2 et B2 des températures sur oued Boukiou avec le modèle HadCm3	78
Figure IV.11 : Scénario A2 et B2 des précipitations sur oued Boukiou avec le modèle HadCm3	79
Figure IV.12 : Résultat du calage du modèle GR2m.....	81
Figure IV.13 : Corrélacion linéaire du calage entre les débits simulés et les débits observés ...	82
Figure IV.14 : Résultat de la validation du modèle GR2m	83
Figure IV.15 : Corrélacion linéaire de la validation entre les débits simulés et les débits observés.....	84

Liste des abréviations

ANRH : agence nationale des ressources hydriques.

BV : bassin versant.

Hmax : Altitude maximale.

Hmin : Altitude minimale.

Hmoy : Altitude moyenne.

Hmed : Altitude médiane.

ORSTOM : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer.

T : Température (°C).

Tmax : Température maximale.

Tmin : Température minimale.

Tmoy : Température moyenne.

Tc : temps de concentration.

OMM : Organisation météorologique mondiale.

ONM : Office National de Météorologie.

Kc : Indice de compacité de Graveleuse.

Ip : Indice de pente de Roche.

Ig : Indice globale.

Imoy : Pente moyenne.

Rc : Rapport de confluence.

Ra : Rapport des aires.

Rl : Rapport des longueurs.

SRES : Second Report on Emission Scenario

Ds : Dénivelé spécifique.

Dd : Densité de drainage.

Sdsm : Statistical downscaling modèle.

RCP : Représentative concentration Pathway.

HadCm3 : Hadley Center Coupled Model 3

GIEC : Groupe Intergouvernemental des Experts du Climat

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	16
CHAPITRE I.....	3
ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE ET GÉNÉRALITÉ.....	3
I.1. Introduction.....	4
I.2. Définition du réchauffement climatique	4
I.3. Climat.....	4
I.4. Classification climatique.....	5
I.4.1. Classification prenant en compte humidité et température	5
I.4.1.1. Climat équatorial.....	5
I.4.1.2. Climat tropical.....	5
I.4.1.3. Climat désertique	6
I.4.1.4. Climat tempéré.....	6
I.4.2. Classification selon tous les paramètres.....	6
I.5. Le climat en Algérie.....	6
I.6. Analyse climatique.....	7
I.7. Paramètres climatiques	7
I.7.1. Température	8
I.7.2. Précipitation	8
I.7.3. Humidité.....	8
I.8. Indicateurs du changement climatique.....	8
I.8.1. Température	8
I.8.2. Glaciers et océans.....	9
I.8.2.2. Augmentation du niveau des mers et océans	9
I.8.2.3. Puits à CO2	9
I.8.2.4. Circulation océanique.....	10
I.8.3. Diminution des réserves d'eau potable	10
I.9. Effets et causes du réchauffement climatique.....	10
I.10. Conséquences.....	12

I.10.1. Une augmentation de la température.....	12
I.10.2. Une augmentation de la teneur en carbone	12
I.10.3. Exemple de l'effet de serre	12
I.11. Modèle climatique.....	13
I.11.1. Downscaling.....	14
I.11.1.1. Mise en œuvre d'un modèle.....	15
I.11.1.2. Mécanisme de downscaling	15
I.11.2. RCP	15
I.11.3. Scenarios d'émission SRES	16
I.12. Modèle hydrologique	17
I.13. Conclusion.....	18
CHAPITRE II.....	19
DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE	19
II.1. Introduction.....	20
II.2. Présentation générale du bassin versant de la Tafna.....	20
II.3. Situation géographique du bassin versant de la Tafna.....	20
II.4. Présentation du bassin versant d'oued Boukiou	22
II.5. Cadre géographique	23
II.6. Caractéristiques géométriques	23
II.6.1. Surface du bassin	23
II.6.2. Périmètre du bassin.....	24
II.7. Caractéristique de forme.....	24
II.7.1. Morphométrie	24
II.7.2. Morphologie du bassin.....	24
II.7.3. Rectangle équivalent.....	25
II.7.4. Facteur de forme	25
II.7.5. Coefficient de circularité	26
II.8. Caractéristiques du relief	26
II.8.1. Courbe hypsométrique.....	26
II.8.2. Altitudes caractéristiques.....	28
II.8.3. L'altitude médiane ou de fréquence	28
II.8.4. Indices de pente	29
II.8.4.1. Indice de pente de Roche Ip.....	29
II.8.4.2. Indice de pente global.....	30

II.8.4.3. Dénivelée spécifique.....	30
II.8.4.4. Pente moyenne.....	30
II.8.4.5. Rayon de circularité.....	30
II.9. Classification de oued Boukiou	31
II.9.1. Relief.....	31
II.9.2. Superficie.....	31
II.10. Géologie.....	32
II.10.1. Etude lithostratigraphique.....	33
II.10.2. Etude Hydrogéologique	35
II.11. Réseau hydrographique	36
II.11.1. Classification par ordre et étude du chevelu hydrographique.....	37
II.11.2. Rapport de confluence (Rc)	38
II.11.3. Rapport des longueurs	40
II.11.4. Rapport des aires.....	40
II.11.5. Fréquence des cours d'eau.....	41
II.11.6. Densité de drainage.....	41
II.11.7. Densité hydrographique.....	42
II.11.8. Coefficient de torrencialité	42
II.11.9. Coefficient d'allongement (Ca)	43
II.11.10. Temps de concentration	43
II.12. Végétation.....	44
II.13. Climat de la zone d'étude	44
II.14. Conclusion	45
CHAPITRE III	47
EFFET DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE SUR OUED BOUKIOU	47
III.1. Introduction	48
III.2. Présentation de la station de mesures	48
III.3. Etude des précipitations.....	49
III.3.1. Variation des précipitations moyennes annuelles.....	49
III.3.2. Variation des précipitations moyennes mensuelles	50
III.3.3. Variation des précipitations moyennes saisonnières	51
III.3.4. Variation des précipitations moyennes journalières	52
III.4. Etude des températures.....	52
III.4.1. Variation des températures moyennes annuelles.....	52
III.4.2. Variation des températures moyennes mensuelles	54
III.4.3. Variation des températures moyennes saisonnières	54

III.4.4. Variation des températures moyennes journalières	55
III.5. Etude des débits.....	56
III.5.1. Variation interannuelle des débits correspondants	56
III.5.2. Variation moyenne mensuelle des débits	57
III.5.3. Variation moyenne saisonnière des débits.....	58
III.6. Etude des lames d'eau	58
III.6.1. Variation moyenne interannuelle des lames d'eau	58
III.6.2. Variation moyenne mensuelle des lames d'eau.....	59
III.6.3. Variation moyenne saisonnière des lames d'eau	60
III.7. Etude des modèles.....	61
III.7.1. Modèles climatiques.....	61
III.7.1.1. introduction	61
III.7.1.2. SDSM	62
III.7.1.3. HadCM3	63
III.7.1.4. Utilisation des scénarios	64
III.7.2. Modèles hydrauliques.....	64
III.7.2.1. Objectifs de la modélisation	64
III.7.2.2. Caractéristiques du modèle.....	65
III.7.2.3. Choix du modèle.....	65
III.7.2.4. La mise en œuvre d'un modèle	65
III.7.2.5. Les critères de calage des performances.....	65
III.7.2.6. Utilisation du modèle GR2M	65
CHAPITRE IV	70
RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS	70
IV.1. introduction	71
IV.2. Régime pluviométrique.....	71
IV.2.1. variabilité annuelle des précipitations	71
IV.2.2. Variabilité mensuelle des précipitations.....	73
IV.3. données climatiques	73
IV.3.1. Utilisation du modèle climatique	74
IV.3.1.1. Procédure de saisie de données	74
IV.3.1.2. Données utilisées.....	74
IV-3-2 résultats :.....	78
IV-3-2-1 prévisions des températures	78
IV.3.2.2. prévisions des précipitations	79
IV.4. Utilisation du GR2m	79

IV.4.1.Méthodologie	79
IV.4.2. Calage.....	80
IV-4-3Validation :	82
IV.5. Conclusion.....	84
CONCLUSION GENERALE	86
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	88
Bibliographie	92
ANNEXES	93

INTRODUCTION GENERALE

Le développement durable et la préservation de l'environnement constituent une préoccupation majeure en Algérie. Ces dernières décennies, plusieurs changements dans le climat se sont manifestés, de longues périodes de sécheresse suivis de crues rapides et violentes entraînant une érosion intense du sol et des transports solides importants. De telles manifestations semblent prédire vers un réchauffement climatique.

Nous avons pris comme modèle d'étude le bassin versant de l'Oued Boukiou, une région septentrionale de l'extrême Ouest Algérien, une zone semi-aride à aride qui se caractérise par une forte irrégularité pluviométrique et une température moyenne en constante élévation, afin d'évaluer les conséquences sur l'environnement mais aussi l'homme.

L'anticipation des risques associés dans la région, dans ce contexte, est l'un des enjeux de l'agriculture et du développement humain.

Notre étude sur le réchauffement climatique fait appel à des modèles climatiques qui constituent un outil précieux pour explorer les processus complexes d'un système climatique. Actuellement, ces modèles sont utilisés non seulement pour la connaissance scientifique mais aussi, de plus en plus, des instruments de prévisions, particulièrement pour les sciences sociales.

Le travail consiste dans un premier temps à l'étude du bassin versant de Oued Boukiou sur le plan hydrologique, quelques modèles et scénarios les plus utilisés seront présentés. Enfin l'application du modèle SDSM par utilisation de la descente d'échelle statistique à partir des données météorologiques de la station Chouachi ; ainsi que l'application d'un modèle hydrologique GR2M pour étudier le comportement de l'Oued Boukiou et satisfaire, ainsi, les besoins de prévisions hydrologiques.

Le plan de ce mémoire est constitué de quatre chapitres :

- Chapitre 1 : présente une synthèse bibliographique générale sur le climat avec ses classifications, le réchauffement climatique et son impact dans le monde, la modélisation climatique.
- Chapitre 2 : présente la zone d'étude avec une description générale sur le bassin versant de Oued Boukiou : la situation géographique, les caractéristiques de forme, la géologie.

Introduction générale

- Chapitre 3 : s'intéresse à l'étude climatique et hydrologique et l'effet du réchauffement climatique sur le bassin versant de Oued Boukiou avec les modèles et les méthodes utilisées pour cette étude.
- Chapitre 4 : application du modèle hydrologique génie rural (GR) avec le GR2m et du modèle climatique Hadcm3 pour déterminer les scénarios A2 et B2 avec le logiciel Sdsm sur le bassin versant de Oued Boukiou et analyser et interpréter les résultats obtenus.

Et enfin, une conclusion générale où nous essayerons de synthétiser les résultats obtenus dans cette étude et faire des recommandations.

CHAPITRE I

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE ET GÉNÉRALITÉ

I.1. Introduction

Depuis la création, la terre a vécu une alternance de réchauffement et refroidissement climatique un effet naturel qui a impacté toute vie. Cependant depuis le début de l'ère industrielle la température n'a cessé d'augmenter.

I.2. Définition du réchauffement climatique

C'est un phénomène d'augmentation de la température moyenne terrestre (océans et atmosphère) qui se produit dans le monde entier et sur plusieurs années.

Ce phénomène est dû aux rejets de plus en plus importants ; domestiques, industriels, agricoles. (GIEC, réchauffement planétaire de 1.5°C, 2019)

I.3. Climat

Le climat peut être défini comme étant les conditions moyennes qu'il fait dans un endroit donné (température, précipitations, etc.) calculées d'après les observations d'au moins 30 ans (défini par l'Organisation Météorologique Mondiale). Il est donc caractérisé par des valeurs moyennes, mais également par des variations et des extrêmes. A l'échelle de la planète, le climat représente une machine complexe qui est le produit, dans l'espace et dans le temps, de toute une série d'interactions entre les éléments qui composent les différents compartiments :

- L'atmosphère,
- La lithosphère (la croûte terrestre),
- L'hydrosphère (l'ensemble des mers, des océans, des lacs et des cours d'eau de la planète)
- La cryosphère (les glaces du monde entier),
- La biosphère (l'ensemble des êtres vivants, en particulier la végétation).(M.Cielsa, 1997)

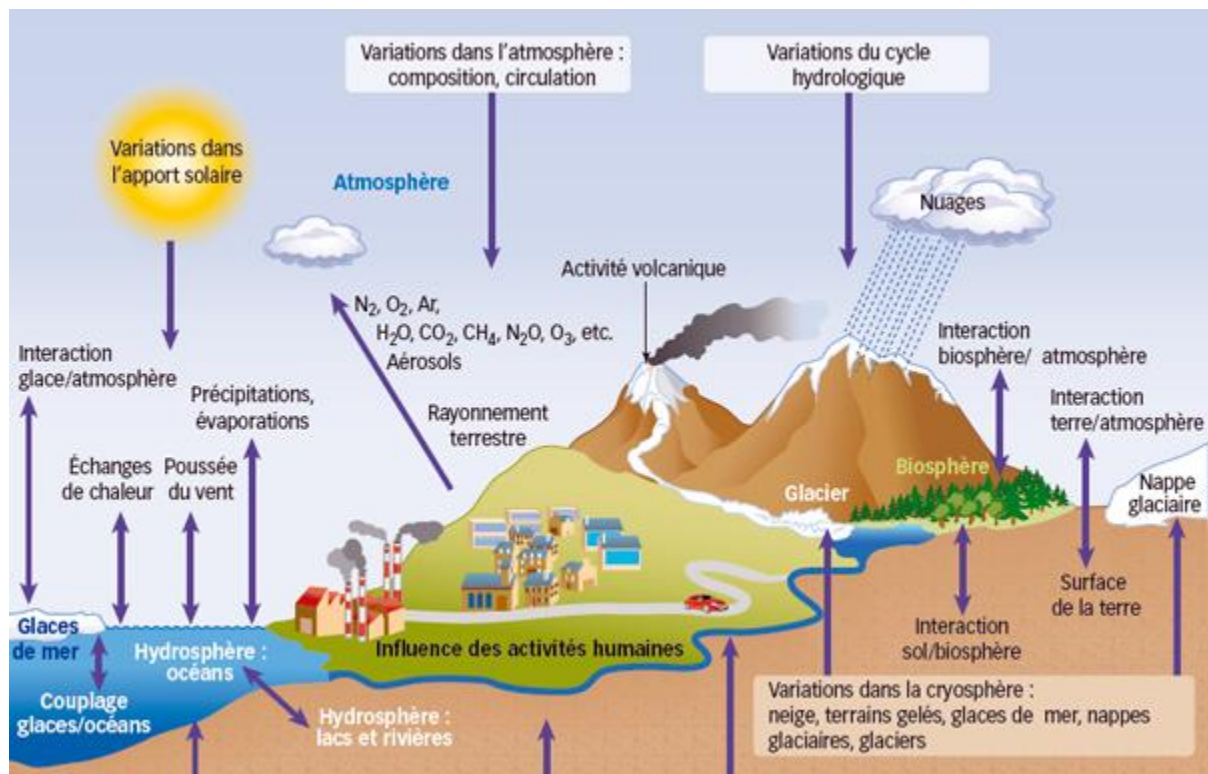


Figure I.1 : Composante du système climatique et interactions *source (interstice.info)*

I.4. Classification climatique

Le climat est un ensemble de circonstances atmosphériques et météorologiques (humidité, pressions et températures) propres à une région donnée

Plusieurs classifications sont proposées, dans ce travail une classification basée sur la température et l'humidité est proposée suivie d'une classification où la pression et le couvert végétal sont pris en comptes. (universalis.fr)

I.4.1. Classification prenant en compte humidité et température

I.4.1.1. Climat équatorial

Se caractérise par une température moyenne assez élevée qui se situe entre 24°C et 32°C et un taux d'humidité qui frôle régulièrement la saturation compris entre 70 et 90 % ; enfin des précipitations entre 1500 et 2000 mm annuelles. (universalis.fr)

I.4.1.2. Climat tropical

Touche les régions comprises entre les tropiques (cancer et capricorne) et où la température moyenne ne baisse pas au-dessous de 18°C et se caractérise par une alternance de saisons sèches durant lesquelles les précipitations sont presque nulles et des températures

relativement basses et des saisons humides avec des précipitations abondantes et températures élevées. (universalis.fr)

I.4.1.3. Climat désertique

Ou aride, se caractérise par la sécheresse durant toute l'année, une humidité de l'atmosphère quasiment nulle et une alternance de température élevée le jour et basse, voire très basse, la nuit. (universalis.fr)

I.4.1.4. Climat tempéré

Caractérisé par des températures annuelles moyennes de 18°C et des précipitations de 600 à 2000 mm. On distingue plusieurs sous-types selon la position géographique de la zone à étudier : climat océanique, méditerranéen et subtropical humide. (universalis.fr)

I.4.2. Classification selon tous les paramètres

Tableau I.1 : Classification climatique (A.Foucault, 2016)

Climats zonaux	Principaux types de climat	Biomes principaux
Climats des basses pressions intertropicales	Climats intertropicaux	Forêt pluviale
	Climats subtropicaux	savane
Climats des hautes pressions subtropicales	Climats arides	Déserts , steppes tropicales
	Climats méditerranéens	Arbustes à feuilles persistantes
Climat des basses pressions tempérées	Climats tempérés tièdes	Forêts caducifoliées
	Climats tempérés froids	Forêts résineux
Climats des hautes pressions polaires	Climats subpolaires	Toundra
	Climats des glaces	Pas de végétation

I.5. Le climat en Algérie

L'Algérie bénéficie d'un climat très varié entre les différentes régions (nord- sud et est- ouest). Le climat est de type méditerranéen sur toute la frange nord qui englobe le littoral et l'atlas tellien (étés chauds et secs, hivers humides et frais). Il est semi-aride sur les hauts plateaux au centre du pays et désertique dès que l'on franchit la chaîne de l'Atlas Saharien.

Les précipitations sont caractérisées par une variabilité spatio-temporelle très importante.

La tranche de pluie annuelle décroît à mesure que l'on descend au sud et tombe à moins de 100 mm au sud de l'Atlas Saharien, cette valeur est généralement considérée comme marquant le début du désert. A la décroissance des précipitations du nord au sud s'ajoute une autre décroissance de l'est à l'ouest.

Les bordures nord centre et est reçoivent en moyenne des quantités annuelles de précipitations variant entre 600 et 1150 mm. Elles sont de ce fait plus arrosées que le reste du pays. Les bordures nord-ouest enregistrent des quantités annuelles moyennes de 250 à 500 mm. (ONM, 2021)

I.6. Analyse climatique

Depuis les années 1970 et avec tous les moyens technologiques mis à la disposition (ordinateurs de calcul, satellites...etc) des chercheurs se sont intéressés au climat à l'échelle terrestre et ont constaté les points suivants :

- Augmentation régulière de la température.
- Fonte des glaciers.
- Augmentation du niveau des mers et océans.

(BAGHDADLI, 2014)

I.7. Paramètres climatiques

Dans l'étude du climat plusieurs paramètres sont pris en compte.

- Les précipitations.
- La température.
- L'évapotranspiration et l'humidité.

(BAGHDADLI, 2014)

I.7.1. Température

Depuis le 19^{ème} siècle les températures sont relevées régulièrement et étaient relativement constantes jusqu'au milieu des années 1970, une hausse particulièrement marquée a été relevée dans certaines zones et durant cette dernière décennie des records de températures sont relevés. (BAGHDADLI, 2014)

I.7.2. Précipitation

Des modifications importantes des précipitations ont été enregistré ces quarante dernières années, ainsi des précipitations, régulières et bien réparties dans le temps et dans la plupart des régions, sont devenues irrégulières avec souvent apparition d'orages violents accompagnés de très fortes pluies avec des cumuls d'eaux très important en peu de temps.

Dans les régions semi-arides (le cas de l'Algérie) la sécheresse s'est installée dans le temps. (BAGHDADLI, 2014)

I.7.3. Humidité

Selon les climatologues, il faut différencier l'humidité absolue qui est la masse totale de la vapeur d'eau contenue dans l'air, un gaz à effet de serre et l'humidité relative qui décrit le degré de saturation de l'air à une température donnée, correspondant au bien être humain.

Durant ces quarante dernières années, l'humidité absolue a augmenté de 2.2% particulièrement significative dans les régions tropicales et l'hémisphère nord.

Une hausse significative des températures pourraient toujours générer une augmentation de l'humidité absolue. (BAGHDADLI, 2014)

I.8. Indicateurs du changement climatique

I.8.1. Température

Depuis 1850, on constate une tendance claire au réchauffement climatique, et même une accélération de celui-ci. Au XX^e siècle, la température moyenne du globe a augmenté d'environ 1,5 °C (GIEC, Les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5°C, 8/10/2018). La décennie 2010-2019 est la période de 10 années consécutives la plus chaude au moins depuis le début des mesures instrumentales, en 1850. En raison d'une forte variabilité naturelle, la température moyenne du globe peut, certaines années, être plus élevée ou plus basse que celle des années précédentes. Mais cette variabilité interannuelle ne doit pas

être confondue avec l'évolution de fond : une tendance générale à la hausse marquée depuis plus d'un siècle. Près de la surface terrestre, le réchauffement s'est accentué. Depuis le milieu des années 1970, il a atteint une moyenne de 0,17 °C par décennie. (GIEC, Les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5°C, 8/10/2018)

I.8.2. Glaciers et océans

I.8.2.1. Albedo

Le phénomène de la fonte des glaces est constaté au niveau des glaciers avec des vitesses de fonte variable. La diminution de la surface enneigée a pour conséquence une diminution de l'albedo global de la planète (l'albedo est la fraction de l'énergie solaire qui est réfléchi vers l'espace).

L'albedo étant plus faible, la part du flux solaire renvoyé vers le cosmos diminue et celle absorbée par la terre augmente provoquant ainsi une augmentation de la température. (J.L.Goudet, 2011)

I.8.2.2. Augmentation du niveau des mers et océans

La fonte des glaces entraîne une augmentation de la proportion d'eau liquide qui va alimenter les mers et océans et par conséquent leur niveau. Rapport G (Giec, 2019)

I.8.2.3. Puits à CO₂

Durant ces dernières années la concentration du CO₂ ne cesse d'augmenter. Le CO₂ se dissout dans l'eau des mers et océans, et ce d'autant plus facilement qu'elle est froide. Une partie est directement dissoute dans l'eau, l'autre partie est assimilée par les phytoplanctons puis dans l'eau après leur mort : donc un volume important de carbone est stocké dans les océans et considéré comme un puits à CO₂.

L'augmentation de la température de l'eau des mers et océans a un impacte négatif non seulement ne peut plus capter de CO₂ mais libère celui emprisonné. (Davidson, 2016)

I.8.2.4. Circulation océanique

La circulation océanique découle d'un transfert de chaleur d'équateur et tropiques vers les pôles, via des phénomènes de convection entre l'eau en surface et celle en profondeur.

Lorsque la température baisse la salinité de l'eau augmente et donc sa densité. Ainsi l'eau de mer plus dense au pôle redescend vers le sud en profondeur et se réchauffe progressivement au niveau de l'équateur et tropiques et remonte vers la surface. Ces courants sont responsables de la régulation à l'échelle du globe exemple : Gulf Stream.

Les pôles jouent un rôle important dans le bon fonctionnement de la circulation océanique profonde en mettant en place les conditions de température et de salinité nécessaires à la plongée de l'eau froide et dense vers les couches profonde des océans. (<https://ocean-climate.org/>)

I.8.3. Diminution des réserves d'eau potable

Le cycle de l'eau est intégralement affecté par le changement climatique : perturbation des régimes pluviométriques, du ruissellement, du niveau des mers, etc. Ces changements ont de fortes répercussions sur les milieux aquatiques, dont l'état dépend de la ressource en eau.

Les milieux aquatiques sont exposés notamment aux modifications des températures atmosphériques et des cours d'eau, à l'intensification des événements extrêmes menant à des variations brutales du débit et du niveau d'eau.

En accentuant le risque de sécheresses, le changement climatique peut mener à une diminution temporaire mais drastique du niveau des eaux des lacs, étangs et mares ayant un impact sur les espèces. De plus, en cas de pénurie d'eau, le changement climatique provoque, par effet de moindre dilution, la concentration des pollutions modifiant l'équilibre biologique et chimique de l'eau pouvant aboutir à une mortalité importante sur différentes espèces (poissons, invertébrés benthiques, végétation aquatique, etc.).

Au contraire, dans le cas de l'intensification et de la multiplication des épisodes de pluies extrêmes, le changement climatique augmente le risque d'inondations augmentant notamment le risque d'érosion détériorant les berges et la ripisylve, essentiels aux espèces inféodées aux milieux aquatiques dulcicoles. (Organisation Mondiale de la Santé, 2019)

I.9. Effets et causes du réchauffement climatique

Depuis la fin du XIXe siècle, la température moyenne terrestre s'est considérablement modifiée. Les progrès techniques liés à un siècle et demi d'industrialisation ont eu un impact majeur sur l'environnement. L'utilisation accrue de combustibles fossiles (charbon, gaz, pétrole), la déforestation ainsi que les pratiques agricoles intensives ont entraîné une

augmentation des émissions de gaz à effet de serre, qui a pour conséquence l'augmentation de la température moyenne terrestre. Les émissions totales de gaz à effet de serre produites aujourd'hui ont augmenté de 80% depuis 1970 et de 30% depuis 1990 (GIEC). Les prévisions du GIEC pour l'an 2100 indiquent une hausse de 1,5 à 6°C. En prenant en compte l'estimation minimale, cette hausse est supérieure à tout autre réchauffement sur 100 ans en considérant les 10 000 dernières années.

La fonte des glaciers de montagnes et des calottes polaires due à l'élévation des températures entraîne une élévation du niveau des océans et des risques de submersion marine sur les territoires situés en dessous du niveau de la mer et sur les zones côtières. Le GIEC estime que le niveau moyen des mers et des océans pourrait s'élever jusqu'à 82 cm d'ici la fin du siècle si rien n'est fait pour limiter les émissions de GES. Au niveau mondial, une hausse de 1 mètre du niveau des mers toucherait directement 10% de la population mondiale, soit 600 à 700 millions de personnes. source (ADEME, 2018)

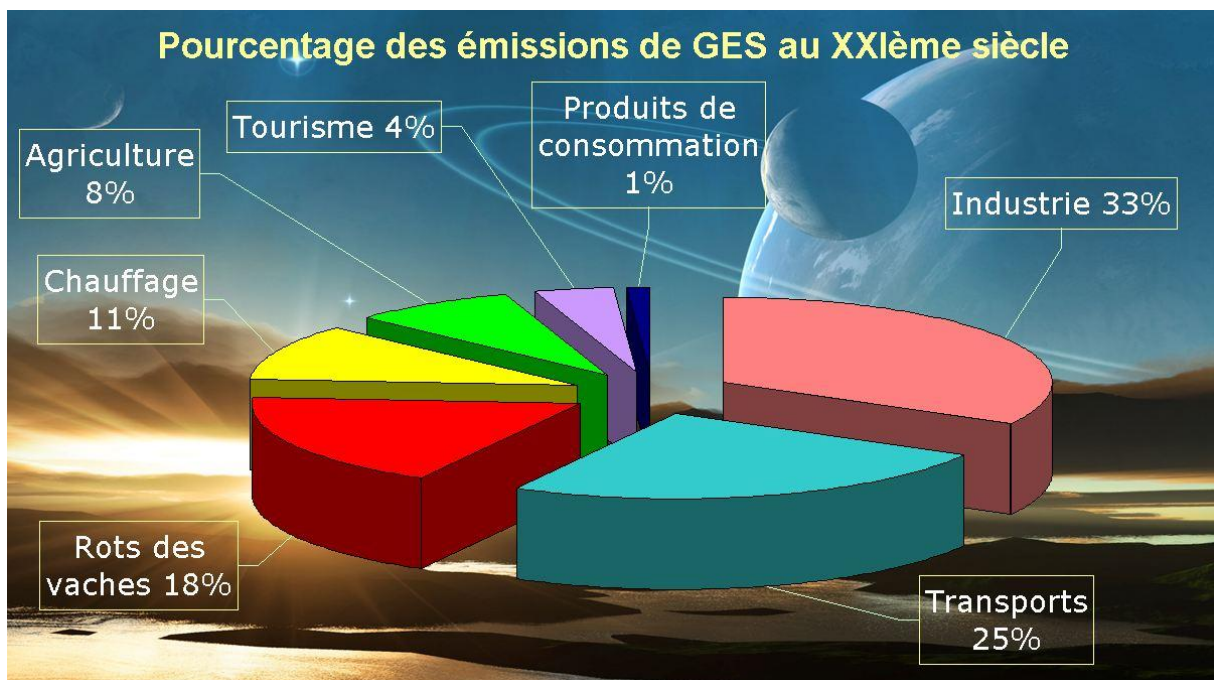


Figure I.2 : Emission de Gaz à effet de serre (terresacree.org/rechauf.htm)

I.10. Conséquences

I.10.1. Une augmentation de la température

Le réchauffement climatique entraîne plusieurs conséquences sur la planète c'est ainsi qu'apparaissent des périodes de canicules de plus en plus longues qui se traduisent par des sécheresses entraînant des réductions tangibles des réserves d'eaux de surface et des nappes phréatiques. (GIEC, 2015)

I.10.2. Une augmentation de la teneur en carbone

La teneur du gaz carbonique de l'atmosphère élevée due à l'utilisation intempestive des énergies fossiles (usines et transports) entraîne une acidification des mers et océans.

