

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Hydraulique

Laboratoire Matériaux de Génie Civil et Environnement

Mémoire de projet de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en hydraulique

**Etude de la variabilité climatique et son impact sur les ressources hydriques « cas du bassin versant d'Oued Biskra »**

Youcef ALIANE

Sous la direction du Professeur Abdelmalek BERMAD

Présenté et soutenu publiquement le 21 Juin 2017

Composition du Jury :

|           |                |                 |            |       |
|-----------|----------------|-----------------|------------|-------|
| Président | M <sup>r</sup> | E.H. BENYOUSSEF | Professeur | ENP   |
| Promoteur | M <sup>r</sup> | A. BERMAD       | Professeur | ENP   |
| Examineur | M <sup>r</sup> | A. LEFKIR       | MCA        | ENSTP |

ENP 2017



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Hydraulique

Laboratoire Matériaux de Génie Civil et Environnement

Mémoire de projet de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en hydraulique

**Etude de la variabilité climatique et son impact sur les ressources hydriques « cas du bassin versant d'Oued Biskra »**

Youcef ALIANE

Sous la direction du Professeur Abdelmalek BERMAD

Présenté et soutenu publiquement le 21 Juin 2017

Composition du Jury :

|           |                |                 |            |       |
|-----------|----------------|-----------------|------------|-------|
| Président | M <sup>r</sup> | E.H. BENYOUSSEF | Professeur | ENP   |
| Promoteur | M <sup>r</sup> | A. BERMAD       | Professeur | ENP   |
| Examineur | M <sup>r</sup> | A. LEFKIR       | MCA        | ENSTP |

ENP 2017

## *Dédicaces*

*À Mon père, ma mère*

*Et mes frères*

## *Remerciements*

Avant tout, je remercie Allah le tout puissant qui m'a donné le courage, la volonté et la patience d'accomplir ce travail.

Je remercie également toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce mémoire.

En commençant, en premier lieu, par remercier chaleureusement le professeur *Abdelmalek BERMAD*, de m'avoir fait l'honneur de m'encadrer. Je tiens à le remercier pour tout le soutien qu'il m'a apporté, sa disponibilité, ses conseils avisés et les connaissances qu'il a généreusement partagées avec moi afin de mener à bien ce présent travail.

Mes remerciements vont également à M<sup>r</sup> *LEFKIR* pour sa précieuse aide dans l'accomplissement de ce travail, ainsi que le temps qu'il m'a consacré.

J'exprime aussi toute ma gratitude à l'ensemble des enseignants du Département d'Hydraulique, ainsi que les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique, auxquels chacun de nous doit sa formation d'ingénieur.

Enfin, je remercie vivement les membres du jury qui me font l'honneur d'évaluer notre travail.

Merci à vous tous.

ALIANE Youcef

## ملخص:

يهدف هذا العمل إلى دراسة التغير المناخي في المنطقة شبه القاحلة لواد بسكرة ومدى تأثيرها على الموارد المائية في المنطقة. للقيام بذلك، قد تم تطبيق العديد من الطرق لفترات تتراوح ما بين 23-66 سنة (مؤشرات التمرکز، تحليل مكاني وزماني لمؤشرات هطول الأمطار، اختبارات إحصائية، مرشح هانينج من نظام 2، توازن مائي). إن تطبيق مؤشرات التمرکز ومرشح هانينج لسلسلة هطول الأمطار وسلسلة التدفق بينت أنه يوجد تغير مناخي يتميز بتناوب مرحلة رطبة التي تبدأ في 1950، مرحلة جافة في العقود 70 و 80 و 90، ومرحلة جديدة رطبة في العقد 2000. أظهرت نتائج تحليل اختبار السلاسل أنها تحوي على انقطاعات معظمها متواجد في فترتي 1969-1971 و 2000-2006. وكان لتنوع المعلمات المناخ تأثير سلبي على جريان المياه السطحية والموارد المائية حتى الموازنة المائية التي أثرت على تغذية المياه الجوفية والحد من توافر احتياطي المياه في المنطقة خلال فترات الجفاف.

**الكلمات الدالة:** تغير المناخ، الجفاف، الموارد المائية، الأمطار، واد بسكرة.

## Abstract :

The aim of this thesis is to study the climatic variability on the semi-arid region of Oued Biskra and to understand its impact on the water resources of the region. Several methods have been applied on periods from 23 to 66 years (reduced centered indices, spatio-temporal analysis, statistical tests, Hanning pass filter of order 2, water balance). The application of the reduced centered indices and the Hanning low-pass filter to the rainfall and hydrological series showed a climatic variability characterized alternation of phases : a wet phase that began in the 1950s, which was followed by a dry phase in the 1970s and 1980s and 90, after that a new wet phase occurred in the decade 2000. Moreover, the interannual fluctuation of rain and flows is accompanied by stationarity breaks in their series. Static tests reveal ruptures in rainfall, which are localized mainly in the periods 1968-1971 and 2000-2006. The variability of these climatic parameters had an adverse effect on runoff and surface resources, as well as on the hydrological balance that affected underground recharge, and thus reducing the region's supply of water during periods of rainfall deficit.

**Key words :** Climate variability, drought, water resources, rainfall, flow Watershed Oued Biskra

## **Résumé :**

Ce travail vise à étudier la variabilité climatique au niveau de la région semi-aride d'Oued Biskra et à comprendre son impact sur les ressources hydriques de la région. Pour ce faire, plusieurs méthodes ont été appliquées sur des périodes allant de 23 à 66 ans (indices centrés réduits, analyse spatio-temporelle, tests statistiques, filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2, bilan hydrique). L'application des indices centrés réduits et le filtre passe-bas de Hanning aux séries pluviométriques et hydrologiques ont mis en évidence une variabilité climatique caractérisée par une alternance de phase humide qui débute dans les années 1950, de phase sèche dans les décennies 70, 80 et 90 et d'une nouvelle phase humide dans la décennie 2000. En outre, la fluctuation interannuelle de la pluie et des débits s'accompagne de ruptures de stationnarité dans leurs séries. Les tests statistiques font apparaître des ruptures au niveau de la pluviométrie dont la majorité se localise dans les périodes 1968-1971 et 2000-2006. La variabilité de ces paramètres climatiques a eu des conséquences néfastes sur le ruissellement et les ressources superficielles, ainsi que sur le bilan hydrologique qui a affecté la recharge souterraine réduisant ainsi, les disponibilités en eau des réserves de la région pendant les périodes de déficit pluviométrique.

**Mots clés :** variabilité climatique, sécheresse, ressources en eau, pluie, bassin versant Oued Biskra

# Tables des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des acronymes

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Introduction générale .....</b>                                 | <b>13</b> |
| <b>Chapitre I : Recherches bibliographiques.....</b>               | <b>17</b> |
| I.1. Introduction .....  | 17        |
| I.2. Changement climatique .....                                   | 17        |
| I.2.1. Qu'est-ce que le changement climatique ?.....               | 17        |
| I.2.2. Les points les plus marquants du 5ème rapport du GIEC ..... | 18        |
| I.2.3. Changement climatique ou variabilité climatique ?.....      | 19        |
| I.2.4. Changement climatique dans la méditerranée.....             | 19        |
| I.3. Sécheresse.....   | 20        |
| I.3.1. Définition et caractérisation de la sécheresse.....         | 20        |
| I.3.2. Sécheresse dans le monde .....                              | 22        |
| I.3.3. Sécheresse en Algérie.....                                  | 24        |
| <b>CHAPITRE II : Présentation de la zone d'étude.....</b>          | <b>30</b> |
| II.1. Présentation géographique .....                              | 30        |
| II.2. Géologie .....   | 31        |
| II.2.1. Géologie de la cuvette d'Oued Biskra .....                 | 31        |
| II.3. Pédologie.....   | 32        |
| II.3.1. Types de sols.....   | 33        |
| II.3.2. Taux d'infiltration.....                                   | 34        |
| II.4. Géomorphologie.....  | 36        |
| II.4.1. Montagne .....   | 36        |
| II.4.2. Plaines .....  | 37        |
| II.4.3. Piedmonts.....   | 37        |

|  |   |           |
|--|---|-----------|
| II.5.  | Ressources en eau superficielles .....                            | 37        |
| II.6.  | Nappe des alluvions d'Oued Biskra.....                            | 38        |
| II.7.  | Bassin versant d'Oued Biskra .....                                | 38        |
| II.7.1.  | Milieux naturels du bassin .....                                  | 40        |
| II.7.2.  | Unités hydrologiques du bassin .....                              | 40        |
| II.7.3.  | Caractéristiques morphologiques du bassin.....                    | 41        |
| <b>CHAPITRE III : Collecte et critique des données.....</b>                                |   | <b>48</b> |
| III.1.   | Introduction.....   | 48        |
| III.2.   | Inventaire des données.....                                       | 48        |
| III.3.   | Critique des données .....  | 51        |
| III.3.1.   | Méthodes de comblement de lacunes .....                           | 52        |
| III.3.2.   | Comblement des lacunes .....                                      | 54        |
| III.4.   | Détection des valeurs singulières.....                            | 58        |
| III.4.1.   | Test de Grubbs-Beck .....   | 58        |
| III.4.2.   | Analyse des résultats .....                                       | 59        |
| <b>CHAPITRE IV : Caractérisation de la variabilité climatique .....</b>                    |   | <b>62</b> |
| IV.1.  | Introduction .....  | 62        |
| IV.2.  | Méthodologie mise en œuvre .....                                  | 62        |
| IV.2.1.  | Utilisations des indices pluviométriques.....                     | 62        |
| IV.2.2.  | Analyse spatio-temporelle des indices pluviométriques .....       | 63        |
| IV.2.3.  | Détection de rupture .....  | 64        |
| IV.2.4.  | Calcul des variations moyennes .....                              | 66        |
| IV.3.  | Résultats et analyses .....                                       | 66        |
| IV.3.1.  | Calcul des indices .....  | 66        |
| IV.3.2.  | Caractérisation spatiale des précipitations .....                 | 72        |
| IV.3.3.  | Etude de l'homogénéité des séries et détection des ruptures ..... | 73        |
| IV.4.  | Conclusions .....   | 77        |
| <b>CHAPITRE V : Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques .....</b> |   | <b>80</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| V.1. Introduction.....  | 80        |
| V.2. Evolution du régime hydrologique avec la pluviométrie..... | 80        |
| V.2.1. Méthode de la variable centrée réduite .....             | 80        |
| V.2.2. Filtre passe-bas de HANNING d'ordre 2 .....              | 81        |
| V.3. Bilan hydrique.....  | 81        |
| V.4. Résultats et analyses .....                                | 84        |
| V.4.1. Evolution des débits avec les précipitations .....       | 84        |
| V.4.2. Bilan hydrique .....                                     | 89        |
| V.5. Conclusions.....   | 92        |
| <b>Conclusion générale .....</b>                                | <b>94</b> |
| <b>Liste des références bibliographiques .....</b>              | <b>97</b> |

## Liste des figures

|   |    |
|---|----|
| Figure I.1. Précipitations moyennes sur le bassin méditerranéen. (Benoit et Comeau, 2005) .....   | 20 |
| Figure I.2. Zones sèches à travers le monde. (Source : Millennium Ecosystem Assessment, 2005)<br>.....  | 24 |
| Figure I.3. Carte pluviométrique de l'Algérie. (Seltzer, 1946) .....  | 25 |
| Figure I.4. Carte de l'écoulement annuel moyen de l'Est algérien (période moyenne : 1965-1966<br>à 1994-1995). (Mebarki, 2010).....   | 27 |
| Figure II.1. Esquisse géologique de la région de Biskra. (Busson, 1971) .....   | 31 |
| Figure II.2. Coupe technique d'un forage de reconnaissance à Oued Biskra. (ANRH, 2013) .....  | 34 |
| Figure II.3. Carte de recharge potentielle dans la plaine d'El Outaya. (USTHB, 2010) .....  | 35 |
| Figure II.4. Situation du bassin versant d'Oued Biskra. ....  | 39 |
| Figure III.1. Disposition des stations pluviométriques de l'étude. ....   | 49 |
| Figure III.2. Disposition des stations hydrométriques de l'étude. ....  | 50 |
| Figure IV.1.a. Evolution interannuelle de la pluviométrie à la station de Batna. ....   | 67 |
| Figure IV.1.b. Evolution interannuelle de la pluviométrie à la station de Biskra.....   | 67 |
| Figure IV.1.c. Evolution interannuelle de la pluviométrie à la station de Bouzina. ....   | 68 |
| Figure IV.1.d. Evolution interannuelle de la pluviométrie à la station de Djemourah. ....   | 68 |
| Figure IV.1.e. Evolution interannuelle de la pluviométrie à la station d'El Outaya.....   | 69 |
| Figure IV.1.f. Evolution interannuelle de la pluviométrie à la station de Fom El Gherza. ....   | 69 |
| Figure IV.1.g. Evolution interannuelle de la pluviométrie à la station de Menaâ. ....   | 70 |
| Figure IV.1.h. Evolution interannuelle de la pluviométrie à la station de Tkout. ....   | 70 |
| Figure IV.2. Indices pluviométriques annuels du bassin versant d'Oued Biskra. ....  | 72 |
| Figure IV.3. Variations des indices de Pettitt à la station pluviométrique de Bouzina. ....   | 74 |
| Figure IV.4. Variation de la densité de probabilité de Lee & Heghinian à la station de Biskra...  | 76 |
| Figure IV.4. Ellipse de contrôle associée au test de Buishand à la station de Bouzina. ....   | 77 |
| Figure V.1. Evolution interannuelle des modules de la pluviométrie et du débit à la station de<br>Djemourah de 1970 à 2010 : a) indices centrés réduits b) valeurs pondérées centrées et réduites.<br>..... | 85 |
| Figure V.2. Evolution interannuelle des modules de la pluviométrie et du débit à la station d'El<br>Kantara de 1968 à 2010 : a) indices centrés réduits b) valeurs pondérées centrées et réduites....       | 86 |

|  |    |
|--|----|
| Figure V.3. Evolution interannuelle des modules de la pluviométrie et du débit à la station de Foug El Gherza de 1950 à 2015 : a) indices centrés réduits b) valeurs pondérées centrées et réduites. | 88 |
| Figure V.4. Variation interannuelle de la pluviométrie à la station de Foug El Gherza.....   | 90 |
| Figure V.5. Evolution des paramètres climatiques à la station de Foug El Gherza.....   | 91 |
| Figure V.6. Variation interannuelle des écoulements à la station de Foug El Gherza .....   | 91 |

## Liste des tableaux

|  |    |
|--|----|
| Tableau II.1. Superficie des sous-bassins d'Oued Biskra.....   | 42 |
| Tableau II.2. Altitudes caractéristiques des sous-bassins d'Oued Biskra.....   | 43 |
| Tableau II.3. Calcul de l'indice de compacité pour les sous-bassins d'Oued Biskra. ....  | 44 |
| Tableau III.1. Caractéristiques des stations utilisées pour l'étude.....   | 49 |
| Tableau III.2. Caractéristiques des sous-bassins des stations d'El Kantara et de Djemourah.....  | 51 |
| Tableau III.3. Comblement des lacunes par la méthode de la moyenne mensuelle interannuelle.<br>.....   | 54 |
| Tableau III.4. Détermination des coefficients de corrélation et des équations de régression par la<br>méthode de la régression linéaire..... | 56 |
| Tableau III.5. Reconstitution des données sur la période 1970 – 2010 par la méthode de la<br>régression linéaire. ....                       | 57 |
| Tableau III.6. Résultats de l'application du test de Grubbs et Beck sur les pluies annuelles.....  | 59 |
| Tableau III.7. Résultats de l'application du test de Grubbs et Beck sur les débits moyens annuels.<br>.....                                  | 59 |
| Tableau III.8. Valeurs singulières détectées dans les stations pluviométriques. ....   | 60 |
| Tableau III.9. Valeurs singulières détectées dans les stations hydrométriques. ....  | 60 |
| Tableau IV.1. Résultats du test de Pettitt et calcul des variations pour la moyenne. ....  | 74 |
| Tableau IV.2. Résultats du test de Lee & Heghinian et calcul des variations pour la moyenne. .   | 75 |
| Tableau IV.3. Résultats du test de Buishand. ....  | 76 |
| Tableau V.1. Découpages obtenus pour les trois stations.....   | 84 |
| Tableau V.2. Bilan hydrique à la station de Foum El Gherza avant et après la rupture de 1969.  | 89 |

## **Liste des acronymes**

ACP : Analyse en composantes principales.

AR5 : The Fifth Assessment Report.

GIEC : Groupe d'expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.

MEDROPLAN : Mediterranean drought preparedness and mitigation planning.

NDMC : National drought mitigation center.

OMM : Organisation météorologique mondiale.

ONA : Oscillation nord-atlantique.

UNFCCC : Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques.

ICCARE : Identification et Conséquences d'une variabilité du Climat en AfRIque de l'ouest non sahélienne.

## Introduction générale

La variabilité climatique présente des conséquences dramatiques sur le climat, d'où l'intérêt croissant qui lui est porté depuis des années. En effet, un intérêt particulier s'est développé autour de l'étude de cette variabilité ainsi que sa participation dans le changement dans la variation des ressources en eau, pouvant toucher de nombreux secteurs d'activités.

Ces variations entraînent la création et la propagation d'événements catastrophiques tels que les inondations et la sécheresse. L'Algérie est particulièrement sensible à ces phénomènes, et ce en raison de son relief et sa démographie.

Ces événements représentent des cas extrêmes pouvant avoir comme conséquence : un déplacement de la population, une paralysie économique et peuvent même arriver à des pertes de vies humaines. Parmi ces événements ceux cités ci-dessous :

- 20 Octobre 1993 à l'Ouest algérien, avec 22 décès et 14 blessés à Oued Rhiou ;
- 10-11 Novembre 2001 à Bab El Oued où des pluies diluviennes ont causé la mort de 733 personnes, ainsi que d'importants dégâts rendant 30000 habitants sans abris.
- 10 Octobre 2008 à Ghardaïa (600 km au Sud d'Alger), avec 60 décès, 48 blessés et des dégâts considérables.

Outre les phénomènes d'inondation, la sécheresse apparaît clairement sur les pays du bassin méditerranéen depuis le début des années 80, comme le démontre les simulations climatiques (GIEC, 2014 ; Blöchliger et Neidhöfer, 1998 ; Kadi, 1995). Les travaux de Djellouli *et al.* en 1993, ainsi que ceux de Meddi et Meddi en 2007, démontrent que celle-ci est particulièrement prononcée en Algérie à travers l'existence de phénomènes météorologiques extrêmes et de catastrophes naturelles.

Les régions arides à semi arides de l'Algérie subissent des périodes de sécheresse avec des pluviométries déficitaires et de faibles écoulements des principaux oueds des bassins versants, et ce suite à la variabilité climatique constatée sur ces régions durant ces dernières années. En effet, celles-ci ont connu d'importantes baisses de volumes d'eau de surface stockés, causant ainsi des difficultés dans l'alimentation en eau potable des régions et la satisfaction de son agriculture. La gestion de cette situation nécessite alors la connaissance des facteurs climatiques et l'étude de leurs impacts.

L'Algérie subit alors un manque d'eau important accentué par l'augmentation sans cesse des besoins. Par conséquent, une mobilisation et une préservation de l'eau est nécessaire afin de

perpétuer les efforts relatifs au développement. En réalité, sur les 100 milliards de m<sup>3</sup> qui précipitent en moyenne chaque année, seulement 15 milliards composent les ressources en eaux superficielles.

De plus, une irrégularité des apports liquides est enregistrée suite à la variabilité interannuelle et saisonnière des précipitations. Elle s'accompagne tantôt de violentes crues, tantôt de périodes de basses eaux pouvant durer plusieurs mois d'affilée. Ceci impact directement l'agriculture en causant des baisses sensibles de production. C'est pourquoi il est essentiel de déterminer les diverses modifications du régime en Algérie dans le but d'identifier l'impact de l'évolution du régime hydrologique et les ressources superficielles et souterraines.

L'objectif de cette étude consiste en l'analyse de la série de données hydro-pluviométriques, afin d'estimer l'évolution de la variabilité climatique et plus particulièrement dans les zones semi-arides de l'Algérie, à travers l'étude du bassin versant d'Oued Biskra situé dans la partie Est du pays.

- Comment se caractérise la sécheresse climatique sur les régions semi-arides ?
- Comment se comporte la variabilité spatio-temporelle des pluies dans cette dernière ?
- Quelles sont les tendances de l'évolution des pluies ?
- Quelles seraient les conséquences de cette sécheresse sur les ressources en eau ?
- Les eaux souterraines sont-elles aussi touchées ?

La réponse à ces questions aura permis d'établir et de mettre en forme le présent travail. En plus de l'introduction ainsi que la conclusion générale, ce mémoire est scindé en cinq (5) chapitres :

Des recherches bibliographiques concernant le changement et la variabilité climatique dans le monde, la méditerranée et en Algérie, sont présentées dans notre **premier chapitre**. Ce dernier regroupe aussi l'ensemble des conclusions auxquelles les diverses études, traitant cette thématique, ont répondues.

**Le deuxième chapitre** quant à lui présente notre région d'étude ainsi que le bassin versant concerné par l'analyse.

Une étude des bases de données a été réalisée dans **le troisième chapitre**. Cette étude consiste à vérifier la fiabilité des séries après les avoir d'abord critiquées en vue de les valider et de les exploiter par la suite.

Dans **le quatrième chapitre**, nous avons étudié, au niveau du bassin versant d'Oued Biskra, la caractérisation de la variabilité climatique à travers l'utilisation des indices pluviométriques, l'analyse spatio-temporelle et l'utilisation de tests statistiques de détection de rupture dans les séries.

Nous clôturons notre travail en présentant, dans **le dernier chapitre**, une analyse du changement des paramètres climatiques, et son impact sur les ressources en eau disponibles pendant les périodes de déficit pluviométrique, et ce au niveau de la région d'Oued Biskra.

CHAPITRE I  
RECHERCHES  
BIBLIOGRAPHIQUES

---

## Chapitre I : Recherches bibliographiques

### I.1. Introduction

Chaque année, l'intérêt porté au changement climatique par la communauté internationale accroit, ainsi que les inquiétudes à son propos.

Afin d'estimer cet intérêt et cette inquiétude, il est nécessaire d'associer une signification au terme « changement climatique » et ainsi comprendre l'ampleur que prend ce phénomène.

La compréhension du changement climatique ne repose plus sur sa définition elle-même, mais plutôt sur les causes et les conséquences qu'il pourrait avoir sur la vie des êtres humains et l'environnement. Cette compréhension résulte des recherches climatiques et météorologiques datant du 20<sup>ème</sup> siècle qui, à leur début, consistaient en des études statistiques de paramètres comme les précipitations, la température, la vitesse du vent... Depuis, ces dernières ont connu un développement assez important tel que désormais il est question d'examinations des divers processus physiques et chimiques caractérisant le système climatique.

Suite à ces recherches le constat fut sans appel : il y avait une perturbation climatique considérable au niveau du globe terrestre.

### I.2. Changement climatique

#### I.2.1. Qu'est-ce que le changement climatique ?

Plusieurs définitions du changement climatique existent, parmi lesquelles celle qui fait correspondre ce changement au changement du « temps moyen » constaté dans une région donnée, incluant des éléments associés au temps tel que la température, les précipitations..., ou encore celle proposée par le GIEC, pour qui ce terme représente tout changement du climat dans le temps issu de la variabilité naturelle ou des activités humaines. Enfin, celle utilisée par la UNFCCC où le changement est attribué directement ou indirectement aux activités humaines modifiant la composition de l'atmosphère en plus des changements naturels observés durant le même laps de temps.

Des études démontrent une fluctuation régulière du climat entre réchauffement et refroidissement et ce au cours d'une même année, d'une année à une autre mais aussi au cours des décennies, des siècles et des millénaires. Ainsi, il serait question de cycles normaux du climat se relayant les uns après les autres.

De plus, parmi ces études, celles établies par Folland *et al.* en 1990 ; Jouzel et Lorius en 1999 ; Mann *et al.* en 1999 mettent l'accent sur un réchauffement du climat mondial au cours des 150 dernières années, et désormais une tendance au réchauffement planétaire a été confirmée par le GIEC en 2001, 2007 et 2014.

### **I.2.2. Les points les plus marquants du 5<sup>ème</sup> rapport du GIEC**

Publié en Octobre 2014, le 5<sup>ème</sup> rapport d'évaluation (AR5) du GIEC apporte des éléments nécessaires à l'élaboration de l'accord sur le climat de 2015, afin de parer, de manière optimale, au réchauffement du système climatique dont la cause, depuis le milieu du 20<sup>ème</sup> siècle, serait à 95% le résultats des activités humaines. Cette probabilité a connu une réelle expansion telle qu'elle été estimée à 66% en 2001 puis à 90% en 2007, ce qui ne fait que confirmer les conclusions du GIEC.

Ce rapport se compose de trois (03) volumes et d'un rapport de synthèse dont le premier (1<sup>er</sup>) est dédié aux aspects scientifiques du changement climatique. Les principaux points qui y sont abordés sont ceux relatifs aux conséquences que peut avoir ce changement sur l'environnement à savoir :

- Une hausse de la température moyenne annuelle de 0,3° à 4,8° d'ici 2100 suite aux émissions des gaz à effet de serre, au point où cette augmentation au niveau terrestre et océanique combinée a été estimée à 0,89° pour la période 1901 – 2012. Avec un historique relatant une élévation de 0,85° et ce depuis 1880.
- Plus de 90% de l'énergie issue de l'effet de serre est absorbée par les océans et ce entre 1971 et 2010, où 60% de cette énergie est prise par la partie supérieur de l'océan (0 – 700 m) et 30% pénètrent les profondeurs dépassant les 700 m.
- Les probabilités montrent une diminution de la banquise arctique de 3,5 à 4,1 % par décennie sur la période 1979 – 2012, ayant ainsi pour conséquence une disparition quasi totale de glace au niveau de l'océan Arctique avant le milieu du siècle. Un scénario en continuité pour les temps à venir.
- En résultat de la fonte des glaciers ainsi que l'expansion thermique (dilatation de l'eau liée au réchauffement), survient l'élévation du niveau de la mer. Cette élévation se voit revue à la hausse, de 18 - 59 cm en 2007 à 26 voire 82 cm en 2100. A noter que la mer avait déjà connue une augmentation de 0,19 m durant la période 1901 – 2010.
- Survenue suite à une intensification de l'industrialisation (combustion de combustible fossile et déforestation) ainsi qu'aux divers autres activités humaines (production de ciment), l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre, à savoir le (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>), et l'oxyde nitreux (NO), a atteint 40% depuis 1750 et plus de 20% depuis 1958. Des

taux plus élevés que les intervalles de concentrations observés dans les calottes de glace au cours des 800 000 dernières années. Aussi, plus de 30% de ces émissions ont été absorbée par les océans entraînant ainsi leur acidification.

### **I.2.3. Changement climatique ou variabilité climatique ?**

L'UNFCCC met en place en 1992 deux (02) définitions distinctes à la variabilité et au changement climatique. De prime abord, la variabilité climatique désigne le changement naturel intra et interannuelle. Le changement climatique quant à lui, aborde le sujet comme étant une variation du climat dont la cause serait les diverses activités humaines qui ont pour conséquence la détérioration de la composition de l'atmosphère observée sur une même période de temps.

Suite à la difficulté de dissocier variabilité et changement climatique, une notion fut établie ralliant ces deux terminologies, il sera question alors de « variabilité et changement climatique ». Suivant Niasse *et al.* en 2004, Cette notion représente l'importante variation ou changement du climat qu'il soit d'origine humaine ou naturelle. Cette définition apporte une simplification de l'explication donnée par l'UNFCCC d'une part, et une certaine prise en compte de la définition proposée par le GIEC d'autre part, pour qui le changement climatique se résume à une quelconque variation à long terme du climat.

### **I.2.4. Changement climatique dans la méditerranée**

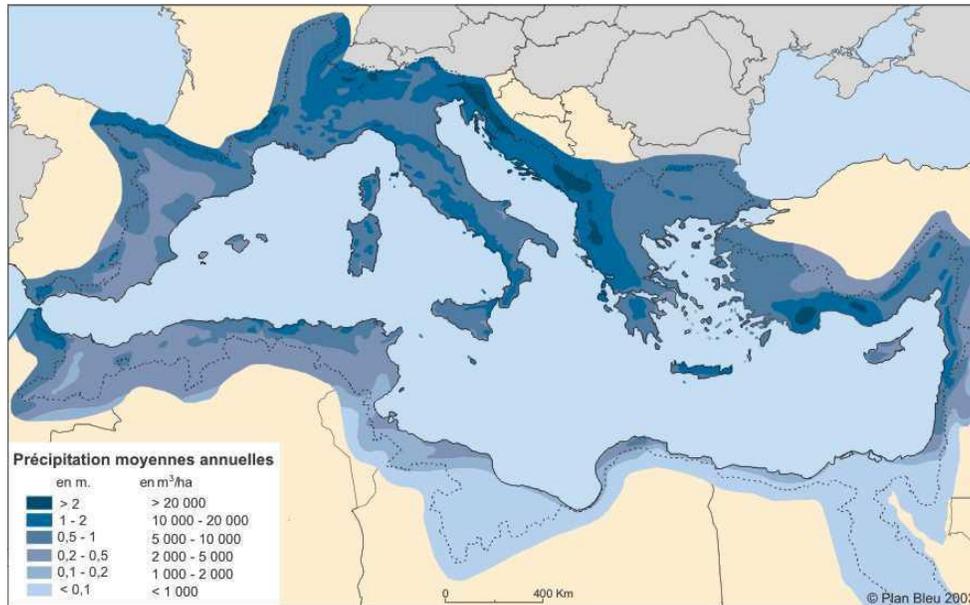
Le changement climatique a eu beaucoup d'impacts sur différentes régions du monde, en particulier au niveau de la calotte glaciaire ainsi que sur les mers et les océans. Parmi ces conséquences une sécheresse sans précédent sur les régions méditerranéennes arides et semi-arides, s'en suit alors une valorisation de la ressource hydrique au cours de ce siècle.

