



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers
Département des Sciences de la Terre



MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du grade de
Master en Sciences de la Terre et de l'Univers
Option : **Hydrosystèmes et Ressources en Eau (HRE)**

Thème :

**Évaluation de la sécheresse climatique : Cas
d'étude d'un bassin versant à climat semi-aride**

Présenté par :

Belghali Chaima

Abid Oum El Kheir

Soutenu le : 01 / 07 / 2024

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Qualité	Grade	Domiciliation
Bakhti Amel	Présidente	MCB	Université d'Oran 2
Bergane Cheikh	Encadrant	MAB	USTO-MB-
Belkheir Khadidja	Examinatrice	MAA	Université d'Oran 2

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier le bon Dieu pour nous avoir donné le courage, la force et la volonté de réussir, et pour nous avoir éclairé le chemin tout au long de notre vie.

Nous remercions M. BERGANE, notre encadrant de l'USTO-MB, d'avoir proposé le sujet et de nous avoir encadrés et suivis dans notre travail.

Nous tenons à remercier Mme BAKHTI qui nous a fait l'honneur de présider le jury.

Nos sincères remerciements vont également à Mme BELKHIR, examinatrice, qui nous fait grand honneur d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

À tous nos enseignants tout au long de nos études. Je n'oublie pas non plus tous nos amis qui nous ont toujours encouragés. À tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin, à tous ceux qui nous ont encadrés, à tous ceux qui nous ont encouragés, à tous ceux qui nous ont accordé leur confiance, à tous ceux qui nous ont montré leur intérêt, à vous tous, MERCI !

Dédicace

Merci Allah « mon dieu » de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur.

À la mémoire de mes chers parents ; Aucune dédicace ne serait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Tous les mots du monde ne sauraient exprimer l'immense amour que je vous porte, ni la profonde gratitude que je vous témoigne pour tous les efforts et les sacrifices que vous n'avez jamais cessé de consentir pour mon instruction et mon bien-être. Je vous dois ce que je suis aujourd'hui grâce à votre amour, à votre patience et vos innombrables sacrifices. Que Dieu, le miséricordieux, vous accueille dans son éternel paradis. Tous mes respects et ma reconnaissance vont à ma famille, source de ma motivation et de mes espoirs, je leur dédie mon travail.

Je dédie ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance en témoignage de ma profonde affection à :

- ✚ Ma chère mère qui m'a protégé pendant toute ma vie, et qui a fait tout pour que je devienne ce que je suis ;
- ✚ Mon père qui m'a tant aidé et encourager ;
- ✚ à mes grands-parents ;
- ✚ Tous mes frères et sœurs ;
- ✚ Toute la famille Belghali et Mazar ;
- ✚ Tous mes amis surtout rabab, nour el houda et sarah ;
- ✚ Toute personne qui a contribué de près ou de loin à ma réussite.

Chaima

Dédicace

Je dédie les fruits de ma réussite et mon diplôme a ce lui qui m'a porté quand elle est faible, à celui qui a veillé tard pour me donner un bon sommeil, et qui pour ma supériorité a bu l'amer avant le doux. Source de tendresse, ma mère.

A celui qui m'a appris et donné une personnalité unique et qui n'a pas lésiné sur moi avec ses conseils et son orientation dans la gestion du navire de mon apprentissage jusqu'à ce qu'il s'ancre ainsi, mon cher père.

A ceux qui ont récolté les épines de mon chemin et qui ont été mon soutien et mon aide jusqu'à ce qu'ils préparer le terrain pour apprendre, mes frères et mes sœurs.

A mon camarade qui m'ont accompagné dans la préparation de cette recherche sans relâche ou m'ennuyer Belghalli chaima , et sans oublies mes amis khaoula, Hanan, Rabab.

Enfin, je dédie cette réussite à la fois à la famille ABID et MOULAY, qui m'a comblé d'amour, d'appréciation et de conseille.