Ces deux paramètres vont influencer sur le climat et ; ainsi, apparaissent des phénomènes météorologiques violents (inondation, ouragans...), des modifications des écosystèmes avec des disparitions de forêts, d'habitats de certaines espèces animales et végétales... et enfin des impacts sanitaires avec l'émergence de certaines maladies qui jusque-là étaient cantonnées à des sous- régions tropicales. (Mayer, 2021)

I.10.3. Exemple de l'effet de serre

Des images de la Nasa montrent une chute très importante de la pollution en Chine. Elle est liée, en partie, à la baisse des activités due à l'épidémie de coronavirus Covid-19.

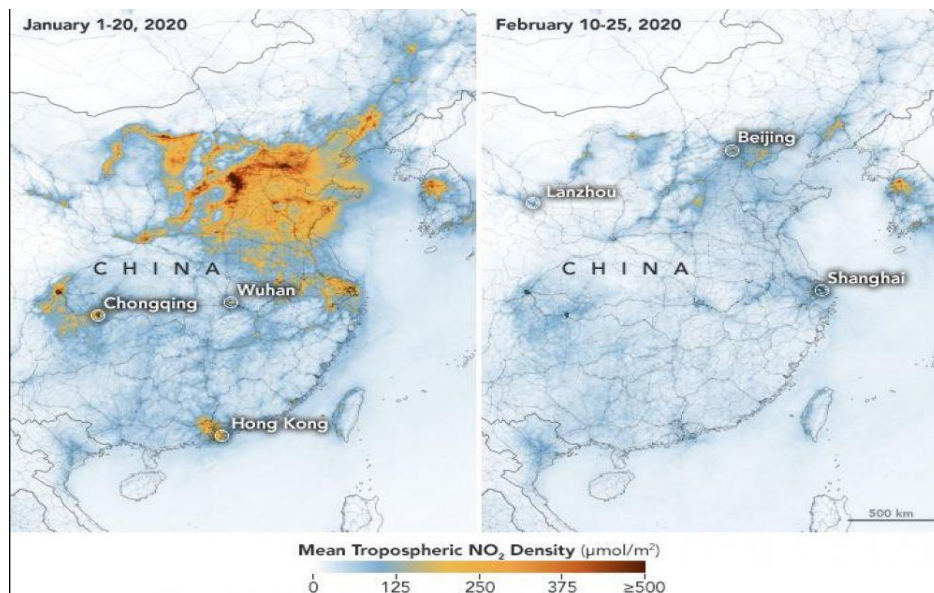


Figure I.3 : Densité du NO₂ avant et pendant le confinement en chine (Nasa 2020)

C'est deux photographies satellite prises par la Nasa avant et pendant la pandémie de la covid-19 en Chine montrent clairement des densités très élevées du dioxyde d'azote dans les régions à forte activité industrielle avant le confinement (janvier 2020) et des densités du dioxyde d'azote faible pendant le confinement et l'arrêt des activités (février 2020).

(Sciences et avenir, 2020)

I.11. Modèle climatique

Un modèle climatique est une modélisation mathématique du climat dans une zone géographique donnée.

Un modèle climatique simule les interactions entre l'atmosphère, l'océan et les surfaces continentales. Grâce au modèle, les scientifiques ont des représentations numériques de la répartition géographique de différents paramètres, tels que la répartition des vents, des nuages, des masses d'eau (J.M.Jancovici, 2007).

Il existe actuellement 54 modèles différents à la date du 3 avril 2020. Beaucoup de centres mettent en œuvre plusieurs modèles en jouant sur la complexité du modèle et/ou sur sa résolution spatiale.

Le premier modèle climatique a été réalisé dans les années 1950 et est la représentation numérique de la planète et les interactions entre ses réservoirs qui modulent le climat : atmosphère, océans et les surfaces continentales.

La surface terrestre est découpée en mailles et leur interaction est modélisée en plusieurs équations mathématiques.

Un modèle climatique cherche à approcher le plus de la réalité ; chaque maille est composé de plusieurs paramètres représentant les mouvements atmosphériques, océanique et surfaces continentales. A partir des conditions de départ connues de chaque paramètre, le modèle nous conduit inexorablement vers des résultats probants.

Actuellement, le Giec utilise le modèle climatique IPSL (Institut Pierre et Simon Laplace) qui résulte du couplage de trois modèles :

- Orchidée : modèle de surfaces continentales basé sur l'étude de l'évolution des sols et la végétation.

- LMDz : les interactions atmosphériques basées sur la circulation atmosphérique et des différents gaz.
- Orcalim : interaction océanique basé sur la circulation océanique des glaces et mers (biologie marine). (<https://www.futura-sciences.com>).

Le modèle climat IPSL

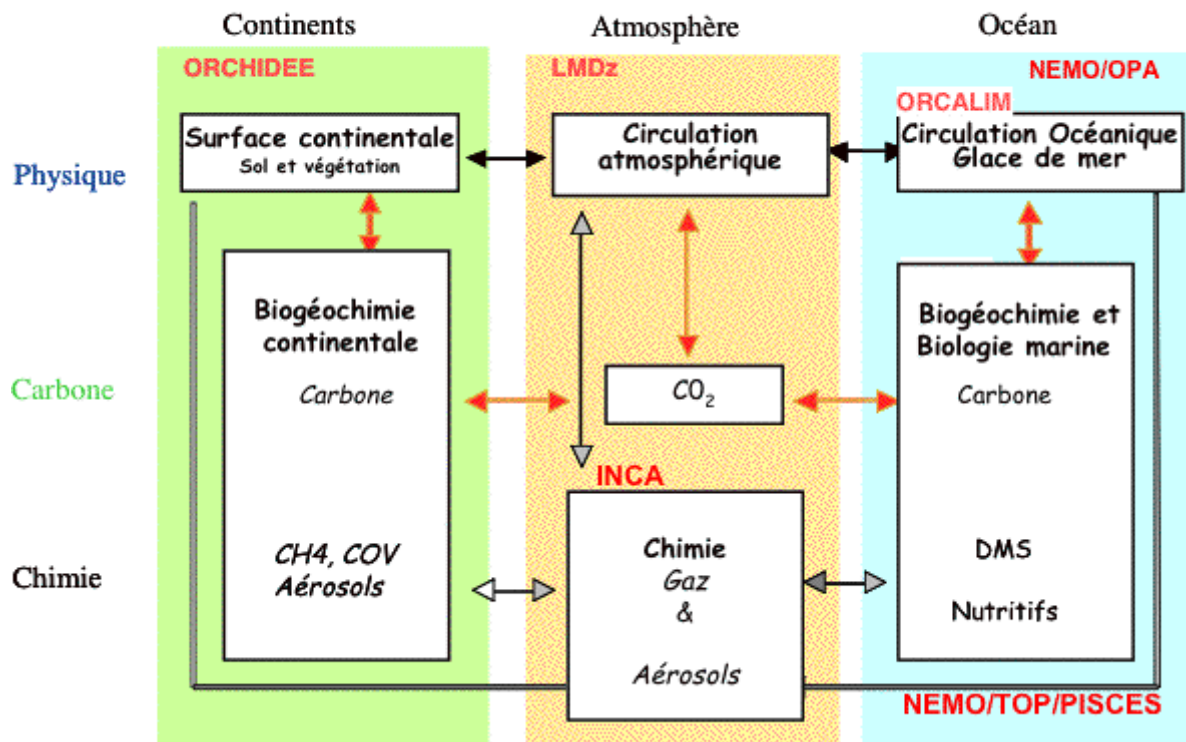


Figure I.4 : Modèle climatique IPSL (<https://www.futura-sciences.com>)

I.11.1. Downscaling

Le downscaling ou la réduction d'échelle est une procédure de déduire des informations haute résolution à partir de variable basse résolution (J.Peng, A.Loew, O.Merlin, & N.E.C.Verhoest, 2017). Cette méthode est utilisée pour obtenir des conditions climatiques à l'échelle locale à partir de variables à l'échelle régionale. Il existe deux techniques :

- Réduction d'échelle dynamique (avec résolution spatiale très élevée)
- Réduction d'échelle statistique (relation statistique est obtenue à partir d'observations données)

A partir de ce modèle, il est possible de faire des prévisions sur des périodes assez longue mais en aucun cas de considérer une prévision journalière.

Dans le cas de notre étude les prévisions climatiques qui seront établies ne seront valable que pour la station ayant fourni les variables locales (station de météorologie de Zenata).

I.11.1.1. Mise en œuvre d'un modèle

Le but est d'obtenir des cartes de températures à fine échelle spatiale pour le présent et le futur. Pour cela, il nous faut des données de sorties d'un modèle climatique déterministe, ce qui nous permettra de comparer une carte du futur à celle du présent, régit selon le même protocole.

I.11.1.2. Mécanisme de downscaling

Ce mécanisme nécessite un découpage de terrain en résolution numérique. L'équation de régression environnementale est calculée à partir d'une matrice de données de températures.

Pour apprécier les prévisions de la région au changement global du climat, nous avons opté par une descente d'échelle statistique à partir des données météorologiques de la station Chouachi. Les modèles de ce type sont conventionnellement développés en deux étapes :

- Modéliser les précipitations
- Modéliser la température

I.11.2. RCP

Le scénario RCP (**R**épresentative **C**oncentration **P**athway) permet de modéliser le climat futur, il est basé sur les hypothèses différentes de quantité de gaz à effet de serre qui sera émise dans le futur. (GIEC, Voies de concentrations représentatives(RCP), 2019)

Quatre scénarios ont été adoptés selon le forçage radiatif qui est une variation de l'énergie transmise à l'ensemble du système terre atmosphère. Il s'agit de la différence entre l'énergie radiative (**ER**) reçue et l'énergie radiative émise.

- $ER_{reçue} > ER_{émise} \Rightarrow$ réchauffement
- $ER_{reçue} < ER_{émise} \Rightarrow$ refroidissement

Quatre RCP sont utilisés :

-RCP2.6 (forçage = $+2.6W/m^2$)

-RCP4.5 (forçage = $+4.5W/m^2$)

-RCP6 (forçage = $+6W/m^2$)

-RCP8 (forçage = $+8W/m^2$)

Cette dernière méthode d'approche a été établie en parallèle à celle utilisée par la précédente génération de scénarios qui s'appuyait sur une approche séquentielle (la taille de l'échantillon n'est pas fixée et les données sont évaluées au fur et à mesure) ; les scénarios les plus utilisés SRES contiennent divers facteurs influents sur le changement climatique : développement de la population et développement socio-économique.

(R.Pielke, M.G.Burgess, & J.Ritchie, 2021)

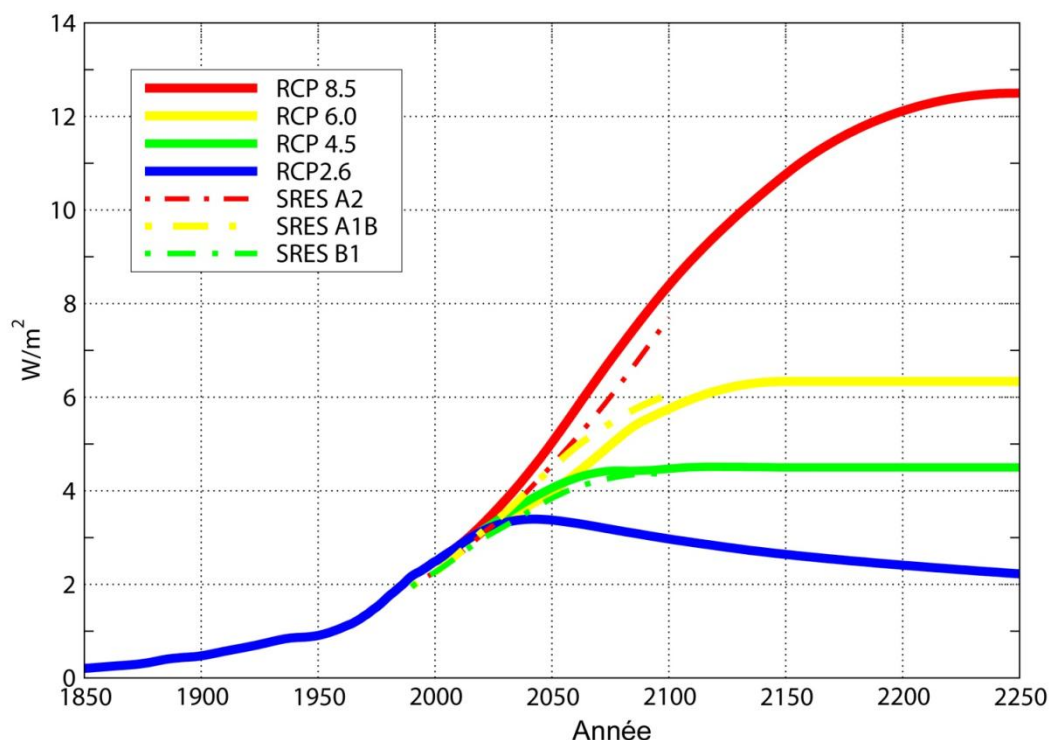


Figure I.5 : Comparaison des scénarios RCP (traits pleins) et SRES (tirets) source (*DRIAS, les futures du climat, 2021*)

I.11.3. Scénarios d'émission SRES

Il existe deux types de scénarios A et B avec des subdivisions

➤ Le A1 repose sur une croissance mondiale rapide et d'une manière équitable jusqu'à la moitié du 21ème siècle avec trois subdivisions :

- A1F1 : le monde continuera de fonctionner avec les combustibles fossiles
- A1T : le monde fonctionnera avec les combustibles propres (non fossiles)
- A1B : le monde fonctionnera avec les combustibles hybrides

- Le A2 un monde divisé avec régions riches et régions pauvres, sans accompagnement ni partage de richesse.
 - B1 identique à A1 avec une économie axée sur une technologie propre et un développement durable.
 - B2 avec préservation de l'environnement et un développement durable spécifique pour chaque région.
- (DRIAS, les futures du climat, 2021).

I.12. Modèle hydrologique

La modélisation hydrologique est la méthode de simulations numériques des écoulements des cours d'eau.

Ce modèle utilise une équation mathématique avec plusieurs paramètres tels la topographie la pluviométrie du bassin versant, les différents obstacles rencontrés par l'eau, état et qualité du sol ainsi que les conditions du parcours de l'eau dans le lit.

La modélisation peut donner les hauteurs et vitesses de l'eau atteintes lors de la crue centennale.

Un modèle permet de simuler la quantité et qualité d'un cours d'eau en temps et prend en compte les caractéristiques physiques d'un bassin versant et leurs variations dans l'espace et dans le temps.

(KESSASRA, 2017)

I.13. Conclusion

Les modèles climatiques doivent prendre en compte des variables pour se rapprocher le plus de la réalité, généralement, par confrontation aux résultats météorologiques actuelles et les données issues des satellites.

CHAPITRE II

DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

II.1. Introduction

L'Oued Tafna, le cours d'eau le plus important de la Wilaya de Tlemcen, prend sa source dans les monts de Tlemcen près de Sebdo (Ghar Boumaâza) et se jette dans la méditerranée (plage de Rachgoun – Wilaya de Aïn Témouchent)

D'une longueur de 165 km et un bassin hydrographique avec une superficie de 7250 km², la Tafna a plusieurs affluents et sous-affluents dont l'Oued Boukiou faisant partie d'un de ses huit sous bassins.

II.2. Présentation générale du bassin versant de la Tafna

Le bassin versant de la Tafna, situé au Nord-ouest du territoire algérien porte le numéro 16 de l'ensemble des bassins de l'Algérie, selon la codification de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. Il s'étend entre la latitude 34°47' et 35°10' et la longitude entre -2° et 1°. (ANRH)

II.3.Situation géographique du bassin versant de la Tafna

Le bassin s'étend sur la totalité de la wilaya de Tlemcen sur une superficie de 7245 km². Selon la nouvelle structuration des unités Hydrologiques en Algérie, il s'étend sur la totalité de la wilaya de Tlemcen, et déborde sur le royaume du Maroc, le bassin versant de la Tafna appartient à l'ensemble de l'Oranie Chott Chergui.(ANRH)

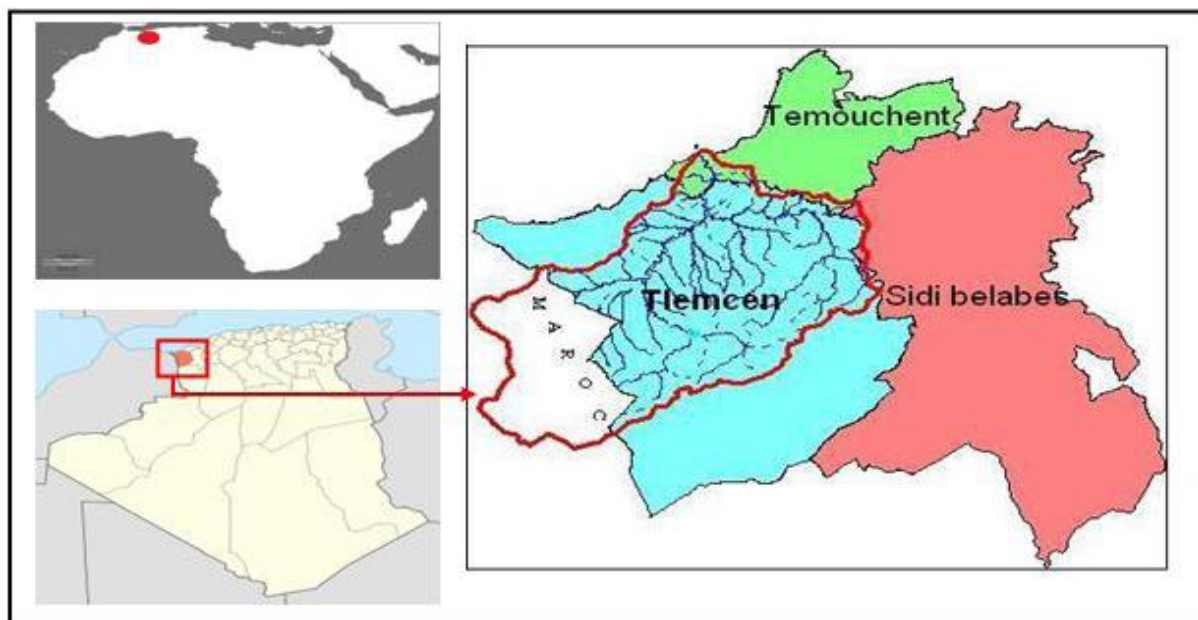


Figure II.1 : Situation géographique du bassin versant de la Tafna (ARAF, 2012)



Figure II.2 : Situation géographique du bassin de la Tafna dans l'ensemble Oranie- Chott Chergui (ARAF, 2012)

Le bassin de la Tafna constitué de huit (08) sous bassins (fig.II.4), dont deux se trouvent en amont dans le territoire marocain englobant une superficie de 1950 km², soit 27 % de la superficie totale du bassin versant.(BELARBI, 2010)

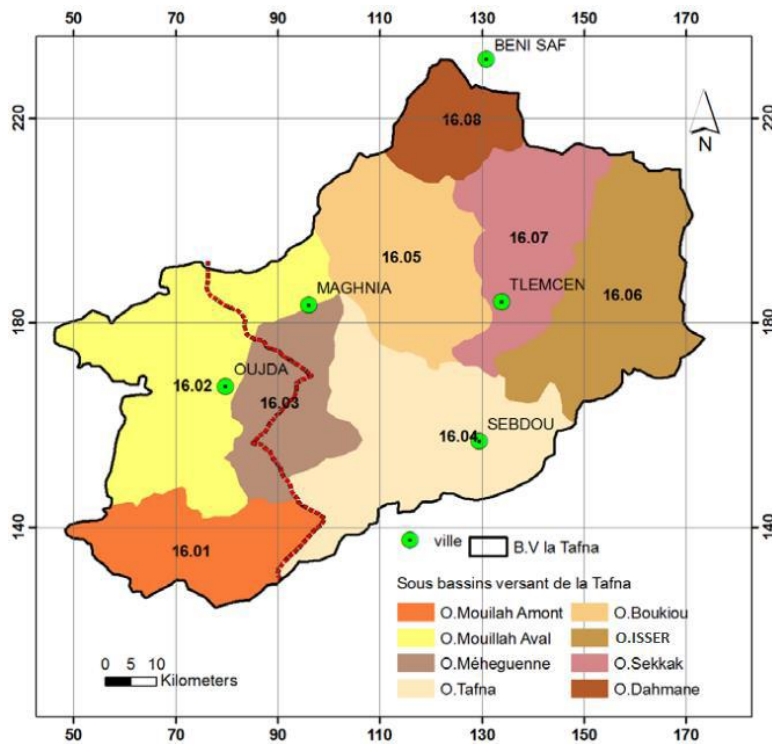


Figure II.3 : Sous bassins de la Tafna (BENMMOUSSET, 2011)

Le bassin versant est subdivisé en trois grandes parties:

- Partie orientale : les principaux affluents sont l'oued Isser et l'oued Sikkak,
- Partie occidentale: la Haute Tafna: ces affluents sont (oued Sebdou et oued Khemis) et l'oued Mouilah.
- Partie septentrionale : qui débute pratiquement du village Tafna et s'étend jusqu'à la plage de Rachgoune, embouchure de la Tafna sur la mer. **Les oueds Boukiou, Boumessaoud et Zitoun** sont les principaux affluents de cette partie.

II.4. Présentation du bassin versant d'oued Boukiou

Le bassin versant de l'oued Boukiou se situe au Nord-ouest algérien, entre les longitudes $1^{\circ} 29'41''$ W et $1^{\circ}43'32''$ W et les latitudes $34^{\circ} 59'52''$ N et $35^{\circ} 6' 42''$ N. De forme allongée, il s'étend sur une superficie de 117.3 km^2 pour un périmètre de 58 km. Il est limité à l'Ouest par les monts des Traras, au Nord par les montagnes de Djebel Dhar Eddis, au Sud-ouest par les reliefs du Djebel Fillaoucène qui culminent à 1200 m, tandis qu'à l'Est, des plaines basses entourent le bassin à son exutoire vers l'oued Tafna. Affluent rive gauche de la Tafna, l'oued Boukiou est long de 21 km. Il prend sa source sur les hauteurs d'oued Chaabane en amont d'Ain Kebira non loin de Nedroma à 855 m d'altitude.

Le bassin versant de Oued Boukiou est aussi l'un des huit affluents de la Tafna. (ILES, 2019)

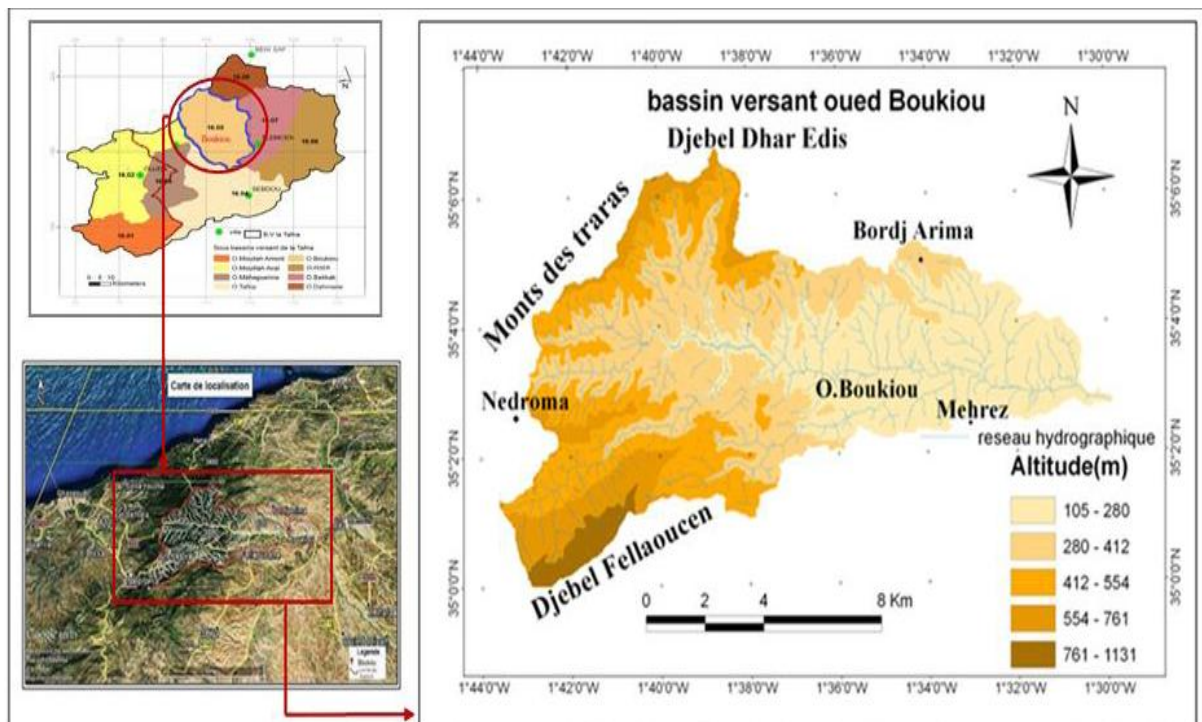


Figure II.4 : Situation géographique du secteur d'étude (Bouguerra et al., 2016)



Figure II.5 : Photos de Oued Boukiou prise le 29/04/2021

II.5. Cadre géographique

Le bassin versant de l'oued Boukiou se situe entre les longitudes $1^{\circ} 29' 41''$ W et $1^{\circ} 43' 32''$ W et les latitudes $34^{\circ} 59' 52''$ N et $35^{\circ} 6' 42''$ N. De forme allongée, il s'étend sur une superficie de 117.3 km^2 pour un périmètre de 58 km. Il est limité :

- ✓ à l'Ouest par les monts des Traras,
- ✓ au Nord par les montagnes de Djebel Dahreddis,
- ✓ au Sud-ouest par les reliefs du Djebel Fillaoucène qui culminent à 1200 m,
- ✓ à l'Est des plaines basses entourent le bassin à son exutoire vers l'oued Tafna

L'oued Boukiou est long de 21 km. Il prend sa source sur les hauteurs d'ouled Chaabane en amont d'Ain Kebira à 12.9 km de Nedroma.

II.6. Caractéristiques géométriques

II.6.1. Surface du bassin

L'aire est la portion du plan délimitée par la ligne de crête, ou contour du bassin. Sa mesure est faite soit à l'aide d'un planimètre, soit par la méthode des petits carrés, et est

généralement exprimée en Km². Dans le cas du bassin versant d'oued Boukiou : A = 117.3 km². Source (BERREZOUG, 2016).