Les études établies dans cette région, et surtout celle faite par Xoplaki *et al.* en 2000 démontrent que les précipitations de la saison humide ont augmenté en Méditerranée au début de la moitié du 20<sup>ème</sup> siècle, avec un maximum atteint aux années 1960. S'en suit alors, une baisse de ces précipitations à partir des années 70 et plus particulièrement la période fin 80 début 90, avec des diminutions allant jusqu'à 2,2 mm/mois/décennie.

D'autre part, l'étude réalisée par Jacobeit en 2000 ainsi que Giorgi en 2002, révèle une tendance négative des précipitations hivernales à travers l'analyse de la variabilité saisonnière des précipitations le long de la Méditerranée entre 1901 et 1998.

Aussi, Norrant et Douguédroit en 2003, révèlent l'existence d'une unique importante diminution des précipitations et ce en Grèce pour les périodes de 1915-16 à 1987-1988. Ailleurs, sur le bassin méditerranéen, les diminutions sont négligeables tout au long des trois (03) saisons de pluie.

De plus, Norrant en 2007, montra via l'analyse des totaux régionaux de pluie du bassin Méditerranéen que les diminutions ne sont que peu importantes entre 1950 et 2000. Exception faite pour quelques régions durant des mois précis, où les baisses furent significatives tels que : l'Espagne méditerranéenne en Octobre, le golfe de Gênes en Décembre, la Grèce en Janvier et la région atlantique en Mars. Pour l'Italie, l'analyse statistique des séries pluviométrique de 1918 - 1999 faite par Longobardi et Villani en 2009, démontre une baisse pour 97% de la série depuis les trente (30) dernières années.



**Figure I.1.** Précipitations moyennes sur le bassin méditerranéen. (Benoit et Comeau, 2005)

Enfin, le Grand Maghreb, situé au sud du bassin méditerranéen, ne fait pas exception à la tendance mise en évidence tel que les études réalisées au Maroc par la direction de météorologie nationale (Benassi, 2001 ; Driouech *et al.*, 2010) sur une période allant de 1958 à 2000 démontrent la même tendance à la sécheresse avec une diminution de la pluviométrie moyenne annuelle de l'ordre de 15% pour la période 1971 – 2000.

### I.3. Sécheresse

#### I.3.1. Définition et caractérisation de la sécheresse

Selon les recherches menées par Tate et Gustard en 2000, une définition universelle de la sécheresse ne peut être mise en place au jour d'aujourd'hui. Néanmoins, l'état de sécheresse peut être caractérisé par un manque dans une ou plusieurs composante(s) du cycle hydrologique. Ce manque est dû, suivant Alley en 1984 et Chang et Cleopa en 1991, à de faibles précipitations durant une période donnée, rapportée à la moyenne des apports observés durant cette même période. La

principale conséquence du prolongement de cette inexistance ou faiblesse, est la modification de l'alimentation des différents compartiments du bassin versant et alors la diminution de l'eau de surface ainsi que l'eau souterraine.

Les recherches qu'ont effectuées Dracup *et al.* en 1980 puis Wilhite et Glantz en 1985 ont mené à l'apparition de trois (03) grandes catégories de sécheresse couramment utilisées par les climatologues et les hydrologues, et qui sont :

- La sécheresse météorologique : ce type de sécheresse, d'après Palmer en 1965 ; Boken en 2005 et Keyantash et Dracup en 2002, est caractérisée par une diminution des précipitations solides et liquides au-dessous de la normale et ce pour une période de temps variant du mois à l'année voire plusieurs années. Plusieurs études parmi lesquelles celles de : Bjerknes en 1969 ; Rasmusson et Wallace en 1983 ; Folland *et al.* en 1986 ; Lamb et Pepler en 1992 ; Ting et Wang en 1997 et enfin Trenberth et Shea en 2005), montrent qu'elles sont causées par l'augmentation de la température au niveau de la surface de la mer.
- La sécheresse agricole (ou édaphique) : définie par les recherches de Palmer en 1965 ; Rosenberg en 1978 et Wilhelmi en 2002, comme étant une période de temps durant laquelle l'humidité du sol se voit diminuer au-delà de sa valeur moyenne impactant par conséquent les végétations naturelle et cultivée. Elle est souvent provoquée, suivant les recherches de Narasimhan et Srinivasan en 2005, par un cumul des précipitations inférieures à la normale, une irrégularité temporelle de leur distribution (diminution de la fréquence et augmentation de l'intensité), une évapotranspiration plus importante suivant les résultats de recherches de Klocke et Hergert en 1990 ; Rind *et al.* en 1990 ; Hanson en 1991 et Vicente-Serrano *et al.* en 2010, ou encore un ruissellement plus intense. Cette sécheresse pourrait causée, d'après les études de Panu et Sharma en 2002, de lourds dommages sur les productions agricoles.
- La sécheresse hydrologique : les études effectuées par Yevjevich en 1967 ; Dracup *et al.* en 1980 et enfin Tallaksen *et al.* en 1997, donnent comme conclusion que cette catégorie de sécheresse dépend du taux d'approvisionnement en eaux de surface et souterraines des lacs, aquifères... elle définit alors le degré de réalimentation du sol ou du sous-sol ainsi que le débit qui y circule tel que, suivant Linslet *et al.* en 1975, si ce dernier n'est pas suffisant pour répondre aux besoins locaux durant une période donnée alors l'état de sécheresse est établi. Elle a pour résultat une diminution des activités humaines à savoir : l'AEP, l'irrigation, le tourisme, la production hydroélectrique...

### I.3.2. Sécheresse dans le monde

La sécheresse peut avoir de lourdes conséquences sur l'environnement ainsi que sur l'être humain. Cette dernière n'est pas propre à une seule région, au contraire, sa mondialisation transparait à travers les différentes « catastrophes » qu'a connues le monde et qu'il continuera à rencontrer durant les années à venir selon certains scenarii établis par Watson *et al.* en 1997. Parmi ces impacts, Obassi en 1994 cite les statistiques émises par l'OMM, de 1967 à 1991, où il est mentionné de plusieurs milliards de personnes affectées par ce phénomène, 1,4 milliards plus précisément. D'autres conséquences sont à citer, à titre d'exemple la perte d'un groupement de bétail en Asie méridionale en 2000, la fuite de près de 300 000 familles du désert du Registan au sud de l'Afghanistan, la mort de plusieurs personnes au Proche-Orient, une baisse du niveau d'eau au niveau de l'Euphrate et le Tigre atteignant 20% de leur débit moyen rapporte The Nation en 2000...

Cette sécheresse a pris une ampleur lourde de conséquences qui n'est pas prête de se terminer en fin de l'année 2000 suivant l'analyse de l'indice de précipitations annuelle au Sahel ouest africain faite par L' Hôte *et al.* en 2002.

Même si la sécheresse est notable sur plusieurs régions du monde, au niveau de l'Afrique les modifications climatiques restent variées suivant les recherches de Paturel *et al.* en 2004, de manière à ce que ces changements passent d'une augmentation de la pluviométrie annuelle durant la première moitié du le 20<sup>ème</sup> siècle en Afrique Centrale, à une diminution très marquée et sans équivalent de la pluie depuis la fin des années 1960 en Afrique de l'Ouest. Cependant, plusieurs pays comme le Togo, le Bénin ou la partie maritime du Nigeria n'ont connu aucun changement notable, contrairement au pays de l'Afrique sahélienne et centrale qui eux ont connu des fluctuations au niveau des précipitations avec, respectivement une augmentation en 1940 puis une diminution vers 1970 et une augmentation vers 1919 puis une diminution en 1970.

Des ruptures préférentielles ont été observées en 1970 au niveau des grands cours d'eau de Cote d'Ivoire ainsi que le Bani au Mali. Et ce à travers des études menées respectivement par Ake *et al.* en 2010 et Ardoin-Bardin en 2004 qui ont utilisé le test de PETTITT pour appuyer leurs arguments, ainsi que Mahé *et al.* en 2001 pour qui la diminution de 68% du débit fut assez parlante.

Cette concordance temporelle des ruptures démontre l'existence d'un lien entre le régime du cours d'eau et les précipitations, cas prouvé aussi par l'insertion des années de rupture obtenues par le découpage de Hanning sur la station de Grand-Lahou étudié par Servat *et al.* en 1999. D'autres part, suivant Olivry en 1997 ; Paturel *et al.* en 1997, 1998 et aussi Servat *et al.* en 1998 et 1999, ces ruptures démontrent l'inscription de la région de Grand-Lahou dans la fluctuation du régime pluviométrique entre la fin des années 1960 et le début des années 1970 en Afrique de l'Ouest et Centrale

Les études effectuées par Kouame en 2011 font état d'existence d'une tendance à l'augmentation des coefficients de tarissement à partir de la rupture de 1970 dans le bassin versant du N'zo à l'Ouest de la Côte d'Ivoire. En 1986, une sécheresse intense toucha la région de Soubré, ce qui a eu pour conséquence l'abaissement des volumes mobilisés (dont l'évolution est inverse aux coefficients de tarissement) dans les différents bassins versant mais aussi diminution des réserves d'eau de surface et souterraine de la région.

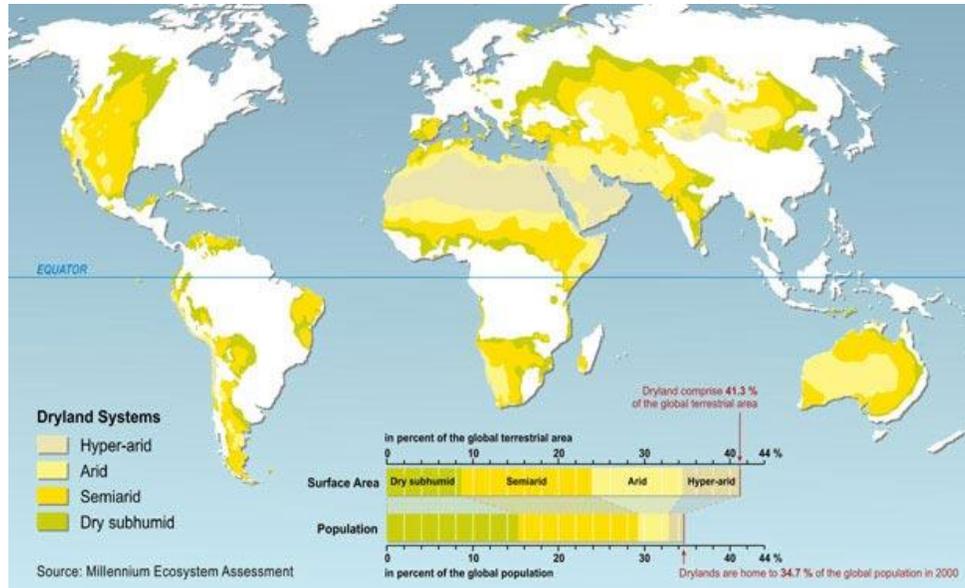
De même, les études de Lubes *et al.* en 1998 ont montrées une élévation des coefficients de tarissement dès 1969 sur cinq (05) sous-bassins du fleuve Niger. Auparavant, le même phénomène fut observé sur les bassins versants du Tchad par Nicholson en 1994. Puis revue un peu plus tard par Vissin en 2007 au niveau du bassin béninois du fleuve Niger.

Les pays d'Afrique du Nord ne font pas exception à cette règle de variabilité climatique, tel que les études effectuées par Kingumbi *et al.* en 2006 au niveau de la Tunisie, montrent une importante baisse (sans rupture de stationnarité des séries) des précipitations annuelles en son centre entre 1976 et 1989.

D'autres parts, différentes études ont été réalisées dans la région de Siliana en Tunisie en utilisant plusieurs méthodes afin de mettre en évidence cette sécheresse. Par exemple celle faite par Bergaoui et Alouini en 2001 qui donne un pourcentage de 60% d'années sèches avec la méthode des écarts à la moyenne et voit ce taux diminuer à 35% en utilisant l'analyse fréquentielle. De plus, leur fréquence d'apparition est de 55% d'années sèches formées de deux (02), trois (03) ou cinq (05) années consécutives.

Les études de Benzarti *et al.* en 2001 utilisent les chaînes de Markov sur des séries de pluviométrie annuelle, et auparavant Bergaoui en 1983 sur des séries saisonnières et journalières, afin de démontrer que la persistance des années sèches est plus fréquente dans les régions du nord et du centre du pays. De plus, la probabilité d'avoir deux années sèches consécutives varie de 23 à 40 % suivant une croissance du sud-ouest au nord-ouest.

Enfin, l'étude de Kingumbi, 2006 sur la pluviométrie et les apports de l'Oued Merguellil révèle une baisse des précipitations ces dernières décennies. Aussi, l'année 1988 – 1989 apparue comme une année de rupture pour ce même auteur ainsi que pour Bergaoui *et al.* en 2001 et Lahache et Pillet en 2008.

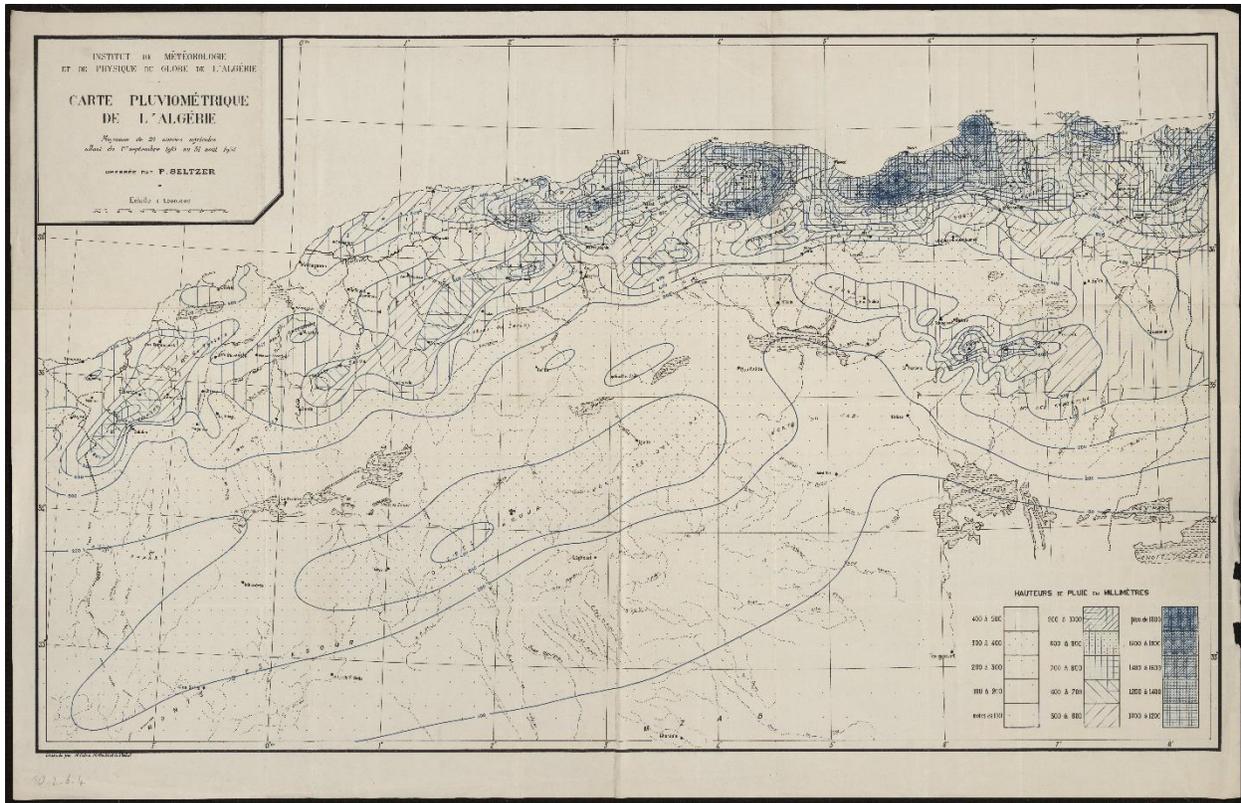


**Figure I.2.** Zones sèches à travers le monde. (Source : Millennium Ecosystem Assessment, 2005)

### I.3.3. Sécheresse en Algérie

Les travaux concernant l'étude de la sécheresse en Algérie ont débuté de manière simpliste le dernier siècle, en utilisant le calcul de la moyenne et ce sur quelques stations. Ce n'est qu'en 1946 qu'une analyse approfondie est établie par Seltzer sur le climat Algérien. S'en suit alors l'étude établie par Demmak *et al.* en 1994 sur les stations du Nord en utilisant entre autres la méthode comparative des moyennes (1974-1992 par rapport à celle de Chaumont 1913-1963) et celle de la moyenne de longue durée (1922-1992). De ces dernières, deux (02) constats ont vu le jour :

- D'est en ouest, l'importance du déficit pluviométrique accroit durant la période 1974 – 1992 ;
- Existence d'une tendance à la sécheresse durant les vingt dernières années analogues à celle rencontrées entre 1913 et 1940.



**Figure I.3.** Carte pluviométrique de l'Algérie. (Seltzer, 1946)

De plus, Farmer et Wigly, selon Kadi en 1995, mettent en évidence l'évolution de l'indice de sévérité de la sécheresse sur le Nord Algérien tel que le résultat fait apparaitre une sécheresse sévère et généralisée en : 1937, 1961, 1970.

D'autres analyses établies par Laborde en 1993 sur 120 postes pluviométriques du Nord ont montré, à travers l'analyse en composante principale, une succession de quatre (04) phases pluviométriques :

- Phase 1 : une période longue allant de 1922 à 1938, où la pluviométrie est supérieure à la moyenne de 6 %.
- Phase 2 : une courte période sèche de 1939 à 1946 à l'ouest et au centre du pays avec un déficit de l'ordre de 11 %.
- Phase 3 : une phase pluvieuse allant jusqu'en 1972.
- Phase 4 : une longue période sèche débutant dès 1973.

Matari *et al.* en 1999 quand à eux, appliquent, sur deux (02) réseaux et deux (02) régions différentes, une ACP qui donna comme résultat une séparation régionale de l'ouest Algérien pour une analyse spatio-temporelle de la pluviométrie. Ils aboutirent aux constatations suivantes :

## CHAPITRE I : Recherches bibliographiques

---

- Une baisse des pluies printanières causa la sécheresse des années 40 ;
- Une baisse des pluies hivernales causa la sécheresse des années 80.

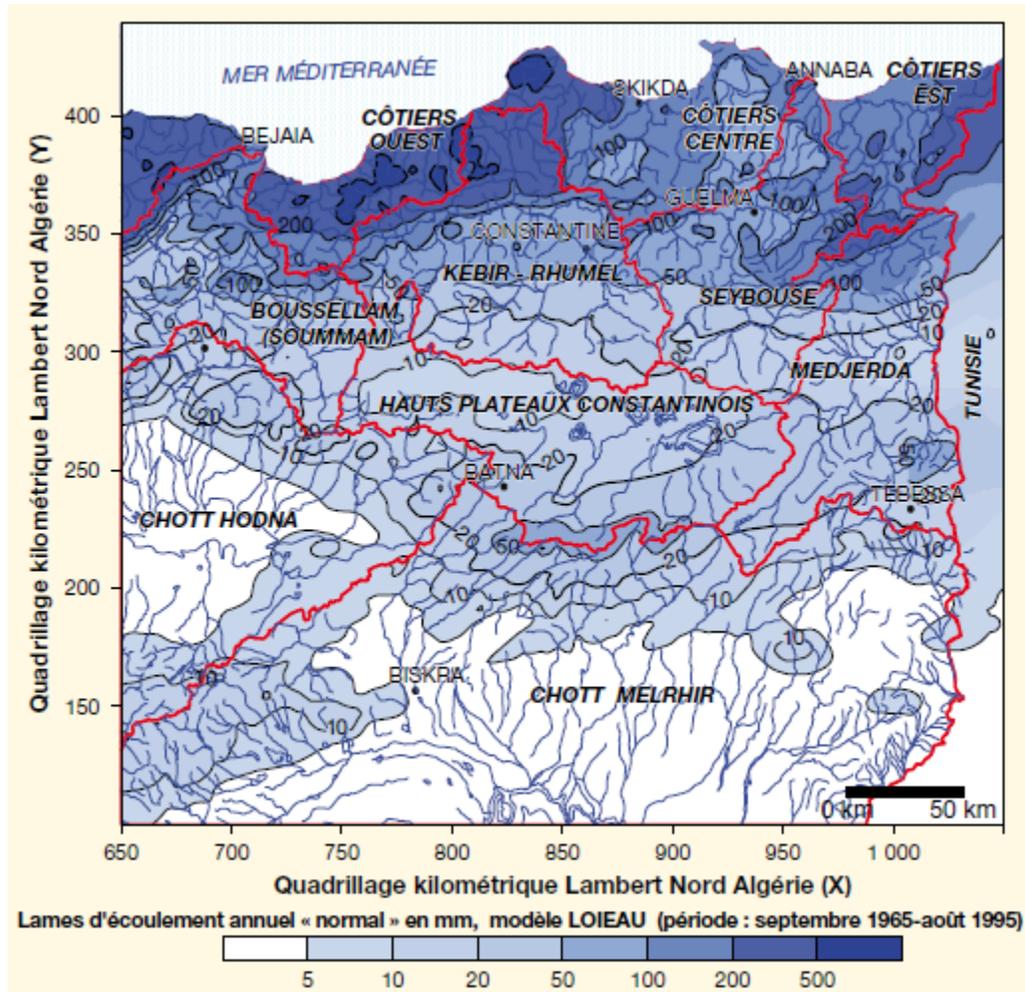
En 2005, Khaldi a étudié de la sécheresse sur les stations pluviométrique du nord-ouest Algérien. Les résultats sont les suivant :

- L'existence d'une succession de deux (02) phase, l'une pluvieuse s'étalant des années 50 aux années 70, et l'autre sèche enregistrée depuis les années 80 jusqu'en 2005 confirmée par un indice de sévérité de la sécheresse important ;
- Une baisse des pluies hivernales entre 1990 et 2000 au niveau des stations étudiées ;
- Un bon ajustement des périodes pluvieuses par le modèle de Markov, à l'opposé des périodes sèches qui montrent une différence remarquable entre les fréquences calculées et théoriques.
- Existence d'une relation entre l'ONA et la pluviométrie de cette région à travers une certaine corrélation entre elles.

Dans d'autres études faites en 2010 par Mebarki sur les apports des cours d'eau de l'Est Algérien, il est précisé que les deux (02) périodes les plus sèches (faible hydraulicité) sont celle de 1987 – 1988 ainsi que celle de 1993 – 1994 et 2001 – 2002.

Aussi, Khoualdia et Djebbar, à travers des études de sécheresse réalisées en 2014 sur la région de la Medjerda, mettent en évidence plusieurs points important à savoir :

- Diminution des pluies ainsi que les apports liquides au niveau des cours d'eau et augmentation de l'évapotranspiration et de la température durant la période s'étalant de 1970 à 2000 ;
- Diminution des apports liquides au niveau du barrage d'Ain Dalia, marqué par des piques de minima en 1988-1989, 1993-1994 et 2001-2002
- Intensité de pluie importante.



**Figure I.4.** Carte de l'écoulement annuel moyen de l'Est algérien (période moyenne : 1965-1966 à 1994-1995). (Mebarki, 2010)

Et enfin plus récemment, des études élaborées en 2009 par Meddi *et al.* par application des chaînes de Markov sur des stations installées au niveau du nord de l'Algérie, aboutissent au résultat suivant :

- Probabilité de succession de deux années sèches à l'Ouest plus importante qu'au Centre, et inversement pour le cas de la succession d'une année non sèche à une année sèche.

En vue d'une préparation d'un plan de gestion de la sécheresse en Algérie il est nécessaire d'utiliser les résultats des différentes études citées ci-dessus. De plus, différentes autres approches sont traitées afin d'y contribuer à titre d'exemple : les différences spatiales de la sécheresse proposée par Beersma et Buishand en 2004, la prédiction des sécheresses par les indices de la circulation atmosphérique avancée par Lloyd et Saunders en 2002 et la diminution des effets de la sécheresse donnée par OMM en 2000. Enfin, des indices quantifiant l'intensité et l'ampleur de la sécheresse

sont aussi utilisés pour l'analyse et la planification continue des sécheresses telles que l'ont précisé Svoboda *et al.* en 2002.

Dans une perspective de défense contre la sécheresse, un centre de recherche sur la sécheresse (NDMC) fut développé aux Etats-Unis d'Amérique rapportent Robles *et al.* en 2006, et ce dans le but de rassembler, mesurer, et cartographier les impacts de ce phénomène et fournir aux décideurs des outils de recherches facile. De même, d'autres centres s'intégrant dans cette vision ont vu le jour au Canada, en Italie et en Espagne... pour une meilleure compréhension du phénomène.

Récemment, le programme « MEDROPLAN » a été lancé suite à la collaboration entre Chypre, l'Espagne, la Grèce, l'Italie, le Maroc et la Tunisie comme initiative de mise en place de conduites à suivre, alliant science et politique, en vue de la gestion de la sécheresse dans les pays méditerranéens.

Enfin, en vue de la création d'un guide complet de gestion de la sécheresse, l'expérience Algérienne et étrangère ainsi que les connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques se rapportant à ce domaine sont primordiales. Or, en 2006 Jarraud déclare que la sécheresse est une composante du climat et que les statistiques disponibles permettant l'analyse de la sécheresse, comme les précipitations, les débits... sont obtenus par des lois statistiques dont l'utilisation est limitée dans le cas des événements rares et long, à titre d'exemple : la régression multiple, l'étude fréquentielle des étiages, la loi de Laplace-Gauss étudiée par Hubert et Bendjoudi en 1998, ainsi que toutes les autres lois à décroissance exponentielle...

CHAPITRE II  
PRESENTATION DE  
LA ZONE D'ETUDE

---

## CHAPITRE II : Présentation de la zone d'étude

### II.1. Présentation géographique

Se trouvant à 446 km au sud-est de la Capitale, la wilaya de Biskra est une région s'étendant dans la partie sud de l'Atlas Saharien entre les méridiens 5° et 7°, et dont la superficie avoisine les 30 000 km<sup>2</sup>. Elle est limitée :

- Au nord par la wilaya de Batna ainsi que la terminaison sud de la chaîne des Aurès,
- Au nord-est par la wilaya de Khenchela,
- Au nord-ouest par la wilaya de M'sila,
- À l'est par la wilaya de Tébessa,
- À l'ouest par la wilaya de Djelfa,
- Et au sud par les wilayas d'El Oued, de Ouargla et la bordure nord de la plate-forme saharienne.

À l'ouest comme à l'est, de grandes oasis bordent la wilaya de Biskra. D'abord, la région des Ziban à l'ouest avec ses deux (2) axes à savoir :

- Le Zab Gherbi, regroupant administrativement les communes de Tolga, El Ghrous, Bordj Ben Azouz, Lichana, Bouchegroune, Foughala et El Hadjeb, et qui forment l'axe nord de l'oasis,
- Les communes d'Oumeche, Mlili, Ourelal, Mekhadema et Lioua qui forment quant à elle l'axe sud.

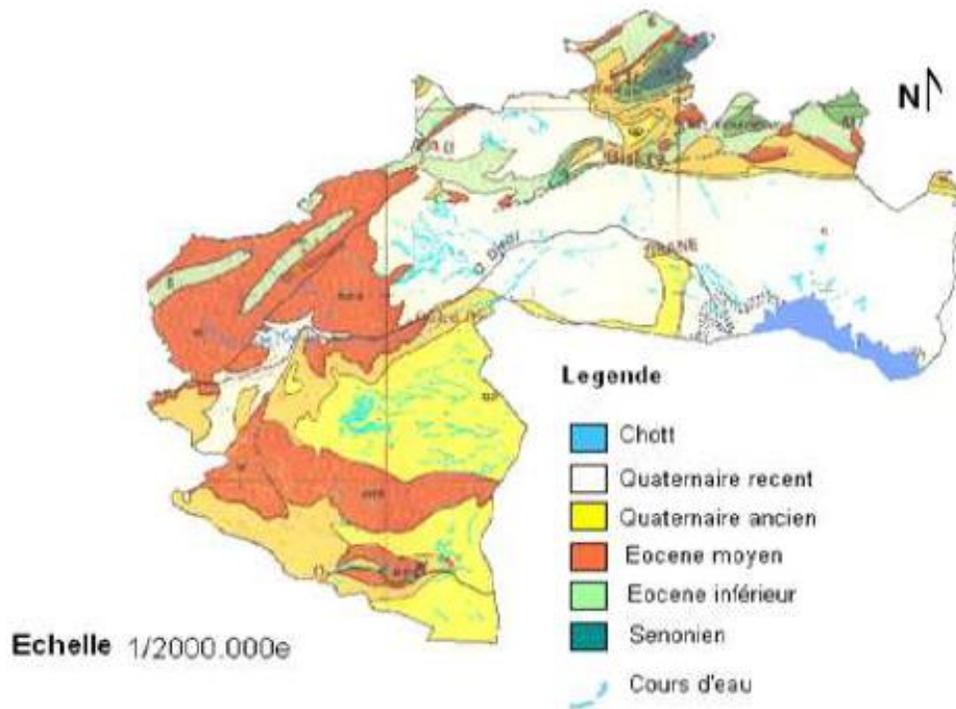
Ensuite, l'oasis du Zab Est à l'est de Biskra qui regroupe administrativement les communes de Sidi Okba et Chetma avec les palmeraies de Thouda, Seriana et Garta. Constituant l'une des grandes régions du sud-est Algérien, cette oasis fait partie de la wilaya de Biskra telle qu'elle est limitée :

- Au nord par les communes d'El Outaya, Branis et Mechounech,
- À l'est par les communes d'Ain Naga, El Haouch,
- Au sud par la commune de Still qui fait partie de la wilaya d'El Oued,
- Et à l'ouest par les communes de Zerzour, et Ouled Slimane appartenant à la wilaya de M'sila ainsi que de la commune de Chaiba.