Oum El Kheir

Résumé

La sécheresse est un phénomène naturel caractérisé principalement par un déficit de précipitations sur une zone géographique donnée pendant une période définie. Ses impacts sont significatifs dans les domaines socio-économiques, environnementaux et agricoles. L'objectif principal de cette étude est d'analyser le comportement de la sécheresse dans un bassin versant endoréique comprenant 14 stations pluviométriques, réparties entre le bassin versant des Hauts-Plateaux Constantinois et celui de Chott Melghir. Cette analyse repose sur le calcul d'indices de sécheresse météorologique à l'échelle annuelle, couvrant différentes périodes d'observation allant de 33 ans à 43 ans. Les indices évalués comprennent l'Indice de Concentration des Précipitations, l'Indice de Précipitation Standardisé, l'Indice d'Aggressivité des Précipitations, l'Indice de Saisonnalité et l'Indice d'Anomalie des Précipitations. Les résultats de PCI montrent une diversité marquée dans la concentration des précipitations au sein du bassin versant, avec des stations présentant des niveaux variables de concentration. L'altitude et la latitude émergent comme des facteurs déterminants dans la variation de la concentration des précipitations, tandis que l'impact de la longitude est négligeable. L'analyse du SPI met en évidence que la catégorie la plus fréquemment observée est "proche de la normale", couvrant près de 70% des années étudiées. Environ 16% des années sont caractérisées par des conditions humides, tandis que les périodes de conditions sèches représentent environ 14% des années. La période de 1982-1991 se caractérise par une humidité relativement élevée comparée aux décennies 1972-1981 et 1992-2001. Les résultats du coefficient de corrélation de Pearson entre les indices de sécheresse SPI, IFM et RAI pour les 14 stations du bassin versant étudié révèlent des valeurs significatives entre les indices SPI et RAI, avec $r \geq 0,99$ suggérant une cohérence remarquable entre ces deux indices dans l'évaluation des conditions de sécheresse et des niveaux de corrélation légèrement inférieurs entre SPI et IFM, ainsi qu'entre IFM et RAI soulignant une cohérence moindre entre ces paires d'indices.

Mots clés : Sécheresse ; Endoréique ; PCI ; SPI ; MFI ; SI ; RAI.

Abstract

Drought is a natural phenomenon characterized mainly by a lack of precipitation over a given geographical area during a defined period. Its impacts are significant in the socio-economic, environmental and agricultural fields. The main objective of this study is to analyze the behavior of drought in an endorheic watershed comprising 14 rainfall stations, distributed between the Hauts-Plateaux Constantinois watershed and that of Chott Melghir. This analysis is based on the calculation of meteorological drought indices on an annual scale, covering different observation periods ranging from 33 years to 43 years. The indices evaluated include the Precipitation Concentration Index (PCI), the Standardized Precipitation Index (SPI), the Modified Fournier Index (MFI), the Seasonality Index (SI) and the Rainfall Anomaly Index (RAI). The PCI results show a marked diversity in precipitation concentration within the watershed, with stations exhibiting varying levels of concentration. Altitude and latitude emerge as determining factors in the variation of precipitation concentration, while the impact of longitude is negligible. The SPI analysis shows that the most frequently observed category is "near normal", covering almost 70% of the years studied. Around 16% of years are characterized by wet conditions, while periods of dry conditions account for around 14% of years. The 1982-1991 period is characterized by relatively high humidity compared to the 1972-1981 and 1992-2001 decades. The results of the Pearson correlation coefficient between the SPI, IFM and RAI drought indices for the 14 stations in the watershed studied reveal significant values between the SPI and RAI indices, with $r \geq 0.99$ suggesting remarkable consistency between these two indices in assessing drought conditions, and slightly lower correlation levels between SPI and IFM, as well as between IFM and RAI highlighting less consistency between these pairs of indices.

Keywords : Drought ; Endorheic Watershed ; PCI ; SPI ; MFI ; SI ; RAI.

المخلص:

الجفاف هو ظاهرة طبيعية تتميز بشكل رئيسي بنقص في الهطولات المطرية في منطقة جغرافية معينة خلال فترة زمنية محددة. تأثيراته كبيرة في المجالات الاجتماعية والاقتصادية والبيئية والزراعية. الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تحليل سلوك الجفاف في حوض مائي داخلي يضم 14 محطة مطرية، موزعة بين حوض المرتفعات القسنطينية وحوض شط ملغيغ. يعتمد هذا التحليل على حساب مؤشرات الجفاف المناخي على المستوى السنوي، ويغطي فترات رصد مختلفة تتراوح بين 33 و 43 عامًا. تشمل المؤشرات التي تم تقييمها مؤشر تركيز الهطولات المطرية، مؤشر الهطولات المطرية القياسي، مؤشر شدة الهطولات المطرية، مؤشر الموسمية، ومؤشر شذوذ الهطولات المطرية. تظهر نتائج مؤشر تركيز الهطولات (PCI) تباينًا ملحوظًا في تركيز الهطولات المطرية داخل الحوض المائي، حيث أظهرت المحطات مستويات مختلفة من التركيز. تبرز كل من الارتفاع وخط العرض كعوامل حاسمة في التباين في تركيز الهطولات المطرية، بينما كان تأثير خط الطول طفيفًا. يكشف تحليل مؤشر الهطولات القياسي (SPI) أن الفئة الأكثر شيوعًا هي "قريبة من المعدل الطبيعي"، حيث تغطي حوالي 70% من السنوات التي تمت دراستها. تتميز حوالي 16% من السنوات بظروف رطبة، في حين تمثل الفترات الجافة حوالي 14% من السنوات. تتميز فترة 1982-1991 بارتفاع نسبي في الرطوبة مقارنة بالعقود 1972-1981 و 1992-2001. تكشف نتائج معامل ارتباط بيرسون بين مؤشرات الجفاف SPI، MFI و RAI للمحطات الـ 14 في الحوض المائي المدروس عن قيم كبيرة بين مؤشري SPI و RAI، مع $r \geq 0,99$ مما يشير إلى اتساق كبير بين هذين المؤشرين في تقييم حالات الجفاف ومستويات الارتباط، بينما كانت العلاقة بين SPI و MFI وكذلك بين MFI و RAI أقل وضوحًا، مما يشير إلى تباين أقل بين هذه الأزواج من المؤشرات.

الكلمات المفتاحية: الجفاف؛ داخلي؛ PCI؛ SPI؛ MFI؛ SI؛ RAI؛

Sommaire

Introduction Générale	1
Chapitre I Étude bibliographique	3
I.1 Introduction.....	5
I.2 Définition de la sécheresse.....	5
I.3 Classification de la sécheresse	6
I.3.1 Sécheresse météorologique	6
I.3.2 Sécheresse agricole	6
I.3.3 Sécheresse hydrologique.....	6
I.3.4 Sécheresse socio-économique	6
I.4 Causes et impacts de la sécheresse.....	6
I.4.1 Aspect enviromental	7
I.4.2 Aspect social	8
I.4.3 Aspect économique	8
I.5 Caractérisation de la sécheresse	8
I.6 Sécheresse en Algérie.....	9
I.6.1 Evénements historiques	9
I.6.2 Quelques études sur la sécheresse en Algérie	11
I.7 Structures nationales travaillant dans la problématique de la sécheresse.....	17
I.7.1 Catégorie des structures fortement impliquées	17
I.7.2 Catégorie des structures utilisatrices de l'information sur la sécheresse.....	17
Chapitre II Présentation de la zone d'étude	18
II.1 Délimitation de la zone d'étude	19
II.2 Lithologie et perméabilité	20
II.3 Relief.....	20
II.4 Morphométrie	20
II.4.1 Caractéristiques de forme du bassin versant.....	20
II.4.1.1 Surface du bassin versant.....	20
II.4.1.2 Périmètre du bassin versant.....	20
II.4.1.3 Coefficient de compacité de Gravélius.....	20
II.4.1.4 Rectangle équivalent	21
II.5 Etude climatique.....	21
II.5.1 Sélection des stations pluviométriques.....	21
II.5.2 Contrôle de la fiabilité des données : méthode des doubles cumulées.....	23
II.5.3 Vérification de l'homogénéité des stations de référence	26
II.5.4 Statistiques descriptives	27
II.5.5 Diagramme ombrothermique	28

II.5.6 Régime climatique	29
II.5.7 Bilan hydrique selon Thornthwaite	31
Chapitre III Caractérisation de la sécheresse	33
III.1 Introduction.....	34
III.2 Influence des facteurs géographiques sur la distribution, la concentration et la saisonnalité des précipitations.....	34
III.2.1 Influence des facteurs géographiques sur la distribution des précipitations	34
III.2.2 Influence des facteurs géographiques sur la concentration des précipitations	36
III.2.3 Influence des facteurs géographiques sur l'agressivité des précipitations.....	44
III.3 Analyse des tendances pluviométriques	47
III.4 Evaluation de la sécheresse météorologique.....	53
III.5 Corrélation entre différents indices de sécheresse.....	57
Conclusion Générale.....	61