II.6.2. Périmètre du bassin

Le périmètre est la longueur, généralement exprimée en km, de la ligne de contour du bassin, sa mesure est faite à l'aide d'un curvimètre. Pour certaines applications, on trace le périmètre stylisé du bassin en lissant son contour. Dans le cas du bassin versant d'oued Boukiou : P = 58 km. (BERREZOUG, 2016)

II.7. Caractéristique de forme

II.7.1. Morphométrie

Les principaux paramètres morphométriques qui jouent un rôle essentiel et qui peuvent influencer la variation du régime hydrologique sont : la forme, l'ordre des cours d'eau, le relief et en particulier, la densité de drainage, la fréquence des cours d'eau, l'allongement et le profil des cours d'eau. (BEDDIAR & ZERGOUN, 2019)

II.7.2. Morphologie du bassin

La morphologie du bassin est représentée par KG (coefficient de Gravilius ou coefficient de forme) qui a une grande influence sur l'écoulement global du cours d'eau et surtout sur l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin résultant d'une pluie donnée. KG est le rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même surface. (ILES, 2019)

Il est exprimé par la formule suivante : $KG = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$

Avec :

KG : Indice de compacité de Gravelius

A : Surface du bassin versant [km²]=117, 3 □□□

P : Périmètre du bassin versant [km]=58 km

Pour :

KG=1: la forme du bassin versant est quasiment circulaire

KG>1 : le bassin est de forme allongée

Dans le cas du bassin versant d'oued Boukiou: KG=1.5

Donc oued Boukiou est de forme allongée.

II.7.3. Rectangle équivalent

Le rectangle équivalent permet de comparer l'influence de la forme sur l'écoulement dans les différents bassins versants

$$P = 2(L + l) = \frac{KG * \sqrt{A}}{0.28}$$

Avec:

$$A = L \times l \quad (3)$$

L : Longueur du rectangle équivalent [km]

l : Largeur du rectangle équivalent [km]

Longueur (L)

$$L = \frac{KG * \sqrt{a}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{KG} \right)^2} \right]$$

$$L = 23.91 \text{ KM}$$

Largeur (l)

$$l = \frac{KG * \sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{KG} \right)^2} \right]$$

$$l = 4.9 \text{ KM}$$

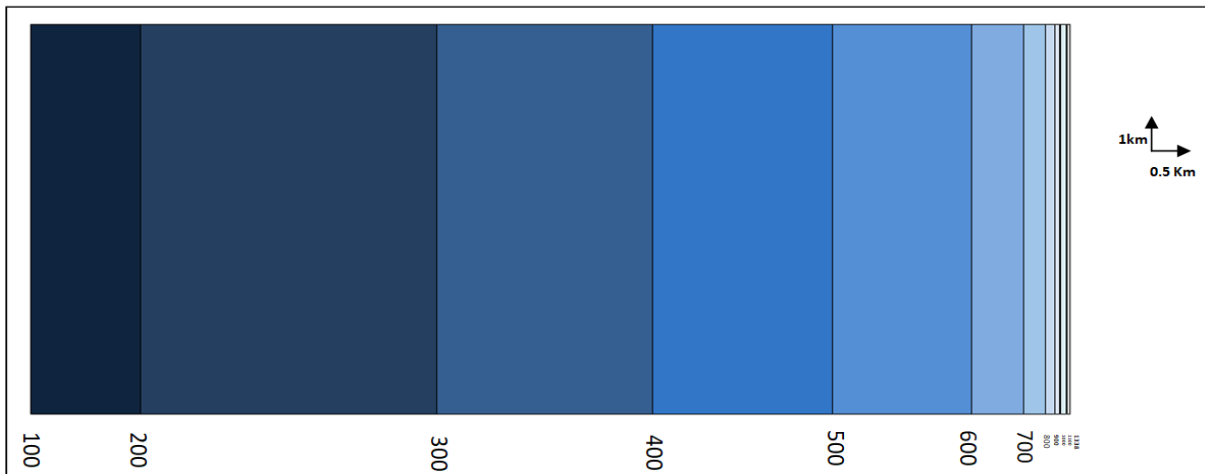


Figure II.6 : Représentation graphique du rectangle équivalent du bassin versant de oued

Boukiou

II.7.4. Facteur de forme

$$Rf = \frac{A}{L^2} = 0.2$$

Avec :

A : Surface du bassin versant [km²]

L : Longueur du bassin versant entre l'embouchure et le point le plus éloigné [km]

Le bassin versant est plus long que large.

II.7.5. Coefficient de circularité

La circularité d'un BV (Miller, 1959) est le rapport entre l'aire du BV et l'aire d'un cercle ayant le même périmètre que ce dernier :

$$R_{ci} = \frac{4A\pi}{P^2} = 0.438$$

Avec :

A : Superficie totale du bassin versant [km²].

P : Périmètre du bassin versant [Km].

Où, des valeurs de circularité du bassin s'approchant de 1 indiquent une forme quasi Circulaire (Singh, 1992) et une pente relativement faible.

Pour de tels bassins versants, l'infiltration est relativement uniforme et le temps que prend l'eau pour rejoindre l'exutoire est moins élevé que celui d'un bassin de forme allongée (Reddy et al., 2004). Les valeurs faibles, médianes et élevées sont des indices du stade (jeune, mature et vieux) du cycle de vie des bassins tributaires (Sreedevi et al., 2005).

Le coefficient de circularité (Rci) de oued Boukiou est de **0.438** qui exprime la jeunesse du bassin.

II.8. Caractéristiques du relief

La topographie a une influence considérable sur divers paramètres hydrologiques et climatiques dans une zone donnée. C'est le facteur clé qui détermine la capacité de ruissellement, d'infiltration et d'évaporation de la plupart des terres. C'est un élément clé du comportement hydrologique des bassins versants. A partir de la distribution de la zone altimétrique dans le bassin versant, la courbe altimétrique et la carte de fréquence altimétrique ont été établies.

II.8.1. Courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique, c'est la courbe de surface en Km² ou en pourcentage du bassin versant où les altitudes sont supérieures à une cote h donnée.

Tableau II.1 : Répartition Hypsométrique du bassin versant de Oued Boukiou
(BERREZOUG, 2016).

Tranche d'altitude (m)	Surface partielle Ai (Km ²)	Surface partielle Ai (%)	Surface partielle Cumulée Ai(Km2)	Surface partielle cumulée Ai (%)
1100-1338	0,3	0.255	0.3	0.255
1100-1000	0,7	0.618	1.025	0.873
1000-900	0,6	0.49	1.6	1.363
900-800	1	0.895	2.65	2.258
800-700	2,4	2.024	5.025	4.282
700-600	6,2	5.306	11.25	9.588
600-500	15,7	13.341	26.9	22.929
500-400	20,3	17.327	47.225	40.256
400-300	24,5	20.843	71.675	61.099
300-200	33,5	28.537	105.15	89.636
200-100	12,1	10.358	117.3	100

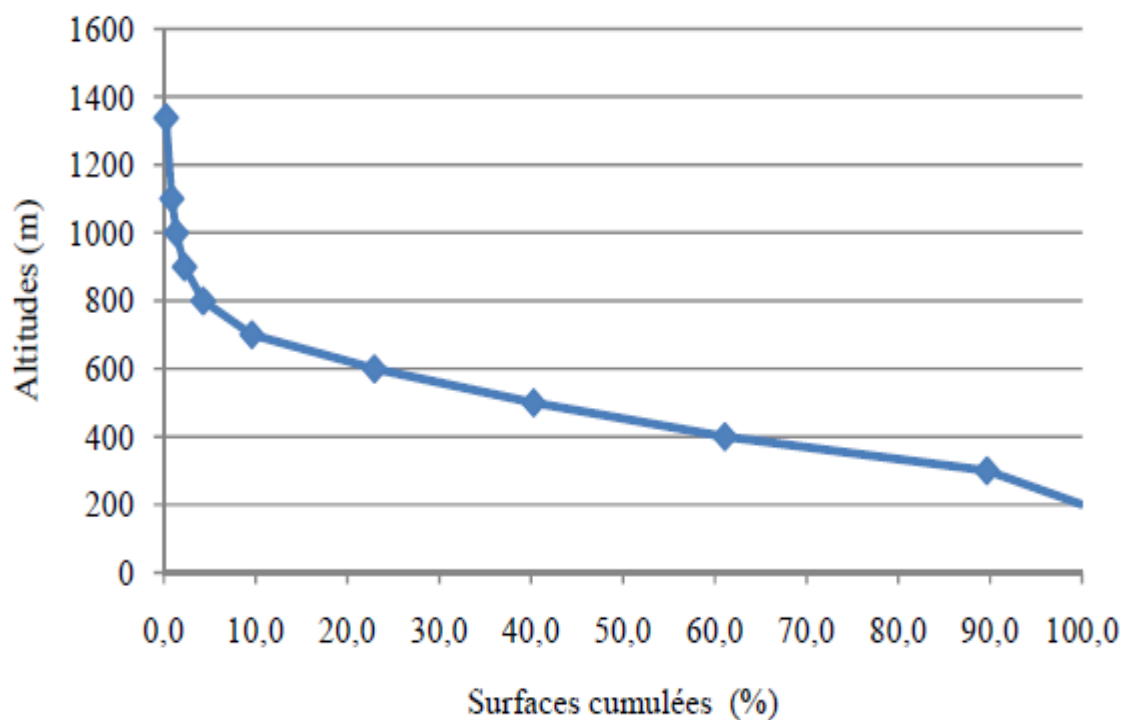


Figure II.7 : Courbe hypsométrique de oued Boukiou

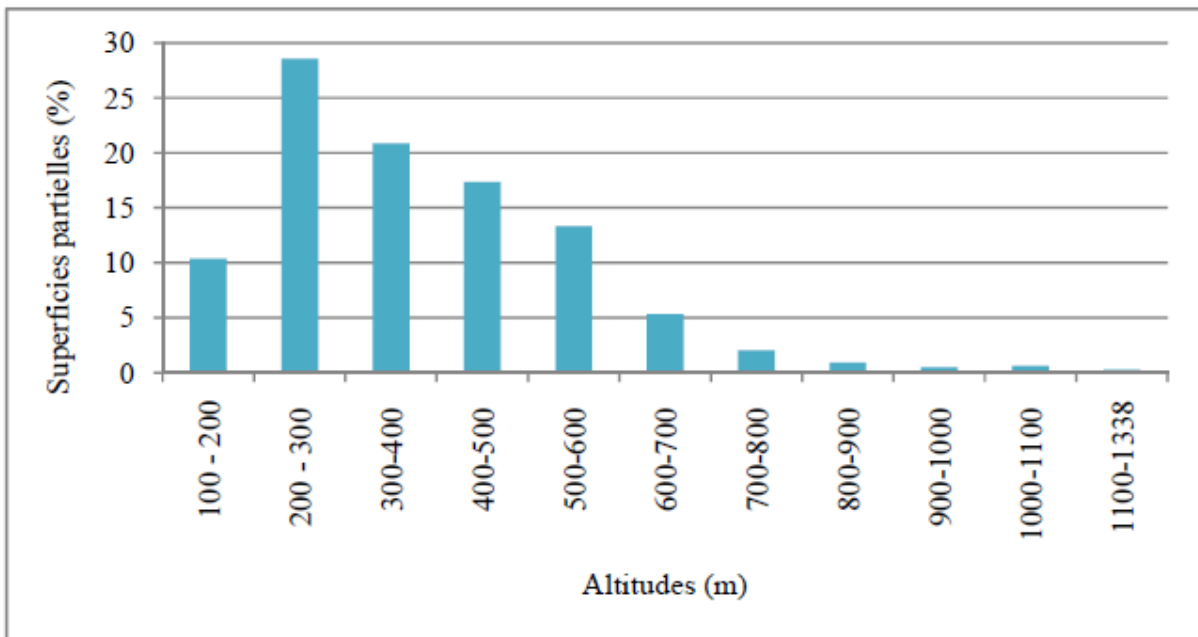


Figure II.8 : Histogramme des fréquences altimétriques de l'oued Boukiou

II.8.2. Altitudes caractéristiques

$$H_{moy} = \frac{\sum(A_i H_i)}{A}$$

Avec :

H_{moy} : Altitude moyenne du bassin [m].

A_i : Aire comprise entre deux courbes de niveau [Km²].

H_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m].

A : Superficie totale du bassin versant [km²].

L'altitude maximale $H_{max}=1338m$ et l'altitude minimale $H_{min}=100$

Donc **$H_{moy}=382.74m$**

II.8.3. L'altitude médiane ou de fréquence

L'altitude médiane correspond à l'altitude au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique. Elle est de :

$H_{med} = 350 m$

Tableau II.2 : Altitude moyenne par rapport à une classe d'altitude donnée

Altitude moyenne (m)	hi	Ai	Hi*Ai
1338-1100	1219	0.3	365.7
1100-1000	1050	0.73	761.25
1000-900	950	0.58	546.25
900-800	850	1.05	892.5
800-700	750	2.375	1781.25
700-600	650	6.225	4046.25
600-500	550	15.65	8607.5
500-400	450	20.325	9146.25
400-300	350	24.45	8557.5
300-200	250	33.475	8368.75
200-100	150	12.15	1822.5

Tableau II.3 : Altitudes caractéristiques du bassin versant de oued Boukiou

Bassin versant	Altitude maximale (m)	Altitude minimale (m)	Altitude 50% (m)	Altitude moyenne (m)	H5% (m)	H95% (m)	Altitude la plus fréquente(m)	Observation
Boukiou	1338	100	350	382.73	700	150	200-300	Vieux

II.8.4. Indices de pente

Ces indicateurs sont destinés à décrire les pentes du bassin et permettent des comparaisons et des classifications. Ils sont conçus à partir de la répartition hypsométrique des bassins.

II.8.4.1. Indice de pente de Roche Ip

IP est donné par la moyenne de la racine carrée des pentes mesurées sur le rectangle, équivalent et pondérée par les surfaces. c'est un indice proposé par roche en 1964

$$Ip = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n \sqrt{ai * di}$$

Avec :

Ip : Indice de pente (m/km),

L : Longueur du rectangle équivalent (m),

ai : Fraction en % de la surface A comprise entre deux courbes de niveau, voisines distantes de di

Ip = 1.8 (m/km).

II.8.4.2. Indice de pente global

Sur la courbe hypsométrique, on prend les points tels que la surface supérieure ou inférieure soit égale à 5% de A. On en déduit les altitudes H5 et H95 entre lesquelles s'inscrit 90% de l'aire du bassin et la dénivelée

$$D = H5 - H95$$

$$D = 550 \text{ m.}$$

L'indice global (I_g) est égal à: $\frac{D}{L}$

Avec :

I_g : Indice de pente global de Roche [m/km].

D : Dénivelée D = H5% - H95% [m].

L : Longueur du rectangle équivalent [m].

$$I_g = 0.023 \text{ m/km}$$

II.8.4.3. Dénivelée spécifique

La dénivelée spécifique D_s sert à comparer des indices de pente de bassin des superficies différentes. I_g Diminue quand L augmente (la surface du bassin versant augmente) il est donc difficile de comparer deux bassins versants de différentes tailles.

La dénivelée spécifique D_s est exprimée par l'équation suivante :

$$D_s = I_g \sqrt{A}$$

$$D_s = 249 \text{ m}$$

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

II.8.4.4. Pente moyenne

La pente moyenne d'un cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin donc le temps de concentration. Le calcul de la pente moyenne (I_{moy}) s'effectue à partir du profil longitudinal du cours d'eau principal et de ses affluents.

Elle est définie comme étant le rapport entre la dénivelée totale du rectangle équivalent et sa longueur.

L'équation de la pente moyenne est : $I_{moy} = \frac{D}{L}$

$$I_{moy} = 5.13\%$$

II.7.4.5. Rayon de circularité

$$R4 = \frac{4A\pi}{P}$$

Avec :

A : Surface du bassin versant (km²)

p : Périmètre du bassin versant (km)

Donc :

$$R4 = 25.40 \text{ km}$$

II.9. Classification de oued Boukiou

II.9.1. Relief

La classification d'ORSTOM classe les bassins versants selon le relief et les deux paramètres I_g et D_s .

$I_g=2.27\%$ et $D_s=246\text{m}$.

Tableau II.4 : Classification du relief selon l'indice global et la dénivelée spécifiée après l'ORSTOM.

Type de relief	$I_g(\text{m/km})$	$DS (m)$
Relief très faible	$I_g < 0.002$	$DS < 10$
Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$	$10 < DS < 25$
Relief assez faible	$0.005 < I_g < 0.01$	$25 < DS < 50$
Relief modéré	$0.01 < I_g < 0.02$	$50 < DS < 100$
Relief assez fort	$0.02 < I_g < 0.05$	$100 < DS < 250$
Relief fort	$0.05 < I_g < 0.5$	$250 < DS < 500$
Relief très fort	$0.5 < I_g$	$500 < DS$

II.9.2. Superficie

Les bassins sont classés selon leur superficie.

Tableau II.5 : Classification des bassins versants selon la superficie

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

Le bassin versant de oued Boukiou est un petit bassin à relief assez fort.

II.10. Géologie

La géologie influence sur l'écoulement des eaux souterraines et superficielles ainsi que les infiltrations et les érosions.

La nature des roches et leurs structures nous indiquent sur la capacité d'infiltration de la zone d'étude et par conséquent la quantité de terre susceptible d'être érodé.

Le bassin versant d'Oued Boukiou présente à l'Ouest un substrat rigide de roches anciennes du Dj. Fellaoussène culminant à 1138m qui est caractérisé par des formations schistoquartziques très compactes du Dévonien. Le centre est constitué par des argiles et des marnes plus ou moins dolomitiques et gypseuses datant du Trias et du Jurassique moyen.

Par ailleurs, on rencontre à l'Est, des formations du Miocène inférieur et moyen avec une alternance de poudingues formés d'éléments calcaires dolomitiques à ciment calcaréo-gréseux et des séries argilo-marneuses au sein desquelles s'intercalent des bancs décimétriques de grès ferrugineux friables. (Bouanani, 2004)

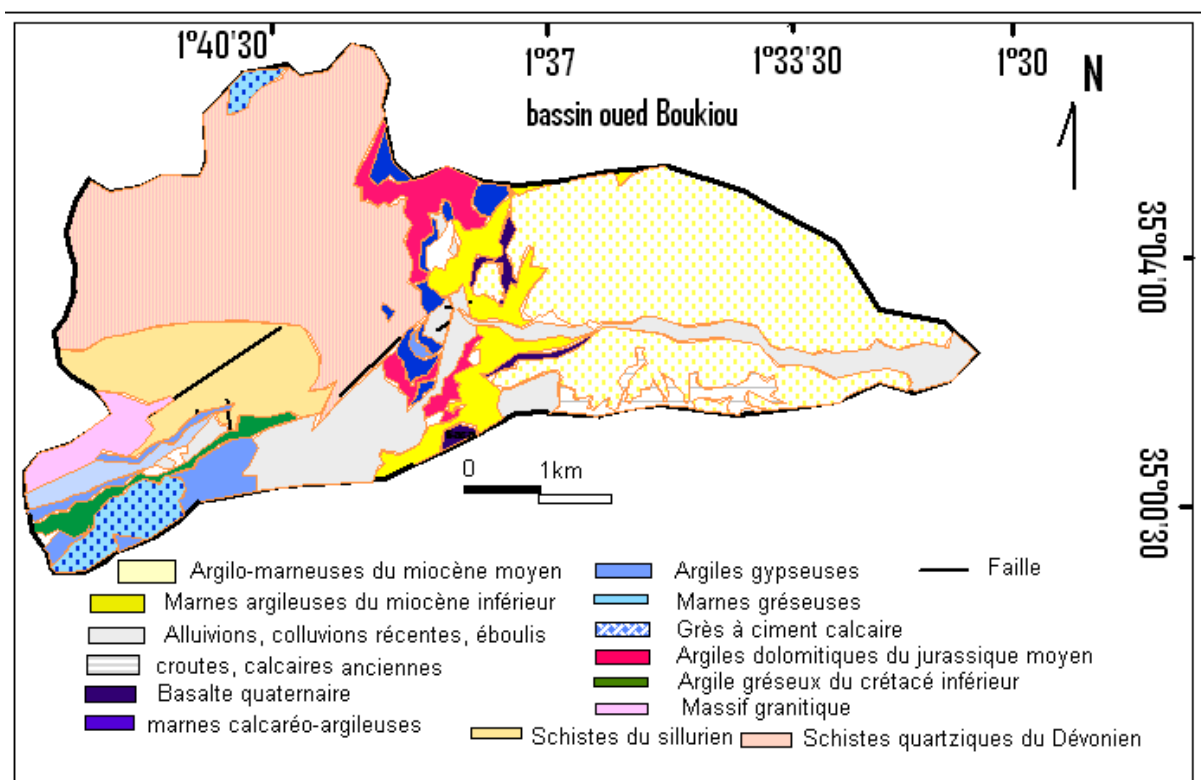


Figure II.9 : Carte géologique du bassin oued Boukiou (Bouguerra, 2018)

II.10.1. Etude lithostratigraphique

Dans la zone d'étude, situé dans la partie orientale des Traras, les faciès jurassiques inférieurs et moyens sont parfois mal présentés, du fait des variations latérales des épaisseurs et de lithofaciès.

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

- 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.



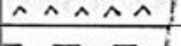
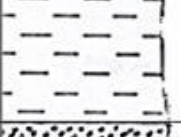
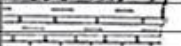
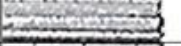

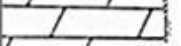
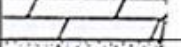



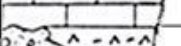

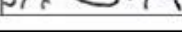
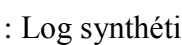
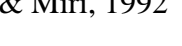



Ages des Formations	Colonne lithostratigraphique	Les Formations
Quaternaire		Alluvions + Limons
Miocène moyen (Serravalien)		Alternances de marnes et de grès
Miocène inférieur		Basaltes de Boukiou
Miocène inférieur		Marnes verdâtres
Miocène inférieur		Conglomérats de base
Coniacien		Marno-calcaires blancs
Turonien		Calcaires argileux
Cénomannien		Groupe argilo-marneux
Aptien		Dolomie aptienne
Tithonien à Valanginien		Groupe marno-carbonaté
Kimmeridgien supérieur		Dolomie de Tlemcen
Oxfordien supérieur à Kimmeridgien inférieur		Grès de Boumediene
Callovo - Oxfordien		Argiles de Saïda
Bathonien		Marnes de Sekika
Aaléno-Bajocien		Calcaires des Traras
Toarcien		-Marno-calcaires de Bayada
Domérien		-Ammonitico rosso des Traras Calcaires de Tisedoura
Carixien		Calcaires compacts de Zaïlou
Permo-Trias à Infra Lias		-Formations volcano-sédimentaire -Série détritique pourpre
Paléozoïque		Schistes quartzitiques

Figure II.10 : Log synthétique du secteur d'étude de Oued Boukiou (Kébir & Miri, 1992 repris par Kacemi & Senina, 2015)

II.10.2. Etude Hydrogéologique

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 zone d'étude parmi les ressources en eaux souterraines:

Les nappes profondes hypothétiques, les nappes superficielles observables.

Les formations qui peuvent être considérées comme réservoirs fréquents

dans la zone d'étude sont :

- Les calcaires du Lias,
- Les dolomies de Tlemcen,
- Les alluvions plio-quaternaires.

Tableau II.6 : Distinction hydrogéologique des formations d'oued Boukiou ((BERREZOUG, 2016)

	Niveaux imperméables	Niveaux perméables
Nappes Profondes	1-Schistes quartzeux.	1-Grés de Boumediene,
	2- Formation conglomératiques du Permo-Trias.	2-Granite de Nedroma,
	3-Complexe Volcano-sédimentaire du Lias inférieure.	3-Calcaires du Lias,
	4-Formation marno-calcaire du Toarcien.	4-Dolomies de Tlemcen,
	5- Marnes de Sekika.	5-Calcaires des Traras, dolomies aptiennes et calcaires blancs du Turonien
	6- Argile de Saïda.	6-Conglomérats de base du Miocène,
	7- Groupe marnocarbonaté.	7-Travertins.
	8-Groupe Argilo-marneux.	
	9-Marno-calcaires blancs.	

Nappes Superficielles	- Les marnes du Miocène (Marnes verdâtres et marnes gréseuses) et les limons superficiels sont imperméables.	-Les basaltes et les alluvions grossiers de OuedBoukiou sont perméables.
------------------------------	--	--

Les alluvions perméables couvrent tous le fond de la vallée de l'Oued Boukiou ; le réservoir a un mur et des rives totalement étanches représentés par les marnes gréseuses du Miocène moyen en aval et les marnes verdâtres du Miocène inférieur en amont.

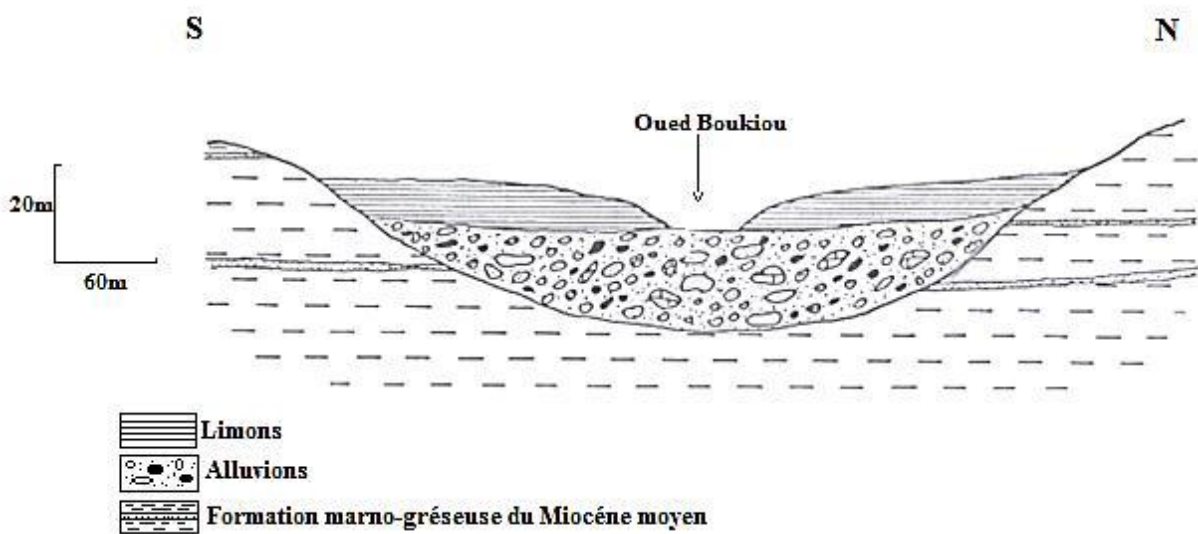


Figure II.11 : Coupe en travers de la plaine alluviale de l'Oued Boukiou (*Miri & Kébir, 1991*).

II.11. Réseau hydrographique

Les réseaux hydrologiques sont définis comme tous les cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires qui participent à l'écoulement de l'eau. Le réseau hydrologique est sans aucun doute l'une des caractéristiques les plus importantes du bassin. Par conséquent, il peut prendre plusieurs formes. Les différences entre les réseaux hydrologiques des bassins hydrographiques sont principalement dues à quatre facteurs :

- ❖ Géologie : la nature des strates affecte la forme du réseau hydrologique.
- ❖ Climat : le réseau hydrologique est dense dans les zones montagneuses très humides, mais tend à disparaître dans les zones désertiques.
- ❖ Pente du terrain : elle détermine si le cours d'eau est en phase de sédimentation.

- ❖ Cours d'eau : en terrain élevé, les cours d'eaux participent souvent à l'érosion des roches où l'eau s'écoule. En revanche, les rivières des plaines s'écoulent dans des lits de rivières dominés par les sédiments.