## II.2. Géologie

L'aspect géologique de la région de Biskra apparait comme une transition structurale et sédimentaire, tel qu'au nord la région est montagneuse, par contre au sud, elle est plus effondrée.

Entre ces deux points extrêmes, la région montre un ensemble de flexures, de plis-failles et de failles d'orientation est-ouest appelé "accident sud atlasique" apparu durant la phase paroxysmale pliocène et post-pliocène de la surrection de l'Aurès. Cette même phase orogénique est responsable de l'ensemble des déformations majeures du continental Néogène.



**Figure II.1.** Esquisse géologique de la région de Biskra. (Busson, 1971)

### II.2.1. Géologie de la cuvette d'Oued Biskra

La région d'Oued Biskra se caractérise par ces deux (2) groupes de formations distincts. Les premières, propres au lit de l'oued, sont des alluvions du Quaternaire composés principalement de sables et de graviers, tandis que les secondes, caractérisant les rives de l'oued, sont de Quaternaires Anciens ; des poudingues, graviers et sables de l'ancienne terrasse.

La cuvette d'Oued Biskra est bordée :

- Au nord par la barre calcaire turonienne,
- Au sud par la barre des poudingues pliocènes,
- À l'est et à l'ouest par les argiles miocènes.

Ses formations alluvionnaires reposent sur des formations d'argiles miocènes quasi imperméables, issues du transport des produits de l'érosion des reliefs calcaires et argileux amont.

Au niveau de l'oued, la variabilité granulométrique est telle qu'à l'amont les dépôts sont décimétriques et forment une vaste zone d'épandage perméable et qui deviennent plus fins vers le sud plus argileux. Au milieu de l'oued, une importante concentration de matériaux grossier existe, par contre ils deviennent plus fins vers les berges.

Les limites latérales à l'est et l'ouest de la cuvette de l'oued sont couvertes par l'argile miocène imperméable qui favorise l'accumulation des eaux souterraines. D'ailleurs, les coupes des forages exécutés dans l'oued démontrent une lithologie dominée par des couches de galets, de graviers, de sable et même de gypse à quelques endroits qui, par leur perméabilité, contribuent à cette accumulation (figure II.2).

### **II.3. Pédologie**

Tout comme la plupart des sols rencontrés dans des régions arides, les sols du sud Algérien présentent des caractéristiques communes, à savoir des précipitations faibles et irrégulières ainsi qu'une importante évaporation.

Avec des conditions aussi extrêmes, l'évolution des sols se voit affaiblie, ainsi leurs éléments minéraux se trouvent détériorés et leurs éléments solubles se concentrent et se regroupent à un niveau ou à un autre du profil jusqu'à apparition de nodules ou de croutes calcaires gypseuses appelées « deb-deb ».

Des études démontrent l'existence d'une liaison entre les sols du Sahara et la géomorphologie et la géologie du substratum de chaque région. À l'exception des régions d'El Outaya et de Sidi Okba caractérisées par des sols relativement profonds.

Les sols de la wilaya de Biskra sont, pour la plupart, pauvres et peu profonds aussi connues comme des sols éoliens d'ablation et des sols basiques. Toutefois, le nord de la région peut être caractérisé par une absence de sol appelée zone d'affleurements de la roche mère, et le sud-est par des chotts ou zone des sols halomorphes.

Une étude établie sur la région des Ziban par l'Agence Nationale de l'Aménagement du territoire en 2003 révèle la présence de trois (3) classes principales des sols.

### **II.3.1. Types de sols**

#### **II.3.1.1. Sols peu évolués**

Rencontrés le plus souvent en bordure de certains grands oueds, comme : Oued Salsou, Oued En Naam (Bled El Madher et Mazouchia au nord de Tolga), au sud d'Oued Djeddi (entre Ouled Djellal et Lioua), Bled Selga Sâadoune et Oglat Siouf (plaine d'El- Outaya), Oued Mellah (entre Biskra et Oumache), Oued Fellag (Zone nord-ouest d'El Ghrous). Ils sont composés de sable mobile grossier, faiblement calcaire et avec des traces organiques dans les vingt premiers centimètres supérieurs, et sont fréquemment sujet à l'érosion éolienne.

Dans ces sols de type AC, la matière organique est fragmentée et peut être bien humifiée. La matière minérale quant à elle, n'a rencontré aucune altération, cependant, des événements physiques ont pu la désagréger. Enfin, les sels minéraux y compris les carbonates et les sulfates, ainsi que les cations pourraient avoir été redistribués au sein de la matière.

#### **II.3.1.2. Sols calcimagnésiques**

Ces sols de type AR ou AC ou A(B) R ou A(B) C ont la particularité d'être bien développée. Ils se caractérisent par la présence d'une certaine influence dominante du carbonate de calcium, de calcium de magnésium ou de sulfate de calcium, composants communs aux sols arides.

Répanus dans l'ensemble de la wilaya de Biskra, ils sont surtout présents dans les formations quaternaires longeant la chaîne atlasique quand ils sont à différenciation de carbonates. Par contre, associés à des accumulations gypseuses, leur occupation préférentielle est le centre de la wilaya avec une ampleur grandissante vers le sud.

#### **II.3.1.3. Sols halomorphes**

Présents dans la région est à proximité du Chott Melghir, la zone au nord des palmeraies d'Oumache, dans la zone de Selga ainsi que dans la plaine d'El Outaya. Ils se rencontrent dans les dépressions en forme de cuvettes évasées, dont les bords forment des zones d'accumulation remplies par les écoulements issus des reliefs lors des précipitations.

Ils sont caractérisés par la présence de sels solubles avec une conductivité électrique supérieure à  $7 \text{ mmhos/cm}$  à  $25^\circ\text{C}$ , et dont les teneurs élevées impactent les végétations. Cependant, dans le cas des sols du Sahara, incluant la région de Biskra, la salinité est supérieure à cette norme. Cette variabilité est surtout due à la texture des sols, qui est généralement grossière et permet un bon lessivage des sels par les eaux d'irrigation.

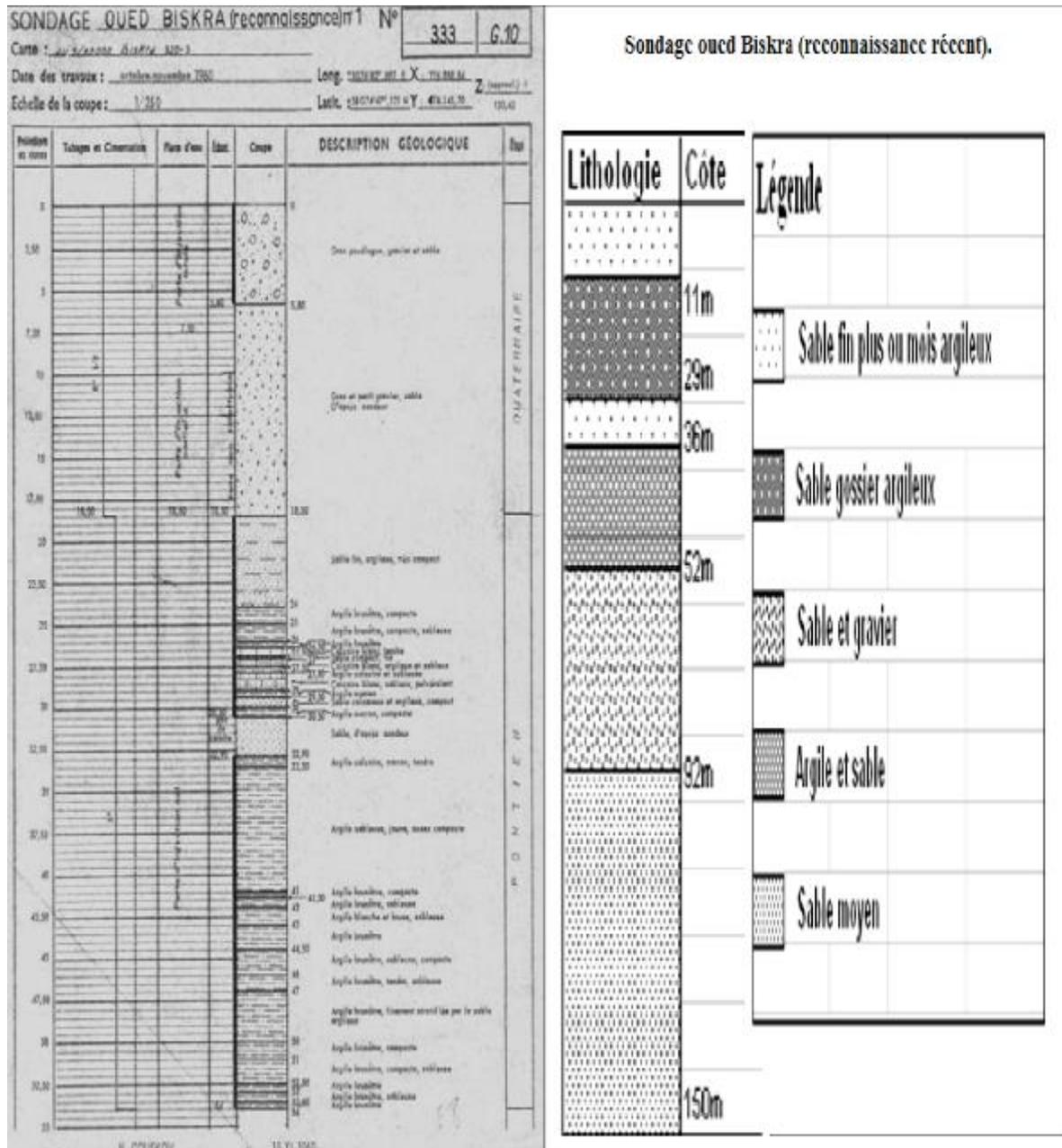


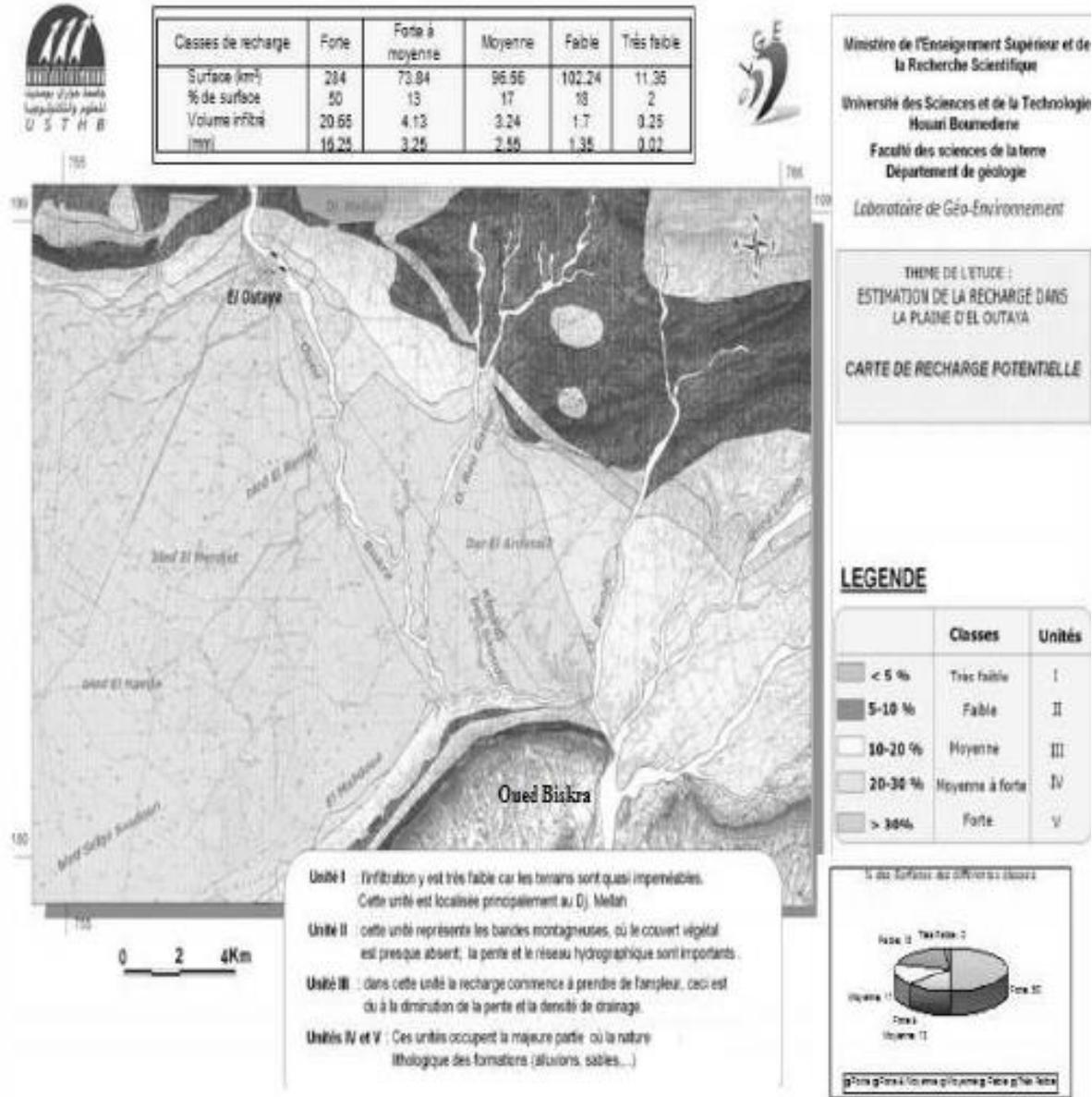
Figure II.2. Coupe technique d'un forage de reconnaissance à Oued Biskra. (ANRH, 2013)

### II.3.2. Taux d'infiltration

La présente carte, établie par un groupe de chercheurs du laboratoire « Géo-Environnement » de l'USTHB, représente une synthèse de recharge potentielle dans la plaine d'El Outaya. Elle est issue de l'assemblage des cartes paramétriques élaborées et stockées sous forme de couches dessins et données dans le Système d'Informations Géographiques utilisé.

## CHAPITRE II : Présentation de la zone d'étude

Une étude a été établie sur le système aquifère d'Oued Biskra montre que le taux d'infiltration varie de 17 % à 65 % pour un débit de crues de 105 à 6105 m<sup>3</sup>/j, par conséquent chaque volume à son propre coefficient d'infiltration.



**Figure II.3.** Carte de recharge potentielle dans la plaine d'El Outaya.

## II.4. Géomorphologie

Dans sa quasi-totalité, la région de Biskra est constituée de la grande dépression septentrionale saharienne entourée au nord, nord-est et au nord-ouest par les versants de l'Atlas saharien.

Sa morphologie est marquée par trois importantes unités morphologiques : la montagne, le piedmont et enfin la plaine.

### II.4.1. Montagne

La région est bordée au nord par les monts du Zab dont le caractère montagneux est peu visible et au nord-est par le massif de l'Aurès. En effet, les monts du Zab se caractérisent par des collines étroites dont les reliefs peu élevés (400 à 900 m), s'alternent avec des bassins déprimés (Bled El Mazouchia : 250 m, plaine d'El Outaya : 150 m), formant ainsi une esquisse de chaînons à l'ouest et au nord-ouest de Tolga.

#### II.4.1.1. Monts des Zab

Ils Relient les monts des Ouled Nail à l'Aures par des collines représentant les restes d'anticlinaux et synclinaux tel que la plaine synclinale d'El Outaya. Le nord-ouest de Tolga est caractérisé par les anticlinaux des Zibans de forme arquée à l'instar de Chaiba et Djebel Khalia, d'ailleurs l'anticlinal du Chaiba sépare même les monts d'Ouled Nail du Zab. Aussi, étant un point culminant des Zibans, le massif du Djebel El Ksoum est un anticlinal avec un sommet en calcaires turoniens dont l'extrémité se terminant par un col : le Teniet-en-Nam, joint la partie occidentale de la plaine d'El Outaya avec la dépression des Zibans.

Le Djebel Guouara avec ses 714 m, composé de calcaires du Sénonien, couvre la dépression du Bled Selga à l'est de Teniet-en-Nam, le séparant ainsi du Djebel Bou Rhezal, un anticlinal de 519 m étroit orienté nord-est et sud-ouest. Ce dernier est une véritable barrière traversée par la route de Biskra-Batna avec un peu plus de difficulté au col de Teniet-es-Sfa à 212 m d'altitude.

#### II.4.1.2. Massif de l'Aurès

Il s'étend au nord-est de Biskra et du Zab oriental, des reliefs d'orientation ouest-est limitent leur Sud à travers deux (2) éléments :

- Les Gueheb : série de collines d'orientation est-ouest d'altitude variant de 400 à 600 m.
- Les Guerguitt : chaîne de collines s'étalant d'ouest en est de Biskra à Ouled Rharhar dont l'altitude ne dépasse que rarement 400 m.

#### II.4.2. Plaines

Les Zibans sont des oasis se situant au pied des montagnes (du Zab et de l'Aurès) au nord du bas Sahara. Ils se composent de plaine et de cône-glacis plongeant sous une plaine alluviale résultante de l'association de cônes similaires à ceux des oueds de l'Aurès.

Ces oasis se subdivisent en deux (2) groupes de palmeraies séparés par l'Oued Biskra :

- Le Zab Chergui à l'est : réparti dans les plaines de Sidi Okba, le Zab Chergui représente une des plus grandes plaines du bassin, s'étalant du bas Sahara au massif de l'Aurès avec une altitude de 200 m. Elle est découpée par les lits des oueds issus des Aurès dont les bordures accueillent Garta à 80 m d'altitude, Seriana à 100 m d'altitude et Sidi Okba à 60 m d'altitude vers le sud.
- Le Zab Gherbi à l'ouest : se caractérise par sa formation calacaro-gypseuse « deb-deb » de 1 ou 2 m d'épaisseur.

#### II.4.3. Piedmonts

Le ruissellement a permis d'étaler les dépôts faisant ainsi du piedmont sud atlastique une zone bien individualisée. Ces derniers forment un glacis, au pied de l'atlas saharien, s'étalant de l'ouest à l'est du piedmont du Djebel Bou Rhezal, issu de la descente d'une série de longs glacis en pente douce sur 5 km. En effet, cinq (5) niveaux de glacis de front descendent de la crête principale sous forme de dalle calcaro-gypseuse très résistante et de galets calcaires (Turonien-Cénomaniens).

Le flanc Sud du Djebel Bou Rhezal quant à lui connaît un recouvrement de glacis d'ablations, taillé dans une roche meuble issus d'une ancienne dune, par les sables.

#### II.5. Ressources en eau superficielles

La wilaya de Biskra, malgré sa nature aride, possède d'abondantes ressources en eau de surface telles qu'elles sont alimentées par les principaux oueds de la région : Djeddi, Biskra, El Arab, qui se jettent dans le Chott Melghir lors des crues.

Dans cette région, deux (2) grands barrages sont en exploitation depuis l'an 2000, à savoir :

- Le barrage de Foug el Gherza : Réalisé en 1952 ; ce barrage a une capacité de 47 Hm<sup>3</sup> et reçoit en moyenne 22 Mm<sup>3</sup> par an. Il régularise 13 Mm<sup>3</sup> par an des apports du bassin d'Oued El Abiod. En 2003, son taux d'envasement a réduit sa capacité à près de 17 Mm<sup>3</sup> et son évaporation fait perdre environ 5 Mm<sup>3</sup> chaque année.

- Le barrage de Fontaine des Gazelles : Sa capacité de 55Mm<sup>3</sup> permet de régulariser les apports d'un bassin de 1 660 Km<sup>2</sup> sur Oued El Hai. Malheureusement, les apports solides estimés à 360 000 m<sup>3</sup> par an ainsi que les grandes pertes par évaporation évaluées à 6 Mm<sup>3</sup> par an réduisent sa capacité, par conséquent seul 14 Mm<sup>3</sup> sont destinés à l'irrigation chaque année.

Le réseau hydrographique des Zibans, appartenant au grand bassin saharien de Chott Melghir, possède une superficie totale de 26 000 Km<sup>2</sup> ainsi qu'un tracé varié résultant des différences de relief de l'Atlas et du climat en lui-même.

### **II.6. Nappe des alluvions d'Oued Biskra**

La nappe d'Oued Biskra, d'âge Quaternaire, est composée d'une couche aquifère de 40 à 60 m de puissance, alimentée par inféro-flux d'oued, s'étendant sur 5 Km<sup>2</sup> et dont l'épaisseur moyenne est de 20 m. Sa nature lithologique est graveleuse (sédiments d'origine détritique), elle comprend des galets et des graviers avec passages sableux à argileux. Son volume d'alluvions est de 100 Hm<sup>3</sup> et sa forme allongée de direction nord-sud résulte de l'écoulement d'Oued Biskra creusé dans les marnes imperméables du miocène et remblayé par des dépôts alluvionnaires.

En 1967, une étude géophysique a permis d'approfondir les connaissances se rapportant à cette nappe et ce via une série de sondages électriques. Ainsi, parmi les observations obtenues : une variation de l'épaisseur des alluvions saturées sur substratum marneux imperméable du Miocène, mais aussi une limite du réservoir prise à une épaisseur nulle de la nappe.

La granulométrie de la cuvette d'oued Biskra démontre une grande variabilité d'amont en aval. En amont, les dépôts sont décimétriques constituant ainsi une zone d'épandage très perméable. Par contre au sud, ils deviennent plus fins. De même, au milieu de l'oued les matériaux sont grossier, tandis qu'ils deviennent plus fins vers les berges.

Enfin l'extension verticale de la nappe peut parfois atteindre les 40 m avec des lentilles d'argiles quaternaires marquant le substratum local de la nappe.

### **II.7. Bassin versant d'Oued Biskra**

Le bassin versant (ou encore bassin hydrographique) est l'unité d'étude en hydrologie, ce nom représente la surface de collecte des précipitations alimentant un cours d'eau dont la trajectoire de son écoulement et son drainage est imposée par les différentes pentes de la topographie qui y règne.

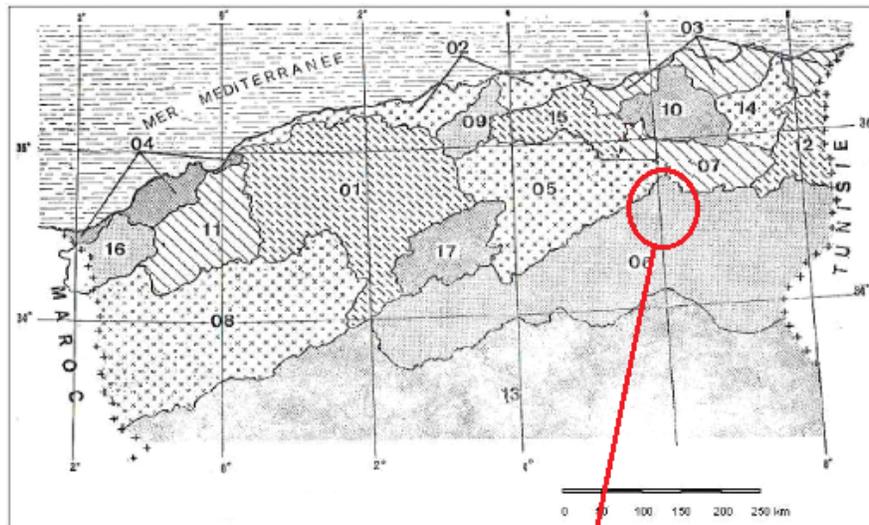
Il est limité par des lignes de partage des eaux qui servent à séparer les différents bassins qui se trouvent cote à cote. Ces dernières sont clairement visibles dès lors que le relief est bien marqué,

## CHAPITRE II : Présentation de la zone d'étude

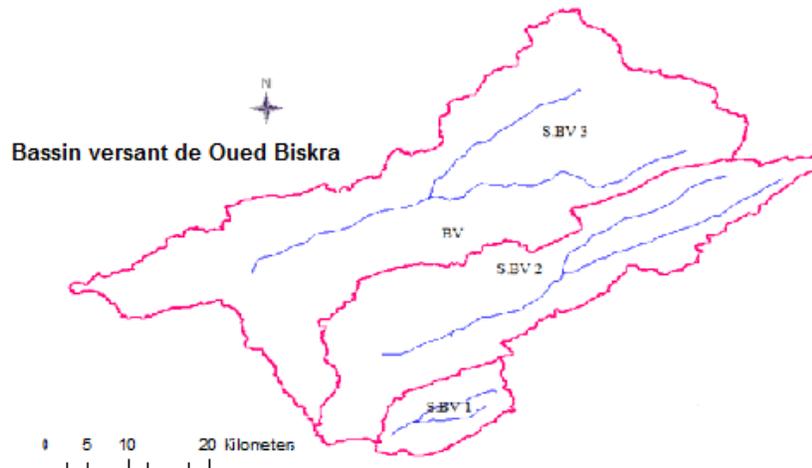
tandis qu'elles sont peu remarquables dans les régions plates où les écoulements tendent à se perdre dans les sables ou les cuvettes désertiques.

Le bassin d'Oued Biksra quant à lui, appartient au bassin Chott Melghir, il s'étend sur une superficie de 3147 km<sup>2</sup>, avec :

- Au nord Djebel Metlili (1496m) et la chaîne montagneuse de Bellezma (2091m) ;
- Au sud les montagnes des Aurès et Djebel Azeg (1937m) ;
- A l'est Djebel El Mahmel (2321m), Djebel Asker (1679m) et Djebel Ich Ali (1815m).



- |                                     |                               |                               |
|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 01 : Cheliff ;                      | 02 : côtières algérois ;      | 03 : côtières constantinois ; |
| 04 : côtières oranais ;             | 05 : Chott Hodna ;            | <b>06 : Chott Melrhir ;</b>   |
| 07 : Hauts Plateaux constantinois ; | 08 : Hauts Plateaux oranais ; | 09 : Isser ;                  |
| 10 : Kébir-Rhumel ;                 | 11 : Macta ;                  | 12 : Medjerda ;               |
| 13 : Sahara ;                       | 14 : Seybouse ;               | 15 : Soummam ;                |
| 16 : Tafna ;                        | 17 : Zahrez.                  |                               |



**Figure II.4.** Situation du bassin versant d'Oued Biskra.

### **II.7.1. Milieux naturels du bassin**

Le bassin versant d'Oued Biskra comportent des éléments naturels impactant son comportement hydrologique. Il est divisé en trois (3) différents milieux naturels qui sont :

#### **II.7.1.1. Montagnes**

Composés principalement de massifs montagneux des Aurès dans le sud du bassin, elles sont aussi constituées par les monts d'Asker (1833 m), Ras Errih (1916 m) et Djebel Azeg (1937 m). Au nord, la chaîne montagneuse de Bellezma s'impose avec ses 2091 m, elle est caractérisée par de forts reliefs en plusieurs chaînons orientés E.N.E.-O.S.O. et dont l'altitude accroit progressivement d'ouest en est pour atteindre leur point culminant au Djebel Rfaa à 2178 m d'altitude ainsi qu'au Djebel Metlili à 1496 m. L'est quant à lui est caractérisé par Djebel El Mahmel avec une altitude de 2321 m et Djebel Ich Ali avec ses 1815 m.

Ces reliefs représentent une barrière naturelle dont le rôle hydrologique se reflète à travers leur influence sur les divers paramètres climatiques.

#### **II.7.1.2. Piedmonts**

Représente une zone de transition entre la montagne et la plaine d'étendant d'est en ouest. A titre d'exemple, le piedmont méridional dont les collines à pente douce et les étendues planes se situent à une altitude variant de 1200 à 1600 m.

#### **II.7.1.3. Plaines**

Représentent la partie plate du bassin se trouvant au nord-est des piedmonts et limitées par les courbes de niveau 800 et 1200 m, utilisées le plus souvent pour les activités agricole saisonnières. Elles sont le plus exposée aux crues qui, par charriage, alimente la zone de dépôts sableux, graveleux et limoneux.

### **II.7.2. Unités hydrologiques du bassin**

L'unité hydrologique du bassin peut être décomposée en trois (3) grands ensembles, à savoir :

#### **II.7.2.1. Bassin supérieur**

Représente une région encadrée de chaînes montagneuses dont l'élévation est faible par exemple le mont de Bellezma avec ses 2091 m. Son nord est couvert de forêts, par contre son sud est dénudés et rocailleux.

Cette zone est caractérisée par une importante alimentation en eau, d'ailleurs elle est drainée par Oued El Hai, Oued Tilatou et Oued Fedhala.

### **II.7.2.2. Bassin moyen**

Englobant la zone du piedmont et une partie de la plaine, ce bassin est entouré d'un certain nombre de montagnes :

- Au nord-ouest par le relief d'Ain Zaatout ;
- Au nord par Djebel Mahmel avec ses 2321 m ;
- Au sud-est par Djebel Lazreg avec ses 1937 m ;
- Au sud, la dépression saharienne d'El Outaya se dresse avec des reliefs moins importants que le précédent bassin et dont l'altitude varie de 300 à 1600 m.

Ce bassin est alimenté par Oued Djemourah formé d'Oued Abdi et Oued Bouzina dont les ramifications prennent source des Djebel El Mahmel et Boutelarmine.

### **II.7.2.3. Bassin inférieur**

Situé au sud du bassin d'oued Biskra, il est limité :

- Au nord par Djemourah,
- A l'est par Djebel Ras Chicha,
- A l'ouest par la plaine d'El Outaya,
- Au sud par Biskra.