Liste des figures

Figure I.1 : Carte des déficits pluviométriques dans le Nord Algérien (ANRH 2017)	10
Figure II.1 : Délimitation de la zone d'étude	19
Figure II.2 : Stations pluviométriques retenues pour l'étude	22
Figure II.3 : Contrôle de l'homogénéité des données pluviométriques des stations étudiées.....	26
Figure II.4 : Diagrammes ombrothermiques de Gaussen et Bagnauls de quelques stations pluviométriques étudiées.....	29
Figure II.5 : Climagramme d'Emberger comportant les stations pluviométriques étudiées	30
Figure II.6 : Représentation graphique du bilan hydrique de Thornthwaite de la station de Halla Boudella...	32
Figure III.1 : Variation de la pluie intra-annuelle en fonction de l'altitude	35
Figure III.2 : Variation de la pluie intra-annuelle en fonction de latitude	35
Figure III.3 : Variation de la pluie intra-annuelle en fonction de la longitude	36
Figure III.4 : Variation de PCI en fonction de l'altitude	38
Figure III.5 : Variation de PCI en fonction de latitude	39
Figure III.6 : Variation de PCI en fonction de la longitude.....	39
Figure III.7 : Variation de SI en fonction de PCI	42
Figure III.8 : Variation de SI en fonction de l'altitude.....	43
Figure III.9 : Variation de SI en fonction de latitude.....	43
Figure III.10 : Variation de SI en fonction de longitude.....	44
Figure III.11 : Variation de IFM en fonction de l'altitude	46
Figure III.12: Variation de IFM en fonction de latitude	47
Figure III.13 : Variation de IFM en fonction de longitude	47
Figure III.14 : Classification de la sécheresse annuelle par SPI pour chaque station pluviométrique	54
Figure III.15 : Pourcentage moyenne d'occurrence de la sécheresse selon l'indice SPI	54
Figure III.16 : Pourcentage de stations affectées par les différentes catégories de sécheresse	55
Figure III.17 : Fréquences des classes de l'indice SPI pour trois décennies successives	57

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Caractéristiques et période d'observation des stations pluviométriques retenues pour l'étude	22
Tableau II.2 : Résultats du test de Wilcoxon	27
Tableau II.3 : Caractéristiques statistiques des stations pluviométriques étudiées	27
Tableau II.4 : Caractérisation climatique de quelques stations pluviométriques étudiées	30
Tableau II.5 : Bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite de la station station Halla Boudella	32
Tableau III.1 : Classification de la sécheresse selon les valeurs de PCI	36
Tableau III.2 : Indice de concentration des précipitations des stations du bassin versant étudié.....	37
Tableau III.3 : Différentes classes de SI	40
Tableau III.4 : Indice de saisonnalité des précipitations des stations du bassin versant étudié	41
Tableau III.5 : Classification de la sécheresse selon les valeurs de IFM	44
Tableau III.6 : Indice d'agressivité des précipitations des stations du bassin versant étudié	45
Tableau III.7 : Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués sur les précipitations annuelles..	50
Tableau III.8 : Classification de la sécheresse selon les valeurs de SPI	53
Tableau III.9 : Classification de la sécheresse selon les valeurs du RAI.....	58
Tableau III.10 : Corrélation entre différents indices de sécheresse	58

Liste des abréviations

ABH : Agence des Bassins Hydrographiques
ACP : Analyse en Composantes Principales
ADE : Algérienne Des Eaux
AMDO : Atlantic Multi- Decadal Oscillation
ANBT : Agence Nationale des Barrages et Transferts
ANCC : Agence Nationale sur les Changements Climatiques
ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques
ASA : Agence Spatiale Algérienne
BNEDER : Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural
CDER : Centre de Développement des Energies Renouvelables
ENSO : El Nino Southern Oscillation
ETP : ÉvapoTranspiration Potentielle
ETR : ÉvapoTranspiration Réelle
IFM : Index Fournier Modified
INRAA : Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie
INRF : Institut National de la Recherche Forestière
INSID : Institut National des Sols, de l'Irrigation et du Drainage
MK : Mann-Kendall
MO : Mediterranean Oscillation
NAO : North Atlantic Oscillation
ONM : Office National de la Météorologie
ONS : Office National Des Statistiques
PCI : Precipitation Concentration Index
RAI : Rainfall Anomaly Index
RDI : Reclamation Drought Index
RU : Réserve Utile
SI : Seasonality Index
SIG : Systèmes d'Informations Géographiques
SPEI : Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
SPI : Standardized Precipitation Index
SSFI : Standardized Stream Flow Index
STI : Standard Temperature Index
TCI : Temperature Condition Index
TVDI : Temperature-Vegetation Drought Index