La structure du réseau hydrologique est en grande partie liée à l'évolution des phénomènes structuraux qui ont affecté la zone de la période géologique. (Ould Ahmed, 2018)

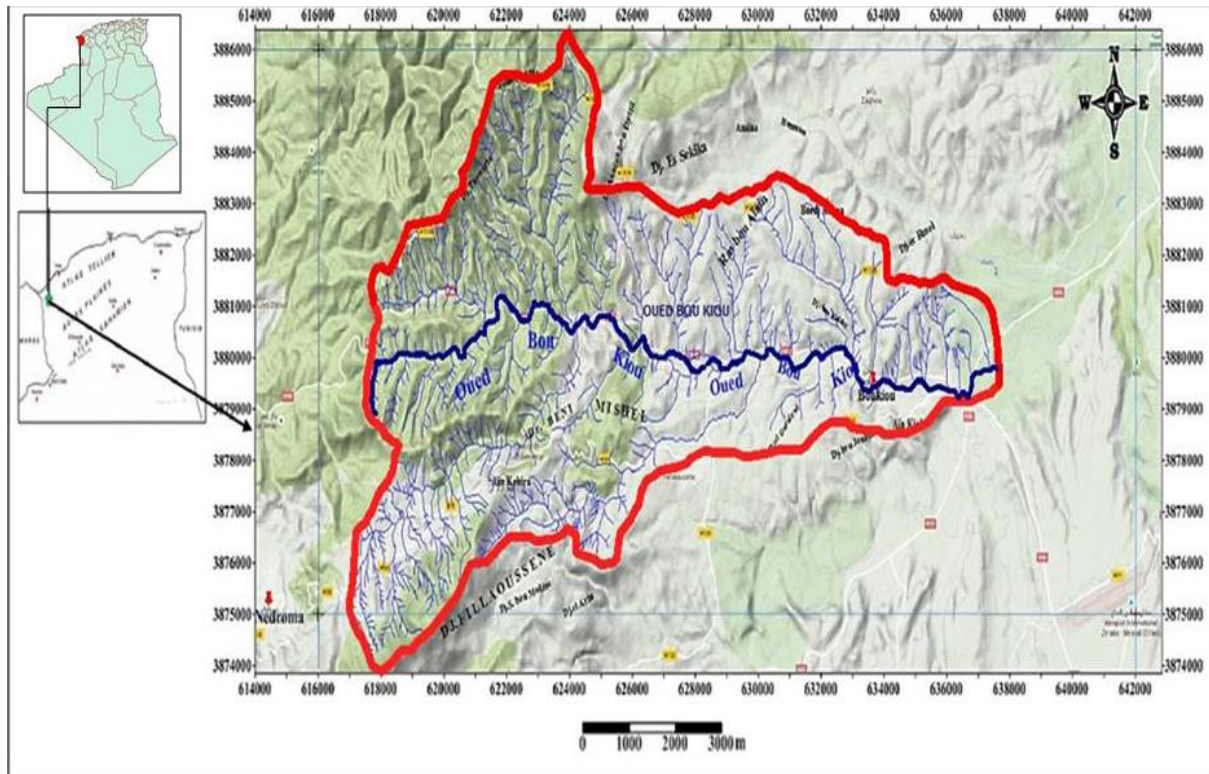


Figure II.12 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Boukiou (Kacemi & Senina 2015)

II.11.1. Classification par ordre et étude du chevelu hydrographique

Ici, nous suivons la règle de Horton modifiée par Schumm pour obtenir les résultats des principaux paramètres qui sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau II.7 : Paramètres morphométriques du bassin versant de Oued Boukiou

Ordre	Nombre	Rapport de confluence	Longueurs cumulées (km)	Longueurs moyennes (km)	Rapport des longueurs	Aires cumulées (km ²)	Aires moyennes (km ²)	Rapport des aires
1	1063	4.74	157	0.15	3.05	66.125	0.06	1.83
2	224	5.46	101	0.45	2.44	25.325	0.11	1.72
3	41	4.56	45.1	1.1	1.99	7.9	0.19	3.05
4	9	4.5	19.75	2.19	2.51	5.3	0.58	4.01
5	2	2	11	5.5	2.73	4.675	2.33	1.27
6	1	-	15	15	-	2.975	2.975	-

L'analyse du tableau ci-dessus, montre que le bassin est d'ordre 6 selon la classification de Schumm.

Les paramètres importants qui régissent le régime hydrologique d'un cours d'eau sont : la densité de drainage, le rapport de confluence, le rapport des longueurs et le rapport des aires.

II.11.2. Rapport de confluence (Rc)

Le rapport de confluence (Rc) est le quotient du nombre de thalwegs d'ordre x par celui des thalwegs d'ordre supérieur (x+1).

Les réseaux hydrographiques sont dans la plus part des cas dendritiques, c'est-à-dire ramifiés comme les branches d'un arbre. Certains chercheurs distinguent 3 principaux types de réseaux:

- *chêne*: la ramification est bien développée avec un espacement régulier des confluences. Le rapport Rc est inférieur à 5 comme l'Amazone.
- *peuplier*: le bassin versant nettement plus long que large, présente de nombreux affluents parallèles et un rapport de confluence élevé, Rc supérieur à 10,
- *pin*: le bassin se caractérise par une concentration des confluences dans le secteur amont d'où sort un tronc qui ne reçoit plus d'affluents importants. Le rapport Rc est faible comme le Nil.

Les trois types d'organisation de réseaux hydrographiques. L'histoire géomorphologique et la structure géologique sont à l'origine de réseaux d'organisation plus complexe. (<http://medhycos.mpl.ird.fr/en/data/hyd/Drobot/1C.htm>)

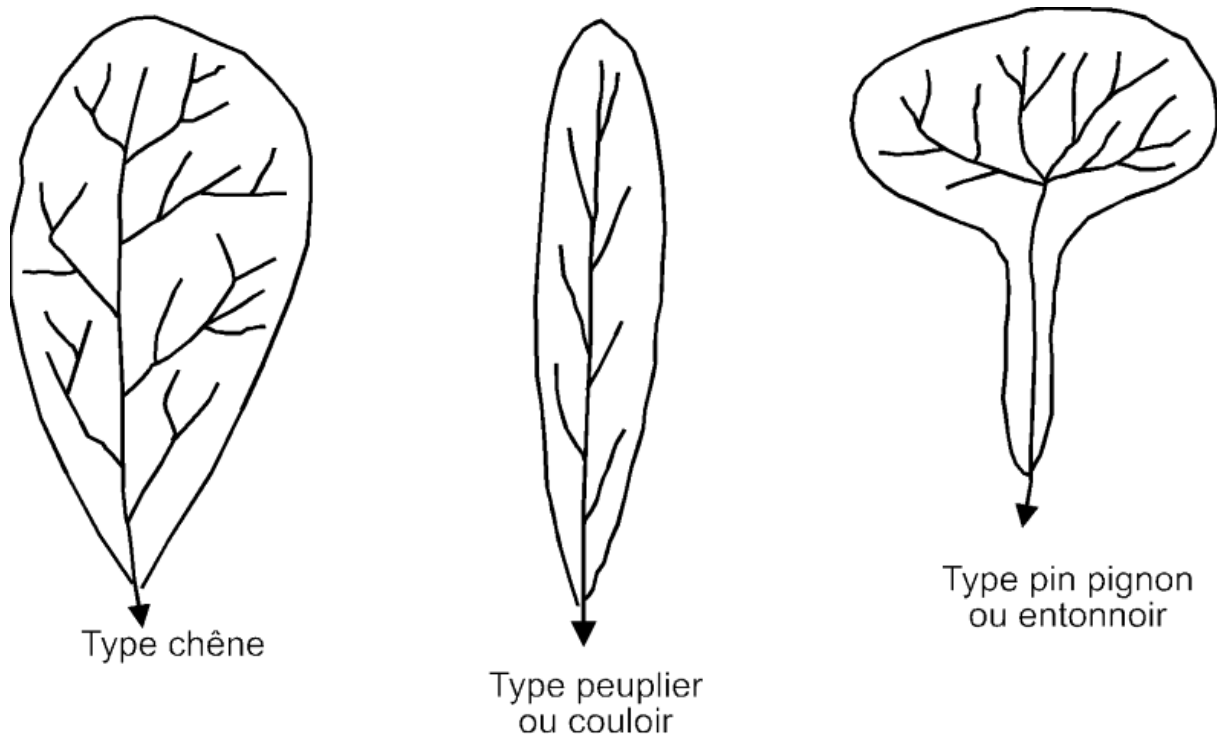


Figure II.13 : Types de bassins versants

source(<http://medhycos.mpl.ird.fr/en/data/hyd/Drobot/1C.htm>)

Dans le cas de OuedBoukiou le rapport de confluence :

$$R_c = \frac{N_x}{N_{x+1}}$$

Avec :

Rc: Rapport de confluence.

Nn: Nombre de cours d'eau d'ordre x.

Nn+1 : Nombre de cours d'eau d'ordre x+1.

Tableau II.8 : Rapport de confluence du bassin versant de oued Boukiou :

Ordre	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{4}{5}$	$\frac{5}{6}$	<i>moyenne</i>
Rapport de confluence Rc	4.75	5.46	4.56	4.5	2	4.25

$$R_c = 4.25$$

Donc le réseau est de type Chêne car le rapport de confluence moyen $R_c = 4.25 < 5$

II.11.3. Rapport des longueurs

Le rapport de longueur totale (RL) est quotient de la longueur moyenne des talwegs d'ordre (n+1) par celle des talwegs d'ordre n :

$$Rl = \frac{ln+1}{ln}$$

L_n : longueur de cours d'eau d'ordre n.

L_{n+1} : longueur de cours d'eau d'ordre n+1.

Il y'a deux méthode pour calculer le rapport des longueurs ; analytique et graphique

Méthode analytique :

Tableau II.9 : Rapport des longueurs du bassin versant de oued Boukiou

<i>Ordre</i>	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{4}{5}$	$\frac{5}{6}$
<i>Rapport des longueurs Rl</i>	3.21	2.44	1.99	2.51	2.72

La moyenne de RL = **2.57**

II.11.4. Rapport des aires

Il est défini comme le rapport entre la surface moyenne des thalwegs d'ordre (n+1) par celui des thalwegs d'ordre (n) :

$$Ra = \frac{An+1}{An}$$

Avec :

R_a : Rapport des aires.

A_n : Surface moyenne des thalwegs d'ordre n.

A_{n+1} : Surface moyenne des thalwegs d'ordre n+ 1.

Comme pour le calcul du rapport des longueurs il y a deux méthodes ; analytique et graphique.

Méthode analytique

Tableau II.10 : Rapport des aires du bassin versant de oued Boukiou

Ordre	$\frac{2}{1}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{6}{5}$
Rapport des aires	1.83	1.72	3.05	4.01	1.27

La moyenne de Ra est de : **2.37**

II.11.5. Fréquence des cours d'eau

Elle représente le nombre de cours d'eau (N) par unité de surface (A), Elle est calculée par la formule :

$$FS = \frac{N}{A}$$

Avec :

Fs : Fréquence des cours d'eau.

N : Nombre de thalwegs (N = 1340),

A : Surface du bassin (km²).

Pour oued Boukou, **Fs = 11.42**, ce qui correspond en moyenne au nombre de cours d'eau par Km².

II.11.6. Densité de drainage

La densité de drainage, introduite par Horton (1945), est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant :

$$Dd = \frac{\sum Li}{A}$$

Avec :

Dd: Densité de drainage [km/km²]

Li: Longueur de cours d'eau [km]

A: Surface du bassin versant [km²]

$$Dd = 2.97 \text{ km/km}^2$$

II.11.7. Densité hydrographique

La densité hydrographique représente le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface.

$$F = \frac{\sum Ni}{A}$$

Avec :

F : densité hydrographique [km^{-2}]

N_i : nombre de cours d'eau

A : superficie du bassin [km^2]

$$F = 11.42 \text{ km}^{-2}$$

Il existe une relation assez stable entre la densité de drainage D_d et la densité hydrographique F , de la forme :

$$F = a * D_d^2$$

Où a est un coefficient d'ajustement.

En somme, les régions à haute densité de drainage et à haute densité hydrographique (deux facteurs allant souvent de pair) présentent généralement une roche mère imperméable, un couvert végétal restreint et un relief montagneux. L'opposé, c'est-à-dire la faible densité de drainage et la faible densité hydrographique, se rencontre en région à substratum très perméable, à couvert végétal important et à relief peu accentué.

Dans le cas du bassin versant de oued Boukiou, la faible densité du drainage et de la densité hydrographique expliquent le faible écoulement de Boukiou ce qui implique qu'il y a une perte par infiltration dans un sol perméable.

II.11.8. Coefficient de torrentialité

C'est un coefficient qui tient compte à la fois de la densité des thalwegs élémentaires par la densité de drainage :

$$C_T = D_d * F_1$$

Avec :

Dd: Densité de drainage (Km/Km²)

F1: Fréquence des thalwegs élémentaires. $\frac{N1}{A}$ (N1 : nombre de cours d'eau d'ordre 1=1063)

N1: Nombre de cours d'eau d'ordre 1.

CT=26.9

La valeur élevée du coefficient de torrentialité correspond au chevelu hydrographique issu d'un secteur montagneux et pluvieux. (Bouanani, 2004)

II.11.9. Coefficient d'allongement (Ca)

Il est donné par la formule suivante : $Ca = \frac{2 * \sqrt{\frac{A}{\pi}}}{L0}$

$$\text{Et } L0 = \frac{\sum_{i=1}^n Li}{n}$$

Avec :

Ca: Coefficient d'allongement.

A: Surface du bassin versant. (Km²)

n: Nombre d'ordre.

L0: Longueur moyenne des cours d'eau. (Km)

Ca=3

II.11.10. Temps de concentration

Le temps de concentration (**Tc**) est la durée que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée pour parvenir à l'exutoire, pour son calcul, nous faisons appel à la formule de Giandotti :

$$Tc = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{Hmoy - Hmin}}$$

avec :

Tc : Temps de concentration (heure)

A : Superficie du bassin (km²)

L : Longueur du thalweg principal (km)

Hmoy : Altitude moyenne (m)

Hmin : Altitude minimale (m)

Tc = 06h00

Le temps de concentration des eaux est non seulement fonction de la surface mais aussi d'autres paramètres tels que la lithologie, la pluviométrie et le relief. (Bouanani, 2004)

II.12. Végétation

Le couvert végétal influe énormément sur la quantité d'eau écoulée lors d'une pluie en effet, la végétation a un rôle de régulateur dans le régime d'écoulement du bassin versant et qui est déterminant dans la rapidité du ruissellement superficiel donc rôle d'atténuateur d'une part.

D'autre part selon la nature de la végétation (foret, maquis,... etc) l'évapotranspiration peut jouer un rôle déterminant et peut diminuer le volume de la crue.

En revanche un sol nu a une faible capacité de rétention entraînant un ruissellement rapide et une accélération de l'érosion du sol. (Bouanani, 2004) et (Bouguerra, 2018)

Tableau II.11 : Distribution de la couverture végétale sur le bassin versant de Oued Boukiou

Bassin de Oued Boukiou		
Occupation des sols	Aires (Km ²)	% des aires
Couvert forestier	39	35
Prairie et terrains de parcours	23	20.5
Cultures extensives	19	17
Couvert mort	13	11.5
Vigne	11	9
Arboriculture	7	6

Source : (DSA, 2020)

II.13. Climat de la zone d'étude

La région du bassin versant de oued Boukiou possède un climat continental semi-aride à hiver tempéré de type méditerranéen avec une variabilité irrégulière de la pluviométrie . D'après les mesures prises à la station djebel chouachi entre 1974 et 2018 les températures moyennes sont de 18 °C tandis que les précipitations moyennes annuelles sont de 290.5 mm. (ILES, 2019)

II.14. Conclusion

Cette recherche nous a permis de nous renseigner sur les différents paramètres et caractéristiques du bassin versant de oued Boukiou.

Les principales caractéristiques physiques du bassin versant de oued Boukiou sont classées dans le tableau suivant :

Tableau II.12 : Caractéristiques morphométriques du bassin versant de oued Boukiou

Paramètres	Symboles	Unités	Valeurs
Surface	A	Km ²	117.3
Périmètre	P	Km	58
Coefficient de Gravelius	KC	-	1.5
Longueur du rectangle équivalent	L	Km	24.15
Largeur du rectangle équivalent	l	Km	4.85
Altitude moyenne	H _{moy}	m	382.73
Pente globale	I _g	m/km	0.0227
Indice de pente de roche	I _p	m/Km	1.8
Pente moyenne	I _{moy}	%	5.1
Densité de drainage	D _d	km/km ²	2.97
Facteur de forme	R _f	-	0.20
Coefficient de circularité	R _{ci}	-	0.438
Dénivelée spécifique	DS	m	246
Temps de concentration	T _c	heure	6
Coefficient d'allongement	Ca	-	3

Coefficient de torrentialité	CT	-	26.90
Densité hydrographique	F	Km-2	11.42

Le bassin versant de oued Boukiou est un petit bassin de type chêne et de forme allongée avec un relief assez fort. La courbe hypsométrique du bassin reflète bien l'aspect accidenté de la zone. Le bassin est assez bien drainé en raison de l'effet de régression abrupte.

CHAPITRE III

**EFFET DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE SUR OUED
BOUKIOU**

III.1. Introduction

Plusieurs changements sont observés dans la région du bassin versant de l'Oued Boukiou semblent cohérents avec l'existence d'un réchauffement climatique.

Parmi les paramètres que nous étudierons dans ce chapitre, les précipitations et la température, demeurent un problème pertinent pour la protection de la région.

Pour anticiper les effets néfastes du réchauffement climatique, les modèles climatiques et hydrologiques constituent un outil précieux pour explorer les processus complexes du climat.

III.2. Présentation de la station de mesures

Les données météorologiques de la station Djebel chouachi dont nous disposons ont été relevés auprès de l'ANRH sur une période de 44 ans de 1974 à 2018.

Tableau III.1 : Caractéristique de la station de mesure Djebel chouachi

Station	Période d'enregistrement	Coordonnées			Code de la station	Paramètres mesurés	Etat
		Longitude	Latitude	Altitude (m)			
Djebel chouachi	1974/1975 à 2017/2018	01°31'W	35°14'N	130	160518	Précipitation Débit	Opération nelle

Source : A.N.R.H

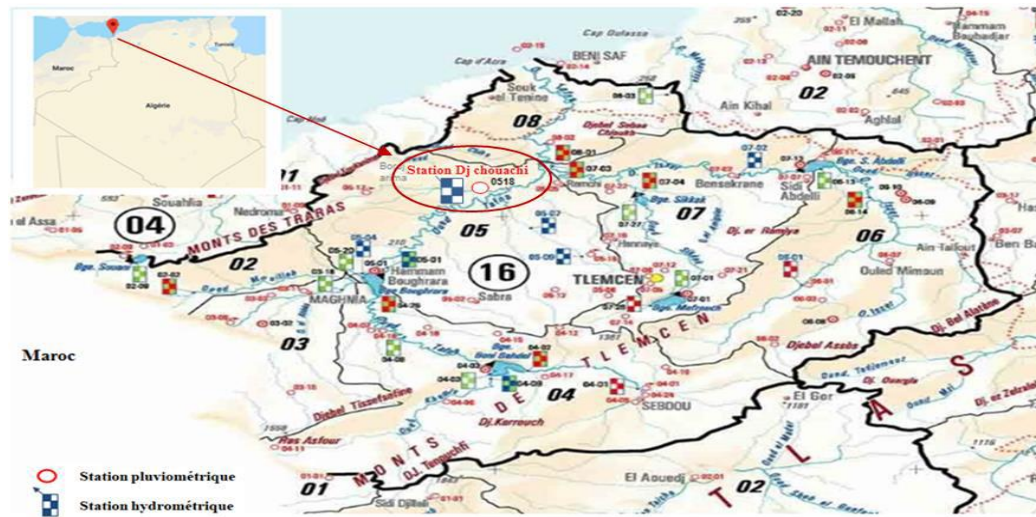


Figure III.1 : Situation de la station hydropluviométrique Djebel Chouachi Source (DRE, 2019)

III.3. Etude des précipitations

L'étude des précipitations constitue le facteur primordial dans le comportement hydrologique du bassin versant de oued Boukiou et aussi dans la détermination du type du climat. Elles varient dans le temps et dans l'espace.

On entend par précipitations, la hauteur de la lame d'eau recueillie par le pluviomètre, quelque soit l'origine de cette eau, pluie, neige, grêle, ou autres formes de condensation. (Réméniéras G., 1986)

III.3.1. Variation des précipitations moyennes annuelles

Cette courbe représente les précipitations moyennes annuelles de 1974 à 2018 en mm, nous constatons que l'année hydrologique (de septembre à octobre) de 1987-1988 est l'année hydrologique la plus sèche et l'année hydrologique 2008-2009 est la plus humide.

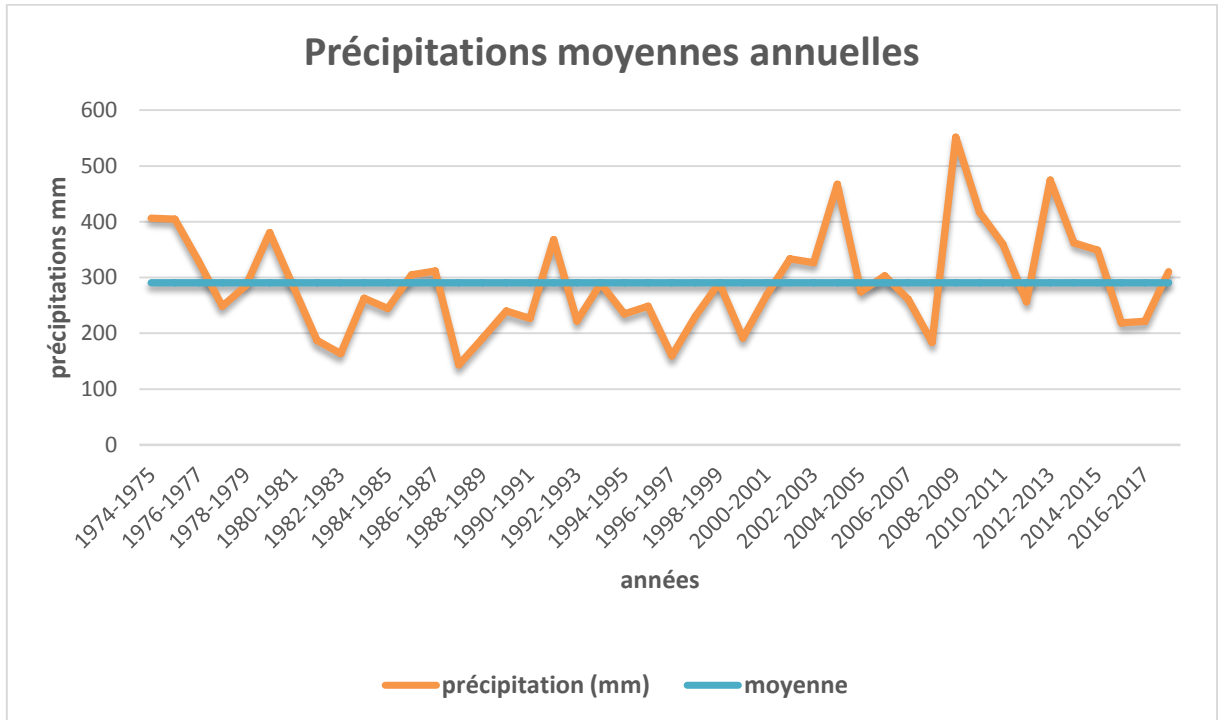


Figure III.2 : évolution des précipitations moyennes interannuelles sur oued Boukiou enregistré la station Dj Chouachi de 1974 à 2018

Nous remarquons dans la figure III.2 de fortes irrégularités entre chaque année. La moyenne des précipitations des 34ans de mesures (entre 1974 et 2018) est de 290.5mm

III.3.2. Variation des précipitations moyennes mensuelles

Cette figure représente la moyenne mensuelle de pluviométrie de chaque mois en mm.

D'après la courbe le mois de février est le mois le plus humide alors que le mois juillet est le mois le plus sec.

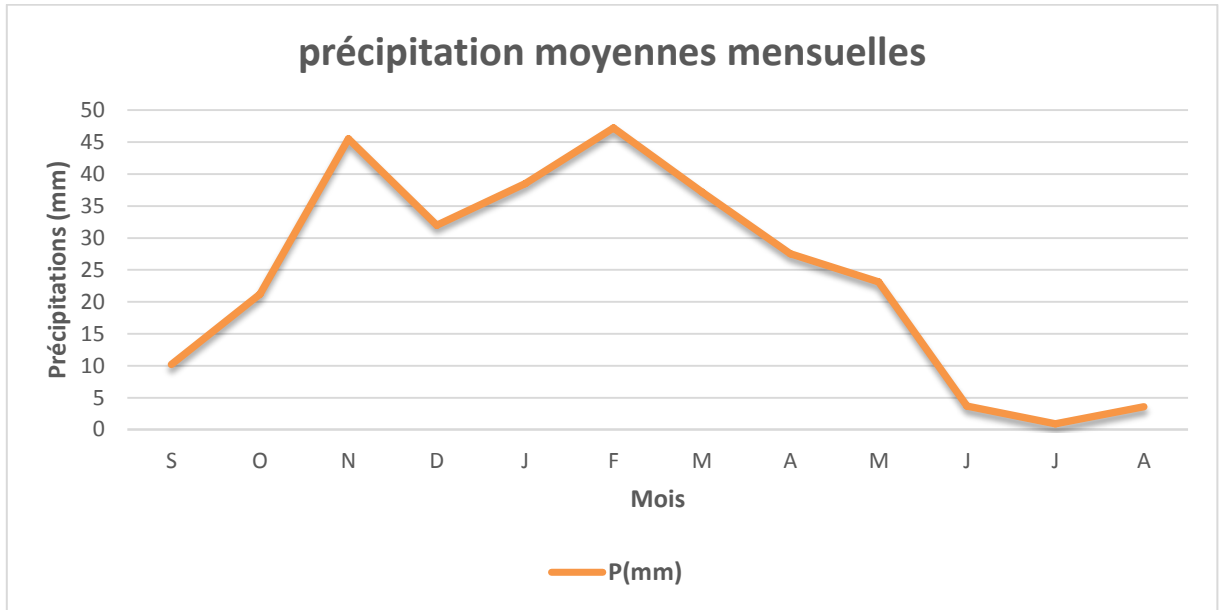


Figure III.3 : Evolution des précipitations moyennes mensuelles de 1974 à 2018 sur oued Boukiou enregistrée à la station Dj Chouachi

III.3.3. Variation des précipitations moyennes saisonnières

Figure représentant les précipitations moyennes saisonnières en mm

L’hiver est la saison la plus humide tandis que l’été est la saison la plus sèche ce qui est typique du climat méditerranéen, donc la plus grande partie d’écoulement s’effectue en hiver.