Ses reliefs accidentés se caractérisent par des altitudes variant de 200 à 1200 m. Il est drainé par Oued Lafrah qui prenant source de Djebel Ich Oumared à 1270 m, ainsi que d'autres petits cours d'eau sur sa rive droite.

En résumé, le bassin versant d'oued Biskra présente un relief diversifié reflétant la nette opposition topographique montagne-plaine qui lui est propre. Il se divise en ensembles naturels bien déterminés tel que les plaines succèdent aux montagnes en passant par des collines jalonnant la ligne de contact entre ces derniers.

## **II.7.3. Caractéristiques morphologiques du bassin**

Les caractéristiques morphométriques du bassin consistent en : sa forme, son altitude caractéristique ainsi que sa superficie. Ces derniers, combinés ou pris chacun à part, interviennent dans les modalités de l'écoulement, c'est pourquoi il est nécessaire de les présenter.

### **II.7.3.1. Superficie du bassin**

Etant une dimension importante pour les calculs hydrologiques (bilan, module, débit spécifique...), la surface du bassin représente l'aire limitée par le contour de ce dernier et dans lequel l'eau précipité se dirige vers un point bien précis.

En ce qui concerne le bassin d'Oued Biskra, la netteté de ses limites n'est visible que dans les parties montagneuses où les reliefs sont établis, contrairement à la partie Sud du bassin où les plaines à topographie plane ou autres formations perméables dominant. Ainsi, la détermination de la surface du bassin varie d'un opérateur à un autre suivant leur propre établissement des délimitations, le planimétrage ainsi que l'instrumentation et l'échelle utilisées.

**Tableau II.1.** Superficie des sous-bassins d'Oued Biskra.

| <b>Bassin</b>                | <b>Superficie (km<sup>2</sup>)</b> |                |
|------------------------------|------------------------------------|----------------|
|                              | Par planimétrage                   | D'après l'ARNH |
| <b>El Hai</b>                | 1910                               | 2056           |
| <b>Djemourah</b>             | 1029                               | 696            |
| <b>Biskra complémentaire</b> | 208                                | -              |
| <b>Biskra</b>                | 3147                               | 2752           |

L'aire du bassin versant à la station de Biskra est d'environ 3147 km<sup>2</sup>, ce dernier est divisé en trois (03) sous-bassins, à savoir :

- Le sous-bassin d'Oued El Hai, contrôlé par la station hydrométrique qui y sise (El Hai) présente une superficie de 1910 km<sup>2</sup> ;
- Le sous-bassin d'Oued Djemourah, supervisé par la station hydrométrique du même site (Djemourah), possède une superficie de 1029 km<sup>2</sup> ;
- Le sous-bassin d'Oued Biskra complémentaire, libre de tout contrôle, présente une superficie de 208 km<sup>2</sup>.

### **II.7.3.2. Orographie**

L'altitude représente un paramètre important intervenant dans les divers facteurs météorologiques et hydrologiques. En effet, à titre d'exemple, les gradients pluviométriques et thermiques dépendent essentiellement de la pente du relief, et dans certain cas de la vitesse d'écoulement aussi (plus importante en montagne qu'en plaine).

Le tableau suivant regroupe les diverses altitudes caractéristiques des sous-bassins de la zone.

**Tableau II.2.** Altitudes caractéristiques des sous-bassins d'Oued Biskra.

| Bassin              | Altitudes caractéristiques en (m) |           |                     |           |
|---------------------|-----------------------------------|-----------|---------------------|-----------|
|                     | $H_{max}$                         | $H_{min}$ | $H_{max} - H_{min}$ | $H_{moy}$ |
| <b>El Hai</b>       | 2091                              | 164       | 1927                | 956       |
| <b>Djemourah</b>    | 2321                              | 193       | 2128                | 998       |
| <b>Biskra comp.</b> | 1270                              | 150       | 1120                | 410       |
| <b>Biskra</b>       | 2321                              | 150       | 2171                | 950       |

D'après le tableau, l'altitude maximum du bassin d'oued Biskra est de 2321 m et ce au sommet de Djebel El Mahmel, tandis que l'altitude minimum est enregistrée à la station de Biskra avec 150 m, ce qui donne une dénivelée de 2171 m.

Par ailleurs, l'altitude moyenne au niveau de l'ensemble du bassin est de 950 m. Cette altitude est plus important dans le sous-bassin d'Oued Djemourah avec 998 m et n'est que de 410 m au niveau d'Oued Biskra complémentaire.

De plus, la dénivelée impactant la pente hydraulique des vallées et des lits des oueds est plus prononcée dans les sous-bassins d'Oued El Hai et Djemourah avec respectivement 1927 m et 2128 m, par contre elle est moins importante dans le sous-bassin d'Oued Biskra complémentaire avec 1120 m.

Sur l'ensemble du bassin, faible sont les étendues de haute altitude supérieure à 1800 m tels qu'ils correspondent aux massifs montagneux de Bellezma, les monts du Zab et celles des Aurès, taillés par Oued Biskra traversant le bassin du nord au sud-ouest. Cette tranche est d'environ 2,5 % de la surface du sous-bassin d'Oued El Hai et elle inclut les sommets de Bellezma, Ich Ali et Metlili. Elle représente aussi 3 % de la surface du sous-bassin d'Oued Djemourah et englobe les sommets de Djebel El Mahmel, Azeg, Boutlarmine et Djebel Asker.

En ce qui concerne les tranches d'altitude inférieur à 1000 m, ces dernières ne correspondent qu'aux vallées drainées par Oued Biskra, c'est-à-dire 11,5 % de la surface totale d'étude.

Les tranches d'altitude dominante varie d'un sous bassin à un autre. En effet, les tranches 400 – 1000 m à titre d'exemple dominant le bassin d'Oued Biskra avec 65 % de la surface globale.

Sur le sous-bassin d'Oued El Hai, la tranche 500 – 1000 m s'étend sur plus de 50 % de la surface. Le sous-bassin d'Oued Djemourah quant à lui se caractérise par ses reliefs montagneux, c'est pourquoi c'est la tranche 1300 – 1700 m qui domine avec 56 % de la surface ce qui fait de ce sous-bassin connait une importante abondance des précipitations et de l'écoulement.

Enfin, le sous-bassin d'Oued Biskra complémentaire quant à lui connaît une prédominance des reliefs dont l'altitude varie entre 200 et 1200 m avec 77 % de sa surface ce qui fait de ce sous-bassin une zone à haut risque d'inondations.

**II.7.3.3. Forme des bassins**

En plus de la surface et de l'altitude, la forme d'un bassin peut aussi avoir son impact sur l'écoulement et sur l'allure de l'hydrogramme de crue. Ainsi, des bassins ramassés et allongés ne réagiront pas de la même manière malgré la similarité des autres conditions.

Cette caractéristique s'exprime à travers divers indices, dont l'indice de compacité de Gravelluis qui peut être défini comme étant le rapport du périmètre stylisé du bassin au périmètre d'un cercle ayant la même surface. Plus l'indice se rapproche de l'unité plus la forme du bassin sera ramassée et par conséquent le temps de concentration de l'eau court.

**Tableau II.3.** Calcul de l'indice de compacité pour les sous-bassins d'Oued Biskra.

| <b>Bassin</b>                | <b>Superficie (km<sup>2</sup>)</b> | <b>Périmètre</b> | <b>Indice de compacité</b> |
|------------------------------|------------------------------------|------------------|----------------------------|
| <b>El Hai</b>                | 1788                               | 229              | 1.52                       |
| <b>Djemourah</b>             | 906                                | 184              | 1.71                       |
| <b>Biskra complémentaire</b> | 93                                 | 99               | 2.87                       |
| <b>Biskra</b>                | 2787                               | 250              | 1.33                       |

Le tableau ci-dessus permet de montrer que le sous-bassin le plus compacté (ou ramassé) est celui d'Oued Biskra avec un indice de compacité  $K_c = 1,33$ . Cette compacité est inversement proportionnel à la surface, tel que l'indice au niveau d'Oued Biskra complémentaire est de  $K_c = 2,87$ , ce qui se traduit par une forme très allongée et donc un temps de concentration très élevé. C'est aussi le cas en ce qui concerne les sous-bassins d'Oued El Hai et Oued Djemourah avec, respectivement, 1,52 et 1,71.

Globalement, le bassin d'Oued Biskra dans son ensemble présente une forme allongée favorisant un temps d'acheminement de l'eau à l'exutoire important, et par conséquent de faibles débits de pointes de crues.

Le calcul de l'indice de compacité dépend essentiellement de la géométrie du bassin assimilé à un plan horizontal. Et même si ce dernier possède une certaine influence sur l'écoulement, il ne permet pourtant pas de prédire la forme des hydrogrammes de crues malgré leur dépendance des formes des divers bassins d'étude. Néanmoins, ceci peut être vrai pour les bassins de grandes tailles, où l'effet de la surface limite l'influence des autres facteurs physico géographiques qui

influencent l'écoulement et dont le plus prédominant n'est pas la forme du bassin mais son système de pente.

Au final, cet indice permet, entre autre, de comparer le comportement des bassins appartenant au même domaine géographique, quoique ses résultats doivent toujours susciter une certaine remise en cause du fait que son calcul dépend de la manière de déterminer le périmètre stylisé.

### **II.7.3.4. Réseau hydrographique**

Il représente l'ensemble des cours d'eau, affluents et sous affluents permanents ou temporaires, par lesquels s'écoulent toutes les eaux de ruissellement et convergent vers un seul point de vidange du bassin versant qui est l'exutoire.

Le réseau hydrographique d'Oued Biskra, principal oued de la région, est composé d'un grand nombre d'affluents et sous affluents collectant les eaux de ruissellement, et ce du sud-ouest de l'Aurès au nord de la ville qu'il traverse pour se déverser dans le Chott Melghir.

Cet oued est la conséquence d'une jonction entre deux (2) affluents : Oued El Hai et Oued Djemourah, drainant respectivement une superficie de 1788 et 906 km<sup>2</sup>. Leur confluence génère Oued Biskra à une altitude de 200 m.

A l'instar d'Oued Biskra, Oued Djemourah résulte aussi de la jonction de deux (2) oueds qui sont : Oued Abdi prenant source du Djebel Lazreg de 1937m et Djebel Boutlarmine avec ses 2178m, il coule vers le sud-ouest.

Oued El Hai quant à lui prend origine sur les flancs de l'Atlas Saharien, qui à son tour prend naissance de la confluence des deux oueds : Fedhala issue du djebel Ich Ali dont l'altitude est de 1815 m et Tilatou descendant des monts de Bellezma de 2091 m. Il coule dans la direction S.E.-N.O. Ce dernier est à l'origine d'Oued Bouaoun, qui suite à sa jonction avec Oued Doufana forme Oued Fedhala s'écoulant du N.O.-S.O.

Malgré le fait d'être alimenté par des cours d'eau d'écoulement périodique, Oued El Hai reste relativement permanent drainant à l'aval de la station d'El Kantara, les massifs de Metlili, Mekrizane et Haouidja. Néanmoins il lui arrive de se perdre dans les dépôts de sable et de gravier de son lit pendant les périodes d'étiages.

Oued Bouzina coule depuis Djebel El Mahmal en contre bas de la plaine de Nerdj jusqu'au Khanguet El Anseur. Il traverse le flanc sud-est du synclinal atteignant par la suite Oued Abdi à Menaâ, cette rencontre forme Oued Djemourah recevant par sa rive gauche Oued Bougatou.

Enfin, Oued Laftah lui prend source de Djebel Ich Oumared du haut de ses 1270 m. Il reçoit sur sa rive droite le petit cours d'eau d'Oued Besbes, En réalité, cet oued est similaire à un ravin saisonnier montrant de haut risque d'inondation en période de crue.

Le temps de concentration est défini comme étant le temps mis par une particule d'eau tombée sur le point le plus éloigné du bassin versant pour arriver à l'exutoire, et peut être déterminé par divers formules parmi lesquelles celle de Giandotti.

Souvent utilisé dans l'étude des crues, il permet aussi de comparer différents bassin d'un point de vue hydrologique. Ce dernier est assez important au niveau des sous-bassins d'Oued El Hai et Djemourah situés au nord avec respectivement 15 heures et 11,47 heures, et ce en raison de l'importance du volume montagneux et la forte incision du relief. Par contre, il est court au niveau du sous-bassin d'Oued Biskra complémentaire avec 6,62 heures en raison de sa faible extension.

Enfin, la prédominance des plaines dans la partie sud ainsi que l'augmentation de la surface du bassin et sa forme allongée font que le temps de concentration qui caractérise l'ensemble du bassin est plus long avec 17 heures.

CHAPITRE III  
COLLECTE ET CRITIQUE  
DES DONNEES

---

## CHAPITRE III : Collecte et critique des données

### III.1. Introduction

L'étude d'un phénomène hydrométéorologique tel que les précipitations, la température, le débit... requière l'analyse des données hydrologiques disponibles. Ces dernières représentent généralement le seul outil permettant à l'hydrologue d'étudier et d'assimiler un phénomène hydrométéorologique, et même arriver à prendre des décisions dans ce domaine.

C'est pourquoi, il est nécessaire d'avoir une certaine maîtrise des diverses techniques d'analyse et de critiques de donnée. Leur application permet à l'hydrologue de tirer un maximum d'informations de l'échantillon étudié, d'examiner et évaluer la qualité des conclusions tirées mais aussi d'avoir une idée des risques que comportent une génération à partir des données partielles.

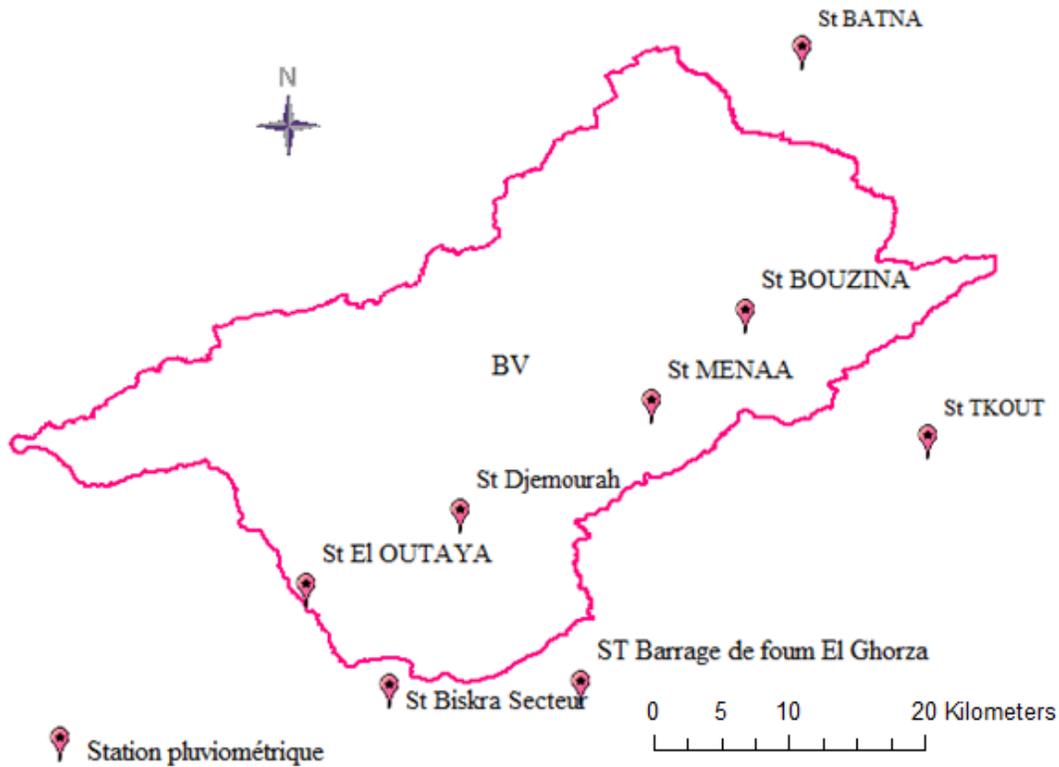
Ces techniques font appeler à des échantillons dont la qualité et à vérifier, De telle sorte qu'avant l'application, les lacunes des données manquantes soient comblées, et les valeurs singulières (dont le réalisme est aberrant) détectées.

### III.2. Inventaire des données

Les données recueillies sont relatives aux enregistrements suivants :

- Données pluviométriques (pluies journalières) ;
- Données hydrométriques (débits journaliers).

Le réseau pluviométrique de la zone d'étude est assez important, tel qu'il est composé d'une dizaine de stations environ. Parmi ces stations, huit (08) postes pluviométriques permettront l'analyse à travers les enregistrements qu'ils comportent, dont cinq (5) se trouvent à l'intérieur du bassin versant d'Oued Biskra et trois (3) à son voisinage proche comme il est représenté dans la figure suivante.



**Figure III.1.** Disposition des stations pluviométriques de l'étude.

Les autres stations de la zone d'étude ne sont pas prises en considération et ce en raison de leur période d'observation courte et des nombreuses lacunes qu'elles contiennent.

Le tableau suivant donne un aperçu clair des caractéristiques ainsi que des périodes de fonctionnement des postes retenus pour l'étude.

**Tableau III.1.** Caractéristiques des stations utilisées pour l'étude.

| Nom de la station | Code de la station | Coordonnées |           |              | Période d'observation |
|-------------------|--------------------|-------------|-----------|--------------|-----------------------|
|                   |                    | Latitude    | Longitude | Altitude (m) |                       |
| <b>Batna</b>      | 07 03 16           | 35°33'N     | 6°10'E    | 1040         | 70/13                 |
| <b>Biskra</b>     | 06 14 16           | 34°50'N     | 5°44'E    | 130          | 73/13                 |
| <b>Bouzina</b>    | 06 13 04           | 35°16'N     | 6°05'E    | 1350         | 72/13                 |
| <b>Djemourah</b>  | 06 13 05           | 35°06'N     | 5°42'E    | 400          | 69/13                 |

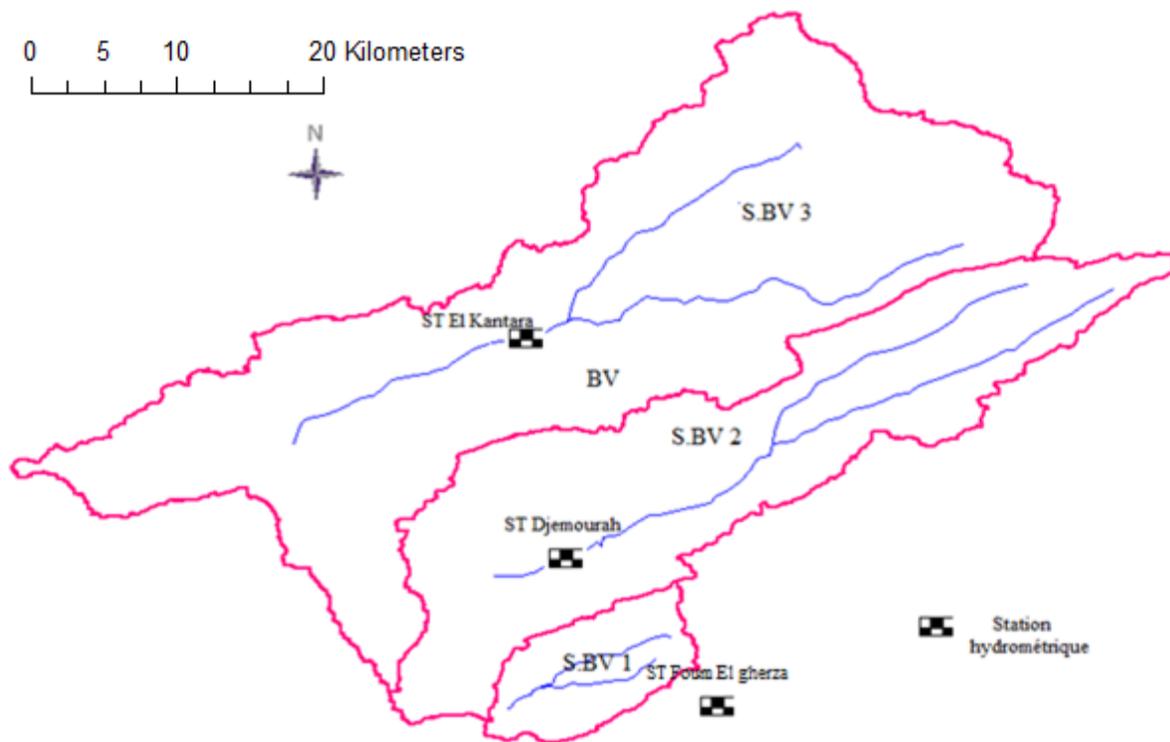
|                                  |          |         |        |      |       |
|----------------------------------|----------|---------|--------|------|-------|
| <b>El Outaya</b>                 | 06 12 05 | 34°58'N | 5°34'E | 222  | 70/98 |
| <b>Barrage de Foum El Gherza</b> | 06 16 01 | /       | /      | /    | 50/15 |
| <b>Mena</b>                      | 06 13 04 | 35°07'N | 6°05'E | 1005 | 68/13 |
| <b>Tkout</b>                     | 06 15 05 | 35°09'N | 6°20'E | 980  | 71/13 |

Au niveau du bassin versant d'Oued Biskra, il existe deux (2) stations permettant la mesure des débits, à savoir :

- La station d'El Kantara située sur Oued El Hai, à quelques kilomètres à l'amont du barrage « Les fontaines des gazelles ». Cette station, dont le code est (06 12 01), couvre la période allant de 1968 à 1995.
- La station de Djemourah installée sur Oued Djemourah et désignée par le code (06 13 01). Elle possède une série de 23 ans s'étalant de 1972 à 1994.

De plus, une troisième s'ajoute aux deux précédentes : celle du barrage de Foum El Gherza qui se trouve à l'extrémité sud du bassin versant. Elle dispose d'une série de 64 ans de 1950 à 2013.

Ces trois stations sont représentées dans la figure suivante.



**Figure III.2.** Disposition des stations hydrométriques de l'étude.

Le tableau ci-dessous rassemble les caractéristiques morphométriques des sous-bassins des stations d'El Kantara et de Djemourah.

**Tableau III.2.** Caractéristiques des sous-bassins des stations d'El Kantara et de Djemourah.

|   |             |           |
|---|-------------|-----------|
| <b>Code de la station</b>                         | 06 12 01    | 06 13 01  |
| <b>Nom de la station</b>                          | EL KANTARA  | DJEMOURAH |
| <b>Nom de l'Oued</b>                              | EL HAI      | DJEMOURAH |
| <b>Surface du bassin versant (Km<sup>2</sup>)</b> | 1910        | 1029      |
| <b>Longueur de l'oued principal (Km)</b>          | 108,86      | 97,96     |
| <b>Coefficient de compacité Kc</b>                | 1,52        | 1,71      |
| <b>Densité de drainage (Km/Km<sup>2</sup>)</b>    | 0,782       | 0,757     |
| <b>Altitude (m)</b>                               | <b>Max.</b> | 2091      |
|   | <b>Min.</b> | 193       |
|   | <b>Moy.</b> | 956       |
| <b>Période d'observation</b>                      | 68-95       | 72-94     |

### **III.3. Critique des données**

Les données hydrométéorologiques sont issues de mesures effectuées sur terrain, et ce dans des conditions naturelles dont les facteurs influençant la grandeur à mesurer peuvent être nombreux et parfois même indésirables.

De même, les données fournies peuvent aussi être entachées d'erreurs de natures accidentelles ou systématiques. Si les erreurs accidentelles se composent statistiquement, les erreurs systématiques elles ne peuvent être rectifiées, ce qui peut entraîner une rupture de l'homogénéité de la série d'étude et par conséquent fausser l'exploitation ultérieure des données. C'est pourquoi un contrôle de la qualité des données à utiliser est plus que nécessaire.

Les différentes méthodes de critiques des données sont basées sur le comblement des lacunes de l'échantillon ainsi que l'élimination des valeurs singulières.

Certaines de ces méthodes sont présentées ci-dessous.

### **III.3.1. Méthodes de comblement de lacunes**

Les lacunes remarquées dans les séries de pluies et de débits peuvent être de plusieurs formes, tel que certaines d'entre elles concernent plusieurs années distinctes, tandis que d'autres touchent différents mois d'une même année. Ceci peut être dû à de nombreuses causes, à savoir : une absence de mesure, un défaut de transmission, une erreur de stockage, une manipulation erronée...

Dans le cas de cette étude, le comblement des données manquantes a principalement été effectué au niveau de cinq (5) stations pluviométriques, celle de : Biskra, Bouzina, Djemourah, El Outaya et Menaâ.

Pour ce faire, deux (2) méthodes ont été utilisées afin d'aboutir aux résultats souhaités : celle de la moyenne mensuelle interannuelle et celle de la régression linéaire.

#### **III.3.1.1. Calcul de la moyenne mensuelle interannuelle**

Dans cette méthode, les données mensuelles sont sous forme d'une matrice ( $n * p$ ) représentant le nombre d'observations, telles que les  $n$  lignes représentent les années et les  $p$  colonnes désignent les mois. Dans cette matrice, les vides pouvant existés correspondent aux lacunes d'observations.

Si les lacunes ne sont pas importantes, alors le comblement des valeurs manquantes par la méthode de la moyenne mensuelle interannuelle est utilisé.

$$[X] = \begin{pmatrix} X(1,1) & Inconnu & \dots & X(1,j) & \dots & X(1,p) \\ X(2,1) & X(2,2) & \dots & X(2,j) & \dots & Inconnu \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Inconnu & \dots & \dots & \dots & \dots & Inconnu \\ X(i, 1) & X(i, 2) & \dots & X(i, j) & \dots & X(i, p) \\ \dots & Inconnu & \dots & Inconnu & \dots & \dots \\ X(n, 1) & X(n, 2) & \dots & X(n, j) & \dots & X(n, p) \end{pmatrix}$$

Le comblement des valeurs manquantes se fait en remplaçant cette dernière par la moyenne mensuelle interannuelle, où :

$$M_j = \frac{1}{q_j} \sum_{i=1}^p X(i, j)$$

Avec :

$$q_j = n - (\text{nombre d'inconnues de la colonne } j)$$

### III.3.1.2. Méthode de la régression linéaire simple

Dans cette méthode, on considère  $X$  et  $Y$  deux échantillons, avec  $n$  observations  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , et  $y_1, y_2, \dots, y_n$ , correspondant à deux mesures simultanées de précipitations effectuées sur deux stations différentes.

Dans le cas où les stations sont assez proches, il y a possibilité alors que les observations soient plus ou moins similaires. Ainsi, la connaissance d'une des variables permettra donc, d'une certaine manière, de prédire quantitativement et qualitativement l'autre.

Théoriquement, on appelle le modèle de régression linéaire sur les données expérimentales, la méthode des moindres carrés reprenant sur l'échantillon la propriété que  $E(y/x) = \alpha + \beta * x$  est la meilleure approximation de  $y$  par  $x$  en moyenne quadratique. Le but alors est d'ajuster au nuage de points  $(x_i ; y_i)$  une droite d'équation  $Y^* = a * x + b$ .

Dans la plupart des cas, les observations ne sont pas alignées, par conséquent la droite n'est pas bien définie. Il faut donc établir certains critères pour obtenir la droite de régression linéaire optimale, tel que :

- La somme des carrés des distances de chacun des points à la droite soit la plus petite possible (c'est-à-dire  $\sum(y_i - y_i^*)^2$  soit minimale).
- L'application de la méthode des moindres carrés pour la détermination des paramètres  $a$  et  $b$  :

$$\sum (y_i - y_i^*)^2 = \sum (y_i - a - bx_i)^2 = F(a, b)$$

Ce minimum est atteint pour  $\frac{\partial F}{\partial a} = \frac{\partial F}{\partial b} = 0$ , ceci donne les deux équations suivantes :

$$\sum (y_i - a - bx_i)^2 = 0 \quad \text{et} \quad \bar{y} = a + b\bar{x}$$

Dont la solution est :

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = r \frac{S_y}{S_x}$$

D'où :

$$y^* = \bar{y} + r \frac{S_y}{S_x(x - \bar{x})}$$

**III.3.2. Comblement des lacunes**

**III.3.2.1. Comblement par la moyenne mensuelle interannuelle**

Des lacunes à l'échelle mensuelle pendant quelques années ont été observées au niveau des stations de Mena, Djemourah, Biskra et Bouzina. Dans ce cas, les valeurs manquantes ont été remplacées par la moyenne mensuelle interannuelle.

Le tableau ci-dessous indique l'emplacement et le remplacement des lacunes par cette méthode pour les quatre (4) stations susmentionnées.