VCI : Vegetation Condition Index

VHI : Vegetation Health Index

WMO : Western Mediterranean Oscillation

Introduction Générale

Introduction Générale

La sécheresse peut être définie comme un phénomène naturel qui affecte les ressources en eau. Elle ruine une région lentement, s'installe et renforce son œuvre de destruction avec le temps. Elle a des effets négatifs sur plusieurs secteurs, à savoir : l'économie, la société et l'environnement. La sécheresse se caractérise par une absence prolongée de précipitations. Ce déficit pluviométrique ne permet plus de satisfaire les besoins en eau des végétaux, des animaux et des êtres humains. Elle est généralement classifiée en quatre types : la sécheresse météorologique, la sécheresse hydrologique, la sécheresse agricole et la sécheresse socio-économique.

Sur la base d'une étude à l'échelle mondiale, presque tous les pays peuvent être touchés par la sécheresse s'ils subissent un manque de pluie pendant une certaine durée, accompagné de températures chaudes. Seules les zones polaires et subpolaires ne peuvent connaître de sécheresse, car elles sont entièrement recouvertes de glace.

Les indicateurs de sécheresse sont des variables qui servent à décrire les conditions de sécheresse. Ils peuvent être météorologiques, comme les précipitations et les températures, ou hydrologiques, comme les débits des cours d'eau ou les niveaux des eaux souterraines.

La gestion de la sécheresse repose sur des indices statistiques permettant de décider quand commencer la mise en œuvre des mesures de conservation de l'eau ou d'atténuation. Plusieurs indices correspondant à différents types de sécheresse ont été proposés par les chercheurs pour mieux identifier, caractériser et suivre la sécheresse.

De nombreux chercheurs ont réalisé des études sur le phénomène de sécheresse en Algérie (**Hamlaoui et al (2013) ; Meddi et Rahmouni (2014) ; Khoualdia et al (2014) ; Lazri et al (2015) ; Merabti et al (2017) ; Habibi et al (2018) ; Berhail (2019) ; Hallouz et al (2020) ; Mega et Medjerab (2021)**). Ils ont montré que, depuis les années 70, le pays a connu des sécheresses fréquentes dues aux perturbations de la pluviométrie et à la forte consommation d'eau. Ces facteurs ont eu des impacts drastiques sur les ressources en eau superficielles et souterraines.

Plusieurs indices de sécheresse ont été proposés pour identifier ce phénomène et quantifier son degré de gravité. Cela a conduit les chercheurs à réaliser des études comparatives entre les différents indices afin de sélectionner celui qui est le plus approprié.

Dans cette étude, nous utiliserons et comparerons cinq indices de sécheresse météorologique : le SPI (Indice de Précipitation Standardisé), le PCI (Indice de Concentration des Précipitations), l'IFM (Indice d'Aggressivité des Précipitations), le RAI (Indice d'Anomalie des Précipitations) et le SI (Indice de Saisonnalité). L'objectif est de déterminer lequel de ces indices est le plus fiable pour l'évaluation de la sécheresse. Pour ce faire, nous analyserons les précipitations annuelles de 14 stations pluviométriques situées dans un bassin versant endoréique, réparties entre les Hauts-Plateaux

Constantinois et le bassin versant de Chott Melghir, caractérisés par un climat semi-aride, avec des données fournies par l'ANRH. L'objectif principal de ce travail est d'évaluer comment ce bassin versant réagit à la sécheresse afin de mieux suivre les conditions de sécheresse et les changements climatiques dans cette région.