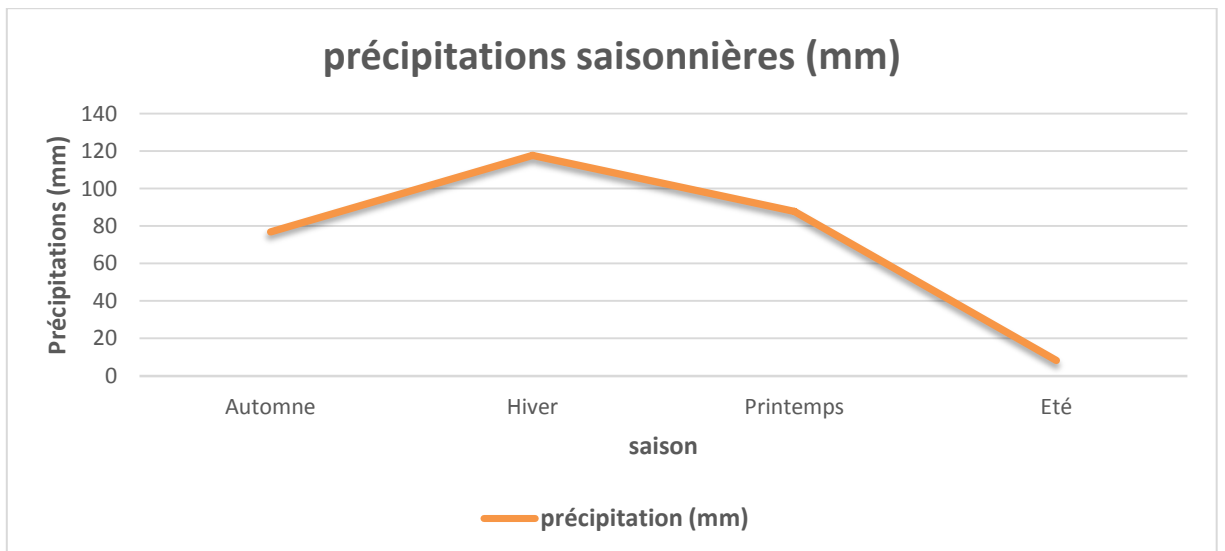


Figure III.4 : Evolution des précipitations moyennes saisonnières de 1974 à 2018 sur oued Boukiou enregistré à la station Dj Chouachi

III.3.4. Variation des précipitations moyennes journalières

La pluviométrie journalière enregistrée à la station Dj Chouachi au cours d'une période allant de 1974 à 2018 représenté dans le graphe ci-dessous :

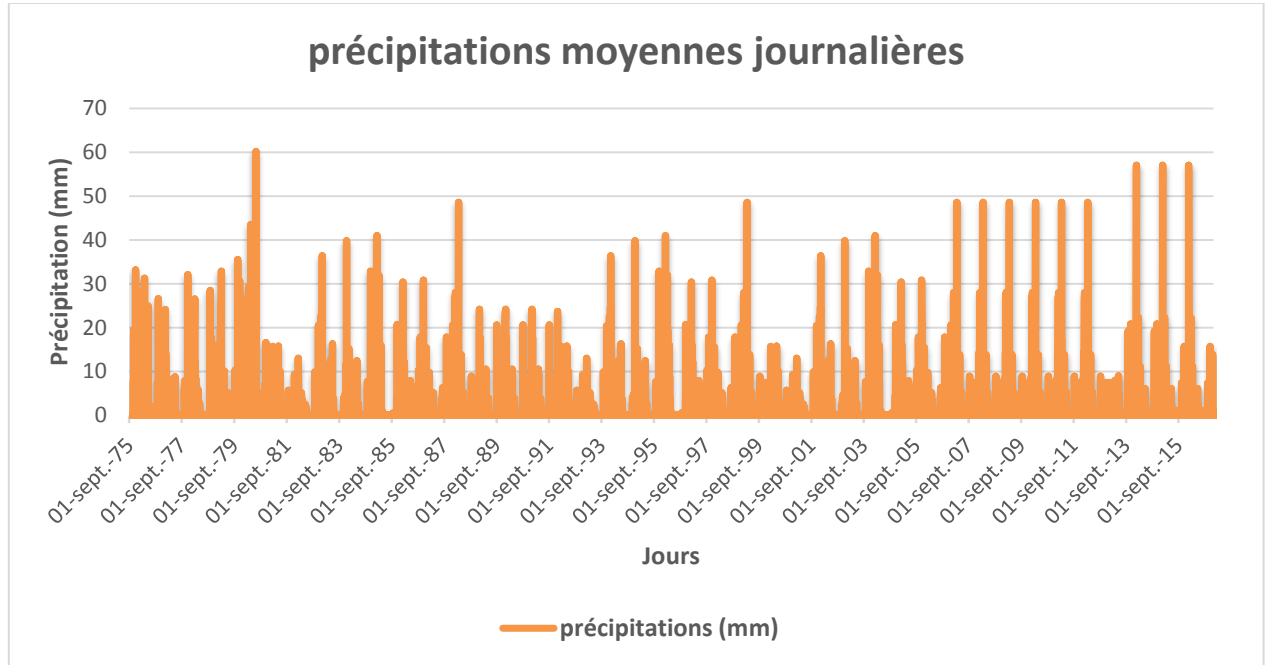


Figure III.5 : données des variations des précipitations moyennes journalières entre 1974 et 2018 de la station Dj chouachi

Aucune information pertinente ne peut-être tirée de cette figure, du fait de la répartition très hétérogène des précipitations journalières d'une saison à l'autre

III.4. Etude des températures

La température est un paramètre déterminant dans un climat, liée aux radiations solaires et transforme l'eau en vapeur selon son intensité et influe par la même occasion sur l'évapotranspiration. Elle varie d'une saison à l'autre et au cours d'une même journée ; en effet, on désigne température minimale mesurée tôt le matin et température maximale mesurée en début d'après-midi. La température moyenne correspond à leur demi-somme.

La température est prise par un thermomètre étalonné placé à l'abri du soleil.

III.4.1. Variation des températures moyennes annuelles

Les données dont nous disposons proviennent de la station de mesure de Zenata (tableau III.2).

Tableau III.2 : caractéristique de la station de mesure de Zenata

Station	Période d'enregistrement	Coordonnées			Code de la station	Paramètres mesurés	Etat
		Longitude	Latitude	Altitude (m)			
Zenata	1974/1975 à 2017/2018	01°46'W	35°01'N	247	605310	Température	Opérationnelle

Les températures moyennes annuelles sont représentées dans le tableau ci-dessous enregistrer à la station Zenata sur une période de 44ans qui va de 1974 à 2018.

Ces données représentent les températures moyennes de la région où se situe le bassin versant de oued Boukiou.

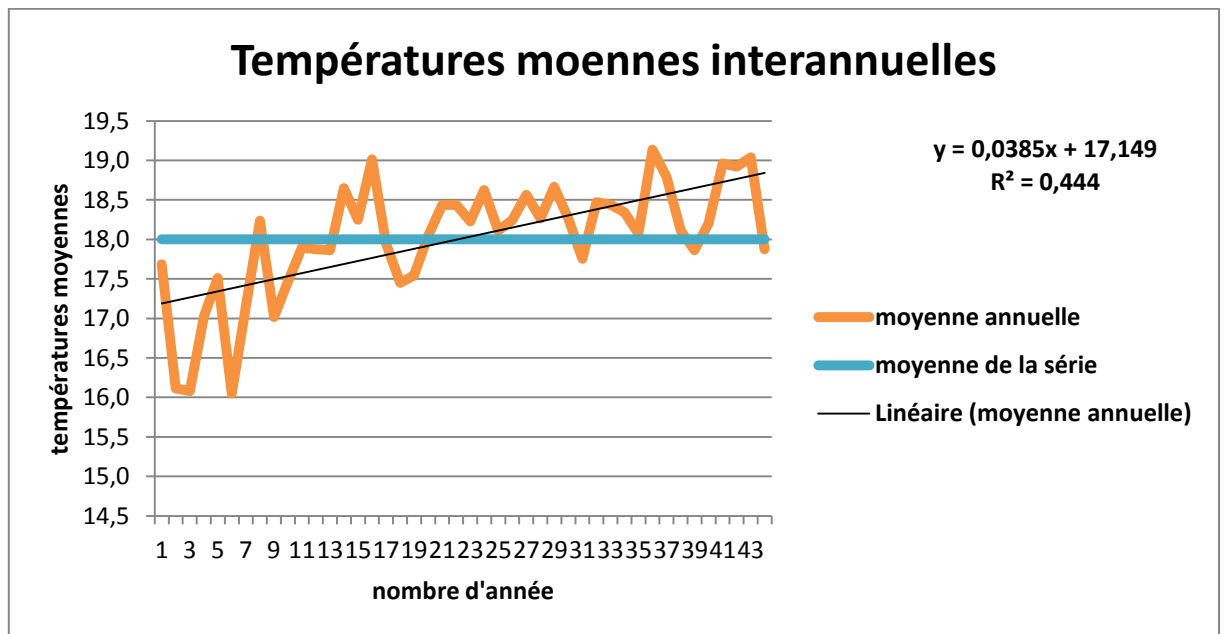


Figure III.6 : Variation des températures moyennes interannuelles entre 1974 et 2018de la station Zenata

Les températures sont variables.

La température moyenne est de 18 c tandis que la température maximale enregistrée est de 19,03 en 1990 alors que la température annuelle minimale enregistrée est de 16.04 en 1977

Nous remarquons une légère hausse des températures au fil des années qui est de 0.038 c.

III.4.2. Variation des températures moyennes mensuelles

Les températures moyennes mensuelles sont représentées dans le tableau ci-dessous enregistré à la station Zenata:

D'après le graphe le mois de janvier est le mois le plus froid avec une température moyenne de 11.82 alors que le mois d'aout est le plus chaud avec une température moyenne enregistrée de 26.58

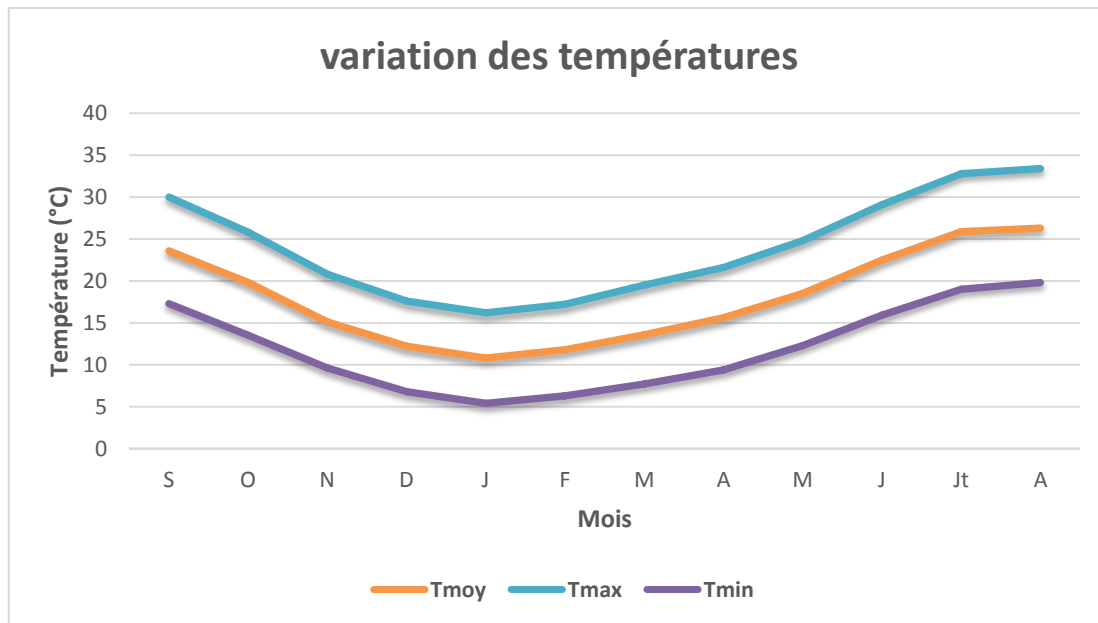


Figure III.7 : Répartition des températures mensuelles moyennes, minimales et maximales de la station Zenata entre 1974 et 2018

III.4.3. Variation des températures moyennes saisonnières

Les températures saisonnières enregistrées à la station Zenata sont représentées dans le graphe suivant :

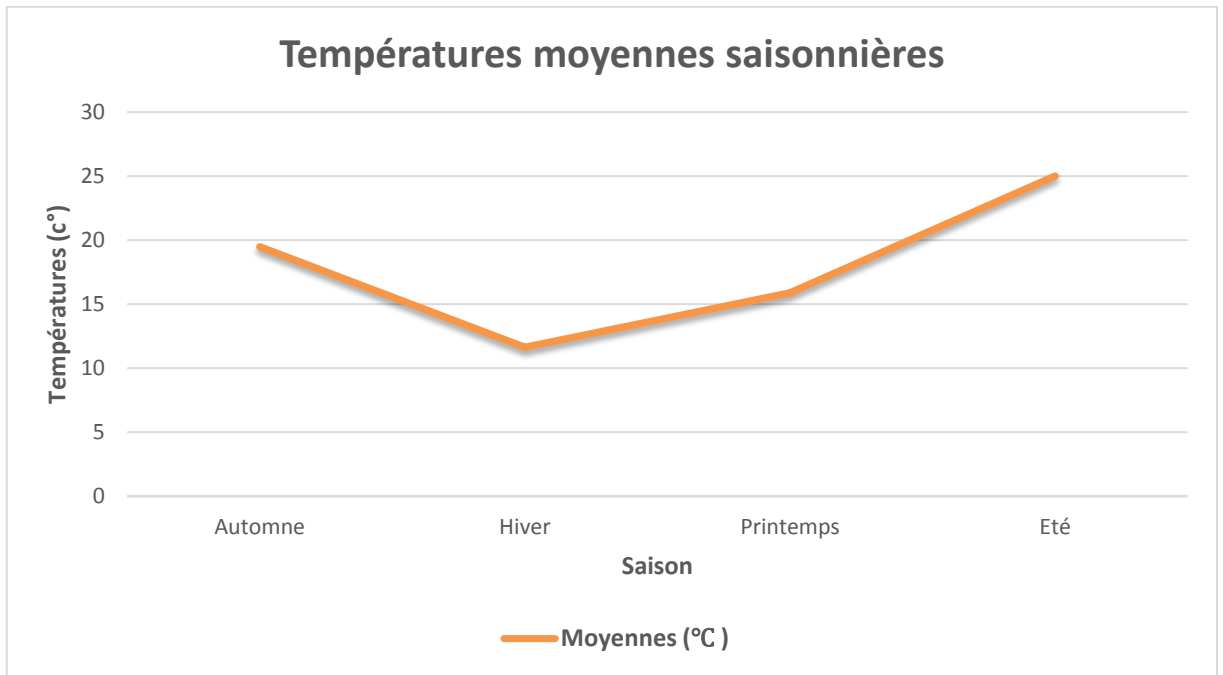


Figure III.8 : données de l'évolution des températures moyennes saisonnières enregistrées à la station Zenata entre 1974 et 2018

L'été est la saison la plus chaude alors que l'hiver est la saison la plus froide ce qui représente le climat méditerranéen.

III.4.4. Variation des températures moyennes journalières

Les températures journalières sont très irrégulières, aucune information ne peut être tirée

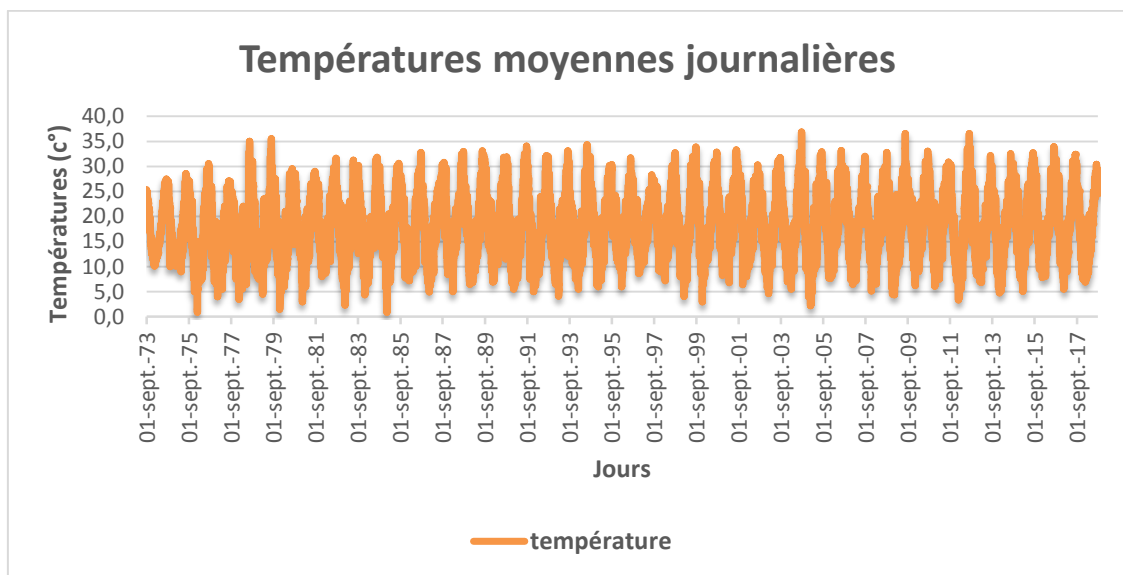


Figure III.9 : données des températures journalières enregistrées à la station Zenata de 1974 à 2018

III.5. Etude des débits

Le débit est le volume d'eau qu'un cours d'eau véhicule par unités de temps. Il dépend d'une part des caractéristiques du bassin versant (pente, perméabilité du sol, couvert végétal...) d'autre part de la météorologie (précipitations, évapotranspiration).

Le but de ce travail est l'étude du débit de l'Oued Boukiou mesuré à partir de la station de Djebel Chouachi

III.5.1. Variation interannuelle des débits correspondants

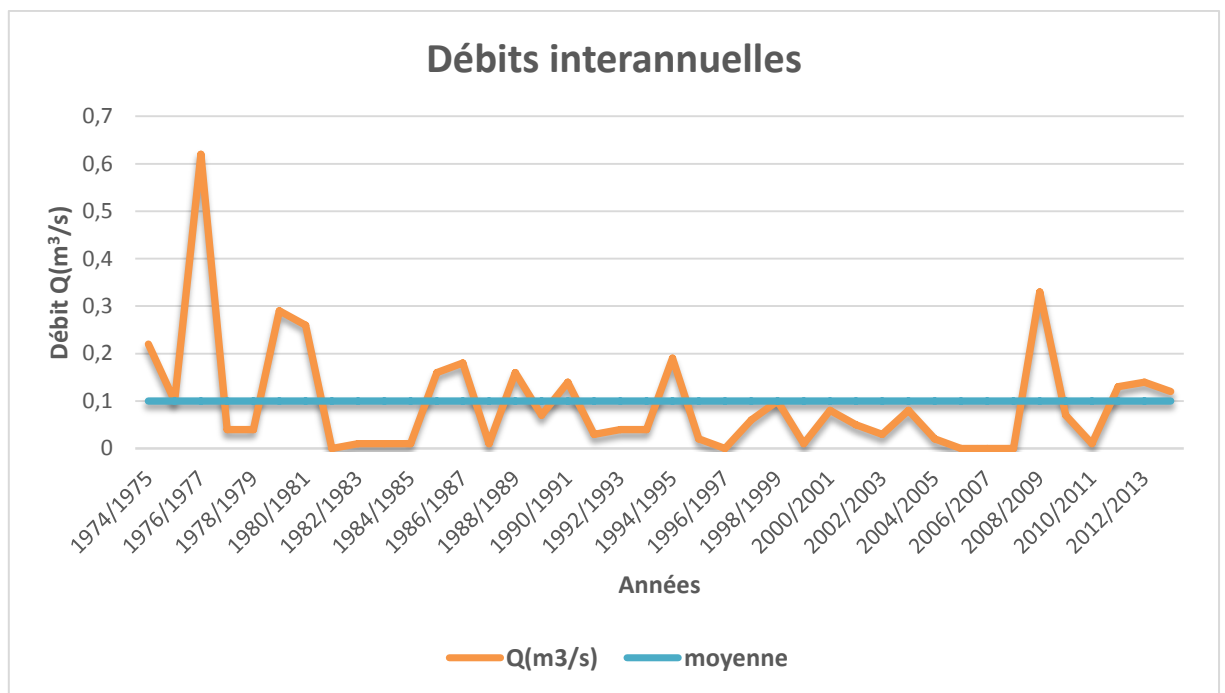


Figure III.10 : Données de l'évolution interannuelle moyenne des débits de oued Boukiou enregistrées à la station Zenata entre 1974 et 2014

D'après le graphe le débit moyen annuel est de $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Nous remarquons aussi de fortes irrégularités dans les débits avec des pics et des saisons complètement sèches entre 2005 et 2008 .

III.5.2. Variation moyenne mensuelle des débits

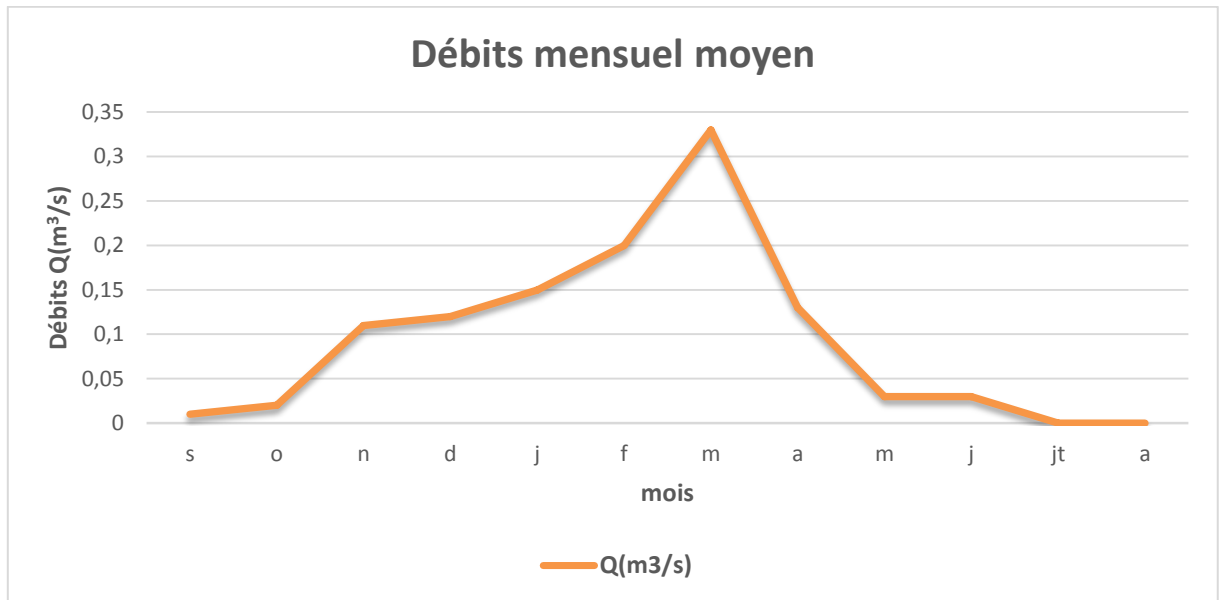


Figure III.11:Données des variations des débits mensuelles de oued Boukiou enregistrées à la station Dj Chouachi entre 1974 et 2014

La moyenne arithmétique des débits mensuels de la station de Djebel Chouachi est égale à 0.10 m³/s

Les valeurs mensuelles les plus élevées des débits sont enregistrées durant les mois de février/mars ; cependant, durant les mois de juillet/août, ces valeurs sont quasiment nulles

III.5.3. Variation moyenne saisonnière des débits

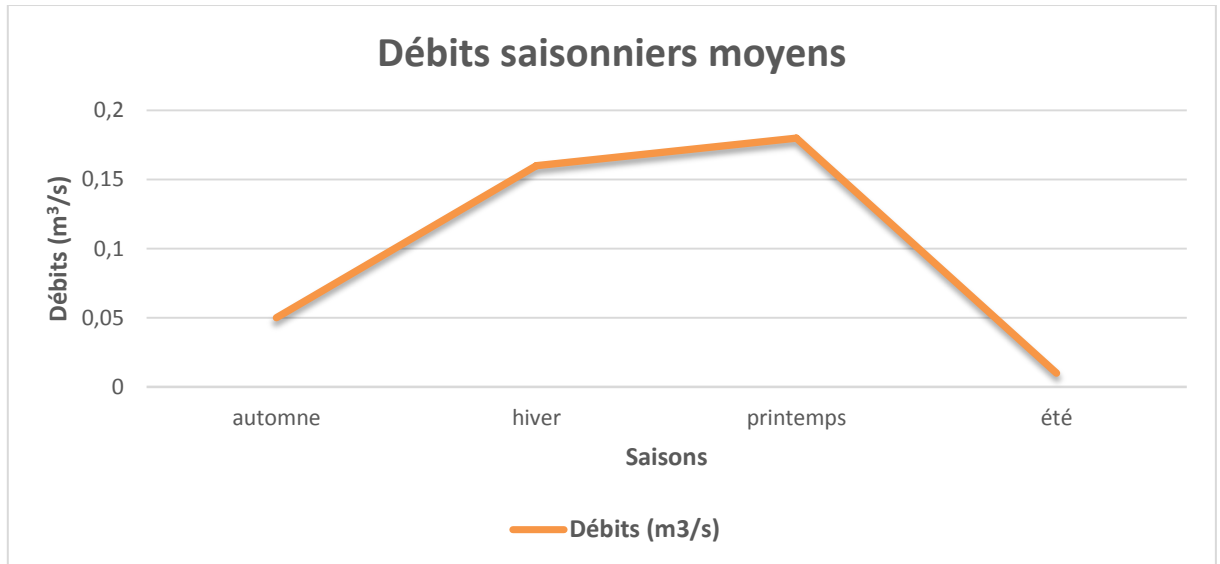


Figure III.12 : données sur les variations saisonnières des débits de Boukiou enregistrées à la station Dj Chouchi de 1974 à 2014

Les débits des saisons hiver/printemps plus élevés que ceux des saisons estivales juillet/août ce qui veut dire que la grande partie de l'écoulement s'effectue au printemps.

III.6. Etude des lames d'eau

La lame d'eau (Le) est la hauteur de précipitations qui s'écoule en moyenne par unité de temps.

La quantité d'écoulement dépend de l'évaporation (température) et les caractéristiques du terrain ; ainsi elle est proportionnelle à la dénivellation du terrain.

La lame d'eau correspond au volume écoulé de la station sur la surface du terrain. Elle est très couramment exprimé en mm ce qui permet de la comparer aux pluies qui en sont à l'origine. (l'encyclopédie, 2018)

III.6.1. Variation moyenne interannuelle des lames d'eau

La figure suivante représente l'évolution interannuelle moyenne des lames d'eau écoulées

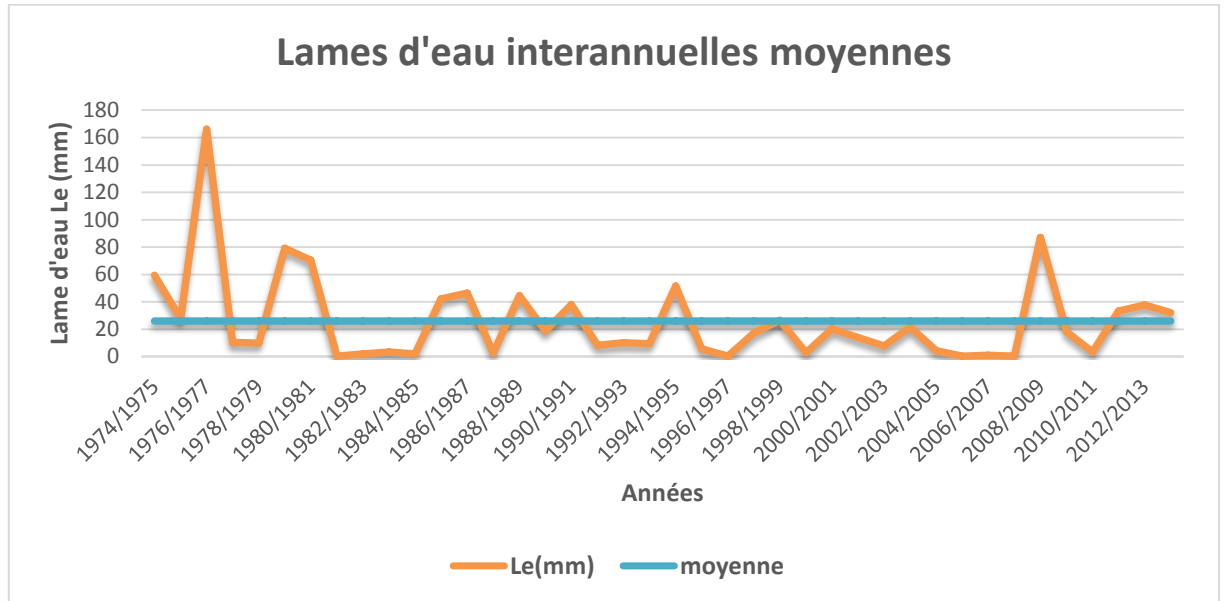


Figure III.13 : Données de l'évolution interannuelle moyenne des lames d'eau écoulées enregistrées à la station Dj Chouchi entre 1974 et 2014

La variation annuelle est relativement importante avec cependant des exceptions élevées durant les années 1974/1975, 1979/1980 et 2008/2009 et très faibles durant les années 1981/1982, 1996/1997 et entre 2005/2008.

La lame d'eau écoulée moyenne est de 26mm.