**Tableau III.3.** Comblement des lacunes par la méthode de la moyenne mensuelle interannuelle.

| Station          | A/M  | Sep  | Oct. | Nov. | Déc. | Jan  | Fév. | Mar  | Avr. | Mai | Juin | Juill. | Aout |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|--------|------|
| <b>Mena</b>      | 1992 |      |      | 24,7 |      |      | 21,8 |      |      |     |      |        |      |
|                  | 1993 |      | 24,6 |      |      |      |      |      |      |     |      |        |      |
|                  | 2000 |      | 24,6 |      |      |      |      |      | 25,5 |     |      | 2,8    | 9,1  |
|                  | 2001 |      |      |      |      |      | 21,8 |      |      |     |      |        |      |
|                  | 2003 |      |      |      |      |      |      |      | 25,5 |     |      |        |      |
|                  | 2004 |      |      |      |      |      |      |      |      |     | 10,9 |        |      |
|                  | 2007 |      |      |      |      |      |      |      |      |     | 10,9 |        |      |
|                  | 2008 | 29,6 |      |      |      | 22,1 |      |      |      |     |      |        |      |
|                  | 2010 |      |      |      |      |      |      |      |      |     | 10,9 |        |      |
| <b>Djemourah</b> | 1972 |      |      | 15,1 |      |      |      |      |      |     |      |        |      |
|                  | 1973 |      |      |      |      |      |      |      |      |     |      |        | 4,6  |
|                  | 1977 |      |      |      |      |      |      |      | 15,6 |     |      |        |      |
|                  | 1979 |      |      |      |      |      |      |      |      |     |      | 0,7    |      |
|                  | 1981 | 12,3 |      |      |      |      |      |      |      |     |      |        |      |
|                  | 1982 |      | 12,4 |      |      |      |      |      |      |     |      |        |      |
|                  | 1983 |      |      |      |      |      |      |      |      |     | 3,9  |        |      |
|                  | 1990 |      |      |      |      |      |      |      |      |     | 3,9  |        |      |
|                  | 1991 |      | 12,4 |      |      |      |      |      |      |     |      |        |      |
|                  | 1992 |      |      |      |      |      |      | 12,2 |      |     |      |        |      |
|                  | 1993 | 12,3 |      |      |      |      |      |      | 13,1 |     |      | 0,7    |      |
|                  | 2005 | 12,3 |      |      |      |      |      |      |      |     |      |        |      |
|                  | 2006 |      |      |      | 15,1 |      |      |      |      |     |      |        |      |
|                  | 2007 |      |      |      | 15,1 | 18,3 |      |      |      |     |      |        |      |

|                |      |      |      |      |     |      |  |      |      |      |     |      |     |
|----------------|------|------|------|------|-----|------|--|------|------|------|-----|------|-----|
| <b>Biskra</b>  | 1973 | 13,3 | 13,8 | 17,5 | 9,4 |      |  |      |      |      |     |      |     |
|                | 1975 | 13,3 | 13,8 | 17,5 |     |      |  |      |      |      |     |      |     |
|                | 1976 |      | 13,8 |      |     |      |  |      |      |      |     |      |     |
|                | 1977 |      |      |      |     |      |  |      |      |      | 0,5 | 2,1  |     |
|                | 1978 | 13,3 |      | 17,5 |     |      |  |      |      |      |     |      |     |
|                | 1981 |      |      |      |     |      |  | 14,0 | 11,8 |      |     |      |     |
|                | 1982 |      |      |      |     |      |  |      |      | 4,1  |     |      |     |
|                | 1989 |      |      |      |     |      |  |      |      |      | 0,5 |      |     |
|                | 1992 |      |      |      |     | 14,4 |  |      |      |      |     |      |     |
|                | 1997 |      | 13,8 |      |     |      |  |      |      |      |     |      |     |
|                | 2003 | 13,3 |      |      |     |      |  |      |      |      |     |      |     |
|                | 2009 |      |      |      |     |      |  |      |      |      |     |      | 2,1 |
| <b>Bouzina</b> | 1977 | 37,7 | 25,0 | 32,0 |     |      |  |      |      |      |     |      |     |
|                | 1979 |      | 25,0 |      |     |      |  |      |      |      |     |      |     |
|                | 1987 |      |      |      |     |      |  | 33,5 | 27,8 | 14,2 | 2,8 | 12,0 |     |
|                | 1996 |      |      |      |     |      |  |      |      | 14,2 |     |      |     |
|                | 2005 | 37,7 |      |      |     |      |  |      |      |      |     |      |     |
|                | 2008 | 37,7 | 25,0 | 32,0 |     |      |  |      |      |      |     |      |     |
|                | 2009 |      | 25,0 |      |     |      |  |      |      |      |     |      |     |
|                | 2010 | 37,7 | 25,0 |      |     |      |  |      |      |      |     |      |     |

### III.3.2.2. Comblement par régression linéaire

Cette technique est utilisée dans le cas où des séries pluviométriques présentent des années sans mesure et pleines de lacunes. Dans ce cas, la reconstitution des valeurs manquantes se fait en corrélant chaque station avec les stations voisines ayant fonctionnées durant l'année manquante de la station à combler, et en déterminant les équations de régressions linéaires qui correspondent aux coefficients de corrélation ( $R^2$ ) le plus importants.

Ainsi, à titre d'exemple :

- La station de Menaâ entre 1999 et 2002 a été reconstituée par les données de la station de Tkout ;
- La station de Bouzina durant les années 1970-1976, 2003 et 2004 par la station de Menaâ et l'année 2002 par la station de Tkout ;
- La station de Biskra au cours des années 1970-1972, 2006 et 2010 par la station de Djemourah ;

- Et enfin, Les pluies annuelles des années 1980-1983, 1994-1996, 1998 et 2003-2010 à la station d'El Outaya ont été reconstituées à l'aide de celles de la station de Menaâ et des années 1999-2002 par celle de la station de Tkout.

Les coefficients de corrélations, les équations de régression ainsi que les données reconstituées aux stations sur une période commune de 1970 à 2010 sont représentées dans les tableaux suivants.

**Tableau III.4.** Détermination des coefficients de corrélation et des équations de régression par la méthode de la régression linéaire.

|            | Menaâ       | Bouzina           | Djemour-ah  | Biskra            | Tkout             | Batna       | El Outaya         |
|------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------------|-------------|-------------------|
| Menaâ      | $R^2 = 1,0$ | $R^2 = 0,7^{(1)}$ | $R^2 = 0,1$ | $R^2 = 0,3$       | $R^2 = 0,7^{(2)}$ | $R^2 = 0,4$ | $R^2 = 0,7^{(3)}$ |
| Bouzina    |             | $R^2 = 1,0$       | $R^2 = 0,5$ | $R^2 = 0,0$       | $R^2 = 0,6^{(4)}$ | $R^2 = 0,0$ | $R^2 = 0,3$       |
| Djemour-ah |             |                   | $R^2 = 1,0$ | $R^2 = 0,7^{(5)}$ | $R^2 = 0,0$       | $R^2 = 0,1$ | $R^2 = 0,0$       |
| Biskra     |             |                   |             | $R^2 = 1,0$       | $R^2 = 0,5$       | $R^2 = 0,1$ | $R^2 = 0,0$       |
| Tkout      |             |                   |             |                   | $R^2 = 1,0$       | $R^2 = 0,3$ | $R^2 = 0,6^{(6)}$ |
| Batna      |             |                   |             |                   |                   | $R^2 = 1,0$ | $R^2 = 0,3$       |
| El Outaya  |             |                   |             |                   |                   |             | $R^2 = 1,0$       |

(1) :  $Y = 0,8661x + 86,737$

(2) :  $Y = 0,6814x + 50,395$

(3) :  $Y = 0,5948x - 48,452$

(4) :  $Y = 0,7743x + 75,882$

(5) :  $Y = 0,6566x + 25,832$

(6) :  $Y = 0,3761x - 9,7795$

**Tableau III.5.** Reconstitution des données sur la période 1970 – 2010 par la méthode de la régression linéaire.

| <b>Biskra</b> |       |
|---------------|-------|
| 1970          | 238,0 |
| 1971          | 31,4  |
| 1972          | 203,8 |
| 2006          | 104,1 |
| 2010          | 158,0 |

| <b>Bouzina</b> |       |
|----------------|-------|
| 1970           | 234,4 |
| 1971           | 391,1 |
| 1972           | 338,8 |
| 1973           | 204,5 |
| 1974           | 298,5 |
| 1975           | 280,8 |
| 1976           | 460,7 |

| <b>El Outaya</b> |       |      |       |
|------------------|-------|------|-------|
| 1980             | 99,8  | 2001 | 165,1 |
| 1981             | 71,5  | 2002 | 126,4 |
| 1982             | 72,9  | 2003 | 88,8  |
| 1983             | 36,5  | 2004 | 143,7 |
| 1994             | 65,0  | 2005 | 143,7 |
| 1995             | 250,6 | 2006 | 83,2  |
| 1996             | 24,6  | 2007 | 27,5  |
| 1998             | 31,2  | 2008 | 163,5 |
| 1999             | 81,5  | 2009 | 165,6 |
| 2000             | 69,4  | 2010 | 161,5 |

| <b>Mena</b> |       |
|-------------|-------|
| 1999        | 215,7 |
| 2002        | 297,1 |

### III.4. Détection des valeurs singulières

Les valeurs singulières sont des valeurs irréalistes et aberrantes comparées aux autres valeurs de l'échantillon, elles peuvent être extrêmement inférieure ou même supérieure. Les valeurs singulières peuvent provenir d'une pluie causée par une situation climatique très différente de celles des autres pluies de l'échantillon ou par une erreur de lecture.

La présence d'une ou de plusieurs valeurs singulières peut avoir un impact considérable sur la qualité d'un ajustement, c'est pourquoi il est nécessaire de les détecter en effectuant des tests tels que celui de Grubbs-Beck (1972).

#### III.4.1. Test de Grubbs-Beck

Le test de Grubbs-Beck consiste à calculer les statistiques suivantes :

$$X_h = EXP(\bar{X} + K_n \times S)$$

$$X_l = EXP(\bar{X} - K_n \times S)$$

Avec :

$X_h$  : Valeur maximale que ne doivent pas dépasser les valeurs de l'échantillon.

$X_l$  : Valeur minimale que ne doivent pas atteindre les valeurs de l'échantillon.

$\bar{X}$  et  $S$  : Sont respectivement la moyenne et l'écart-type des logarithmes népériens des éléments constituant l'échantillon.

$K_n$  : Valeur statistique du test de Grubbs et Beck, tabulée pour différentes tailles d'échantillon ( $n$ ) et de niveaux de signification ( $\alpha$ ).

Pour un niveau de significations  $\alpha$  de 10%, les recherches de Stedinger et al. en 1993 ont permis de fournir une approximation précise de la valeur  $K_n$  pour  $5 \leq n \leq 150$ , tel que :

$$K_n \approx -0,9043 + 3,345\sqrt{\log_{10} n} - 0,4046 \log_{10} n$$

Les résultats de ce test démontrent que les valeurs de l'échantillon supérieures à  $X_h$  sont considérées comme étant des valeurs singulières supérieures, tandis que toutes les valeurs inférieures à  $X_l$  sont considérées comme valeurs singulières inférieures. Ces valeurs sont par la suite comparées avec les observations des autres stations pour identifier ainsi la raison de la présence de cette valeur singulière.

Les tableaux III.6 et III.7 ci-dessous présentent les résultats de l'application du test de Grubbs et Beck sur toutes les stations pluviométriques et hydrométriques.

**Tableau III.6.** Résultats de l'application du test de Grubbs et Beck sur les pluies annuelles.

| Station        | $X_h$ | $X_l$ |
|----------------|-------|-------|
| Batna          | 782,5 | 176,1 |
| Biskra         | 498,7 | 26,7  |
| Bouzina        | 642   | 125,9 |
| Djemourah      | 733,4 | 20,1  |
| El Outaya      | 559   | 10,9  |
| Foum El Gherza | 463,7 | 58,8  |
| Mena           | 625,1 | 78,2  |
| Tkout          | 935,3 | 80,3  |

**Tableau III.7.** Résultats de l'application du test de Grubbs et Beck sur les débits moyens annuels.

| Station        | $X_h$ | $X_l$ |
|----------------|-------|-------|
| Djemourah      | 17,01 | 0,55  |
| El Kantara     | 40,67 | 0,27  |
| Foum El Gherza | 61,71 | 0,76  |

#### III.4.2. Analyse des résultats

Par suite de l'application du test, aucune valeur singulière supérieure n'a été détectée. Par contre, plusieurs valeurs singulières inférieures ont été remarquées.

Les valeurs des pluies totales annuelles et des débits moyens ainsi que les valeurs singulières observées sont regroupées dans les tableaux suivants.

**Tableau III.8.** Valeurs singulières détectées dans les stations pluviométriques.

| Année | Station   | Valeur observée | Valeur maximale calculée |
|-------|-----------|-----------------|--------------------------|
| 1971  | Djemourah | 8,5             | 20,3                     |
| 1973  | Tkout     | 42,5            | 80,3                     |
| 1983  | Biskra    | 24,3            | 26,7                     |
| 1990  | El Outaya | 5,7             | 10,9                     |

**Tableau III.9.** Valeurs singulières détectées dans les stations hydrométriques.

| Année | Station    | Valeur observée | Valeur maximale calculée |
|-------|------------|-----------------|--------------------------|
| 1987  | Djemourah  | 0,49            | 0,55                     |
| 1993  | El Kantara | 0,11            | 0,27                     |

On peut donc conclure que les valeurs singulières détectées au niveau de ces stations ne correspondent pas à des erreurs, mais plutôt à des événements exceptionnels, par conséquent, ces valeurs ne seront pas rejetées.

CHAPITRE IV  
CARACTERISATION  
DE LA VARIABILITE  
CLIMATIQUE

---

## CHAPITRE IV : Caractérisation de la variabilité climatique

### IV.1. Introduction

La caractérisation des éventuelles fluctuations climatiques d'une région repose entre autre sur l'analyse des séries chronologiques de données de pluie et ce à différentes stations de mesures, sur un large nombre possible et de manière à couvrir de longues périodes

L'abondance des littératures concernant l'étude statistique des séries chronologiques de variables climatiques est assez importante. Généralement, cette étude statistiques comprend d'un côté la tendance, et d'un autre le repérage et la détection des changements brutaux des caractéristiques de loi de distribution des variables. En outre, des outils non statistiques existent aussi, ces derniers permettent aussi d'analyser la variabilité climatique telle que l'évolution des indices pluviométriques.

### IV.2. Méthodologie mise en œuvre

Dans cette partie, on présentera les différentes méthodes statistiques et graphiques utilisées lors de notre étude afin d'analyser la variabilité des précipitations annuelles.

#### IV.2.1. Utilisations des indices pluviométriques

En vue d'apprécier l'évolution de la pluviométrie au cours des différentes années, la méthode de l'indice pluviométrique est appliquée. Cette méthode repose sur la caractérisation de l'aspect variable de la pluviométrie au niveau local ou régional, dans le but de faire ressortir les périodes excédentaires et déficitaires.

Pour ce faire, un indice pluviométrique est déterminé pour chaque poste pluviométrique retenu. Cet indice est positif pour les stations présentant une année excédentaire, et est négatif lorsque l'année est déficitaire. Il est défini comme une variable centrée réduite, suivant (Servat *et al.*, 1998), exprimé par l'équation suivante :

$$I_i = \frac{X_i - \bar{X}}{S}$$

Avec :

$X_i$  : Valeur de la pluviométrie annuelle de l'année  $i$ ;

$\bar{X}$  : Valeur moyenne interannuelle de la pluviométrie sur la période étudiée ;

$S$  : Valeur interannuelle de l'écart-type de la pluviométrie sur la période étudiée.

#### IV.2.2. Analyse spatio-temporelle des indices pluviométriques

L'analyse de la variation spatio-temporelle de la pluviométrie repose sur l'utilisation des indices pluviométriques moyens calculés sur les quatre décennies dont les données sont disponibles, à savoir : 1970 - 1979 ; 1980 - 1989 ; 1990 - 1999 ; 2000 - 2010

La base de données obtenue est alors exportée vers le logiciel Arcgis, au niveau duquel une interpolation de type krigeage a été effectuée dans le but de générer la carte thématique.

Le krigeage est une méthode stochastique d'interpolation spatiale permettant d'estimer les valeurs de la variable régionalisée étudiée aux points non échantillonnés et ce en utilisant une combinaison de données aux points mesurés, ceci se fait en tenant compte de la distance et du degré de variation entre ces points (Baillargeon, 2005). Elle représente une méthode d'estimation linéaire sans biais caractérisée par sa minimisation de la variance d'estimation (Lawin *et al.*, 2012).

Suivant Arnaud et Emery (2000), cette méthode d'estimation est la plus efficace en raison de la justesse des interpolations spatiales qu'elle génère.

Dans le présent travail, le krigeage utilisé est un krigeage ordinaire vu qu'il est le plus fréquemment utilisé dans ce genre d'étude (Gratton, 2002). Pour ce faire, deux (2) étapes ont été suivies :

- Construction du variogramme expérimental et estimation du variogramme modèle, qui est une fonction mathématique modélisant la tendance dans le variogramme expérimental dont l'expression est la suivante :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2$$

Avec :

$\gamma(h)$  : Valeur du variogramme expérimental pour une distance  $h$  ;

$Z(x_i)$  et  $Z(x_i + h)$  : Valeurs de la variable aléatoire  $Z$  aux stations  $x_i$  et  $x_i + h$  respectivement ;

$N(h)$  : Nombre de paires de stations séparées par la distance  $h$ .

- Utilisation du variogramme modèle pour déterminer les poids des échantillons utilisés pour le Krigeage ordinaire, dont l'équation de base est donnée par :

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n W_i Z(x_i)$$

Avec :

$Z^*(x_0)$  : Estimateur de la variable aléatoire  $Z$  au point  $x_0$  ;

$W_i$  : Poids du Krigeage ;

$Z(x_i)$  : Valeur observée de la variable aléatoire  $Z$  au point  $x_i$  ;

$n$  : Nombre de points voisins utilisés pour l'estimation de  $Z^*(x_0)$ .

Les variogrammes expérimentaux et modèles sont construits pour chaque décennie. En ce qui concerne l'estimation des paramètres du variogramme modèle, ces derniers ont été faits par ajustement à l'œil nu des variogrammes empiriques, par les méthodes des moindres carrés et de vraisemblance (Ribeiro et Diggle, 2001). Les paramètres de la méthode ajustant le mieux la tendance du variogramme expérimental ont été alors retenus pour le Krigeage.

### IV.2.3. Détection de rupture

A l'issue d'une étude établie au sein du programme ICCARE (Lubès *et al.*, 1994), diverses méthodes statistiques de détection de ruptures ont été retenues. Ces ruptures peuvent être définies par un changement dans la loi de probabilité de la série chronologique à un instant donné, le plus souvent inconnu.

#### IV.2.3.1. Test de Pettitt

Le test de Pettitt (1979) se caractérise par sa robustesse et son aspect non-paramétrique, il dérive de la formulation du test de Mann-Whitney. L'absence d'une rupture dans une série chronologique  $X$  constitue l'hypothèse nulle  $H_0$ . Pettitt définit la variable  $U_{t,N}$  :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij}$$

$$\text{Où } D_{ij} = \text{sgn}(x_i - x_j), \text{ avec } \begin{cases} \text{sgn}(z) = 1 \text{ si } z > 0 \\ \text{sgn}(z) = 0 \text{ si } z = 0 \\ \text{sgn}(z) = -1 \text{ si } z < 0 \end{cases}$$

Il propose de tester l'absence de rupture (l'hypothèse nulle) en utilisant la statistique  $K_N$ , définie par le maximum en valeur absolue de  $U_{t,N}$  pour  $t$  variant de 1 à  $N - 1$ .

À partir de la théorie des rangs, Pettitt montre que si  $K$  désigne la valeur de  $K_N$  prise sur la série étudiée, sous l'hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur  $K$  est donnée approximativement par :

$$Prob(K_N > K) \approx 2\exp\left(-\frac{6K^2}{N^3 + N^2}\right)$$

Pour un risque  $\alpha$  donné ( $\alpha = 5\%$  dans notre cas), l'hypothèse nulle est rejetée si la probabilité de dépassement est inférieure à la valeur de  $\alpha$ . Dans ce cas, la série comporte une rupture localisée au moment où est observé  $\max|U_{t,N}|_{t=1,N-1}$

#### IV.2.3.2. Statistique U de Buishand

Ce test de nature bayésienne se fonde sur deux hypothèses : la normalité et la constance de la variance de la série. En prenant encore comme hypothèse une distribution uniforme pour la position du point de rupture, la statistique  $U$  est définie alors par :

$$U = [N(N + 1)]^{-1} \sum_{k=1}^{N-1} \left(\frac{S_k}{D_x}\right)^2$$

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

$D_x$  : écart-type de la série.

Dans ce cas aussi, l'hypothèse nulle représente l'absence de rupture dans la série. Si cette hypothèse est rejetée, alors le test ne suggère pas une estimation de la date de rupture. Basé sur la méthode de Monte Carlo, Buishand (1982, 1984) propose des valeurs critiques de la statistique  $U$ . Cette méthode donne moins de poids aux premières et aux dernières valeurs de la série, par conséquent elle est plus performante pour tout changement de moyenne intervenant au milieu de la série. La statistique  $U$  est une statistique robuste qui reste valide même pour des distributions de la variable étudiée s'écartant de la normalité.

#### IV.2.3.3. Procédure bayésienne de Lee et Heghinian (1977)

Appliquée en Afrique soudano-sahélienne (Chaouche, 1988), cette procédure permet l'étude des pluies de la région. Elle repose sur le modèle suivant :

$$x_i = \begin{cases} \mu + \varepsilon_i & \text{avec } i = 1, 2, 3 \dots \tau \\ \mu + \delta + \varepsilon_i & \text{avec } i = 1, 2, 3 \dots N \end{cases}$$

Avec :

$\varepsilon_i$  : Sont indépendants et normalement distribués, de moyenne nulle et de variance  $\sigma^2$  ;

$\tau, \mu, \delta$  et  $\sigma$  : Sont des paramètres inconnus ;

$\tau$  et  $\delta$  : Représentent respectivement la position de la rupture dans le temps et l'amplitude d'un changement éventuel de la moyenne.

Le changement éventuel de position et d'amplitude, correspond au mode des distributions a posteriori de  $\tau$  et  $\delta$ . La méthode offre alors la probabilité que le changement se produise au moment  $\tau$  dans une série où un changement à un moment indéterminé est à priori supposé.

Elle donne aussi une estimation de la probabilité que l'amplitude du changement puisse prendre la valeur de  $\delta$ . Cette estimation est d'autant plus précise que la dispersion est faible.

Ces méthodes sont utilisées à travers le logiciel KRONOSTAT (IRD., 1998) qui permet une visualisation des résultats en format numérique et graphique.

### IV.2.4. Calcul des variations moyennes

Pour les variables climatiques dont la série chronologique présente une rupture, les variations moyennes sont calculées de part et d'autre de la rupture en appliquant la formule suivante :

$$D = \frac{\bar{x}_j}{\bar{x}_i} - 1$$

Où :

$\bar{x}_j$  : Moyenne sur la période après la rupture ;

$\bar{x}_i$  : Moyenne sur la période avant la rupture.

## IV.3. Résultats et analyses

### IV.3.1. Calcul des indices

Les valeurs des indices centrés réduits de la pluviométrie ont été déterminées pour les huit stations retenues.

Les figures suivantes illustrent les résultats obtenus pour chaque station.

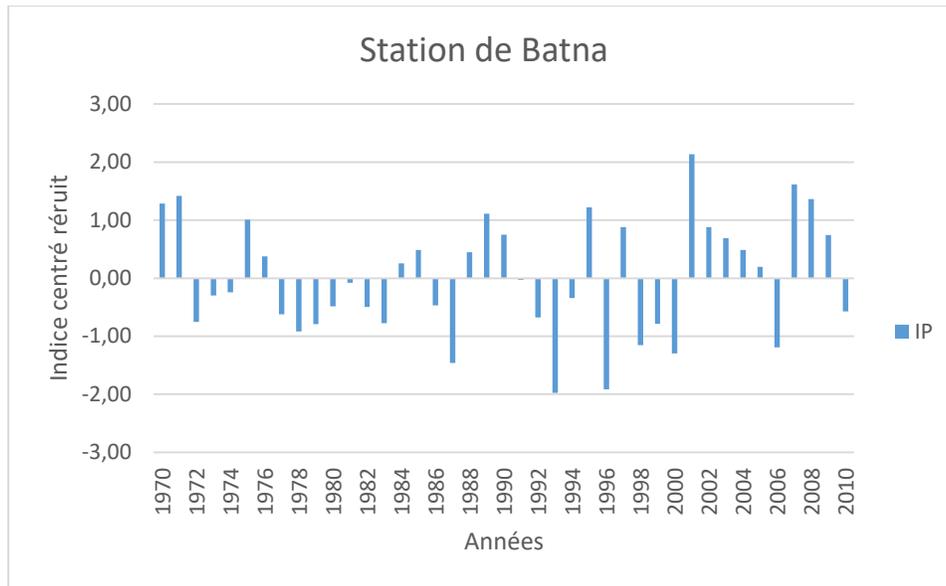


Figure IV.1.a. Evolution interannuelle de la pluviométrie à la station de Batna.

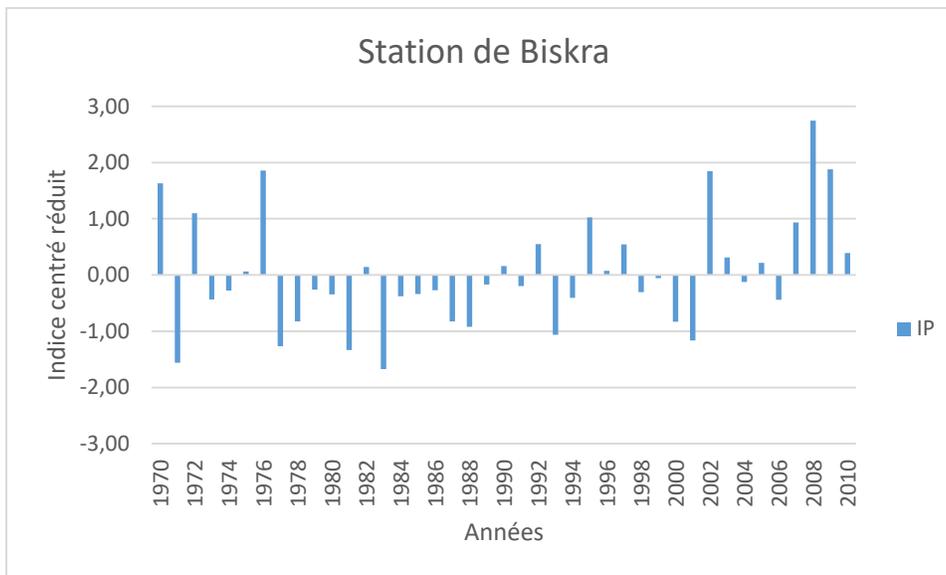


Figure IV.1.b. Evolution interannuelle de la pluviométrie à la station de Biskra.

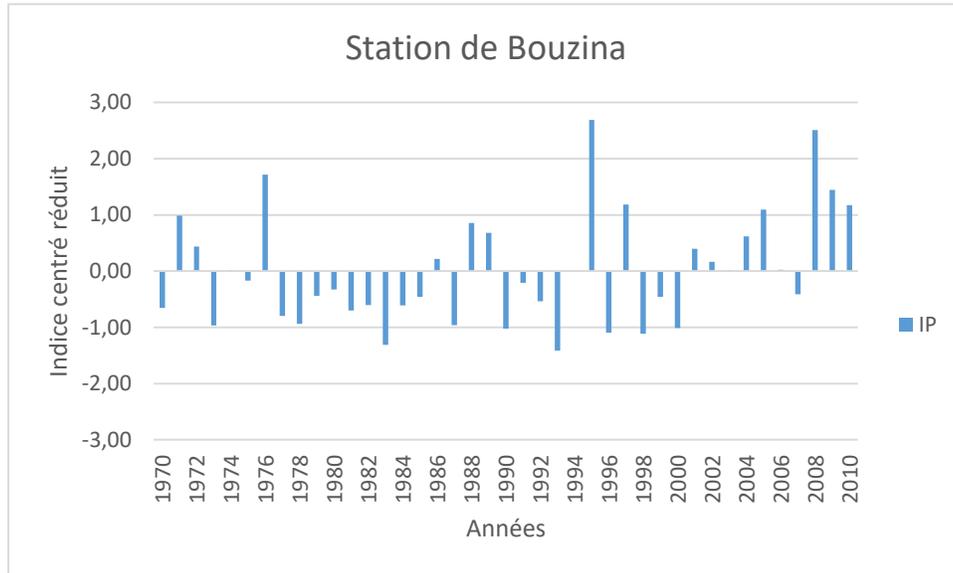


Figure IV.1.c. Evolution interannuelle de la pluviométrie à la station de Bouzina.

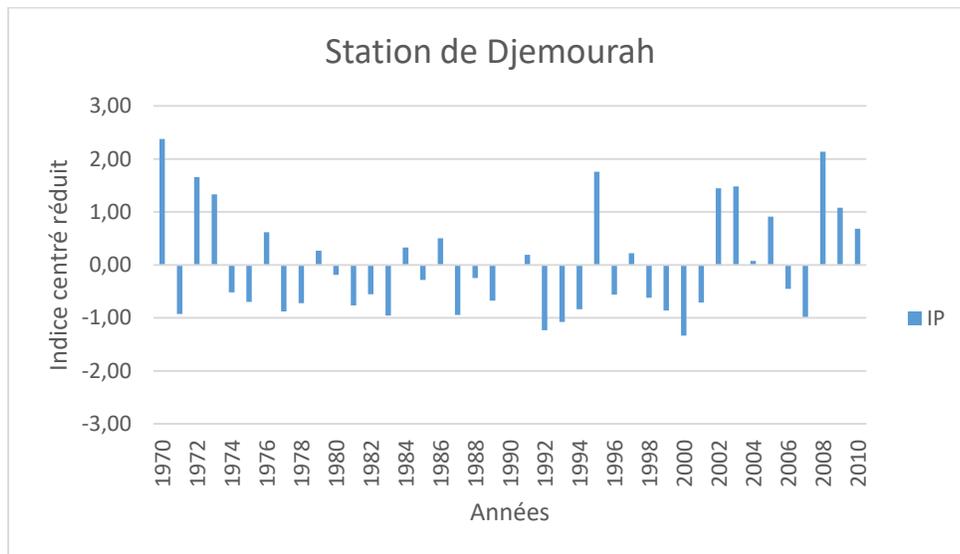


Figure IV.1.d. Evolution interannuelle de la pluviométrie à la station de Djemourah.