Ce mémoire est structuré de la manière suivante :

- Une introduction générale qui expose le contenu du travail ;
- Le premier chapitre aborde une recherche bibliographique incluant les définitions, les types et les concepts explicatifs du phénomène de la sécheresse, ainsi que les études réalisées sur la sécheresse en Algérie ;
- Le deuxième chapitre présente la zone d'étude ;
- Le troisième chapitre est dédié à l'évaluation de la sécheresse dans la région étudiée ;
- Une conclusion générale résumant les résultats obtenus et proposant des recommandations.

Chapitre I

Étude bibliographique

I.1 Introduction

La sécheresse est un phénomène dévastateur caractérisé par une situation, temporaire ou saisonnière, de déficit en eau par rapport à l'état normal, dans lequel les ressources en eau seraient insuffisantes pour répondre à la demande d'approvisionnement en eau imposée par des systèmes à usage humain et aux besoins de l'environnement. La sécheresse est une anomalie d'échelle régionale, elle peut toucher les régions humides comme elle peut aussi toucher les régions arides. La complexité de la définition de sécheresse fait que différentes propositions sont faites et différents angles peuvent être traités dans ce domaine.

La sécheresse est généralement classée par types (météorologique, agricole, hydrologique et socio-économique), et elle peut être caractérisée par la durée, la sévérité, l'intensité, la couverture spatiale et sa période de retour (**Wilhite & Buchanan-Smith, 2005**).

Le suivi de la sécheresse joue un rôle très important dans la prévision et la prévention contre ce phénomène, pour cela on s'intéresse à la sécheresse future en analysant l'évolution du degré de la sensibilité au phénomène entre une référence actuelle fixée et une période future.

I.2 Définition de la sécheresse

Selon **Tate & Gustard (2000)** et **Cai et al. (2017)**, il y a une absence d'une définition universelle précise et incontestée de la sécheresse. Cependant, les définitions peuvent être classées en grandes catégories comme conceptuelle ou opérationnelle (**Wilhite & Glantz, 1985**). La définition conceptuelle décrit les concepts de base de la sécheresse avec une description générale des processus physiques impliqués, tels que le manque de précipitations, le manque d'humidité du sol, la pénurie d'eau dans les lacs et les cours d'eau et la pénurie d'eau à l'usage domestique (**Wilhite & Chapter, 2000**).

D'autre part, la définition opérationnelle se concentre sur l'identification du début, la durée et la fin des épisodes de la sécheresse, y compris leur gravité (**Mishra & Singh, 2010**). Les définitions opérationnelles visent à fournir des informations précises sur la sécheresse à l'aide d'un système d'alerte précoce efficace (**Wilhite & Chapter, 2000**). La cohérence entre ces définitions est une clé pour lever toute ambiguïté dans l'élaboration des politiques de lutte contre la sécheresse (**Mukherjee et al, 2018**).

Classiquement définie, la sécheresse est un événement récurrent du climat due essentiellement à un déficit hydrique marqué temporairement dans une ou plusieurs composantes du cycle hydrologique (**Hong et al, 2016**). Ce manque d'eau est généralement causé par des faibles précipitations sur une période donnée qui peut être ponctuelle ou cyclique et ce, par rapport à la moyenne provoquant un sérieux déséquilibre hydrologique et donc de graves dommages en vies humaines et des pertes économiques (**Chang & Cleopa, 1991 ; Yihdego, 2016**).

I.3 Classification de la sécheresse

Les sécheresses sont généralement classées en quatre types à savoir : la sécheresse météorologique, la sécheresse agricole, la sécheresse hydrologique et la sécheresse socio- économique.

I.3.1 Sécheresse météorologique

La sécheresse météorologique est caractérisée par un déficit des précipitations solides et liquides, sur une période du temps prédéterminée durant laquelle les précipitations sont inférieures à la normale. Elle est souvent déclenchée par des anomalies persistantes de grande échelle des températures de surface de la mer (**Szczypta, 2012**).

I.3.2 Sécheresse agricole

La sécheresse agricole se définit plus souvent par un déficit lié à la réserve en eau du sol. Il s'agit d'une période durant laquelle l'humidité du sol est inférieure à sa valeur moyenne. Elle est généralement provoquée par un cumul des précipitations inférieur à la normale, elle peut parfois être engendrée par des taux d'évapotranspiration plus élevés. Ce qui a des conséquences directes sur la végétation, qu'elle soit naturelle ou cultivée (**Szczypta, 2012**).