III.6.2. Variation moyenne mensuelle des lames d'eau

Les variations mensuelles sont plus élevées durant les mois de février/ mars et très faibles durant les mois de juillet/août d'après le graphe ci-dessous :

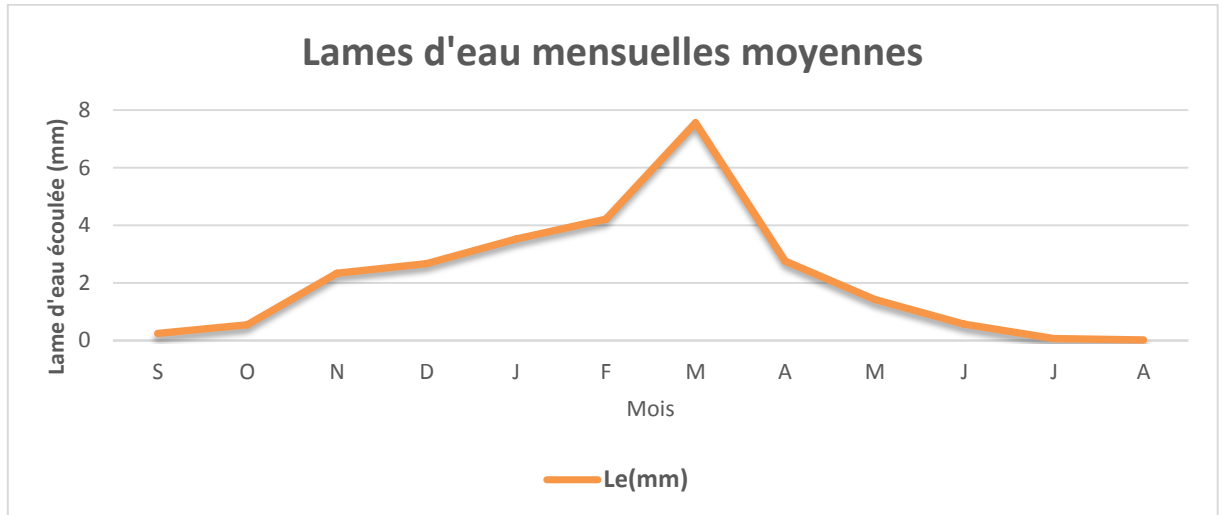


Figure III.14 : Données des variations moyennes mensuelles de oued Boukiou enregistrées à la station Dj Chouachi de 1974 à 2014

III.6.3. Variation moyenne saisonnière des lames d'eau

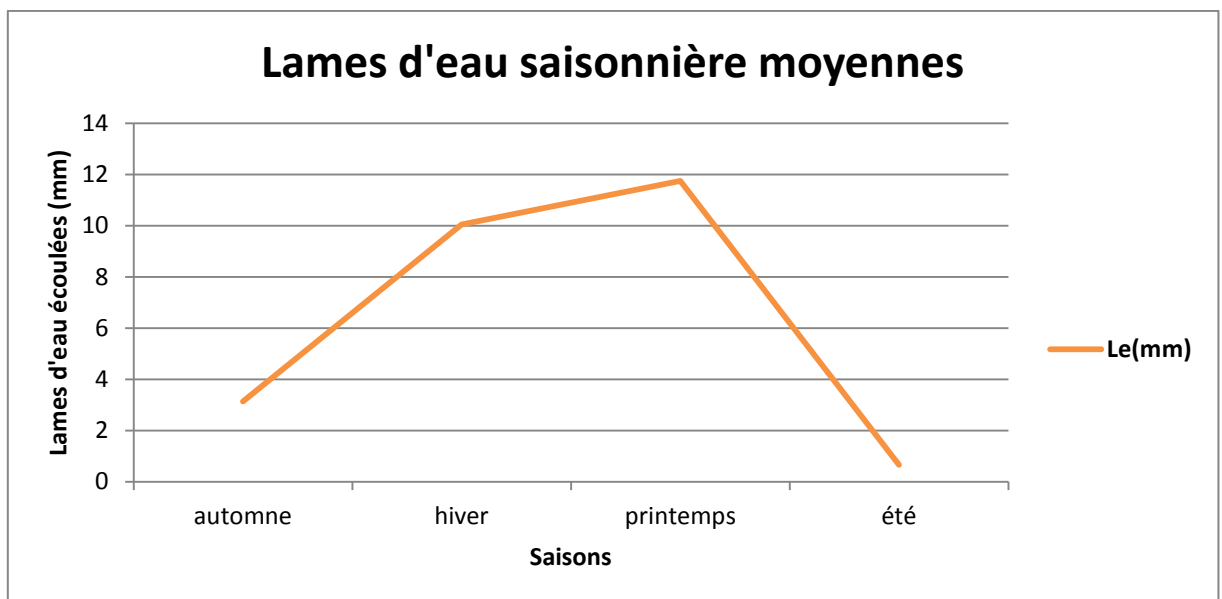


Figure III.15 : variation saisonnière moyenne du bassin versant de oued Boukiou enregistrée à la station Dj Chouachi de 1974 à 2014

Les variations saisonnières sont naturellement plus élevées au printemps qu'en été ainsi l'écoulement est plus élevé au printemps et pratiquement nul en été.

III.7. Etude des modèles

III.7.1. Modèles climatiques

III.7.1.1. introduction

Les modèles climatiques globaux ou GCM (Global Climatic Model) sont des outils utilisés pour simuler les conditions futures à partir de données historiques connues.

Le GCM est en réalité une équation mathématique faisant intervenir tous les paramètres influents et leurs interactions (J.M.Jancovici, 2007) :

- Paramètre « terre » avec toutes les caractéristiques de surface : cours d'eau, la couverture du sol, la végétation...
- Paramètre « atmosphère » : mouvements d'air dans la circulation d'eau et de chaleur
- Paramètre « océan » : courants d'air marins ainsi que les réservoirs de chaleur et de carbone
- Paramètre glaciers et glace

Les modèles climatiques sont construits sur la terre en maille tridimensionnelle représentant ses coordonnées ainsi que tous ses processus physiques. Les interactions entre mailles sont modélisées par des équations mathématiques. Plus la maille est petite plus précis est le modèle.

Le modèle part toujours de conditions initiales connues des paramètres climatiques. La modélisation d'un climat est établie à partir des scénarios évolutifs dépendant à leurs tours des hypothèses portant sur la quantité émise de gaz à effet de serre.

Ainsi le forçage radiatif est l'équilibre entre le rayonnement solaire entrant et les émissions de rayonnements infrarouges sortants de l'atmosphère. Il se mesure en W/m^2 (W=Watt)

Les gaz à effet de serre ont tendance à absorber les infrarouges, on assiste donc à un réchauffement du climat ; dans ce cas, le forçage est positif. Lors d'un forçage négatif, la terre se refroidit.

Le forçage actuel est d'environ $2.4 W/m^2$. Cela veut dire que la terre reçoit plus qu'elle n'en émet et donc la température tend à augmenter.

Des phénomènes naturels peuvent être à l'origine d'un forçage radiatif positif telles les éruptions volcaniques ; cependant, on assiste actuellement à son augmentation exponentielle depuis le début de l'ère industriel et donc probablement de nature anthropique.

III.7.1.2. SDSM

Le **SDSM** (Statistical DownScaling Model) est un outil d'aide à la décision afin d'évaluer les répercussions des changements climatiques locaux au moyen d'une technique robuste de réduction d'échelle statistique. C'est un hybride entre un générateur stochastique de données météorologiques et une méthode de régression linéaire multiple qui facilite le développement rapide de multiples scénarios (faible coût de calcul) en un seul site pour les variables météorologiques quotidiennes dans des conditions de forçages climatiques actuels et futurs (R.L.Wilby, 2002)

SDSM a été conçu pour aider l'utilisateur à identifier les variables climatiques globales (les variables *prédictives*) qui expliquent la majeure partie de la variabilité climatique (du *prédicteur*) en un lieu particulier, et des modèles statistiques sont alors construits à partir de ces informations. Les modèles statistiques sont construits au moyen des données quotidiennes observées – les données climatiques locales à propos d'un lieu particulier pour le prédicteur, et les données à grande échelle de **NCEP** (National Centers for **E**nviromental **P**rediction) pour les variables prédictives;- et ces modèles sont ensuite utilisés avec les variables prédictives; issues des **MCG**(Modèles de **C**irculation **G**énérale) ou **GCM** pour obtenir les données météorologiques quotidiennes à l'endroit en question pour une période future.

Principe

Le SDSM permet la réduction d'échelle spatiale des rapports quotidiens entre les variables prédictives et le predicteur au moyen des techniques de régression linéaire multiple. Les variables prédictives fournissent des données quotidiennes sur l'état de l'atmosphère à grande échelle alors que le prédicteur décrit les conditions climatiques locales. Le logiciel permet de minimiser la tâche de réduction d'échelle statistique des séries météorologiques quotidiennes via les différents processus discrets suivants :

- Analyse préliminaire des variables prédictives dont l'échelle peut être réduite — détermine les variables prédictives à grande échelle qui ont une forte corrélation avec les données observées aux stations. Un certain nombre de variables issues des

champs de pression au niveau moyen de la mer sont comprises, par exemple la force du vent, les composantes méridiennes et zonales du vent, tourbillon, etc. (Voir Réduction d'échelle statistique dans la section Téléchargement des données)

- Assemblage et étalonnage du modèle de réduction d'échelle statistique — les variables prédictives à grande échelle recensées en (1) servent à déterminer les relations de régression linéaire multiple entre ces variables et les données des stations locales. Les modèles statistiques peuvent être établis à l'échelle mensuelle, saisonnière ou annuelle. Des données sont fournies sur l'ampleur de la variance expliquée par le modèle et l'erreur type afin de déterminer la viabilité de la réduction d'échelle spatiale de la variable et du lieu en question.
- Synthèse d'ensembles de données météorologiques courantes à l'aide des variables « prédictives » observées — une fois que les modèles de réduction d'échelle statistique ont été établis, on peut les vérifier en utilisant un ensemble de données indépendantes parmi les variables prédictives observées. La partie stochastique de SDSM permet de produire jusqu'à 100 ensembles de séries de données qui présentent les mêmes caractéristiques statistiques mais qui varient sur une base quotidienne.
- Génération d'ensembles de données météorologiques futures à l'aide des variables prédictives issues de MCG — la production des variables prédictives appropriées issues de MCG permet de générer des ensembles de données météorologiques futures en utilisant les rapports statistiques calculés en (2).
- Essai/analyse diagnostiques des données observées et des scénarios de changements climatiques — il est possible de calculer les caractéristiques statistiques des données observées et des données synthétiques pour procéder à une comparaison facile et ainsi déterminer l'effet de la réduction d'échelle spatiale.

III.7.1.3. HadCM3

HadCM3 est un modèle climatique couplé (atmosphère-**HadAM3**-/océan-**HadOM3**-) utilisé dans la prévision, la détection et l'attribution du climat.

HadCM3 est la première configuration de modèle climatique unifié, à ne pas nécessiter d'ajustements de flux (flux supplémentaires de chaleur et d'eau douce artificiels à la surface de l'océan) pour sa bonne simulation du climat actuel. Il a la capacité de capturer l'empreinte temporelle du changement climatique historique en réponse aux forçages

naturels et anthropiques et particulièrement utile aux études de détection et l'attribution des changements climatiques passés (C.Gordan, 2000)

Enfin, ce modèle, exécuté pour la production de simulations sur des périodes de plus de mille ans, est particulièrement utilisé dans les projets de système de modélisation régionale

III.7.1.4.Utilisation des scénarios

Un scénario représente la qualité potentielle de l'atmosphère (émission de gaz à effet de serre), il est donc tributaire de beaucoup de paramètres tels la croissance démographique et le développement économique de la région ; par conséquent, un scénario part d'une enquête des données exhaustives d'une région et les projeter dans le futur pour le meilleur choix d'un modèle (P.Mote, 2011)

III.7.2. Modèles hydrauliques

III.7.2.1. Objectifs de la modélisation

- Prédétermination des débits de crue ou d'étiage : il s'agit de dimensionné des ouvrages et de réservoirs ou d'aménagements dans le lit (mineur à majeur) du cours d'eau.
- Prévision des crues et des étiages: connaissent le temps de réponse des débits a l'exutoire un modèle pluie débit peut être exploité dans la prévision des débits à court terme et d'anticiper l'évolution des débits vers l'exutoire.
- la reconstitution ou la Simulation de débits : pour reconstituer le débit lacunaire (Les pluies sont plus faciles à observer et à modéliser que les débits).
- La gestion des ressources en eau : contrôle le fonctionnement d'une structure hydraulique La modélisation pluie débit peut intervenir dans cette gestion à trois niveaux:

Par l'évaluation des ressources en eau, et de la valorisation de tous les processus participants aux différents écoulements par exemple les bassins non jaugée.

Il peut aussi caractériser l'impact des différents aménagements hydro-agricoles.

Un modèle qui représente les différents flux du système dynamique ou niveau de barrage en fonction de la demande des divers opérateurs intervenant sur le bassin.

- l'analyse de la non-stationnarité d'un bassin versant.

III.7.2.2. Caractéristiques du modèle

Un modèle est caractérisé par :

- Géométrie du système.
- Les entrées du système.
- Les lois de formalisation des processus.
- L'état initial et les conditions limitent du système.
- Les sorties du système.

III.7.2.3. Choix du modèle

Dépend de :

- La fidélité de la représentation du bassin versant.
- Sa capacité à reproduire le phénomène étudié

III.7.2.4. La mise en œuvre d'un modèle

Dépend de ;

- La formulation du système : avec tous les paramètres et variables d'entrée ainsi que celles de l'ajustement
- Le calage : détermination des paramètres d'ajustement
- La validation : évaluation de la robustesse

III.7.2.5. Les critères de calage des performances

- Critères quadratiques: les plus utilisés
- Critères d'erreur moyenne absolue « Mean Absolute Error »
- Critères de la racine carrée de l'erreur moyenne "Root Mean Square Error"
- Critères de détermination R^2
- Critères de Nash : permettant un meilleur calage du modèle

III.7.2.6. Utilisation du modèle GR2M

Le modèle GR2M a été appliqué à plusieurs bassins versants en Algérie ; particulièrement dans la Wilaya de Tlemcen avec (Abderrazak Bouanani, 2012) sur le versant d'Oued Sekkak ; (BOURSALI, 2015) sur le versant de la Tafna et a donné des résultats satisfaisants

C'est un modèle utilisé pour une représentation simplifiée d'un phénomène naturel

Le **GR2M** (**G**énie **R**ural à **2** paramètres **M**ensuels) est un modèle transformation pluie-débit qui, à partir de deux variables (pluie et évapotranspiration), seront simulés les

débites de base, de ruissèlement total qui représentent les sorties de modèle. Il fonctionne autour de deux (02) réservoirs de production (réservoir sol) et de routage sur lesquels les ajustements et interceptions se font différemment sur les entrées avec :

- **P** : pluie mensuelle
- **E** : évapotranspiration potentielle du mois

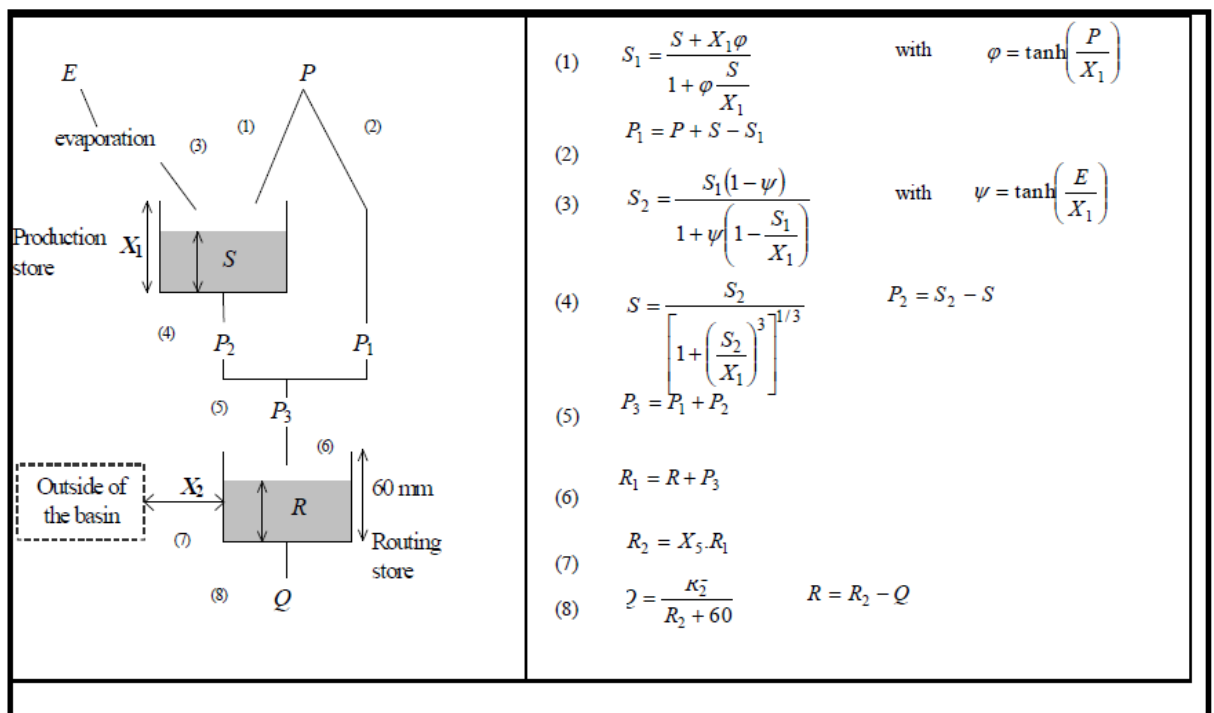


Figure III.16 : fonctionnement du modèle GR2M (Mouelhi, 2006)

Ce modèle est caractérisé par deux réservoirs jouant le rôle de fonctions de production et de transfert :

- Un réservoir sol qui régit la fonction de production et qui est caractérisé par sa capacité maximale $X1$, correspondant à la capacité de rétention en eau du sol.
- Un réservoir d'eau gravitaire qui régit la fonction de transfert caractérisée par un coefficient d'échange souterrain $X2$.

Pour la pluie P , le niveau S dans le réservoir de production devient $S1$, défini par :

$$S1 = \frac{s + X1\varphi}{1 + \varphi \frac{s}{X1}}$$

Avec
$$\varphi = \tan \frac{P}{X1}$$

- Le paramètre **X1** capacité du réservoir est positif et exprimé en mm

La pluie en excès est donnée par $P1 = P + S - S1$

Du fait de l'évapotranspiration, le niveau $S1$ devient $S2$

$$S1 = \frac{S1(1-\Psi)}{1+(1-\frac{S1}{X1})} \text{ ou } \Psi = \tan \frac{E}{X1}$$

E étant l'évapotranspiration potentielle.

Le réservoir sol se vidange en une percolation. **P2** et son niveau **S** prêts pour les calculs du mois suivant dont la formule est :

$$S = \frac{S2}{\left[1 + \left(\frac{S2}{X1}\right)^{2,5}\right]^{0,4}} \text{ et } P2 = S2 - S$$

La pluie totale **P3** qui atteint le réservoir de routage est donnée par : $P3 = P1 + P2$

Le niveau **R** dans le réservoir de routage devient $R1 = R + P$

L'échange en eau est alors $F = (X2 - 1) R1$

- Le paramètre **X2** est positif est adimensionnel

Le niveau du réservoir devient : $R2 = X2.R1$

Le réservoir de capacité fixe de 60 mm se vidange suivant une fonction quadratique, le débit est donné par :

$$Q = \frac{R^2}{R^2 + 60}$$

Le niveau du réservoir devient $R = R2 - Q$

Pour l'optimisation des paramètres $X1$ et $X2$, nous optons pour le critère de Nash

$$Nash (\%) = 100 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Qi - Qcal)^2}{\sum_{i=1}^N (Qi - Qmoy)^2} \right]$$

Qobs : débit mensuel observé

Q cal : débit mensuel calculé

Q moy : débit moyen mensuel observé

On considère que le modèle est performant si le Nash est supérieur à 70%

Le bilan hydrologique durant une année peut se résumer sous une forme simplifiée :

$$P = ETP + Q +/\Delta S$$

P : pluie

ETP : évapotranspiration

Q : débit total obtenu par modélisation pluie-débit

ΔS : variation du stock

Le modèle GR2M est donc à deux paramètres optimisables

- ✓ **X1** : capacité du réservoir de production, correspond à la transformation de la pluie en lame d'eau de ruissellement et doit être compris entre 140 et 2640
- ✓ **X2** : coefficient d'échanges souterrains, correspond au transfert de la lame d'eau lors de la précipitation vers l'exutoire et doit être compris entre 0,21 et 1,31

CHAPITRE IV

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

IV.1. introduction

Nous utilisons, dans un premier temps le modèle SDSM de réduction d'échelle statistique pour produire des séries synthétiques de données météorologiques sur la base de paramètres obtenus à partir de la station de Chouachi. Le modèle nécessite des paramètres mensuels pour les variations saisonnières et vérifier la corrélation entre les variables utilisées.

Une deuxième partie sera consacrée à l'utilisation du modèle GR2m qui est un modèle pluie-débit à deux paramètres optimisables (la capacité de réservoir de production et un coefficient d'échanges souterrains)

IV.2.Régime pluviométrique

La série de données pluviométriques de la station Chouachi ne présente pas beaucoup de lacunes.

IV.2.1. variabilité annuelle des précipitations

Le SPI (Standardized Precipitation Index) est utilisé pour déterminer la sévérité de la sécheresse. Il correspond à la différence entre la pluie de l'année (P_i) et la pluie moyenne (P_{moy}) sur l'écart type (σ). (OMM. 2012)

$$SPI = \frac{P_i - P_{moy}}{\sigma}$$

L'indice SPI est utilisé pour analyser les périodes ou cycles

Tableau IV.1 : classe des SPI

Classes du SPI	Degrés de sécheresse
$SPI > 2$	Humidité extrême
$1,5 < SPI < 2$	Humidité forte
$1 < SPI < 1,5$	Humidité modérée
$-1 < SPI < 1$	Normale
$-1,5 < SPI < -1$	Sécheresse modérée
$-2 < SPI < -1,5$	Sécheresse forte
$SPI < -2$	Sécheresse extrême

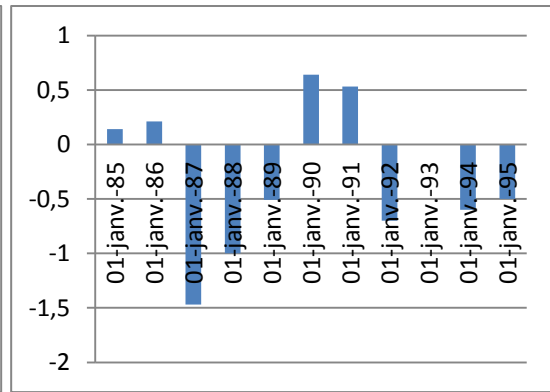
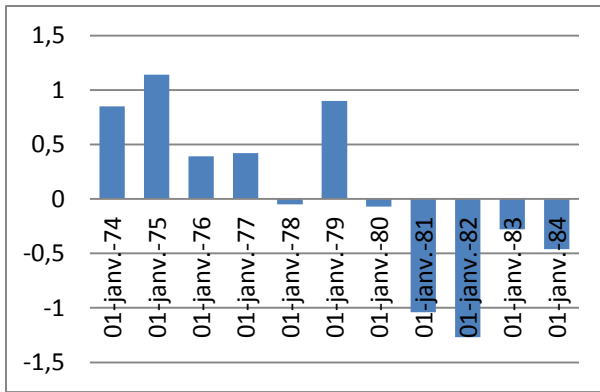


Figure IV.1 : SPI observé de 1974 à 1984

Figure IV.2 : SPI observé de 1985 à 1995

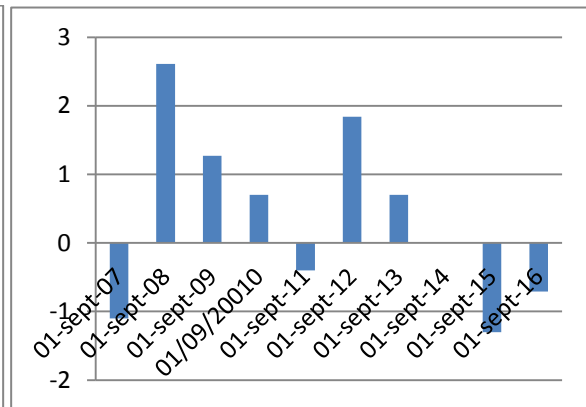
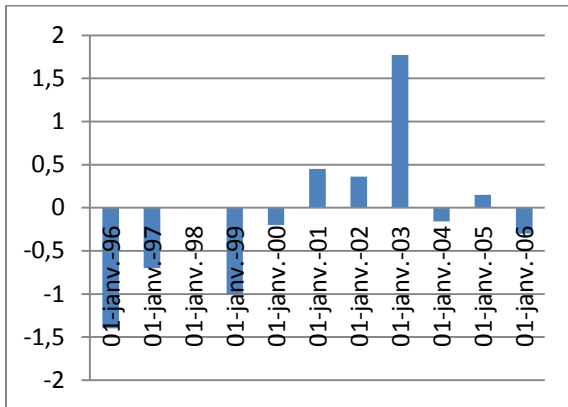


Figure IV.3 : SPI observé de 1996 à 2006 Figure IV.4 : SPI observé de 2007 à 2016

Le fait de ne disposer que d'une série de donnée sur une quarantaine d'année diminue la taille de l'échantillon et affaiblit le degré de confiance ; en effet, il faut toujours garder à l'esprit les limites statistiques

Cependant, les valeurs positives indiquent les précipitations supérieures à la moyenne et les valeurs négatives inférieures à la moyenne.

L'indice indique qu'une sécheresse débute quand la valeur du SPI est inférieure à -1 et qu'une sécheresse se termine quand sa valeur devient positive

L'étude des SPI de la station de Chouachi, durant la période allant de 1974 à 2016, montre une alternance d'année modérément sèche et modérément humide ; avec cependant, des séquences sèche ,bien au-dessous de la moyenne durant les décennies 80 et 90 suivies d'une nette amélioration des précipitations durant les années 2000 avec un pic élevé en 2008.

IV.2.2. Variabilité mensuelle des précipitations

La variabilité mensuelle interannuelle des précipitations grâce au diagramme ombrothermique permet de distinguer les mois humides des mois secs. Il correspond à la formule suivante : $P-2T$ avec P = pluie en mm et T = température en degré Celsius

En effet, la période pluvieuse s'étale de novembre à avril : c'est la caractéristique d'un climat semi-aride.

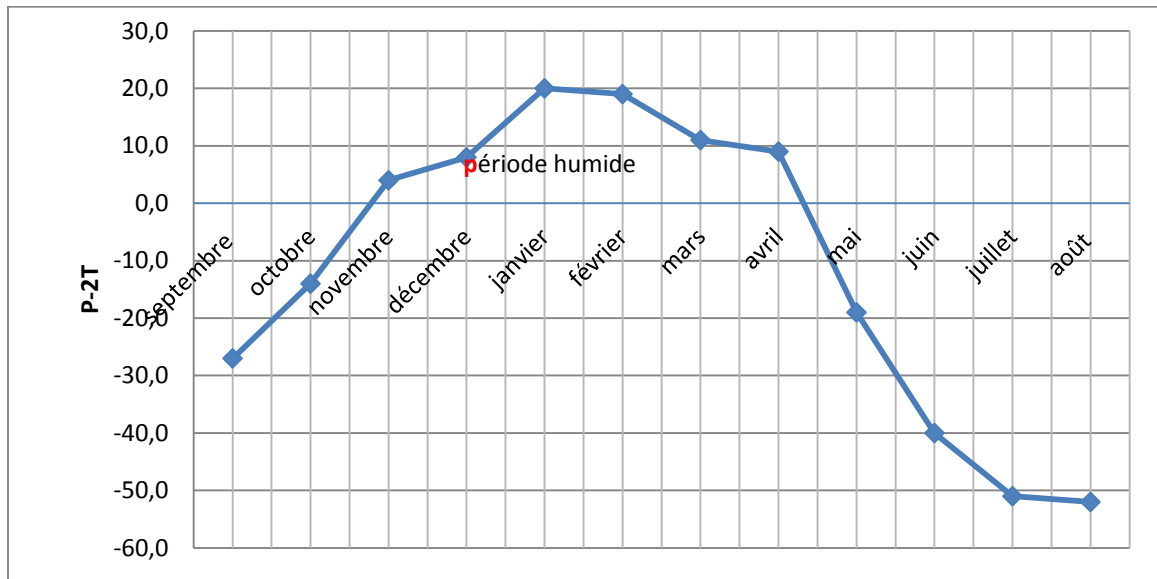


Figure IV.5 : Diagramme ombrothermique

Cependant, l'instabilité du régime pluviométrique est un phénomène couramment observé par le changement de cumul mensuel. En effet, il arrive souvent d'avoir un automne humide suivi d'un hiver et printemps secs ou le contraire pour un cumul identique.