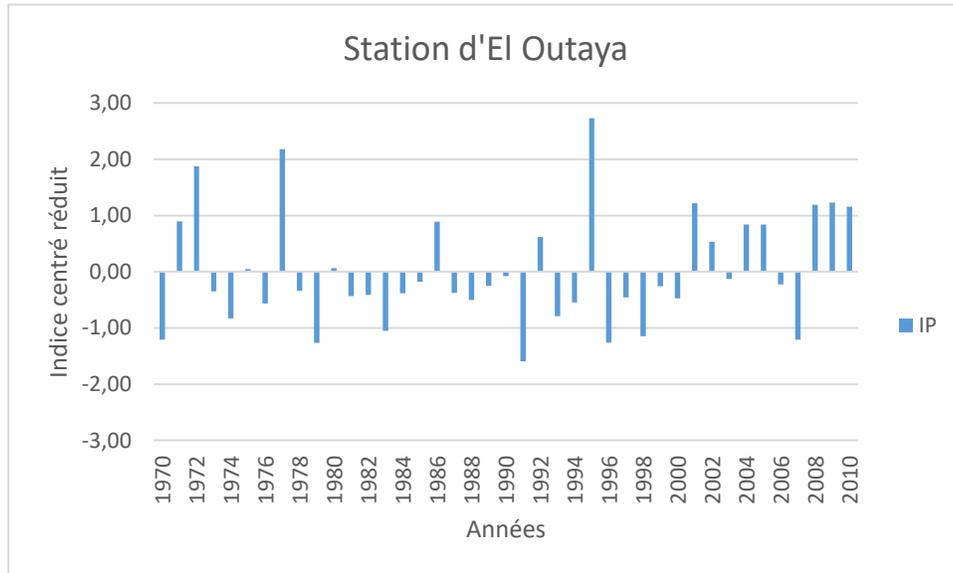


Figure IV.1.e. Evolution interannuelle de la pluviométrie à la station d'El Outaya.

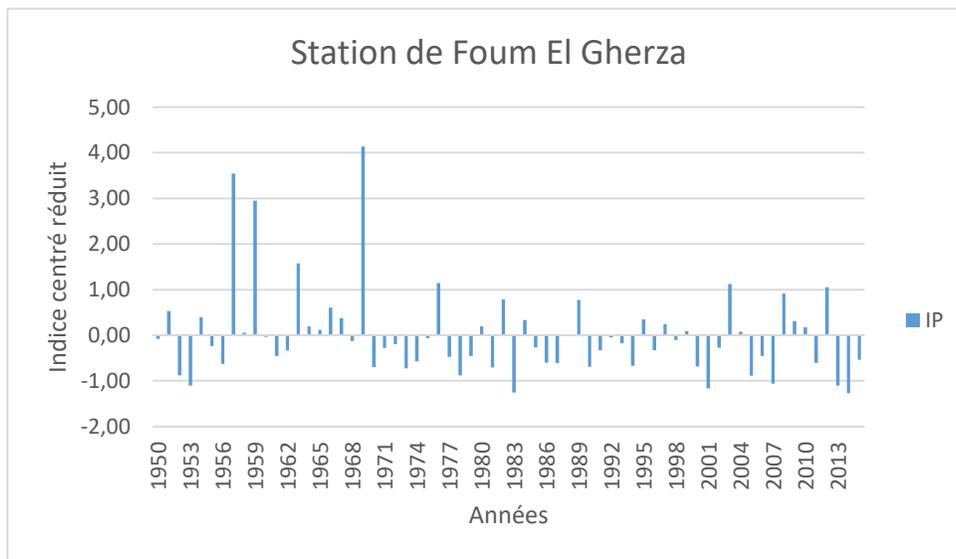


Figure IV.1.f. Evolution interannuelle de la pluviométrie à la station de Foug El Gherza.

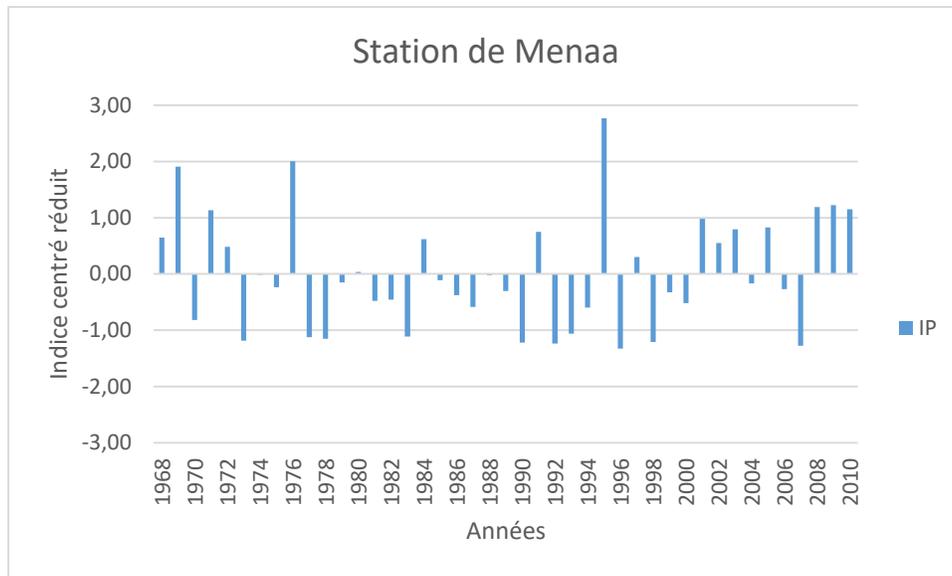


Figure IV.1.g. Evolution interannuelle de la pluviométrie à la station de Menaâ.

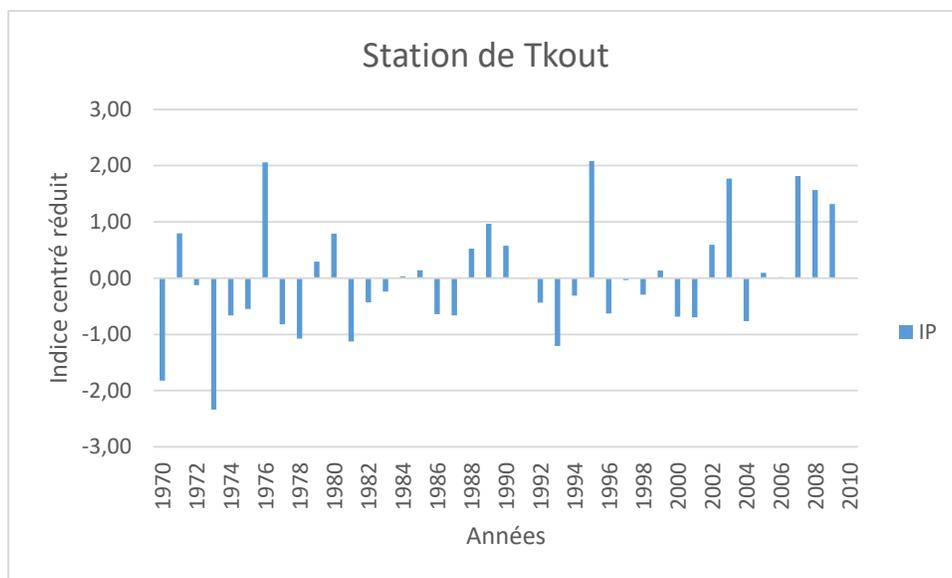


Figure IV.1.h. Evolution interannuelle de la pluviométrie à la station de Tkout.

L'évolution des indices centrés réduits démontre une importante variation de la pluviométrie au niveau de toutes les stations la région.

En effet, la pluviométrie à la station de Batna est illustrée par une succession de périodes sèches et humides (Figure IV.1.a). Les périodes s'étalant de 1972 à 1983 ainsi que celle de 1991 – 2000 sont caractérisées par un indice négatif dont deux (02) déficits aigus sont marqués en 1993 et 1996. La période humide, quant à elle, est nettement observée à partir de 2001 jusqu'en 2010.

Située à l'extrême sud de notre zone d'étude, la région de Biskra est caractérisée par une longue période sèche débutant en 1970 et allant jusqu'en 2001. Elle comporte néanmoins quelques années humides comme l'année 1972, 1976 et 1995 (Figure IV.1.b).

Les précipitations à Bouzina ont connu de grandes variations interannuelles, avec deux périodes déficitaires assez conséquentes établies de 1977 à 1987 et de 1990 jusqu'à l'année 2000. Exception faite pour les années 1995 et 1997 dont les indices pluviométriques estimés à + 2.7, démontrent une pluviosité importante (Figure IV.1.c). En outre, deux autres périodes, humides cette fois, caractérisent cette zone, la première au début des années 1970 et la deuxième de 2001 à 2010.

Au niveau de Djemourah, les variations interannuelles des précipitations sont considérables (Figure IV.1.d). La station a connu une décennie assez humide de 2001 à 2010, avec un indice pluviométrique moyen s'approchant de 1. Les autres années évaluées à cette station sont soit sèches soit normales.

Située pas loin de la station de Djemourah, la station d'El Outaya a connu les mêmes fluctuations que cette station voisine (Figure IV.1.e), avec une persistance d'années sèches ou normales en général sur toute la période étudiée, hormis la dernière décennie qui s'avère être très humide.

Caractérisée par sa longue série d'observation, l'analyse de la pluviométrie à la station de Foum El Gherza a indiqué la présence, dans la région étudiée, d'une forte période humide antérieurement aux années 1970 et qui s'étend de 1954 jusqu'à 1969 (Figure IV.1.f).

Cette période est marquée par de forts indices pluviométriques pouvant aller jusqu'à 4,1 tel qu'il est le cas pour l'année 1969. Cette série met en valeur aussi l'existence d'une période normale voire sèche à partir de 2008 jusqu'à 2015. La variation interannuelle sur le reste de la série, quant à elle, est peu ou prou comme les autres stations.

La station de Menaâ est située au milieu du bassin d'étude, elle permet de mieux apprécier les variations de l'indice pluviométrique (Figure IV.1.g). L'année 1995 apparaît comme étant la plus humide, alors que l'année qui suit représente l'année la plus sèche de la période d'observation. Deux périodes sont clairement remarquables dans la série, l'une sèche allant de 1977 à 1994 et l'autre humide s'étalant de 2001 à 2010.

La pluviométrie à Tkout est marquée profondément par la présence d'années sèches et humides. Elle comprend une période qualifiée de cycle sec, se tenant de 1991 à 2001 dont le plus grand indice retenu est de - 1.3. Mais aussi un autre cycle sec durant les années 1970, avec un indice

pluviométrique plus bas estimé à  $-2.4$ . En ce qui concerne l'excédent pluviométrique, la station de Tkout a connu, comme toute autre station, un cycle humide débutant de 2002 à 2009 avec un léger déficit en 2004 (Figure IV.1.h).

### IV.3.2. Caractérisation spatiale des précipitations

L'analyse spatio-temporelle des indices pluviométriques annuels a mené à une meilleure caractérisation de la variabilité des précipitations au niveau du bassin versant d'Oued Biskra au cours des différentes décennies d'étude.

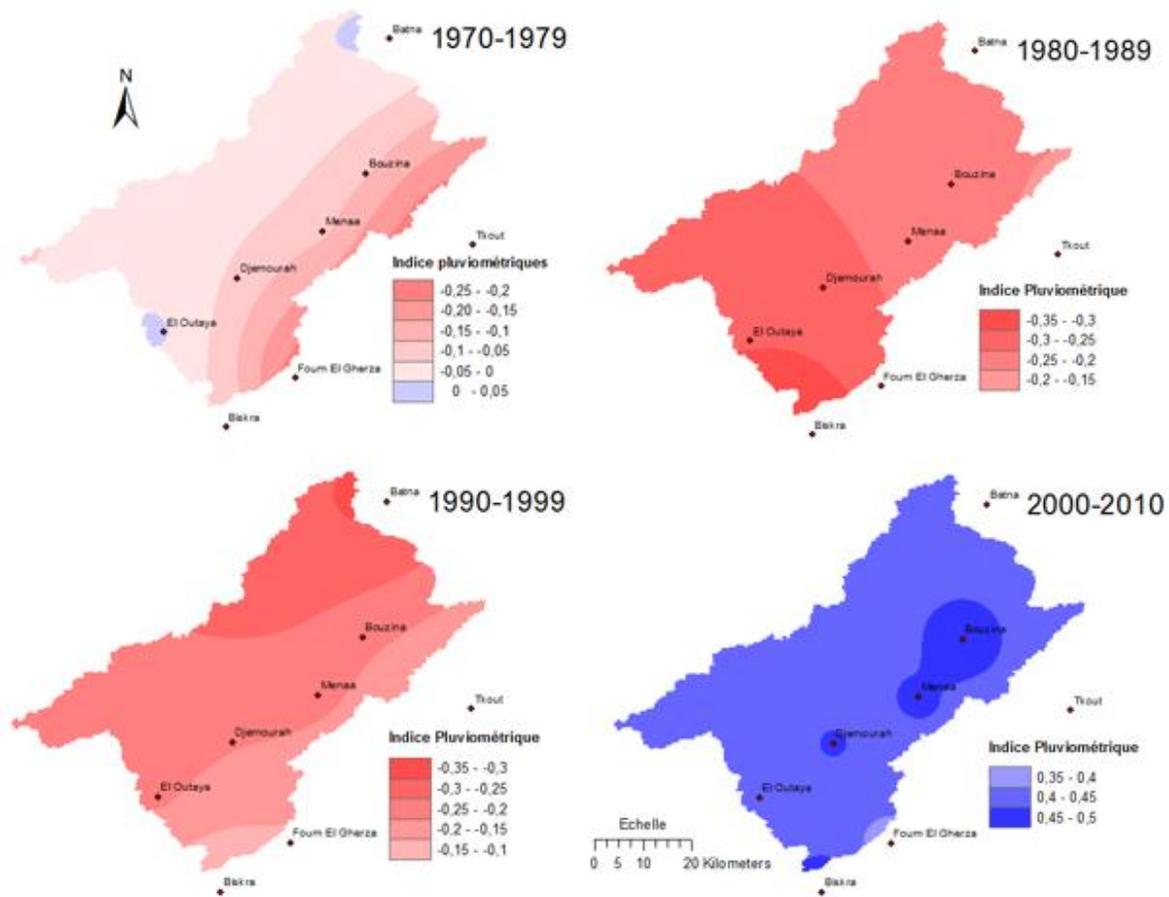


Figure IV.2. Indices pluviométriques annuels du bassin versant d'Oued Biskra.

Les résultats trouvés démontrent une répartition disparate des intensités pluviométriques sur la région d'étude.

La première décennie diffère des autres par l'existence de zones sèches et humides. On observe la présence d'un indice pluviométrique positif compris entre 0 et 0,05 dans la partie nord et sud-ouest du bassin versant. Alors qu'il est négatif dans la majorité du bassin.

Tout au long de cette décennie, le caractère déficitaire s'intensifie d'ouest en est pouvant aller jusqu'à -0,25 dans l'extrême nord-est du bassin d'étude.

Pour la décennie 1980-1989, le caractère déficitaire s'étale désormais sur la totalité du bassin versant avec un indice maximum de -0,35 atteint dans la partie sud. Cependant, la fraction septentrionale du bassin voit son caractère déficitaire diminuer jusqu'à -0,2 notamment dans la partie nord-est.

La décennie comprise entre 1990 et 1999 marque la persistance de la sécheresse, avec cette fois un caractère déficitaire accentué même au nord. L'extrême sud, à titre d'exemple, possède un indice pluviométrique de -0,1 à -0,15. A l'opposé, l'extrême nord est pourvu d'un indice pluviométrique compris entre -0,3 et -0,35.

La dernière décennie quant à elle annonce le retour des précipitations et la suppression du caractère déficitaire dans l'intégralité du bassin versant d'Oued Biskra

Un cycle très humide caractérise cette période avec des indices pluviométriques oscillant de 0,35 à 0,5. Le caractère excédentaire le plus marqué a été enregistré au niveau de la partie nord-est, plus précisément entre la région de Bouzina et Menaa.

### **IV.3.3. Etude de l'homogénéité des séries et détection des ruptures**

Les tests statistiques permettent de détecter la présence ou pas de rupture dans les séries pluviométriques étudiées, et ce en analysant le cumul pluviométrique sur une année hydrique. Parmi ces tests, le test de Pettitt dont les résultats sont consignés dans le tableau suivant.

Tableau IV.1. Résultats du test de Pettitt et calcul des variations pour la moyenne.

| Station        | Période   | Pettitt |               |
|----------------|-----------|---------|---------------|
|                |           | Rupture | Variation (%) |
| Batna          | 1970-2012 | /       | /             |
| Biskra         | 1970-2012 | /       | /             |
| Bouzina        | 1970-2012 | 2000    | +29           |
| Djemourah      | 1970-2011 | /       | /             |
| El Outaya      | 1970-2010 | /       | /             |
| Foum El Gherza | 1950-2015 | /       | /             |
| Menaâ          | 1968-2011 | /       | /             |
| Tkout          | 1970-2010 | /       | /             |

Pour la série pluviométrique de Bouzina, la date de rupture est située en l’an 2000, avec une hausse de +29% de la moyenne des précipitations. Néanmoins, l’absence de rupture dans une série pluviométrique n’est pas synonyme d’absence de variation temporelle des précipitations, cela signifie plutôt que cette variation, si elle existe, n’est pas très apparente avec ce test.

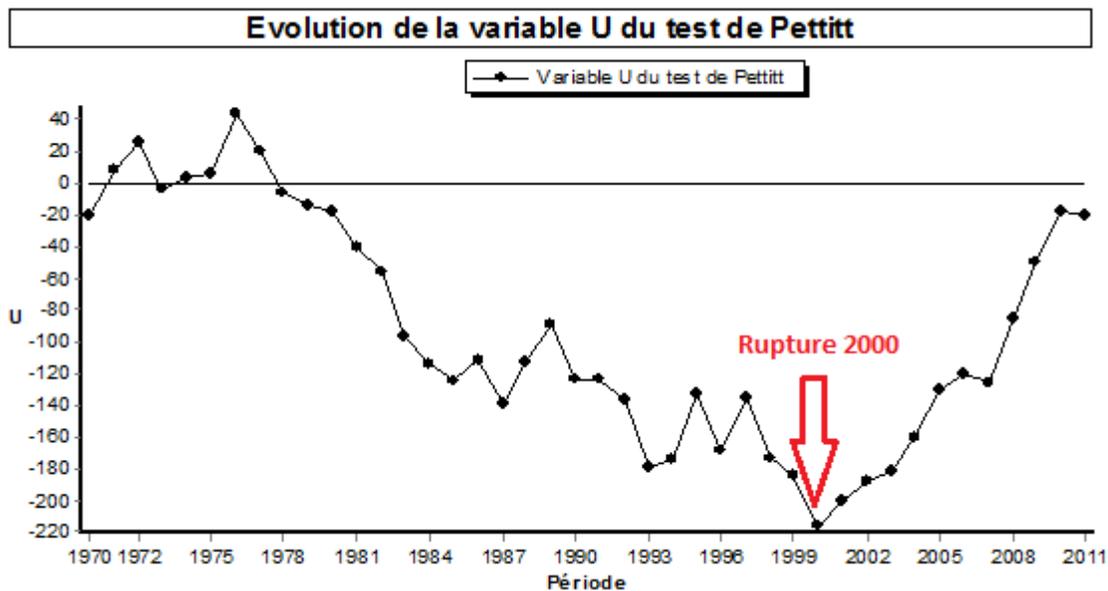


Figure IV.3. Variations des indices de Pettitt à la station pluviométrique de Bouzina.

La méthode statistique de Lee & Heghinian a permis de situer les années de ruptures au sein de toutes les séries pluviométriques étudiées. Les résultats obtenus sont relatés dans le tableau IV.2 :

Tableau IV.2. Résultats du test de Lee & Heghinian et calcul des variations pour la moyenne.

| Station        | Période   | Lee & Heghinian |               |
|----------------|-----------|-----------------|---------------|
|                |           | Rupture         | Variation (%) |
| Batna          | 1970-2012 | 1971            | -28           |
| Biskra         | 1970-2012 | 2001            | +37           |
| Bouzina        | 1970-2012 | 2007            | +32           |
| Djemourah      | 1970-2011 | 1970            | -57           |
| El Outaya      | 1970-2010 | 2007            | +40           |
| Foum El Gherza | 1950-2015 | 1969            | -18           |
| Menaa          | 1968-2011 | 2010            | -5            |
| Tkout          | 1970-2010 | 2006            | +50           |

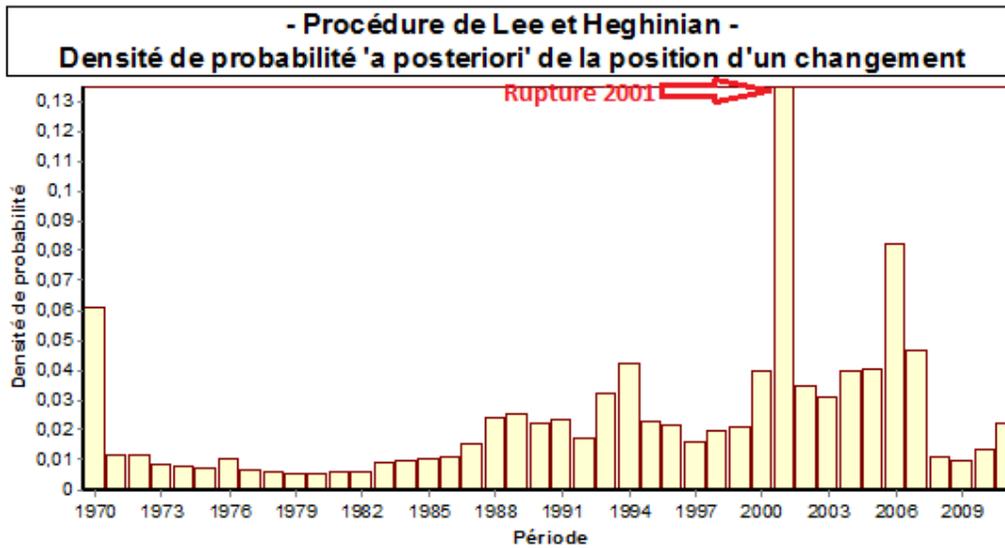
L'avantage du test de Lee & Heghinian est qu'il détecte la rupture même quand elles se présentent à l'extrémité des séries temporelles.

On constate que les stations de Djemourah et Batna présentent des ruptures, respectivement en 1970 et 1971 avec d'importants déficits estimés à 57 et 28% de la moyenne interannuelle. De même, la station de Foum El Gherza subit une rupture en 1969 avec une diminution de 18% de la pluviométrie.

Tandis que la station de Menaa montre une rupture plus tardive en 2010 avec une baisse peu significative de 5%.

Une tendance à la hausse de la pluviométrie est observée au niveau de la station de Biskra en l'an 2000. Les stations de Tkout et d'El Outaya ont connu un changement brusque de la moyenne interannuelle respectivement en 2006 et 2007 avec un excédent pluviométrique assez important de 50 et de 40%.

Enfin, pour la station de Bouzina, une autre rupture a été détectée grâce à ce test en 2007 avec une variation un peu élevée que celle de l'année 2000.



**Figure IV.4.** Variation de la densité de probabilité de Lee & Heghinian à la station de Biskra.

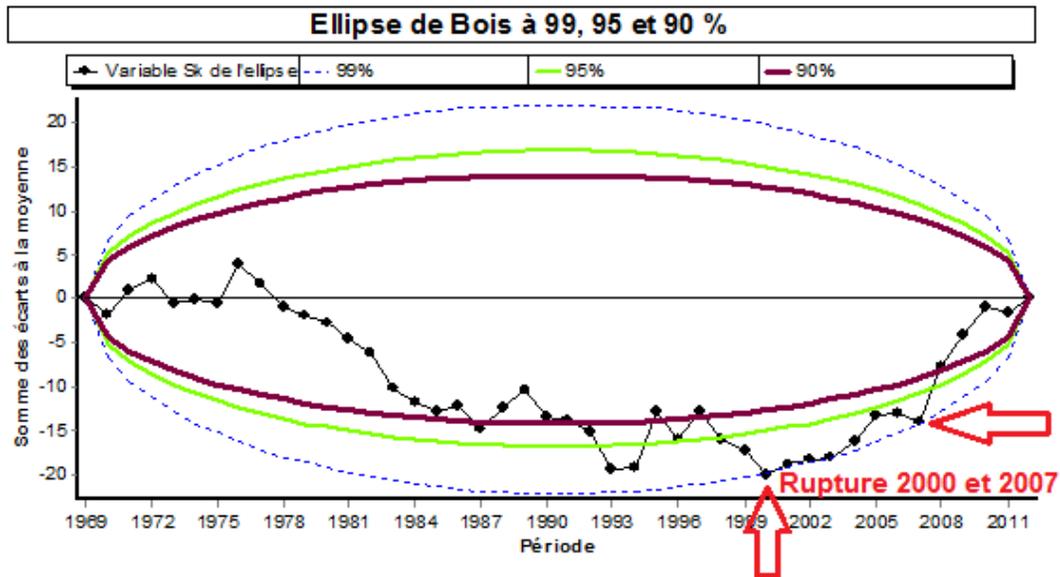
L'année de rupture ne peut être estimée par l'utilisation du test de Buishand, toutefois elle peut être située suite à l'utilisation de l'ellipse de contrôle, telle qu'elle représente le point le plus loin de l'ellipse, en tenant compte du seuil significatif correspondant au test ( $\alpha = 5\%$  dans notre cas).

Un certain nombre de points sortant de l'ellipse sont à considérer, dans le sens où même s'ils sortent de l'ellipse, ils ne font quand même pas référence à des ruptures. Par conséquent, l'ellipse de contrôle ne représente qu'un complément graphique original du test de Buishand.

Le Tableau IV.3 illustre les résultats issus du test de Buishand.

**Tableau IV.3.** Résultats du test de Buishand.

| Station        | Présence de rupture |
|----------------|---------------------|
| Batna          | Non                 |
| Biskra         | Oui                 |
| Bouzina        | Oui                 |
| Djemourah      | Non                 |
| El Outaya      | Non                 |
| Foum El Gherza | Non                 |
| Tkout          | Non                 |
| Mena           | Oui                 |



**Figure IV.4.** Ellipse de contrôle associée au test de Buishand à la station de Bouzina.

Le test de Buishand a mis en valeur les deux années de ruptures détectées via les deux précédents tests au niveau de la station de Bouzina.

Ce test a aussi confirmé les résultats de la méthode de Lee & Heghinian pour les stations de Biskra et Tkout avec des variations similaires.

#### IV.4. Conclusions

L'analyse de l'indice pluviométrique démontre que la plus grande succession d'années sèches au niveau des stations d'étude va de 1976 à 1984. Ce constat est en accord avec les résultats exposés par le (GIEC, 2007, 2014).

De plus, les analyses effectuées au niveau de Foug El Gherza nous ont permis de constater qu'antérieurement aux années 70, la période régnant était humide. Ce qui est corroboré avec les résultats de (Laborde, 1993) qui, durant ses travaux, a mis le doigt sur une phase pluviométrique datant de la même période.

De manière générale, notre zone d'étude est caractérisée par la présence de trois (3) périodes différentes : l'une sèche s'étalant de 1970 à 2002 et deux (2) autres humides allant de 1956 à 1969 et de 2003 à 2010, ce qui ne peut être qu'en accord avec les travaux de (Khaldi, 2005 ; Lazzouzi 2014) dont l'étude concernant le nord algérien reflète une réalité commune. De plus, les faibles précipitations enregistrées durant la période 2009-2015 apparaissent comme un prodrome d'un cycle normal voire sec. Cette dernière conclusion reste à confirmer surtout s'il s'agit d'une région semi-aride, où les études ne sont pas si nombreuses.

L'analyse spatio-temporelle de son côté, met en évidence le début d'apparition de la sécheresse durant la décennie allant de 1970 à 1979, et ce dans la majorité du bassin à l'exception de quelques zones humides. La période 1980 – 1989 démontre une extension de sécheresse dans l'ensemble du bassin, avec une accentuation de cette dernière d'est en ouest du bassin. La décennie 1990-1999 est caractérisée par la persistance de la sécheresse et sa généralisation à la partie nord. Enfin, la décennie 2000-2010 démontre une réapparition de l'excédent pluviométrique dans tout le bassin. Ces conclusions concordent avec les résultats trouvés par (Demmak *et al.*, 1994) dont l'étude peut servir d'extension au bassin d'Oued Biskra.

Enfin, les séries de données chronologiques de l'étude ne sont pas stationnaires et présentent donc des ruptures, où la région étudiée a connu deux (2) périodes de rupture distinctes, à savoir :

- Une période allant de 1969 à 1971, où les ruptures coïncident avec les années de grandes sécheresses en Algérie (Dacosta 1989, Meddi *et al.*, 2009) ;
- Une période s'étalant de 2001 à 2006, qui annonce le retour des pluies. Ces mêmes ruptures ont été trouvées par (Khouldia, 2014).

CHAPITRE V  
IMPACT DE LA VARIABILITE  
CLIMATIQUE SUR LES  
RESSOURCES HYDRIQUES

---

## CHAPITRE V : Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques

### V.1. Introduction

Les résultats de maintes études ainsi que ceux obtenus du chapitre précédent montrent clairement que l'Algérie est prédisposée à la sécheresse, d'ailleurs ce phénomène y est répondu depuis les années 1970, particulièrement au niveau d'Oued Biskra. Dès lors, cette sécheresse climatique peut avoir un effet déplorable sur les différentes parties du cycle d'eau.

Le changement des conditions de température, d'évapotranspiration et de précipitations dans l'espace et dans le temps peuvent avoir un ostensible impact sur les débits des rivières et des lacs.

L'introduction des facteurs hydrologiques est donc indispensable à notre étude. Dans le présent chapitre la pluviométrie est alors jointe aux régimes des débits pour mieux apprécier l'évolution des paramètres hydro-climatiques dans notre zone d'étude.

L'étude du bilan hydrique est alors un moyen essentiel pour mettre en évidence l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau.

### V.2. Evolution du régime hydrologique avec la pluviométrie

Dans le but d'étudier l'aspect hydro-climatique et apprécier les modifications des conditions hydriques, plusieurs méthodes statistiques sont utilisées. Ces dernières sont présentées dans la partie suivante.

#### V.2.1. Méthode de la variable centrée réduite

Utilisée dans le précédent chapitre, la méthode de calcul des indices centrés réduits permet aussi de suivre les fluctuations des régimes des débits assemblées à ceux des précipitations.

Dans notre cas, la station d'El Kantara est alors liée à la station pluviométrique de Menaâ, celle d'Oued Djemourah à la station pluviométrique située dans cette même zone et l'analyse des débits d'Oued El Abiod est réalisée au niveau du barrage de Foum El Gherza avec la station pluviométrique de ce même barrage.

### V.2.2. Filtre passe-bas de HANNING d'ordre 2

Dans cette méthode, les variations saisonnières sont éliminées afin d'affiner l'observation des fluctuations interannuelles. Les totaux pluviométriques annuels sont alors pondérés en utilisant des équations recommandées par Assani (1999), dont l'expression est :

$$x_{(t)} = 0.06x_{(t-2)} + 0.25x_{(t-1)} + 0.38x_{(t)} + 0.25x_{(t+1)} + 0.06x_{(t+2)}$$

Pour  $3 \leq t \leq (n - 2)$ .

Où :

$x_{(t)}$  : Total pluviométrique pondéré du terme  $t$  ;

$x_{(t-2)}$  et  $x_{(t-1)}$  : Totaux pluviométriques des deux termes qui précèdent immédiatement le terme  $t$  ;

$x_{(t+2)}$  et  $x_{(t+1)}$  : Totaux pluviométriques des deux termes qui suivent immédiatement le terme  $t$  ;

Les totaux pluviométriques pondérés des deux premiers ( $x_{(1)}, x_{(2)}$ ) et des deux derniers ( $x_{(n-1)}, x_{(n)}$ ) termes de la série sont calculés grâce aux expressions suivantes (tel que  $n$  représente la taille de la série) :

$$x_{(1)} = 0.54x_{(1)} + 0.46x_{(2)}$$

$$x_{(2)} = 0.25x_{(1)} + 0.50x_{(2)} + 0.25x_{(3)}$$

$$x_{(n-1)} = 0.25x_{(n-2)} + 0.50x_{(n-1)} + 0.25x_{(n)}$$

$$x_{(n)} = 0.54x_{(n)} + 0.46x_{(n-1)}$$

Afin de distinguer nettement les périodes de déficit et d'excédent pluviométriques, les indices centrés et réduits des hauteurs pluviométriques annuelles pondérées obtenus sont calculés.

De même, les séries de débits obéissent aux mêmes procédures de calcul que les séries pluviométriques.

### V.3. Bilan hydrique

Plusieurs méthodes d'estimation des paramètres du bilan hydrologique existent. Parmi celles-ci : la méthode de Turc (1931), de Thornthwaite (1948) et de Penman (1948). Chacune d'entre elles présente des avantages et des limites.

Dans le cas de notre étude, nous avons opté pour l'utilisation de la méthode de Thornthwaite. Ce choix s'explique par l'absence de larges séries de données climatiques permettant un calcul plus précis par d'autres méthodes, dont la méthode de Penman qui justifie de manière concise le processus physique réel.

La méthode de Thornthwaite démontre une certaine fiabilité pour le calcul du bilan hydraulique dont l'expression est mieux présentée à l'aide de cette méthode (Brochet et Gerbier, 1974).

Tout d'abord, il est primordial de déterminer les principaux paramètres suivants : l'évapotranspiration potentielle ( $ETP$ ), l'évapotranspiration réelle ( $ETR$ ) et l'excédent du bilan ( $P-ETR$ ). Par la suite, il est nécessaire d'estimer le ruissèlement moyen annuel ( $R$ ) afin d'en déduire l'infiltration efficace ( $I_e$ ).

Ainsi, pour le calcul de l' $ETP$  de chaque mois, Thornthwaite propose l'équation ci-dessous :

$$ETP = 16 \left( \frac{10 t}{I} \right)^\alpha F(m, \lambda)$$

Avec :

$ETP$  : Évapotranspiration potentielle mensuelle (mm);

$t$  : Température mensuelle moyenne en degré Celsius;

$\alpha$  : Fonction complexe de l'indice thermique ( $\alpha = 6.75 * 10^{-7} * I^3 - 7.71 * 10^{-5} * I^2 + 1.79 * 10^{-2} * I + 0.49239$ ) ;

$I$  : Indice thermique annuel calculé selon l'équation :

$$I = \sum_{i=0}^{12} i$$

Où  $i = \left( \frac{t}{5} \right)^{1.514}$  : indice thermique mensuel.

$F(m, \lambda)$  : facteur correctif en fonction du mois  $m$  et de la latitude  $\lambda$ .

Une fois l' $ETP$  calculée, les valeurs de l' $ETR$  et de l'excédent sont ensuite estimées selon les procédures suivantes :

**1<sup>er</sup> cas :** Pluie mensuelle supérieure à l'évapotranspiration potentielle ( $P > ETP$ )

Alors  $ETR = ETP$

Si  $P + R_{i-1} - ETR \geq RFU$ ; alors  $R_i = RFU$ ,  $\Delta RFU = R_i - R_{i-1}$  et  $S = P + R_{i-1} - ETR - RFU$  ;

Si  $P + R_{i-1} - ETR \leq RFU$ ; alors  $R_i = P + R_{i-1} - ETR$ ,  $\Delta RFU = R_i - R_{i-1}$  et  $S = 0$  ;

**2<sup>e</sup> cas :** Pluie mensuelle supérieure à l'évapotranspiration potentielle ( $P < ETP$ )

$R_{i-1} \geq ETP - P$ , alors  $ETR = ETP$ ,  $R_i = P + R_{i-1} - ETR$ ,  $\Delta RFU = R_i - R_{i-1}$  et  $S = 0$  ;

$R_{i-1} \leq ETP - P$ , alors  $ETR = P + R_{i-1}$ ,  $R_i = 0$ ,  $\Delta RFU = R_i - R_{i-1}$  et  $S = 0$ .

Avec :

*RFU* : Réserve facilement utilisable par les végétaux (la valeur maximale est fixée à 100 mm, compte tenu de la nature argilo-sableuse des sols) ;

*R<sub>i</sub>* : Réserve effective à la fin du mois considéré (mm) ;

*R<sub>i-1</sub>* : Réserve effective à la fin du mois précédent (mm) ;

*ΔRFU* : Variation de la réserve au cours du mois considéré ;

*S* : Surplus disponible pour l'écoulement de surface ou souterrain du mois en cours.

La lame d'eau ruisselée quant à elle est estimée par l'application du modèle de Tixeront (1964) amélioré plus tard par Mouelhi (2003). L'application de ce modèle repose sur l'hypothèse stipulant qu'il existe une certaine corrélation entre la pluviosité moyenne annuelle et le ruissellement moyen annuel pour une longue période d'observation. Ces corrélations existent bel et bien lorsqu'on a affaire à des sols normalement constitués, c'est-à-dire ni trop perméables, ni trop squelettiques. La formule du modèle amélioré est alors établit selon l'équation ci-dessous :

$$R = [P^4 + (aE)^4]^{\frac{1}{4}} - aE$$

Où :

*R* : Lame d'eau annuelle ruisselée (mm);

*P* : Lame d'eau précipitée annuelle (mm);

*E* : Lame d'eau évapotranspirée annuelle (mm);

*a* : Coefficient correctif de l'évapotranspiration potentielle.

Le but de l'estimation des lames d'eau ruisselées annuellement sur les différentes périodes d'observation est de quantifier les conséquences de la variabilité climatique sur les eaux de surface. Le calcul de *ETR* et *R* permettra alors de déduire les infiltrations efficaces ( $I_e$ ) à partir de l'équation du bilan hydrologique :

$$I_e = P - (ETR + R)$$

## V.4. Résultats et analyses

### V.4.1. Evolution des débits avec les précipitations

Une alternance d'années humides et sèches caractérise les variations interannuelles hydro-pluviométriques observées au niveau des stations de Djemourah, El Kantara et Foug El Gherza.

Le tableau ci-dessous rapporte les différents découpages obtenus pour les trois stations, ainsi que les écart-types et les moyennes.

**Tableau V.1.** Découpages obtenus pour les trois stations.

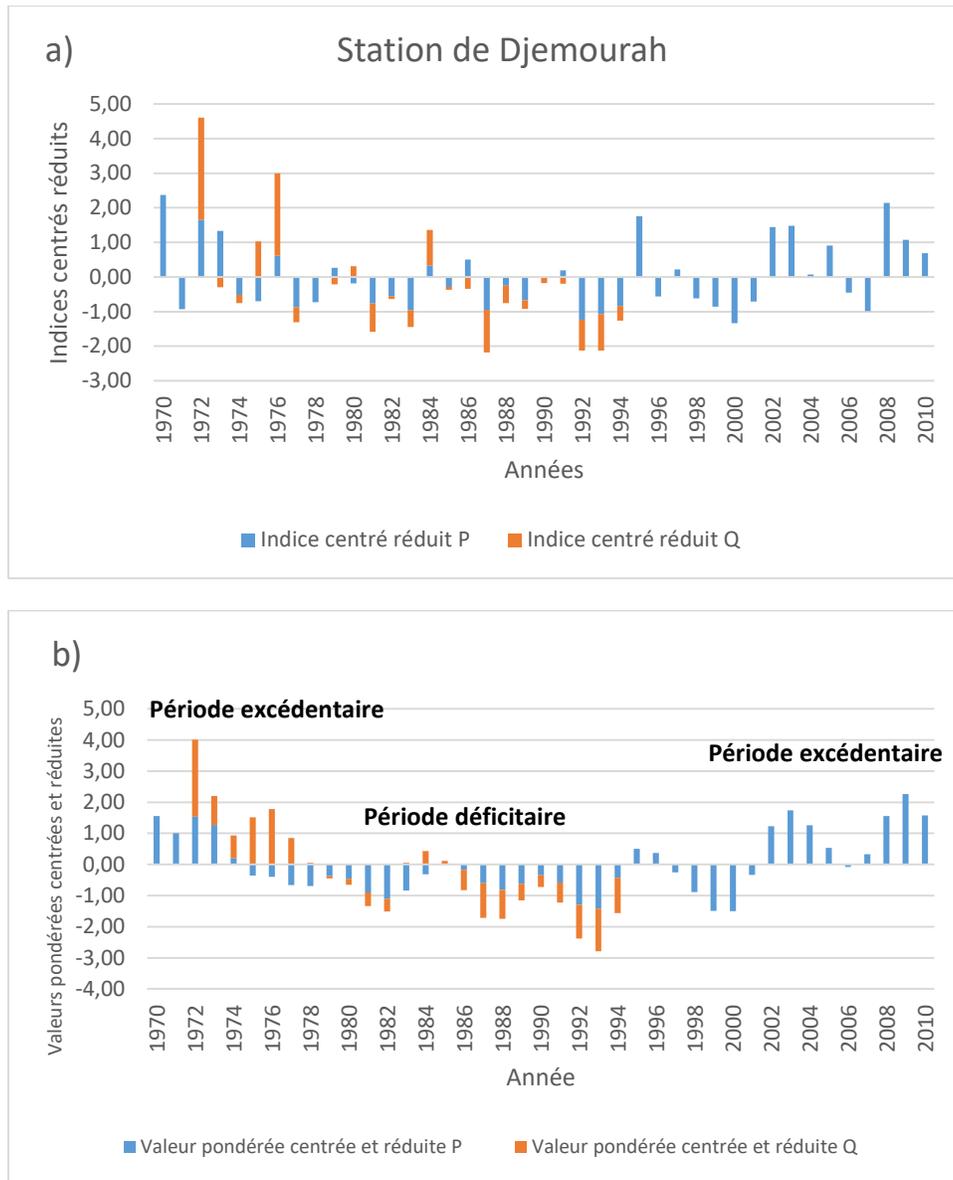
|                     | Station de Djemourah |           | Station d'El Kantara |           | Station de Foug El Gherza |           |
|---------------------|----------------------|-----------|----------------------|-----------|---------------------------|-----------|
| Période humide      | 1970-1974            | 2002-2010 | 1968-1972            | 2001-2010 | 1956-1970                 | 2003-2012 |
| $\mu$ (mm)          | 208,4                | 203       | 308,4                | 292,6     | 233,2                     | 181,7     |
| $\sigma$            | 103,3                | 71,9      | 92,6                 | 76        | 116,9                     | 59,9      |
| Période sèche       | 1975-2001            |           | 1973-2000            |           | 1971-2002                 |           |
| $\mu$ (mm)          | 124,6                |           | 218,5                |           | 159                       |           |
| $\sigma$            | 49,5                 |           | 88,7                 |           | 40,8                      |           |
| $\mu_{global}$ (mm) | 152                  |           | 246,2                |           | 176,9                     |           |
| $\sigma_{global}$   | 72                   |           | 92,7                 |           | 75                        |           |

L'application du filtre passe-bas de Hanning au niveau des stations de Djemourah et d'El Kantara a permis de faire ressortir la variation des précipitations et des écoulements (figure V.1 et figure V.2), tel que deux périodes humides ont été nettement observées :

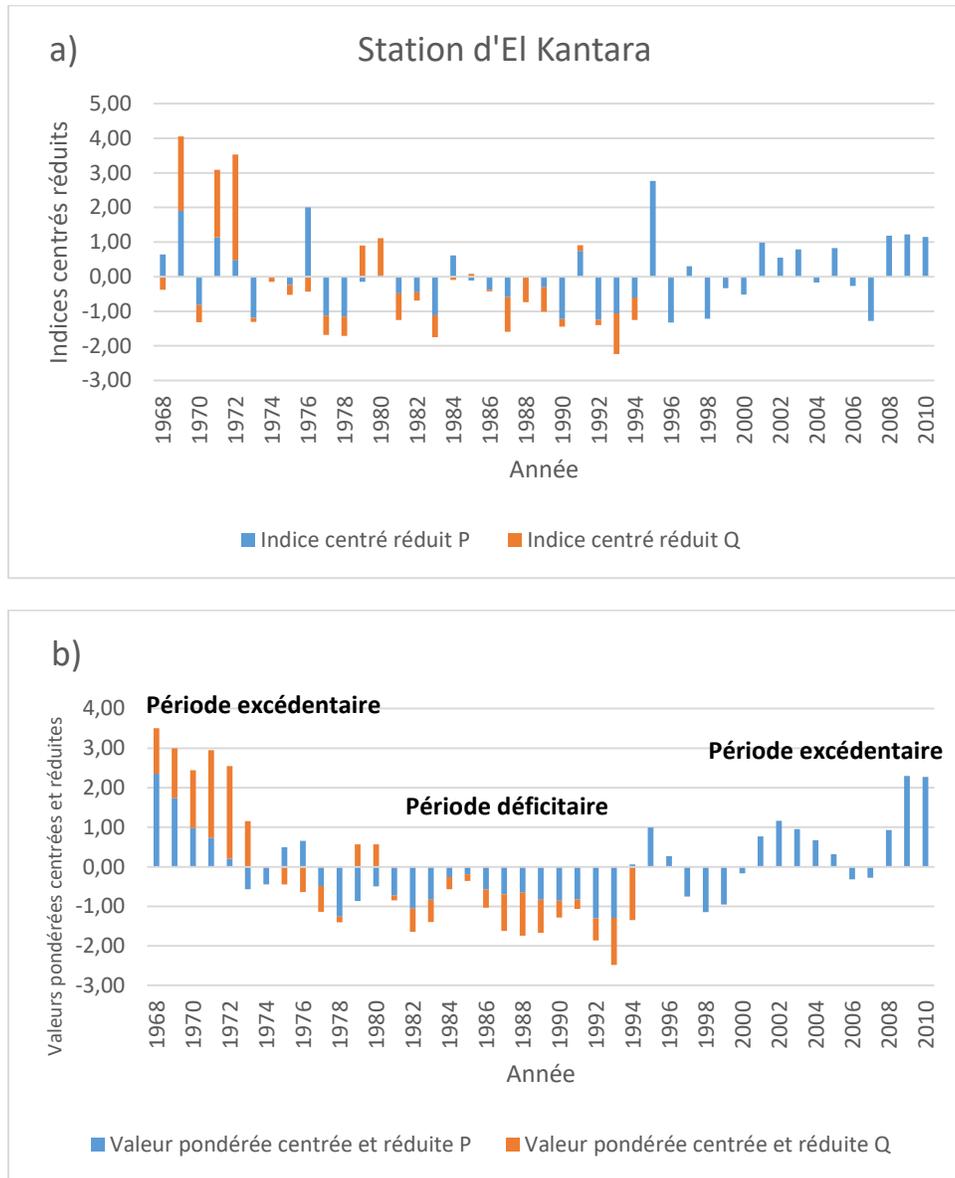
- De 1970 à 1974 et de 2002 à 2010 à la station de Djemourah et ;
- De 1968 à 1972 et de 2001 à 2010 au niveau d'El Kantara.

Ainsi qu'une période sèche allant :

- De 1975 jusqu'à 2001 pour la région de Djemourah et ;
- De 1973 à 2000 à la station d'El Kantara.



**Figure V.1.** Evolution interannuelle des modules de la pluviométrie et du débit à la station de Djemourah de 1970 à 2010 : a) indices centrés réduits b) valeurs pondérées centrées et réduites.



**Figure V.2.** Evolution interannuelle des modules de la pluviométrie et du débit à la station d'El Kantara de 1968 à 2010 : a) indices centrés réduits b) valeurs pondérées centrées et réduites.

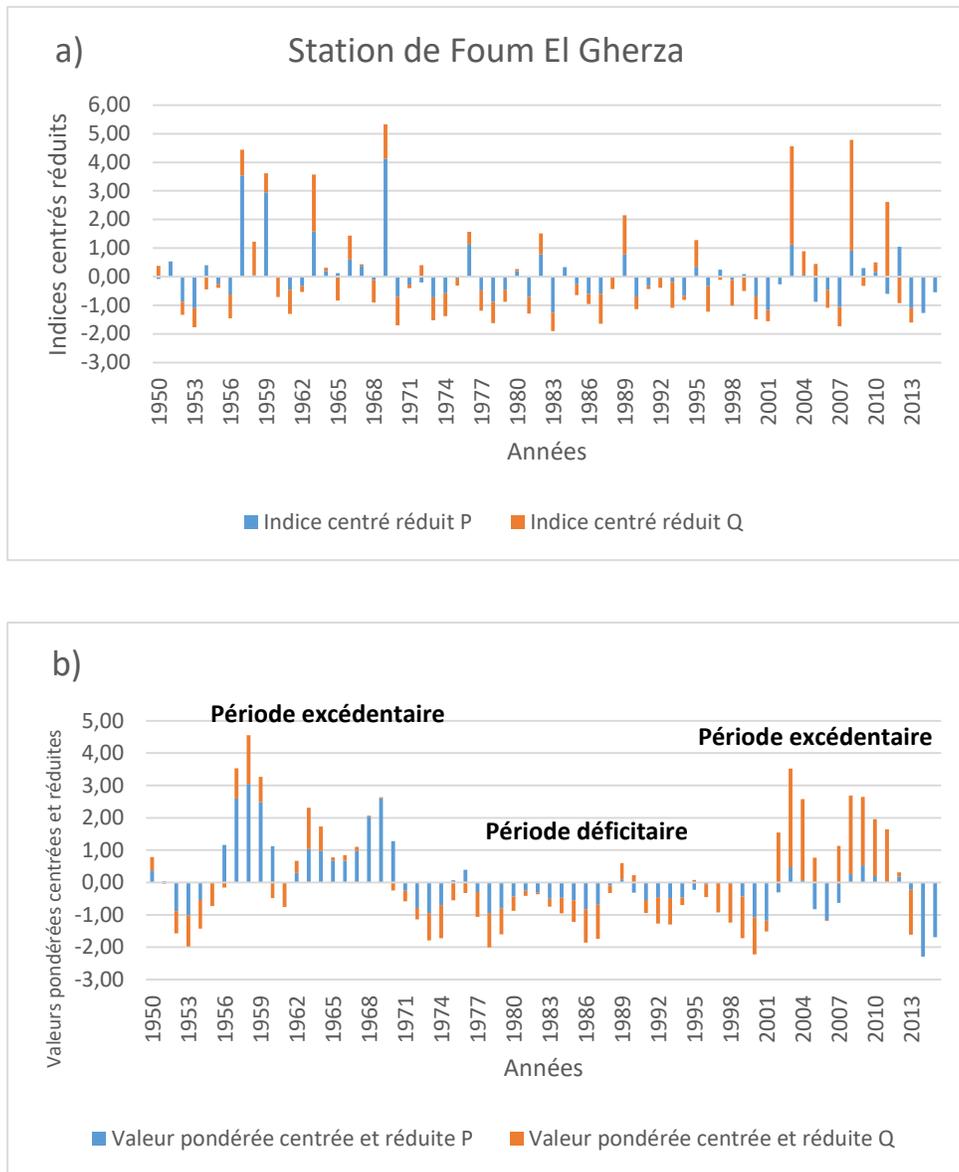
Une importante variation des écoulements d'Oued Djemourah et Oued El Hai est démontrée à travers l'évolution des indices centrés réduits. Cette variabilité se traduit par un écart de 16,38 m<sup>3</sup>/s enregistré entre la plus grande valeur du module annuel et la plus faible valeur observée au niveau de la station d'El Kantara et de 11,32 m<sup>3</sup>/s à la station de Djemourah.

Le débit moyen annuel des deux stations est fortement lié aux précipitations sur toute la période d'étude. En effet, si un déficit pluviométrique est présent sur chaque année, il s'en suit alors un déficit au niveau du module annuel du débit. Exception faite des années 1975,1976 et 1977 durant lesquelles la région de Djemourah a connu de fortes crues, et par conséquent l'enregistrement d'importants débits.

L'analyse de la figure V.3 et du tableau V.1 démontre que la région qui jouxte le barrage de Foum El Gherza est touchée par les mêmes cycles secs et humides que les stations de Djemourah et El Kantara, à savoir une période sèche de 1971 à 2002, ensuite une période humide qui s'étale de 2003 jusqu'en 2012.

L'application du filtrage à la série de Foum El Gherza a démontré aussi, grâce à la longévité de la série, que la dernière période humide ayant touché la région avait finalement débuté en 1956.

De même, ce filtrage prouve aussi que les précipitations et les débits ont connu les mêmes successions de phases sèches et humides, ce qui démontre clairement que ces deux paramètres sont fortement raccordés.



**Figure V.3.** Evolution interannuelle des modules de la pluviométrie et du débit à la station de Foug El Gherza de 1950 à 2015 : a) indices centrés réduits b) valeurs pondérées centrées et réduites.

**V.4.2. Bilan hydrique**

Dans le but d'évaluer l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau dans la région semi-aride de Foum El Gherza, un bilan hydrique a été établi. Ce bilan a été régi à travers le calcul de ses différents paramètres annuels avant et après la rupture de 1969, et dont les résultats sont consignés dans le tableau V.2.

L'étude et l'analyse du tableau met la lumière sur les points suivants :

- Une baisse de 17 % de la pluie moyenne annuelle, tel qu'elle est passée de 202,44 mm avant la rupture à 168,28 mm après la rupture ;
- Une baisse de 63 % de l'excédent ou la pluie efficace, cette dernière était de 17,68 mm avant la rupture, puis est passée à 2,81 mm après la rupture ;
- Une baisse de 64 % du ruissellement moyen annuel, qui était d'environ 0,33 mm avant la rupture, puis 0,13 mm après la rupture ;
- Une baisse de 65 % de la lame d'eau servant à la recharger des aquifères de la région par infiltration, tel que sa valeur est passée de 17,35 mm avant la rupture à 2,68 mm après.

On peut alors conclure de ces observations que le volume d'eau qui s'infiltré dans les aquifères a connu une très grande réduction. Il est passé de 48 millions de m<sup>3</sup> en moyenne annuelle avant la rupture, à 7,5 millions de m<sup>3</sup> actuellement.

**Tableau V.2.** Bilan hydrique à la station de Foum El Gherza avant et après la rupture de 1969.

| <b>Paramètres</b>                             | <b>Avant la rupture (1950-1969)</b> | <b>Après la rupture (1969-2015)</b> |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Précipitation (mm)</b>                     | 202,44                              | 168,28                              |
| <b>ETP (mm)</b>                               | 1081,78                             | 1169,82                             |
| <b>ETR (mm)</b>                               | 184,76                              | 165,48                              |
| <b>Excédent (P-ETR) (mm)</b>                  | 17,68                               | 2,81                                |
| <b>Ruissellement R (mm)</b>                   | 0,33                                | 0,13                                |
| <b>Infiltration efficace (Ie) (mm)</b>        | 17,35                               | 2,68                                |
| <b>Volume d'eau infiltré (Mm<sup>3</sup>)</b> | 48                                  | 7,5                                 |

**V.4.2.1. Evolution interannuelle des paramètres climatiques**

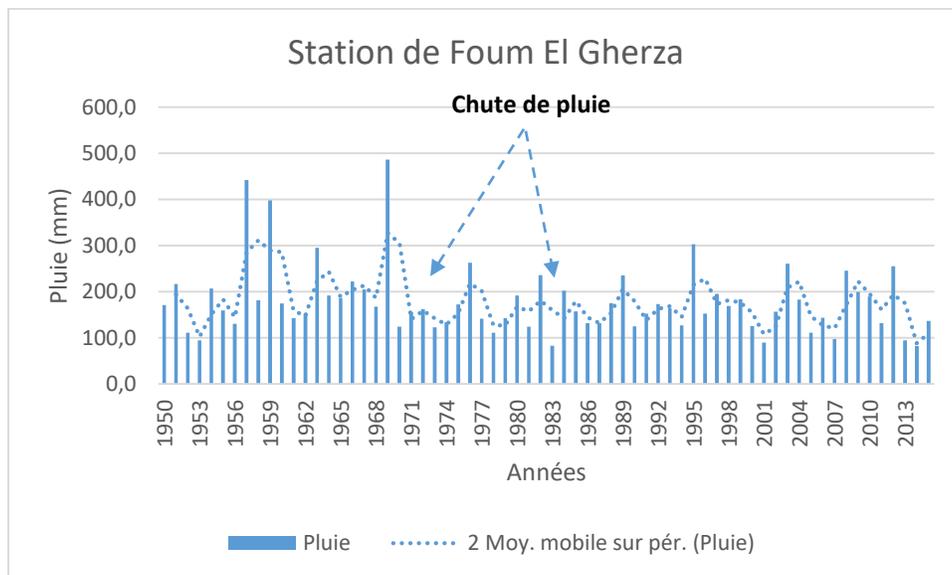
En prenant en considération la forte augmentation des températures ressenties depuis 1970 et par conséquent le taux d'évapotranspiration aussi, une explication logique en découlant peut alors justifier une grande partie de la variabilité et de la tendance des débits de la zone d'étude.

Une longue période de sécheresse de cinq (5) années successives est remarquable au début des années 70 et à la fin des années 90, tel qu'une diminution des précipitations y est apparente.

L'évolution de la pluviométrie se fait inversement à l'évolution de l'évapotranspiration de référence et de la température, comme représenté dans la figure V.5.

La disponibilité des ressources en eau de la région d'étude est influencée de manière négative par l'augmentation de la température, ceci se traduit par l'augmentation des pertes par évaporation (Henia et Benzarti, 2006; Amoussou *et al*, 2006).

Durant la succession des années de sécheresse, une période de déficit hydrique est remarquée aussi. Cette concordance de date prouve que le régime des cours d'eau est fortement lié à celui des précipitations.



**Figure V.4.** Variation interannuelle de la pluviométrie à la station de Foug El Gherza.

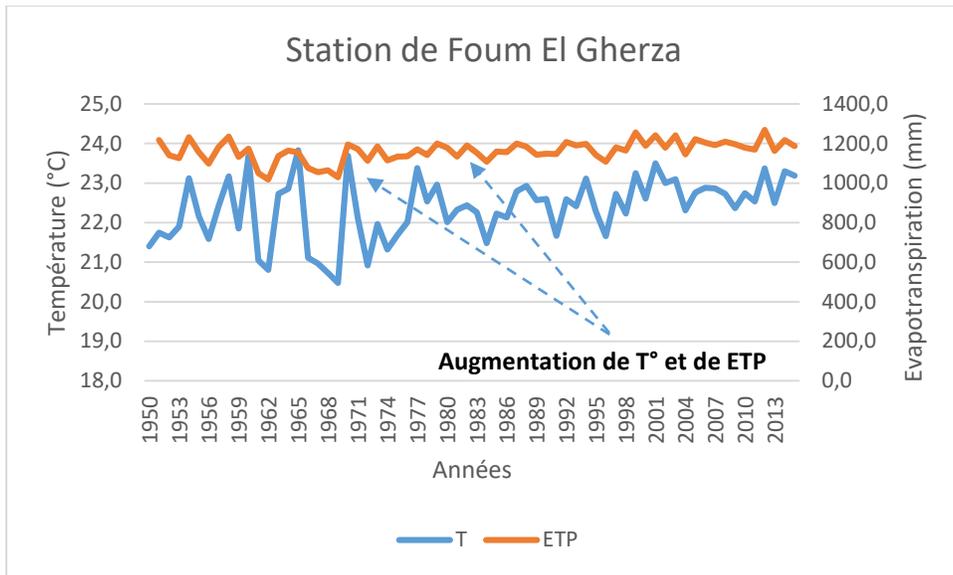


Figure V.5. Evolution des paramètres climatiques à la station de Foug El Gherza.