IV.3. données climatiques

Pour apprécier les prévisions du bassin versant de Oued Boukiou sur le changement du climat, nous avons opté pour une descente d'échelle statistique à partir des données météorologiques de la station Chouachi. Les modèles utilisés sont conventionnellement développés en deux étapes :

- Modélisation des précipitations
- Modélisation des températures

IV.3.1. Utilisation du modèle climatique

IV.3.1.1. Procédure de saisie de données

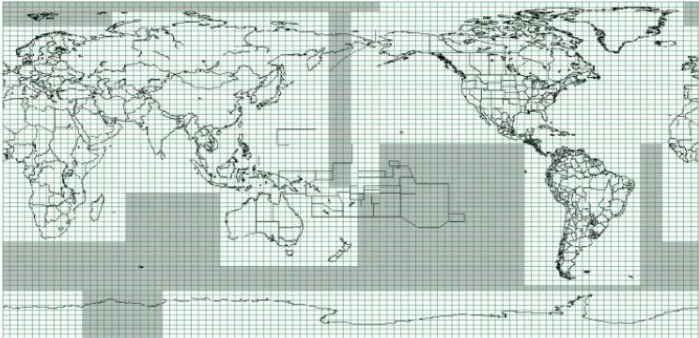
- Acquisition de la série des paramètres météorologiques de la zone
- Délimitation géographique de la zone
- Traitement du fichier pour chaque paramètre en format tabulaire sur un seul fichier
- Choix du ou des scénarios de profils à étudier comme entrée pour la modélisation
- Préparation des données issues du GCM
- Utilisation d'un outil de réduction d'échelle
- Evaluation des tendances par paramètre à partir du GCM sous chaque scénario
- Application du Downscaling sur les scénarios générés pour la production des paramètres climatiques locaux

IV.3.1.2. Données utilisées

- Utilisation des logiciels

Le SDSM pour la mise en œuvre de descente d'échelle à partir de simulation de GCM afin de produire des séquences météorologiques synthétiques.

Cliquez sur la case que vous souhaitez récupérer



Numéro de boîte X :

Numéro de la case Y :

Figure IV.6 : Extraction de BOX du Modèle climatique HadCm3 Source :
(scenario.canada.ca)

- Paramètres météorologiques :

Utilisation des précipitations journalières P (mm) et les données de température moyenne (°C) de 1974 à 2018 ; malheureusement, il existe beaucoup de lacunes dans ces données.

- Coordonnées de la zone étudiée

Extraction de BOX du modèle climatique X : 1 Y : 20

Note : En raison du manque de certaines données journalières observées dans le modèle climatique utilisé dans notre étude, nous avons opté pour des données globales re-analysées

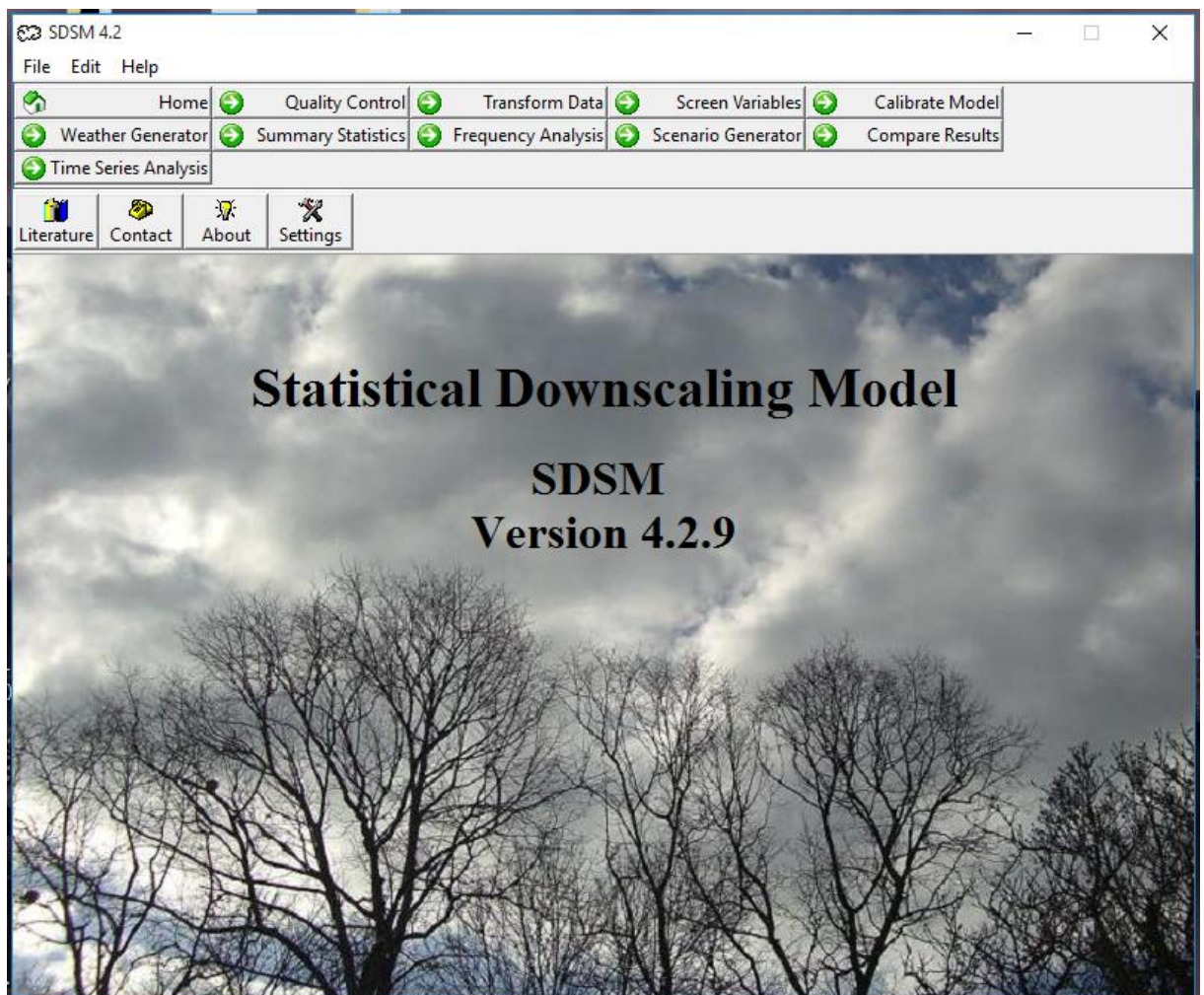


Figure IV.7 : fenêtre du logiciel SDSM source :(sdsms.org.uk, 2021)

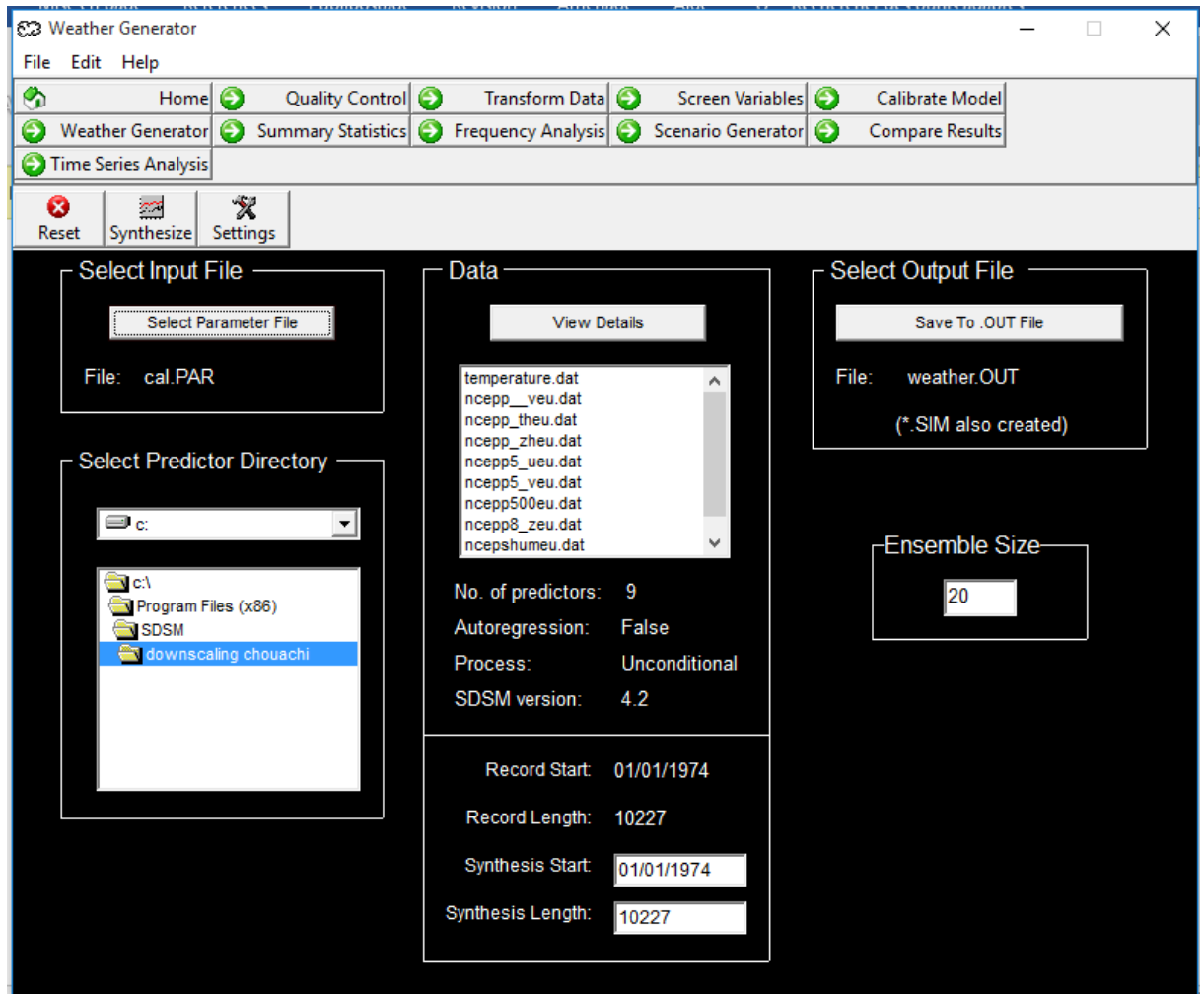


Figure IV.8 : application de la réduction d'échelle

Insertion des paramètres de température et de précipitation issus de la station de mesure dans le logiciel SDSM. (En surbrillance bleu).

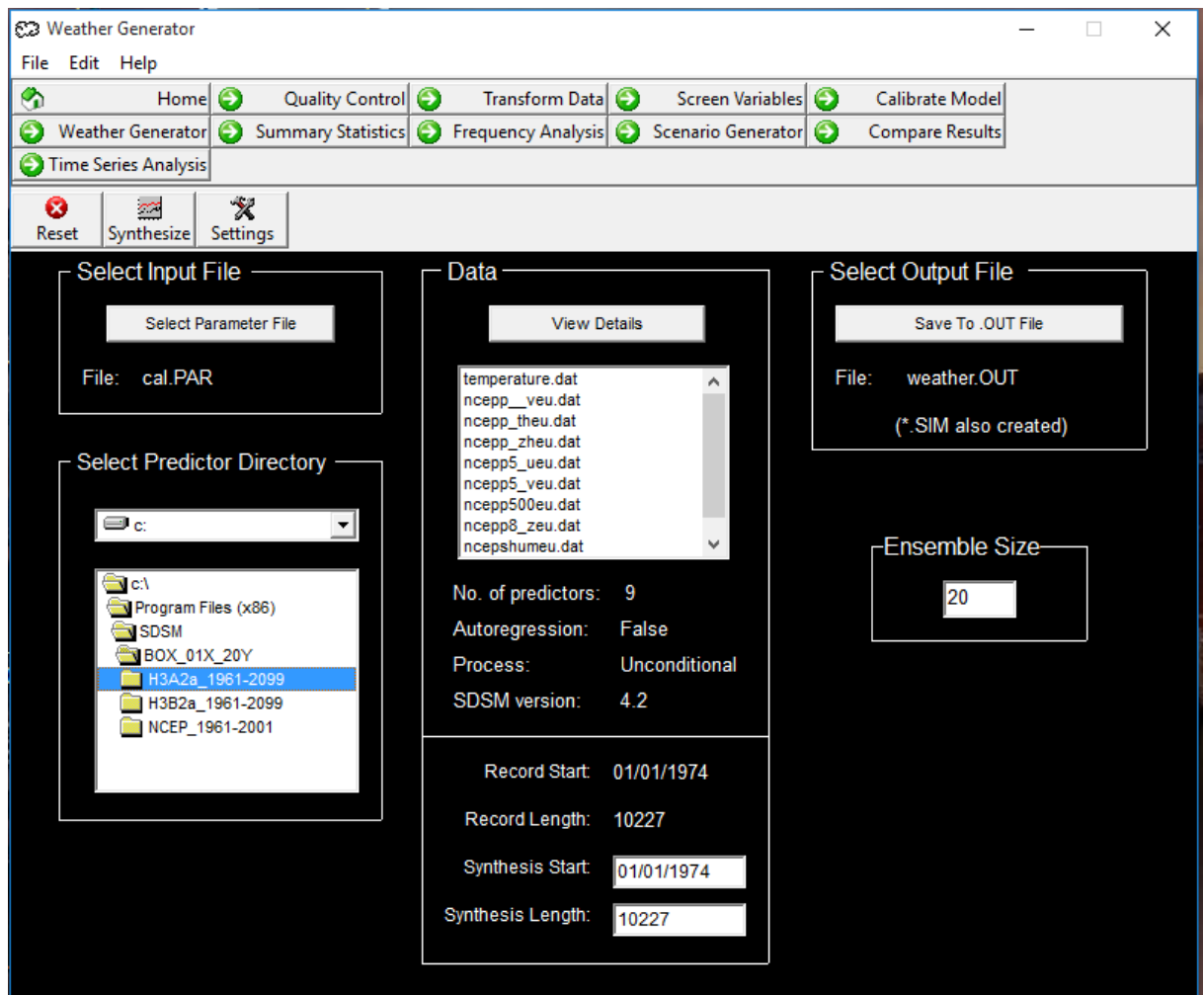


Figure IV.9 : application des scénarios

Après avoir inséré les données climatiques nous appliquons les deux scénarios issus du HadCm3 A2 et B2.

Les NCEP représente les données du scénario historique.

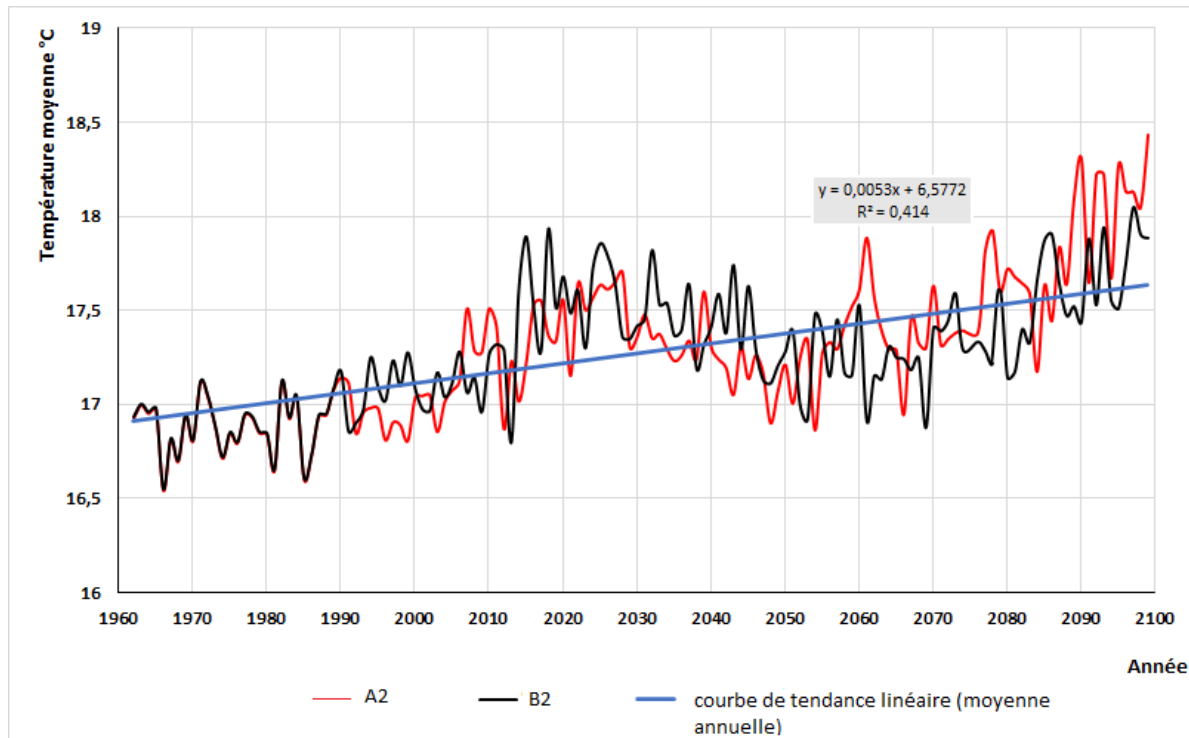
IV-3-2 résultats :**IV-3-2-1 prévisions des températures**

Figure IV.10 : scénario A2 et B2 des températures sur oued Boukiou avec le modèle HadCm3

Quel que soit le scénario utilisé A2 ou B2, la température augmentera inexorablement durant ce 21eme siècle, ceci est vérifié par la courbe de tendance linéaire ascendante ; avec cependant, une moyenne légèrement élevée en utilisant le scénario A2 plus pessimiste.

IV.3.2.2. prévisions des précipitations

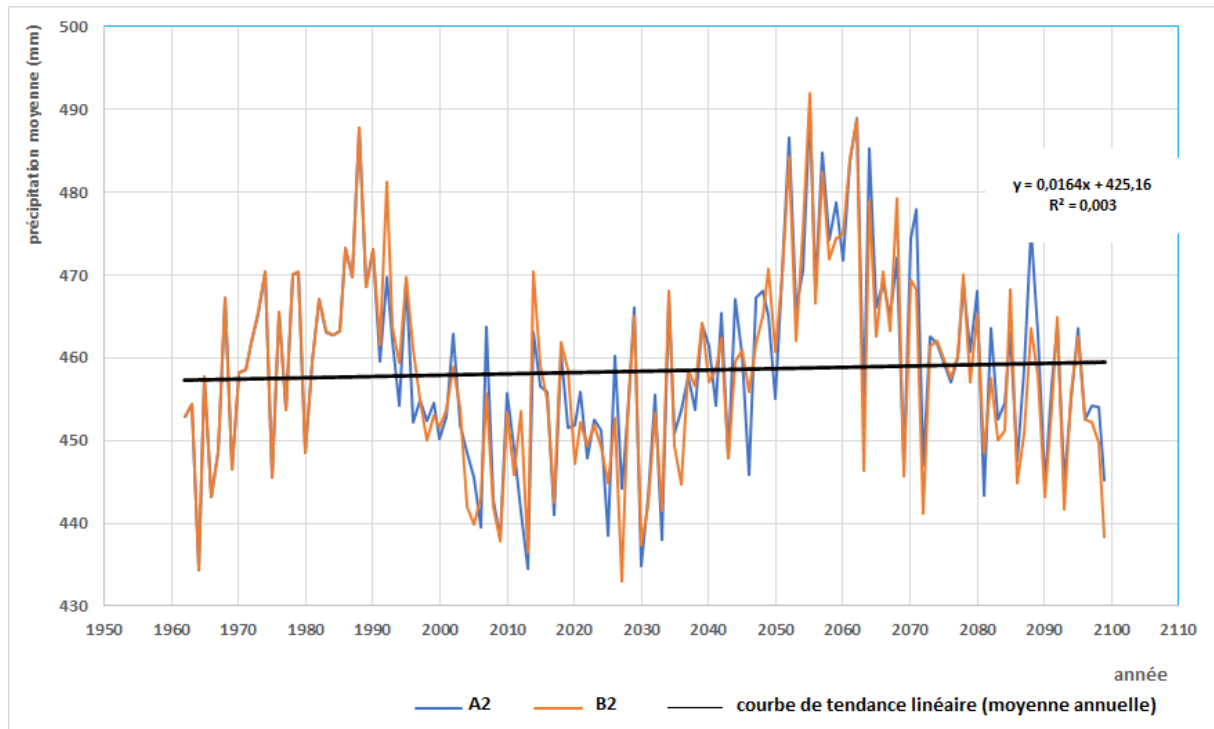


Figure IV.11 : Scénario A2 et B2 des précipitations sur oued Boukiou avec le modèle HadCm3

Le modèle prévoit une fluctuation de précipitation au même rythme actuelle, à la même amplitude, relayée par une augmentation de la moyenne des précipitations annuelles à partir du début de la moitié du 21ème siècle suivie d'une baisse de la fréquence des précipitations.

La courbe de tendance linéaire reste relativement constante.

Toute fois, avec l'augmentation de la température et la variation climatique, on observera probablement une grande instabilité dans le régime pluviométrique et des cumuls importants dans des temps réduits.

IV.4.Utilisation du GR2m

IV.4.1.Méthodologie

Pour tester la capacité du modèle GR2m (Mouelhi S, 2006) à reproduire les débits du bassin versant ; on passe par les étapes suivantes :

- Période de calage : caler le modèle sur une période de temps et déterminer les paramètres X_1 et X_2 du modèle
- Période de validation : valider le modèle sur une autre période en maintenant les mêmes paramètres X_1 et X_2
- Période d'exploitation : une fois le modèle validé, les données simulées peuvent être utilisées pour reconstituer les débits manquants ou erronés et déterminer le bilan hydrologique du bassin

Cependant, l'évaluation des performances nécessite l'utilisation de deux critères :

- Le coefficient de détermination (R^2) permet de juger la qualité de l'ajustement entre deux variables X et Y par la droite de régression
- Le critère de Nash qui permet d'accéder au meilleur calage

Une série de donnée mensuelle observée à la station météorologique Djebel Chouachi du bassin versant de Oued Boukiou sur une période de 39ans (de janvier 1975 à août 2014) a été utilisée :

- 1- Les données mensuelles de la pluviométrie P (mm).
- 2- Les débits mensuels en Q (mm/mois).
- 3- Les ETP calculés par la formule de Thornothwaite.

IV.4.2. Calage

Pour la phase du calage nous avons utilisé les deux tiers (2/3) des données du modèle (pluie, ETP, débits observés) soit une période de 26ans allant de janvier 1975 à décembre 2000, ensuite nous avons procédé au changement des paramètres X_1 et X_2 du modèle entre les valeurs limites comprises entre 140 et 2640 (mm) pour X_1 et 0.21 à 1.31 (mm) pour X_2 avec un intervalle de 0.001 jusqu'à l'obtention des valeurs optimum des coefficients de détermination, et le critère de Nash (valeur égale ou supérieur à 70%). Les résultats du calage, coefficient de détermination, et le Nash sont présentés dans le Tableau

Tableau IV.2 : Résultats du calage du modèle GR2m sur Oued Boukiou

Période de calage (1975 à 2000)						
Paramètre		Critères de qualité et d'optimisation				
X1	X2	Nash %	S0 (mm)	R0 (mm)	Bilan %	Corrélation R
141.17	0.614	71.1	70.59	30	83.8	0.78

S0: Niveau de remplissage initial du réservoir de routage.

R0 : Niveau de remplissage initial du réservoir de production (max : 60mm).

R² : Coefficient de corrélation.

La valeur de ces paramètres dépend de X1 et X2

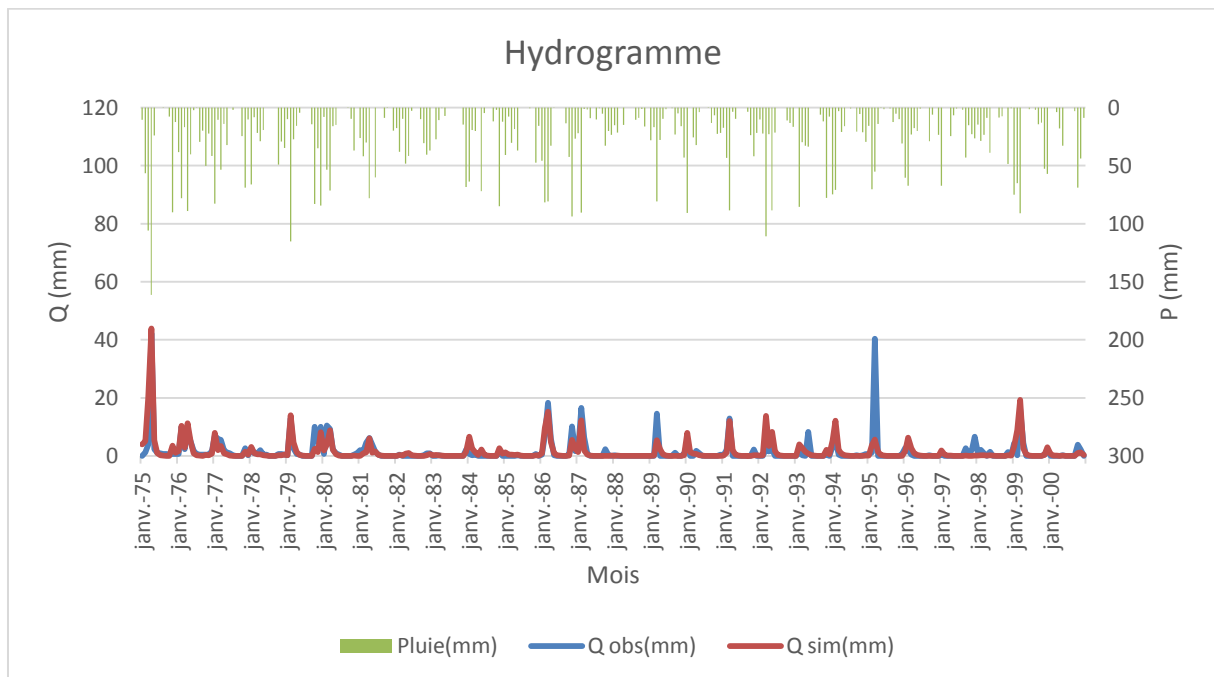


Figure IV.12 : Résultat du calage du modèle GR2m

En analysant les hydrogrammes des débits observés et des débits simulés nous remarquons une bonne superposition des deux courbes et avec le tableau des résultats du calage nous avons obtenu de bons résultats avec une valeur de Nash égale à 71.1% et une

bonne corrélation R^2 égale à 0.78 donc nous pouvons nous permettre de dire que le modèle est bien calé.