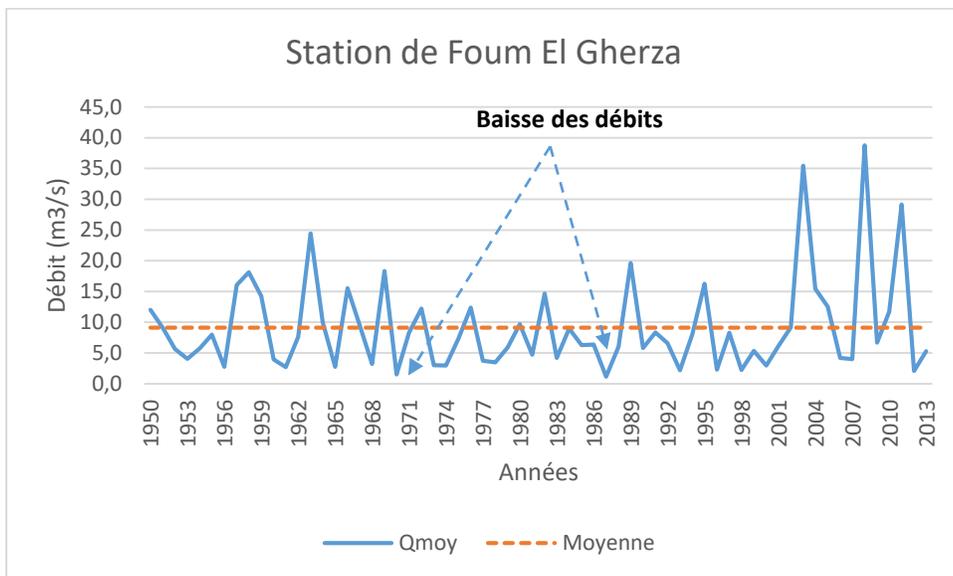


Figure V.6. Variation interannuelle des écoulements à la station de Foug El Gherza.

## V.5. Conclusions

L'application du filtre passe-bas de Hanning a confirmé les résultats du chapitre précédent stipulant que la région étudiée a connu deux (2) périodes humides allant de 1956 à 1970 et de 2003 à 2010, ainsi qu'une (1) période sèche de 1971 à 2002.

L'analyse des relations pluies – débits à travers l'utilisation des indices centrés réduit ainsi que le filtre passe-bas de Hanning a permis de mettre en évidence l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau superficielles. Cette relation se traduit par une diminution de la pluviométrie dès lors que l'écoulement de surface s'amointrit et vis vers ça. Ces résultats sont en accord avec les travaux de (Mebarki, 2010) qui a mis en évidence les années de faible hydraulicité à savoir : 1987 et 1993.

L'évolution de la pluviométrie se fait dans le sens inverse de celle de la température et de l'évapotranspiration de référence. L'augmentation de la température influe donc négativement sur la disponibilité des ressources en eau superficielles particulièrement dans notre cas, où la zone d'étude se caractérise par des températures extrêmes. Cet impact se traduit par l'augmentation des pertes par évaporation.

L'impact de la variabilité climatique sur les barrages s'exprime par leur faible remplissage, ceci est principalement dû à la diminution systématique du ruissellement des eaux de surface. Ce faible ruissellement affecte aussi les barrages de façon négative en favorisant leur envasement, comme dans le cas de Foug El Gherza, où le taux d'envasement s'est élevé jusqu'à 70% en 2006 (Remini, 2009).

La variabilité climatique possède aussi des effets négatifs sur la recharge des aquifères et les eaux souterraines. La comparaison des excédents obtenus à partir du bilan hydrique donne une idée de ces effets, tel qu'une baisse non négligeable de la recharge des ressources en eau souterraine y a été observée, causant aussi une diminution très sensible des écoulements, au moins en étiage, dans la région d'Oued Biskra. En effet, les travaux de (Khoualdia, 2014) affirment que le volume mobilisé par les aquifères a connu une réelle diminution au niveau du bassin versant de Medjerda.

Les dernières années ont été marquées par le retour d'un cycle humide tellement important que les chiffres publiés par le Ministère de l'Hydraulique font état d'un taux de remplissage des différents barrages de plus 70 % durant ces dernières années. Néanmoins, le retour de ce cycle s'accompagne d'une élévation de l'intensité des pluies, pouvant engendrer de dangereux phénomènes comme les inondations et les crues dévastatrices (Zeineddine., 2011 ; Benazzouz., 2011).

Dans ce contexte (et plus précisément dans les régions semi arides), l'amélioration et le renforcement des systèmes d'observations des pluies et des débits au niveau des différentes stations s'avèrent plus que nécessaires, et ce dans le but de mieux caractériser l'évolution du climat et contribuer alors à une meilleure adaptation aux probables effets néfastes des changements climatiques sur les ressources hydriques.

## Conclusion générale

Les principaux objectifs de ce mémoire consistaient d'une part en l'éclaircissement des points de connaissances concernant le lien existant entre les manifestations de la variabilité climatiques et celle des ressources en eau. Et d'autre part, en l'étude de l'impact de ce lien sur les ressources en eau en zone semi-aride.

Ce travail s'est reposé sur un axe principal d'étude, à savoir l'amélioration des notions de variabilité temporelle des régimes pluviométriques et hydrologiques.

Suite à l'analyse de la caractérisation de la variabilité climatique de la zone d'étude, nous avons remarqué que :

- L'utilisation des indices pluviométriques démontre que la région semi-aride d'Oued Biskra a été touchée par une forte sécheresse qui débuta aux années 1970, avec une importante succession d'années sèches qui va de 1976 à 1984. De plus, les analyses effectuées au niveau des stations méridionales nous ont permis de constater qu'antérieurement aux années 70, la période régnant était humide. Ce qui nous conduit à la conclusion stipulant que, notre zone d'étude est caractérisée par la présence de trois (3) périodes différentes : l'une sèche s'étalant de 1970 à 2002 et deux (2) autres humides allant de 1956 à 1969 et de 2003 à 2010. De plus, les faibles précipitations enregistrées durant la période 2009-2015 apparaissent comme un signe annonciateur marquant le début d'un cycle normal voire sec. Cette dernière conclusion reste à confirmer surtout s'il s'agit d'une région semi-aride, où les études ne sont pas si nombreuses.
- La cartographie des indices pluviométriques ou bien la caractérisation spatiale des précipitations de son côté, met en évidence le début d'apparition de la sécheresse durant la décennie allant de 1970 à 1979, et ce dans la majorité du bassin à l'exception de quelques zones humides. La période 1980 – 1989 démontre une extension de sécheresse dans l'ensemble du bassin, avec une accentuation de cette dernière d'est en ouest. La décennie 1990-1999 est caractérisée par la persistance de la sécheresse et sa généralisation à la partie nord. Enfin, la décennie 2000-2010 démontre une réapparition de l'excédent pluviométrique dans tout le bassin.
- Les séries de données chronologiques de l'étude ne sont pas stationnaires, elles présentent donc des ruptures. En effet, la région étudiée a connu deux (2) périodes de rupture distinctes, à savoir : une période allant de 1969 à 1971, où les ruptures coïncident avec les années de grandes sécheresses en Algérie avec une baisse significative de la moyenne

interannuelle des précipitations, et une période s'étalant de 2001 à 2006, qui annonce le retour des pluies et donc une tendance à la hausse de la pluviométrie.

D'autre part, l'étude de l'impact de la variabilité des paramètres climatiques au niveau d'Oued Biskra nous a permis de constater ce qui suit :

- L'application du filtre passe-bas de Hanning a confirmé les résultats précédents stipulant que la région étudiée a connu deux (2) périodes humides allant de 1956 à 1970 et de 2003 à 2010, ainsi qu'une (1) période sèche de 1971 à 2002.
- L'analyse des relations pluies – débits à travers l'utilisation des indices centrés réduits ainsi que le filtre passe-bas de Hanning a permis de mettre en évidence l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau superficielles. Cette relation se traduit par une diminution de la pluviométrie dès lors que l'écoulement de surface s'amoindrit et vis versa. Les années de faible hydraulicité ont été remarquées en 1971, 1987 et 1993.
- L'évolution de la pluviométrie est inverse par rapport à celle de la température et de l'évapotranspiration de référence. L'augmentation de la température influe donc négativement sur la disponibilité des ressources en eau superficielles particulièrement dans notre cas, où la zone d'étude se caractérise par des températures extrêmes. Cet impact se traduit par l'augmentation des pertes par évaporation.
- L'impact de la variabilité climatique sur les barrages s'exprime par leur faible remplissage, ceci est principalement dû à la diminution systématique du ruissellement des eaux de surface. Ce faible ruissellement affecte aussi les barrages de façon négative en favorisant leur envasement, comme dans le cas de Foum El Gherza, où le taux d'envasement s'est élevé jusqu'à 70% en 2006.
- La variabilité climatique possède aussi des effets négatifs sur la recharge des aquifères et les eaux souterraines. La comparaison des excédents obtenus à partir du bilan hydrique donne une idée de ces effets, tel qu'une baisse non négligeable de la recharge des ressources en eau souterraine y a été observée, causant aussi une diminution très sensible des écoulements, au moins en étiage, dans la région d'Oued Biskra.

- Les dernières années ont été marquées par le retour d'un cycle humide tellement important que les chiffres publiés par le Ministère de l'Hydraulique font état d'un taux de remplissage des différents barrages de plus 70 % durant ces dernières années. Néanmoins, le retour de ce cycle s'accompagne d'une élévation de l'intensité des pluies, pouvant engendrer de dangereux phénomènes comme les inondations et les crues dévastatrices.

Suite aux résultats que nous avons obtenus au niveau de la région d'Oued Biskra, nous avons remarqué que la caractérisation de l'évolution climatique nécessitait l'amélioration de plusieurs points parmi lesquels un renforcement des observations des pluies et des débits, plus particulièrement au niveau des différentes stations. Ce qui permettrait alors une meilleure analyse des effets que peut avoir ce changement sur les ressources hydriques.

## Liste des références bibliographiques

- A. F. S. Lee et S. M. Heghinian, 1977. A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables: A Bayesian approach, *Technometrics*, 19 (4) 503-506.
- Ake G-E., 2010. "Impacts de la variabilité climatique et des pressions anthropiques sur les ressources hydriques de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire)," Thèse Unique, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 200 p.
- Alley, W. M., 1984. The Palmer Drought Severity Index: Limitations and assumptions, *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 23, 1100-1109.
- Amoussou E., Oyede L. M. et Boko M., 2006. Variabilité pluvio-hydrologique et production agricole dans le bassin du Couffo au Bénin (Afrique de L'Ouest). XIXe colloque de l'association Internationale de climatologie, les risques liés au temps et au climat, Eparnay, 6-9 septembre, France, p. 67-72.
- Ardoin-Bardin S., 2004. Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone Soudano-sahélienne. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, 440p.
- Arnaud, M. et Emery X., 2000. Estimation et interpolation spatiale. Paris: Hermes Science.
- Assani A., 1999. Analyse de la variabilité temporelle des précipitations (1916-1996) à Lubumbashi (Congo-Kinshasa) en relation avec certains indicateurs de la circulation atmosphérique (oscillation australe) et océanique (El Niño/La Niña). *Sécheresse*, 10(4), pp 245- 252.
- Baillargeon, S., 2005. Le krigeage: revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations. Mémoire de Maitrise, Université Laval, Québec.
- Beersma J. et Buishand A., 2004. Joint probability of precipitation and discharge deficits in the Netherlands, *Water Resour. Res.*, 40, W12508, doi: 10.1029/2004WR003265.
- Benassi, M., 2001. Drought and climate change in Morocco. Analysis of precipitations field and water supply. *Options Méditerranéennes, série A* 80, 83–86.
- Benazzouz A., 2011. Conférence sur les inondations majeures en Algérie, Séminaire International UVREDA, Utilisation et valorisation des ressources en eau pour le développement durable des écosystèmes arides, Centre de Recherche Scientifique et technique sur les Régions Arides, Biskra, 13-14 novembre.

Benoit, G., et A. Comeau, 2005. Méditerranée les perspectives du Plan Bleu sur l'environnement et le développement, Document de travail, Plan Bleu.

Benzarti Z. et Habaieb H., 2001. Etude de la persistance de la sécheresse en Tunisie par utilisation des chaînes de Markov (1909- 1996). Sciences et changements planétaires, Sécheresse. Vol 12 (4), 215-20, Notes méthodologiques.

Bergaoui Z., 1983. Contribution à l'étude statistique de la pluie dans la région de Tunis. Thèse présentée à l'institut nationale polytechnique de Toulouse. 134 pp.

Bergaoui. M., Alouini, 2001. Caractérisation de la sécheresse météorologique: cas du bassin versant de Siliana en Tunisie. Rev. Sécheresse. Vol. 12 n°4. p. 205-213.

Bjerknes, J., 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial pacific, Mon. Weather Rev., 97, 163-172.

Blöchliger H., & Neidhöfer F., 1998 : Impacts des précipitations extrêmes, Rapport de l'orange consultatif en matière de recherche sur le climat et les changements climatiques, pp 40.

Boken, V.K., 2005. Agricultural drought and its monitoring and prediction: Some Concepts, in Monitoring and Predicting Agricultural Drought: A Global Study, edited by

Boken, V.K., Cracknell, A.P. and Heathcote, R.L., Oxford University Press, 3-10.

Brochet P. et N. Gerbier, 1974. L'évaporation : aspect agrométéorologique, évaluation pratique de l'évapotranspiration potentielle. Monographie Meteorol. Nat., 65, 95 p.

Buishand T.A., 1982. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. Journal of Hydrology, vol. 58, p. 11-27.

Busson G., 1971. Le Mésozoïque saharien. 2eme partie : Essai de synthèse des données de sondages algéro-tunisiens. Publication de Centre de la Recherche des zones arides (C.N.R.S), Série Géologie, vol.2, n.11, 810 p.

Chang, T. J. et Cleopa, X. A., 1991. A proposed method for drought monitoring. Water Resour. Bull., 27, 275–281.

Dacosta H., 1989. Précipitation et écoulements sur le Bassin de la Casamance. Thèse de 3ème cycle, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 278 p.

Demmak, A. et OuldAmara, A., 1994. La sécheresse en Algérie des décennies 1970 et 1990 et son impact sur les ressources en eau. Table ronde de sécheresse – changement climatique-désertification. M.R.E., O.S.S., Alger, 14p.

- Dracup, J.A., Lee, K.S. et Paulson Jr., E.G., 1980. On the definition of droughts, *Water Resour. Res.*, 16, 297-302.
- Driouech, F., Déqué, M. et Sánchez-Gómez, M., 2010. Weather regimes—Moroccan precipitation link in a regional climate change simulation. *Global and Planetary Change* 72, 1–10.
- Folland, C.K., Karl, T.R. et Vinnikov, K., 1990. Observed climate variations and change; in *Climate Change: the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) Scientific Assessment*, Cambridge University Press, London, United Kingdom, p. 195-238.
- Folland, C.T., Palmer, T.N. et Parker, D.E., 1986. Sahel rainfall and worldwide sea temperatures (1901-85), *Nature*, 320, 602-607.
- GIEC, 2001. Changements climatiques. Rapport de synthèse. <http://www.ipcc.ch>.
- GIEC, 2007. Changements climatiques. Rapport de synthèse. <http://www.ipcc.ch>.
- GIEC, 2014. Changements climatiques. Rapport de synthèse. <http://www.ipcc.ch>.
- Giorgi F., 2002. Variability and trends of sub-continental scale surface climate in the twentieth century. Part I: observations. *Climate Dynamics* 18, 675–691, doi 10.1007/s00382-001-0204-x488.
- Gratton, Y., 2002. Le krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale. Les articles de l'Institut d'Analyse Géographique, [www.iag.asso.fr](http://www.iag.asso.fr).
- Gravelius, H., 1914. Grundriß der gesamten Gewässerkunde, Band 1: flußkunde (Compendium of Hydrology, vol. 1: Rivers, in German). Goschen, Berlin, Germany.
- Grubbs, F.E. et Beck, G., 1972. Extension of sample sizes and percentage points for significance tests of outlying observations in *Technometrics*, Vol. 14, S. 847-854.
- Hanson, R.L., 1991. Evapotranspiration and Droughts, in: Paulson, R.W., Chase, E.B., Roberts, R.S and Moody, D.W., Compilers, National Water Summary 1988-89-Hydrologic Events and Floods and Droughts, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper, 2375, 99- 104.
- Henia L. et Benzarti Z., 2006. Changements climatiques et ressources en eau de la Tunisie. XIXe colloque de l'association Internationale de climatologie, les risques liés au temps et au climat, Eparnay, 6-9 septembre, France, p. 15-20.
- Hubert P., Servat E., Paturel J., Kouame B., Bendjoudi H., Carbonnel J.P et Lubes-Niel H., 1998. La procédure de segmentation, dix ans après. Proceedings of the Abidjan'98 conference on the

Water Resources variability in Africa during the XXth Century. IAHS Publication 252, pp267-273.

Jacobeit, J., 2000. Rezent Klimaentwicklungim Mittelmeerraum. Petermanns Geogr. Mittl. 144, 22–33.

Jarraud M., 2006. Changements climatiques et gestion des risques, conférence de presse l'Organisation météorologique mondiale (OMM), La Pastorale » Route de Ferney 106, Genève

Jouzel J .et Lorius C., 1999. Evolution du Climat : du passé vers le futur. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, 1999, n°328, 229-239.

Kadi D., 1995. Contribution à l'étude de la sécheresse sur le littoral algérien par le biais de traitement des données pluviométriques et la simulation, Thèse de Magister, Ecole nationale polytechnique d'Alger.

Keyantash, J. et Dracup, J. A., 2002. The quantification of drought: An evaluation of drought indices, B. Am. Meteorol. Soc., 83, 1167–1180.

Khaldi A., 2005. Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien " Monts de Tlemcen - Saida". Thèse présentée pour obtenir le titre de Docteur d'Etat à la faculté des Sciences de la terre, de Géographie et l'Aménagement du Territoire, Université d'Oran, Mai 2005.

Khoualdia W., Djebbar Y., et Hammar Y., 2014. Caractérisation de la variabilité climatique « cas du bassin versant de Medjerda » Nord- Est de l'Algérie. Rev. Sci. Technol., Synthèse 29: 6-23 (2014).

Khronostat, 1998. Logiciel d'analyse statistique de séries chronologiques. ORSTOM Ed. Paris. <http://www.hydrosciences.org/spip.php?article239>.

Kingumbi A., 2006. Modélisation hydrologique d'un bassin affecté par des changements d'occupation. Cas du Merguellil en Tunisie Centrale. Thèse de Doctorat, Université de Tunis El Manar, 300 p.

Klocke, N. L. et Hergert, G. W., 1990. How soil holds water, NebGuide G90-964, INAR, University of Nebraska, Lincoln.

Kouame KF., 2011. "Influences de la variabilité climatique et de la dégradation environnementale sur le fonctionnement de l'hydrosystème du N'zo dans la région guinéenne humide et semi-montagneuse de la Côte d'Ivoire. Contribution de la télédétection, des Systèmes d'Informations

Géographiques et du modèle hydrologique HYDROTEL,” Thèse d’Etat sciences naturelles. Université de Cocody, Abidjan. 379 p.

L’Hôte Y., Mahé G., Somé B. et Triboulet J.P., 2002. Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000 ; the drought continues. *Journal des sciences Hydrologiques*, 47(4), 563-572.

Laborde J.P., 1993. Carte pluviométrique de l’Algérie du Nord à l’échelle du 1/500000. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, projet PNUD/ALG/88/021, une carte avec notice explicative, 44 p.

Lahache R.G., et Pillet G., 2008. Projection des ressources en eau de la Tunisie sous les effets des changements climatiques globaux. XIIIth World Water Congress (Montpellier), 12 p.

Lamb, P.J. et Pepler, R.A., 1992. Further case studies of tropical Atlantic surface atmospheric and oceanic patterns associated with sub-Saharan drought, *J. Climate*, 5, 476–

Lawin, E. A., Oguntunde, P. G., Lebel, T., Afouda, A. et Gosset, M., 2012. Rainfall variability at regional and local scales in the Ouémé Upper Valley in Bénin. *International Journal of Science and Advanced Technology*, 2 (6): 46- 55 (ISSN 2221 -8386).

Lazzouzi S., 2014. Contribution à l’étude de la variabilité et de l’évolution de la pluviométrie sur le littoral Algérien. Projet fin d’étude, Ecole nationale polytechnique.

Lloyd-Hughes B., et Saunders A., 2002. Seasonal prediction of European spring precipitation from El Nino-southern oscillation and local sea-surface temperatures, *International J. Climat.*, 22, 1–14.

Longobardi, A. et Villani, P., 2009. Trend analysis of annual and seasonal rainfall time series in the Mediterranean area. *Int. J. Climatology* 30, 1538–1546.

Lubes H., Gautier F., Masson J-M., Servat E. et Paturel J-E., 1998. Variabilité du régime pluviométrique de l’Afrique de l’Ouest non sahélienne entre 1950-1989. *Journal des sciences hydrologiques*, 43(6).

Lubes H., Masson J-M., Servat E. et Paturel J-E., et Boyer J-F., 1994. Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par application de tests statistiques. Etude bibliographique, rapport 3, Programme ICCARE. OSTROM, Montpellier, France

Mahé G., L’Hôte Y., Olivry J., Wotling G., 2001. “Trends and discontinuities in regional rainfall of west and central Africa,” *J. Sci. Hydrol.*, vol. 46, n° 2, pp.211–226.

Mann, M.E., Bradley, R.C. et Hughes, M.K., 1999. Northern hemisphere temperature during the past millenium: inferences, uncertainties, and limitations; in *Geophysical Research Letters*, v. 26, no.6, p. 759-762.

- Matari A., Kerrouche M., Bousid H. et Douguedroit A., 1999. Sécheresse dans l'ouest algérien. Publications de l'association internationale de climatologie, volume 12, 1999.
- Mebarki A., 2010. Apport des cours d'eau et cartographie du bilan hydrologique : cas des bassins de l'Algérie ; Sécheresse. Volume 21, Numéro 4, 301-8, octobre-novembre 2010, Article de recherche.
- Meddi H. et Meddi M., 2009. Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie. Sécheresse, Vol 20, 57-67.
- Mouelhi C., 2003. Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journaliers. Thèse de Doctorat, École nationale du génie rural, des eaux et forêts de Paris, France, 274 p.
- Narasimhan, R. et Srinivasan, R., 2005. Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring, Agr. Forest Meteorol., 133, 69-88.
- Niasse, M., Afouda A. et Amani A., 2004. Réduire la vulnérabilité de l'Afrique de l'Ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et la désertification : Eléments de stratégie régionale de préparation et d'adaptation, UICN, Gland (Suisse) et Cambridge (Royaume Uni), 71 p.
- Nicholson S-E., 1994. "Recent rainfall fluctuations in Africa and their relationship to past conditions over the continent," The Holocene 4,2 pp 121-131.
- Narrant, C. et Douguédroit, A., 2003. Tendances récentes des précipitations et des pressions de surface dans le Bassin méditerranéen. Annales de géographie 112(631), 298–305.
- Narrant, C., 2007. Relations entre le niveau du géopotential 500 hPa de l'hémisphère nord et les précipitations du bassin méditerranéen (1950–2000). Climatologie 4, 91–104.
- Obassi, G.O., 1994. WMO's Role in the International Decade for Natural Disaster Reduction. Bulletin of American Meteorological Society, 75-9, 655-1661.
- Palmer, W. C., 1965. Meteorological Drought, Weather Bureau, Research Paper, 45, U.S. Dept. of Commerce, Washington, DC, 58 pp.
- Panu, U. S. et Sharma, T. C., 2002. Challenges in drought research: some perspectives and future directions, Hydrol. Sci. J., 47 (SI): S19-S30.
- Paturel J.E., Boubacar I. et L'Aour A., 2004. Evolution de la pluviométrie annuelle en Afrique de l'Ouest et centrale au XXème siècle. Sud Sciences and Technologies. N°13, pp 40 – 46.

- Paturel J.E., Servat E., Delattre M., 1998. "Analyse des séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Journal des Sciences Hydrologiques*," volume 43, n°3, pp. 937-945.
- Paturel J.E., Servat E., Kouamé B., Lubès H., Ouedraogo M. et Masson J.M., 1997. Climatic variability in humid Africa along the gulf of Guinea. Part II: an integrated regional approach. *Journal of Hydrology*, 191, pp 16-36.
- Penman H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc.*, A1931032, 120-145.
- Pettitt A.N., 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, vol. 28, n° 2, p. 126-135.
- Rasmusson, E.M. et Wallace, J.M., 1983. Meteorological aspect of the El Niño/Southern Oscillation, *Science*, 222, 1195-1202.
- Remini B., 2009. Evolution des grands barrages en régions arides : quelques exemples algériens ; Sécheresse. Volume 20, Numéro 1, 961-103, octobre-novembre-décembre 2019, Article de recherche.
- Ribeiro, Jr. P. J. et Diggle, P.J., 2001. geor: A package for geostatistical analysis. *R-NEWS* 1, (2), 15–18. ISSN 1609-3631.
- Rind, D., Goldberg, R., Hansen, H., Rosenzweig, C. et Ruedy, R., 1990. Potential evapotranspiration and the likelihood of future drought, *J. Geophys. Res.*, 95, 9983–10004.
- Robles M., López N., Gadsden H., Pineda R., Reyes-Gómez M. et Hinojosa R., 2006. Analyse des déficits hydriques dans l'état de Chihuahua (Mexique). *Sècheresse*, 17(4), 457-465.
- Rosenberg, N.J., 1978. North American droughts: AAAS [American Association for the Advancement of Science] Symposium, Denver, Colorado, February 1977. Boulder, Colorado, Westview Press.
- Seltzer P., 1946. Le climat de l'Algérie, Alger, Institut de Météorologie et de Physique du Globe, Carboneil, 219 p.
- Servat E., Paturel J.E., Lubès H., Kouamé B., Ouedraogo M. et Masson J.M., 1997. Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part I : detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire. *Journal of Hydrology*, 191, pp 1-15.

Servat E., Paturel J.E., Lubès-Niel H., Kouamé B., Masson J.M., Travaglio M., et Marieu B., 1999. De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. *Revue des sciences de l'eau*, 12(2), pp 363-387.

Stedinger, J. R., R. M. Vogel et E. Foufoula-Georgiou, 1993. Frequency analysis of extreme events, in *Handbook of Hydrology*, edited by D. R. Maidment, chap. 18, pp. 18.1-18.66, McGraw-Hill, New York.

Svoboda M., Hayes M., Heim R., Gleason K., Angel J., Rippey B., Tinker R., Palecki M., Stooksbury D., Miskus D., et Stephens S., 2002. The drought monitor, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83, 1181–1190.

Tate, E.L. et Gustard, A., 2000. Drought definition: a hydrological perspective, in: *Drought and Drought Mitigation in Europe*, edited by: Vogt, J. J. and Somma, F., Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 23-48.

The Nation, 25 Mai 2000. <http://www.africanews.org/east/kenya/stories>.

Thornthwaite C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, 38, 55-94.

Ting, M. F. et Wang, H., 1997. Summertime US precipitation variability and its relation to Pacific sea surface temperature, *J. Climate*, 10, 8, 1853-1873.

Tixeront J., 1964. Prévision des apports des cours d'eau : Dans : *Symposium Eau de Surface*, tenu à l'occasion de l'Assemblée générale de Berkely de L'UGGI, Berkely, CA, États-Unis, pp. 118-126.

Trenberth, K. E. et Shea, D. J., 2005. Relationships between precipitation and surface temperature, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L14703, doi:10.1029/2005GL022760.

Turc L., 1931. Évaluation des besoins en eau irrigation évapotranspiration potentielle. *Ann. Agron.*, 12, 13-49.

UNFCCC, 1992. *Convention Cadre des Nations unies sur les changements climatiques*, 33 p.

Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S. et López-Moreno, J.I., 2010. A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI, *J. Climate*, 23, 7, 1696-1718, doi: 10.1175/2009JCLI2909.1.

Vissin E- W., 2007. "Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger," Thèse de Doctorat. Hydroclimatologie. Université de Bourgogne Centre de Recherches de Climatologie - CNRS - UMR 5210. tel-00456097, version 1 - 11 Feb 2010. 285 p.

Watson, R.T., Zinyowera, M.C. et Moss, R.H., 1997. The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability. - Intergovernmental panel in Climate Change (IPCC), Working Group II, Special Report, November 1997. Consulté en ligne: <http://www.grida.no/climate/ipcc/>.

Wilhelmi, O. V., Hubbard, K. G. et Wilhite, D. A., 2002. Spatial representation of agroclimatology in a study of agricultural drought, *Int. J. Climatol.*, 22, 1399–1414. doi: 10.1002/joc.796.

Wilhite, D.A. et M.H. Glantz, 1985. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions, *Water Int.*, 10, 111-120.

Xoplaki, E., Luterbacher, J., Patrikas, J. et Maheras, P., 2000. Les précipitations hivernales en Grèce et leurs relations avec la circulation atmosphérique au niveau de 500 hPa. *Climate Research* 14, 129–146.

Zeineddine N., 2011. Vers un retour des pluies sur la rive sud du bassin méditerranéen occidental: analyse et évaluation de la tendance pluviométrique sur plus d'un demi – siècle en Algérie. *The Annals of Valahia University of Târgoviște, Geographical Series*, Tome 11 / 2011.