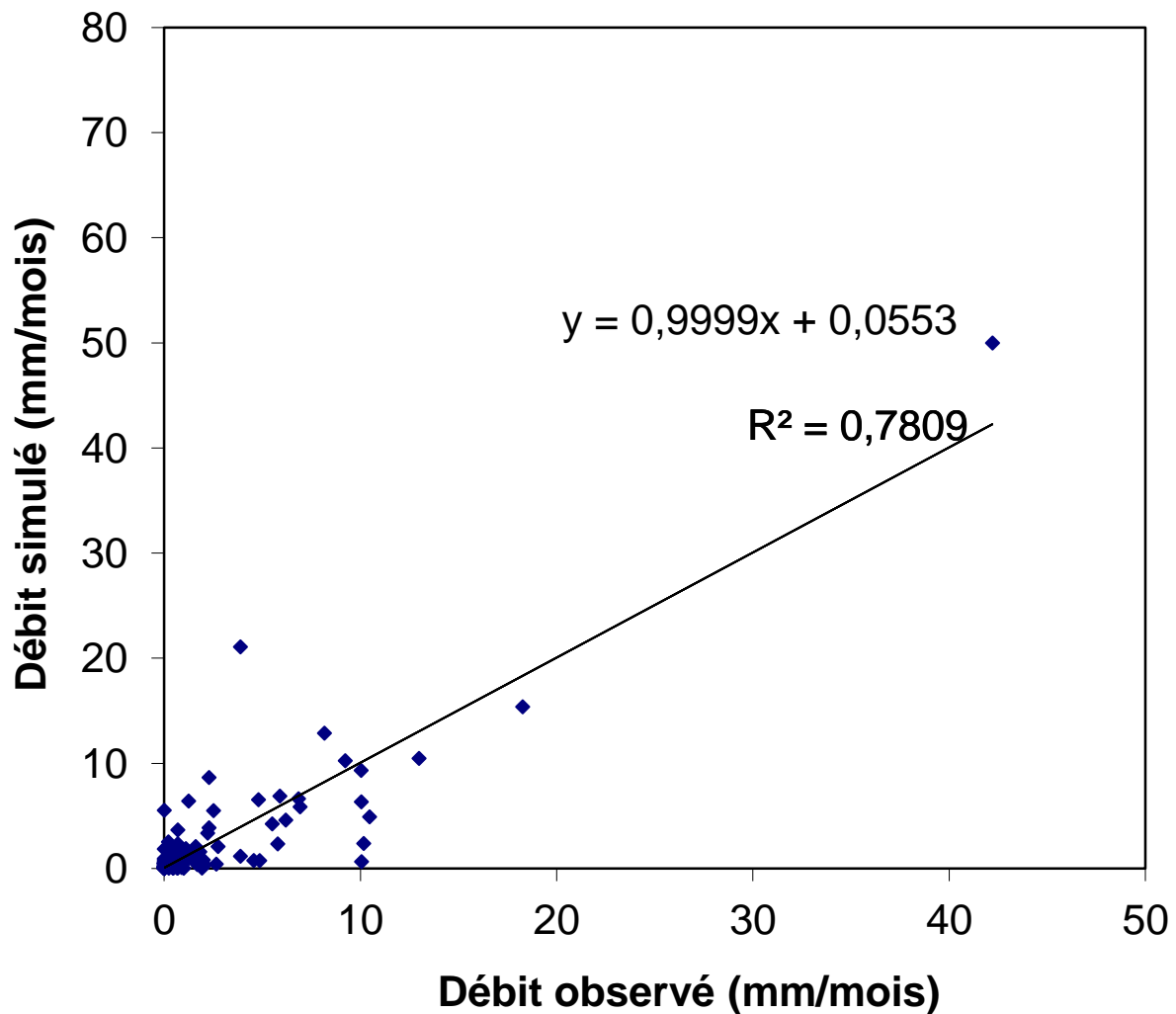


Figure IV.13 : Corrélation linéaire du calage entre les débits simulés et les débits observés

IV-4-3 Validation :

Pour la phase de la validation nous avons pris les données restantes (pluie, ETP et débits observés) qui n'ont pas été utilisées lors de la phase du calage soit le tiers (1/3) qui s'étale sur 13ans de janvier 2001 à août 2014. 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.

Tableau IV.3 : Résultats de la validation du modèle GR2m sur Oued Boukiou

Période de validation (2001 à 2014)						
Paramètre		Critères de qualité et d'optimisation				
X1	X2	Nash %	S0 (mm)	R0 (mm)	Bilan %	Corrélation R
141.17	0.614	67.2	70.59	30	99.3	0.69

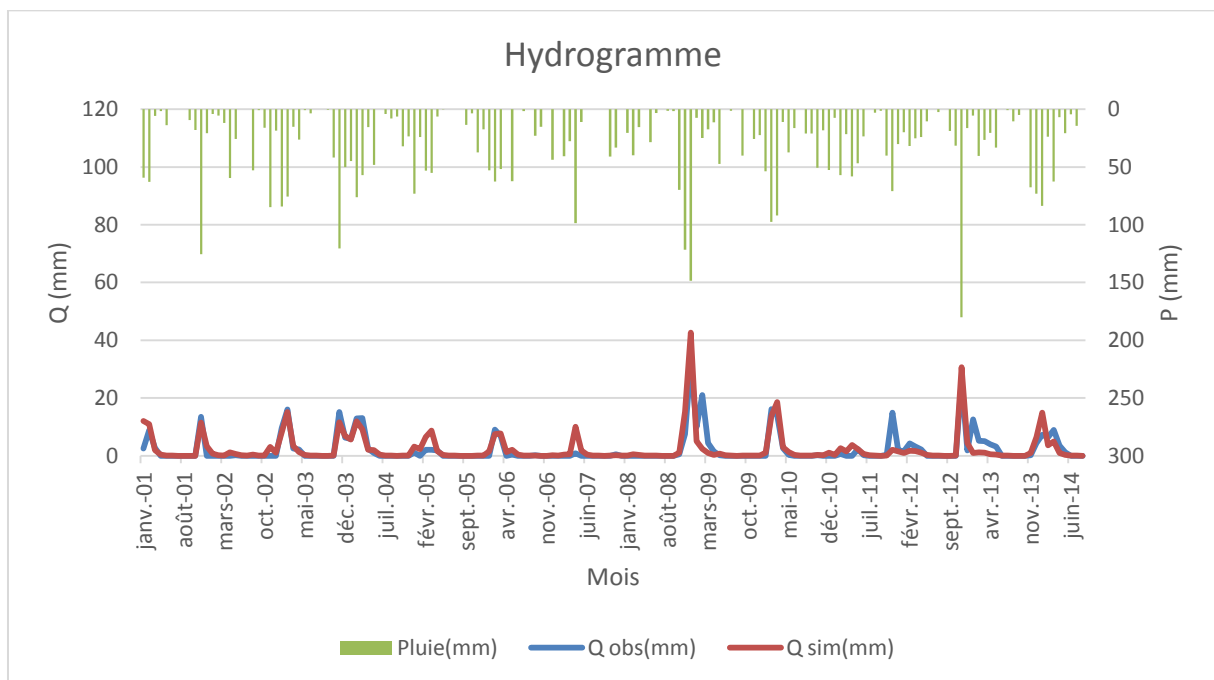


Figure IV.14 : Résultat de la validation du modèle GR2m

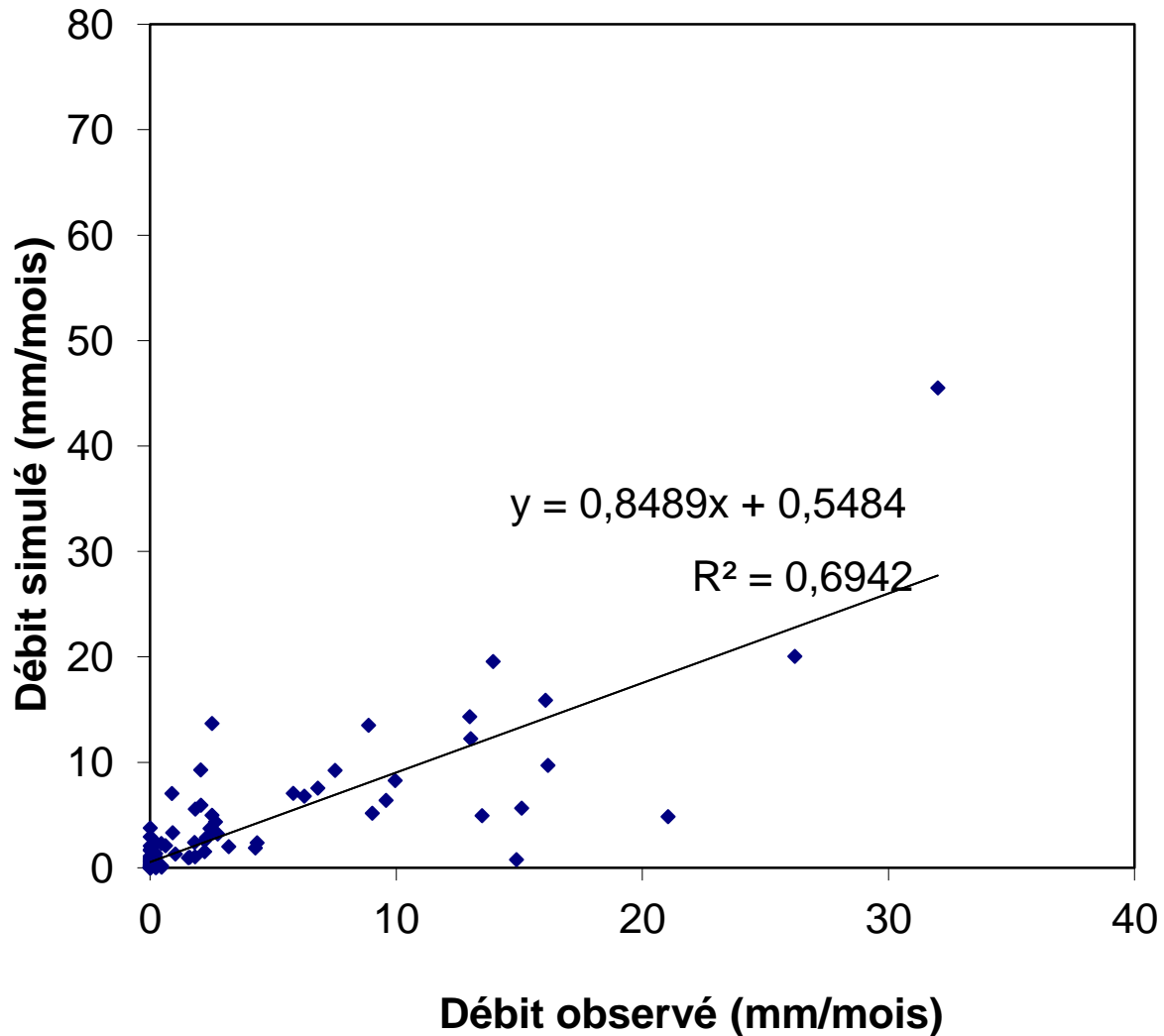


Figure IV.15 : Corrélation linéaire de la validation entre les débits simulés et les débits observés

Les résultats du tableau 4-3 et de la figure 4-15 confirment la bonne performance du modèle avec la valeur de Nash qui est égale à 67.2% et une bonne corrélation R^2 égale à 0.69.

IV.5. Conclusion

Dans le régime pluviométrique, nous avons pris comme seul paramètre l'indice SPI qui permet d'assurer une surveillance des périodes humides. Toute fois, on ne peut pas utiliser cet indice dans l'analyse des changements climatiques puisque la température n'est pas un paramètre pris en compte.

Dans le régime de température, les moyennes prises depuis l'année 1974 à 2018 montrent une nette progression (voir figure) qui, pour les climato-septique plaide pour un réchauffement climatique notable. Quant au modèle utilisé dans notre étude, il a été forcé par des scénarios climatiques couvrant la période allant de 1962 à 2099 et issus de scénarios

socio-économiques et modèles climatiques, ses prévisions sont globalement favorables à court terme puisqu'en dehors d'une augmentation de la température, apparaîtra à court terme des périodes de précipitations, probablement fortes et fugaces, occasionnant des dommages mais avec une restitution d'eau aux nappes pour lesquelles les risques d'une diminution significative sont accrus.

L'utilisation du GR2m nous a permis d'obtenir de bons résultats pour les deux phases : calage et validation (respectivement 71,1% et 67,2% pour le Nash et 78% et 69% pour le coefficient de corrélation R). Toute fois, les performances de ce modèle restent très limitées puisqu'il n'utilise que deux paramètres.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION

L'étude du bassin versant d'Oued Boukiou d'une superficie de 117.3 km², montre un climat de type semi-aride, avec une alternance d'une saison relativement humide (Novembre-Avril) et une saison sèche (Mai – Octobre).

Dans ce mémoire nous avons utilisé deux simulations : climatique et hydrologique.

Les relevés de température au niveau de la station Chouachi nous ont montré une élévation régulière de la moyenne annuelle de température et ce, depuis Septembre 1974 à 2014 soit une quarantaine d'année. En se basant sur les scénarios utilisés dans le modèle climatique étudié (SDSM), nous constatons que les profils de températures simulées par le modèle (jusqu'à 2100) par rapport à ceux mesurés sont en constante progression et les moyennes annuelles de température augmentent d'une manière exponentielle.

Dans le régime pluviométrique, nous constatons une alternance de périodes sèches et de périodes humides et ce, à partir des relevés de la station Chouachi. Quant aux précipitations simulées, elles nous montrent une grande instabilité avec parfois des cumuls importants durant la période allant de 2050 à 2080 suivis d'une baisse de régime pluviométrique durant la fin du 21eme siècle.

Les mêmes résultats sont obtenus pour les deux scénarios utilisés.

Nous avons ensuite exploité le modèle GR2M à deux paramètres sur la zone d'étude pour expliquer le comportement hydrologique du bassin devant les variabilités climatiques observées. Les résultats obtenus sont à priori satisfaisants puisque le modèle présente une efficacité à simuler les écoulements ; malheureusement, le manque de stations de mesure le long du bassin influe sur la qualité des données d'entrée au modèle et par conséquent la fiabilité des résultats.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bibliographie

ANRH (Agence Nationale des Ressource Hydraulique). Données de pluviométries et de débits et de températures des stations Dj Chouachi et Zenata.

ARAF A. (2012). Application de HEC-ResSim, SWAT, et HEC-HMS dans la gestion de l'eau de la Wilaya de Tlemcen. *Mem de Magistère en Hydraulique. Univ Oran.* 221p

BAGHDADLI I. (2014). L'influence du changement climatique sur les ressources en eaux du Meffrouch .*Mem .Master Hydraulique. Univ Tlemcen.*89p

BEDIAR F., ZERGOUNE S. Etude et conception d'une retenue collinaire au niveau du bassin versant de l'oued Boukiou (NW Algérie). Mem de Master en hydraulique. Univ Tlemcen. 145p.

BELARBI F. (2010). Etude de la pluviométrie journalière dans le bassin versant de la Tafna. *Mem. Magister en Hydraulique. Univ Tlemcen.*113p

BEMMOUSSAT A. (2011). Impact de l'activité agricole sur la qualité des eaux souterraines à travers le bassin de la Tafna. *Mém. Magister. Univ Tlemcen.*156 p

BERREZOUG, N. (2016) Hydrologie et modélisation Pluie-Débit de l'oued Boukiou (NW algérien). Mémoire de Master En Hydrologie, Université de Tlemcen. 155p.

BOUANANI, A. BABA-HAMED, K. & BOUANANI, R. (2012) Utilisation d'un modèle global pour la modélisation pluie-débit, cas du bassin de l'Oued Sikkak (Tafna – NW algérien), 83–87. 1er Congrès sur la géologie du Maghreb (Géo Mag).

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

BOUGUERRA S. (2018). Quantification et modélisation du transport solide en climat semi-aride, cartographie du Risque d'érosion hydrique au moyen d'un sig (Cas Des Deux Bassins Versants Oued Boukiou et Oued Boumessaoud (N-W de L'Algérie)). *Thèse de Doctorat. Univ Tlemcen.*165p

BOURSALI I. (2015). Application de la fonction pluie-débit au bassin versant de la TAFNA cas de l'oued Khemis- TLEMEN (NW Algérien). Mem de Magister en hydrogéologie et environnement. 71p

CIELSA WILIAM M (1997). Le changement climatique, les forets et l'aménagement forestier. Rome : FAO. Livre 139p.

DAVIDSON E A (2016). "Projections of the soil-carbon deficit," *Nature*, Nature, vol. 540(7631), pages 47-48, December.

DRE (Direction des Ressources en Eau). Situation géographique de la station Dj Chouachi.

DSA (Direction des Services Agricoles). Répartition du couvert végétal du Bassin de Boukiou

FOUCAULT A. (2016). Climatologie et paléoclimatologie. 2^{ème} édition. Edition Dunod. 415p

GROUPE INTERGOUVERNEMENTAL DES EXPERTS DU CLIMAT – GIEC. (2015)

Changement climatique. Genève 2014. Rapport spécial du GIEC. In Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.

GROUPE INTERGOUVERNEMENTAL DES EXPERTS DU CLIMAT – GIEC. (2018)

Résumé à l'intention des décideurs, Réchauffement planétaire de 1,5 °C, Rapport spécial du GIEC. In Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.

GROUPE INTERGOUVERNEMENTAL DES EXPERTS DU CLIMAT – GIEC. (2019)

Augmentation du niveau des mers et océans. Rapport spécial du GIEC. In Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.

GROUPE INTERGOUVERNEMENTAL DES EXPERTS DU CLIMAT – GIEC. (2019)

Voies de concentrations représentatives(RCP). Rapport spécial du GIEC. In Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.

ILES N. (2019). Application du modèle hydrologique GARDENIA. Cas du bassin versant de l'oued Boukiou (NW algérien). Mém de master Hydraulique. Univ de Tlemcen. 185p.

JANCOVICI J M. (2002) L'avenir climatique. Quel temps ferons-nous ? édition Seuil Sciences. 284 pages

KACEMI M., SENINA A. (2015). Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe alluviale d'oued Boukiou (Nord-Ouest Algérien). *Mém. Master hydrogéologie. Univ Tlemcen.* p172.

KESSASRA. (2017). Modélisation en hydrologie et hydrogéologie. Mem master Eau et Environnement. Univ de Jijel.

MIRI A., KIBIR W. (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

MOTE P., DUFFY P B., MAURER E.,(2011) guidelines for constructing climate scenario. Eos Transactions. American geophysical union. 21 pages

MOUELHI et al. (2006). S. Mouelhi , C. Michel , C. Perrin , V. Andréassian
Développement par étapes d'un modèle de bilan hydrique mensuel à deux paramètres

J. Hydrol. , 318 (2006) , p. 200 – 214. Université de Paris VI

OMM (Organisation Mondiale de la Météorologie) 2012. Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé. N°1090. 25pages

OMS/UNICEF (2019) les nouvelles statistiques mondiales sur l'accès à domicile des populations, à l'eau potable, à l'assainissement et à l'hygiène. Rapport 04 pages

ONM (Office National de la Météorologie) (2021) Le climat en Algérie

Ould Ahmed S. (2018). Etude des paramètres morphométriques et hydrographiques du bassin versant de l'oued Tari. *Mem. Magister en Hydraulique .Univ SAIDA.* 71p

PENG J., LOEW A., MERLIN O, VERHOEST N. E. C. (2017). A review of spatial downscaling of satellite remotely sensed soil moisture. *Reviews of Geophysics*, 55 (2), p. 341-366

PIELKE Jr.R, BURGESS M G and RITCHIE J (2021) Most plausible 2005-2040 émissions scenarios project less than 2.5°C of warming by 2100. SocAr XIV. 18 p

REMENIERAS G. (1986) L'hydrologie de l'ingénieur, 2ème édition, *Eyrolles, Paris*, 456 p.

WILBY, R.L., DAWSON, C.W. and BARROW, E.M. (2002) SDSM—A Decision Support Tool for the Assessment of Regional Climate Change Impacts. *Environmental Modelling & Software*, 17, 145-157

Les sites web

ADME (2018). <https://www.ademe.fr/expertises/changement-climatique/quoi-parler-phenomenes-impacts-changement-climatique>

Drias-climat.fr. <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/175>

Futura-sciences. <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/climatologie-modele-climatique-12896/>

Gouvernement Of Canada. (S.d) <https://climate-scenarios.canada.ca/>

<https://climate-scenarios.canada.ca/?page=pred-hadcm3>

Med-Hycos. <http://medhycos.mpl.ird.fr/en/data/hyd/Drobot/1C.htm>.

NASA (Natioanal Aeronotics and Space Administration) 2020.

<https://earthobservatory.nasa.gov/images/146362/airborne-nitrogen-dioxide-plummets-over-china>

Ocean-climate. <https://ocean-climate.org/sensibilisation/la-circulation-oceanique/>

SDSM. <https://sds.org.uk>.

Emission de gaz à effet de serre. <http://terresacree.org/rechauf.htm>

Interstices info. (2013). Le climat en équations. <https://interstices.info/le-climat-en-equations/>

L'encyclopédie, F. (2018). Définition de lame d'eau.

Science et avenir.(2020). https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/pollution/le-coronavirus-fait-chuter-la-pollution-en-chine-selon-des-images-de-la-nasa_142069

Universalis.fr. <https://www.universalis.fr/encyclopedie/climats-notions-de-base/3-les-grands-types-de-climats-aujourd-hui/>

ANNEXES

Annexe A : Calcul des ETP avec le logiciel ETP Thornthwaite8_georachidv2.xlsm

ETP Thornthwaite8_georachidv2.xlsm - Excel

Fichier Accueil Insertion Mise en page Formules Données Révision Affichage Aide Rechercher des outils adaptés Partager

TÉLÉCHARGER UNE VERSION AUTHENTIQUE D'OFFICE Votre licence n'est pas authentique et vous êtes peut-être victime d'une contrefaçon logicielle. Évitez toute interruption et protégez aujourd'hui vos fichiers grâce à la version authentique d'Office. Obtenir une version authentique d'Office En savoir plus

Inserer dans le tableau ci-dessous seulement les données de température, ne pas insérer les années et les mois
les cellules en jaunes doivent être remplies

Nom de la Station : oued Boukiou

Sélectionner la latitude de la station (ex: 32° 15'3" - le numero de latitude est de 32)

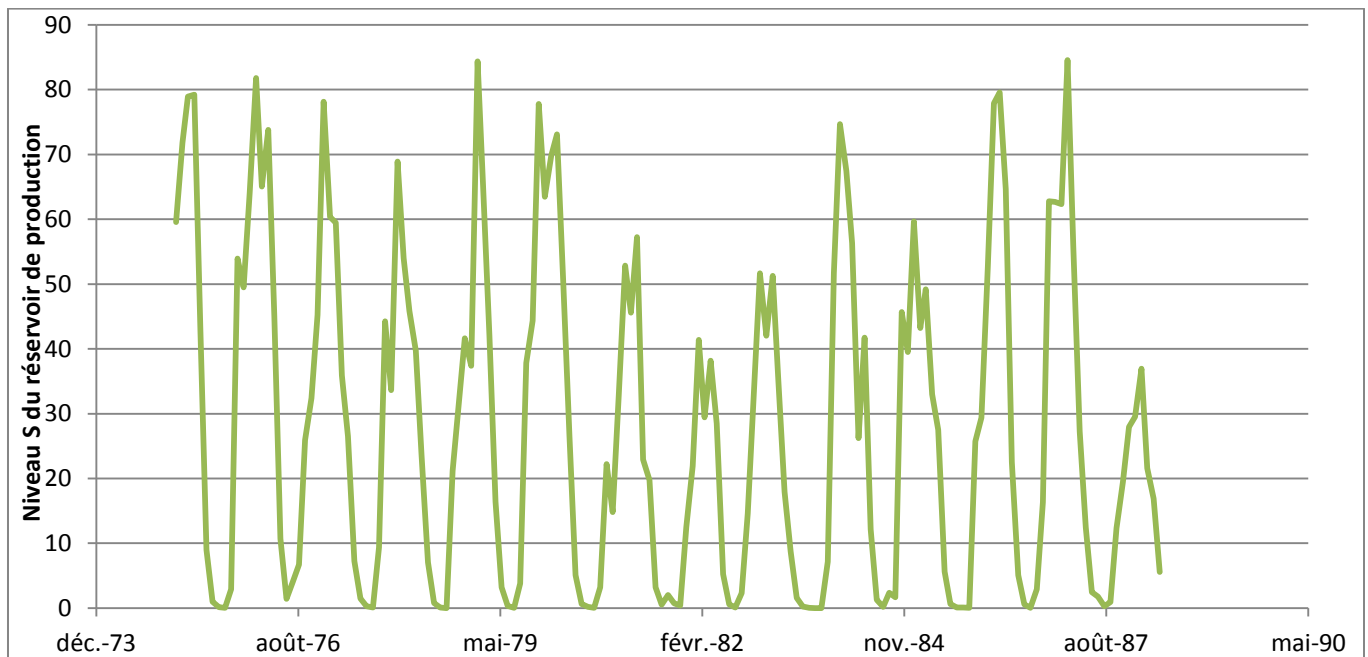
Latitude Nord Année début

Numéro de la latitude 35 Année fin

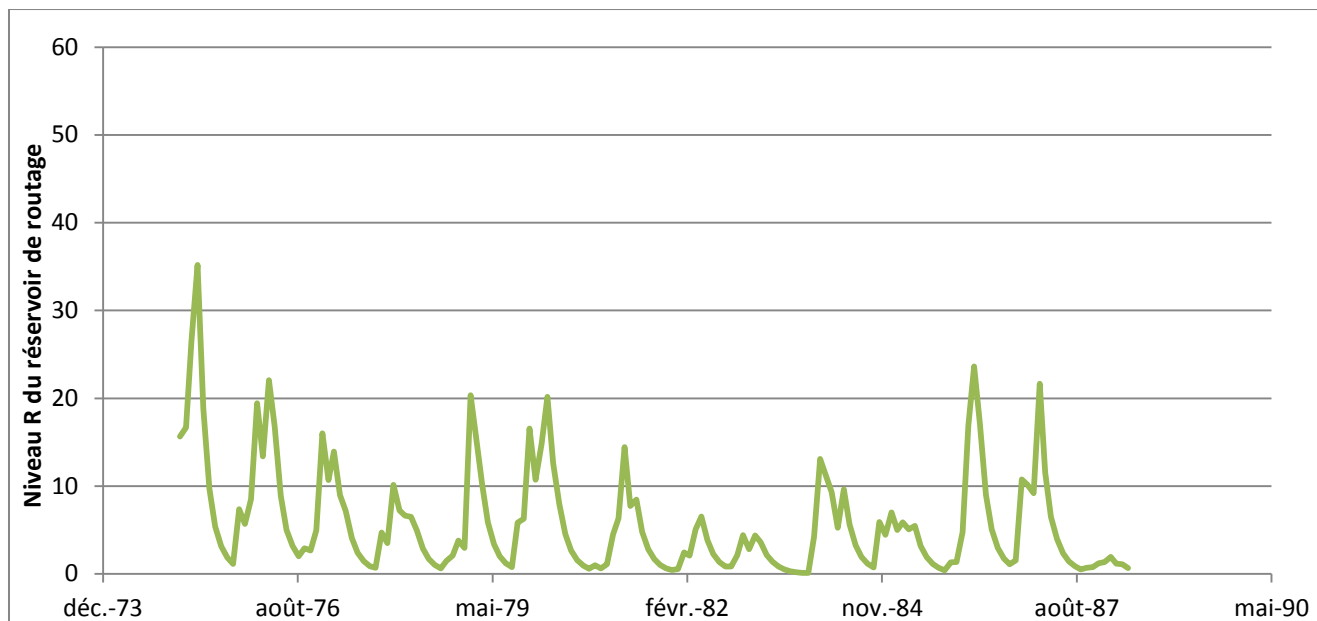
Calculer l'ETP et Télécharger les résultats

Année	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
0												
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												
21												
22												
23												

Annexe B : Niveau S du réservoir de production



Annexe C : Niveau R du réservoir de routage



Annexe D : output des données observé de BV de oued Boukiou

Name	Size	Packed	Type	Modified	CRC32
..			Dossier de fichiers		
A2.SIM	147	118	Fichier SIM	27/09/2021 19:24	45E0EF7C
weather.OUT	2 884 014	313 716	Fichier OUT	27/09/2021 19:20	4E68AF80
A2.xlsx	6 624 576	6 387 328	Feuille de calcul M...	28/09/2021 23:24	4E7AA8A3
cal.PAR	1 268	413	Fichier PAR	27/09/2021 19:19	531B5843
rainfall 1974-200...	33 568	3 132	Film Vidéo CD	26/09/2021 23:13	6DA4E941
A2.OUT	4 484 740	1 552 279	Fichier OUT	28/09/2021 23:24	A6B22E84
precipitation 19...	43 001	3 124	Film Vidéo CD	27/09/2021 19:07	AE739AC4
weather.SIM	148	116	Fichier SIM	27/09/2021 19:20	B0AECF5B
B2.OUT	4 483 805	1 552 234	Fichier OUT	28/09/2021 23:29	CCEF3965
B2.SIM	147	120	Fichier SIM	27/09/2021 19:26	FD7A430A