I.3.3 Sécheresse hydrologique

La sécheresse hydrologique est définie par une réalimentation d'eau insuffisante au niveau des réservoirs du sol ou du sous-sol, dans laquelle le débit des cours d'eau ne répond pas convenablement aux besoins en eau établis par le système de gestion de l'eau local. Elle a eu un impact important sur les activités humaines, car elle va avoir de fortes conséquences sur l'irrigation, les loisirs, le tourisme, le contrôle des inondations, le transport, la production d'énergie hydroélectrique, l'alimentation en eau domestique et la protection de l'environnement (**Szczypta, 2012**).

I.3.4 Sécheresse socio-économique

La sécheresse socio-économique diffère nettement des autres types car elle associe l'activité humaine à des éléments de sécheresse météorologique, agricole et hydrologique. Cela peut résulter de facteurs affectant l'offre ou la demande de certains produits de base (par exemple, l'eau, l'énergie hydroélectrique, etc.) qui dépendent des précipitations (**WMO, 2006**).

I.4 Causes et impacts de la sécheresse

Le manque d'eau et les températures élevées sont des causes naturelles principales de la sécheresse. Lorsque l'hiver ou le printemps n'ont pas été suffisamment pluvieux, les réserves d'eau ne sont pas assez remplies. Le manque d'eau accompagné par une augmentation de températures va accentuer le phénomène de sécheresse car il y aura davantage d'évaporation et de transpiration des plantes ce qui assèche les sols. Ainsi, les aérosols obscurcissant l'atmosphère, la diminution de la couche d'ozone, les déplacements des continents vers les pôles, les courants océaniques, et même l'activité du soleil, peuvent provoquer le phénomène de sécheresse (**Djrbouai, 2016**).

En outre, les activités humaines peuvent également aggraver le phénomène. En effet, l'émanation de gaz toxiques, le surpâturage, l'utilisation abondante de l'eau dans certains milieux, etc. vont créer un déficit dans les réserves d'eau et si ces dernières sont mal gérées, alors la sécheresse sera d'autant plus marquée.

La sécheresse est la catastrophe naturelle la plus coûteuse et la plus meurtrière de notre époque. Elle a des impacts sur plusieurs aspects :

I.4.1 Aspect environnemental

La sécheresse affecte le secteur environnemental, dans lequel elle a des effets sur :

- **Le sol :** La diminution de la teneur en eau dans le sol, mène à la diminution de productivité et de matière organique, fragilise sa structure et conduit à l'encroûtement de la surface du sol par éclaboussure de pluie qui peut augmenter l'érosion de 30 à 50% ou plus conduisant à une diminution de la disponibilité de l'eau et à une érosion plus poussée (**Verrecchia et al., 1995**), la diminution de l'humidité des sols, se traduit également en une faible activité biologique de la faune et de la flore, et en particulier les symbiotes, ce qui réduit le cycle des géo- biogènes (N, P, K, S, Ca, Na, Mg, Fe, Cu, Zn, Co, etc.) en causant une réduction de fertilité (**Le Houerou, 1995**) ;
- **Les ressources en eau :** Tous les impacts de la sécheresse sont liés à la demande en eau excédant les quantités disponibles. La période de temps de l'arrivée des précipitations jusqu'à ce que l'eau soit utilisable dans chaque forme diffère grandement, par exemple, la sécheresse agricole se produit sur une échelle de temps plus petite par rapport à celle de la sécheresse hydrologique, en conséquent, les impacts d'un déficit hydrique sont une fonction complexe de la ressource d'eau et de son utilisation (**Mckee et., al, 1993**). L'eau dans les systèmes de stockage hydrologique est souvent utilisée à des fins multiples et concurrentes par exemple, la production d'électricité, la consommation domestique, l'irrigation, les loisirs, etc., compliquant davantage la séquence et la quantification des impacts, la concurrence pour l'eau dans ces systèmes de stockage s'intensifie pendant la sécheresse et les conflits entre les utilisateurs d'eau augmentent considérablement (**Wilhite & Chapter, 2000**) ;
- **Le couvert végétal et le rendement agricole :** Le domaine agricole est un des secteurs les plus sensibles aux changements du climat tan que le rendement agricole dépend des conditions climatiques notamment les céréales (**Watson et al., 1995**). La sécheresse a des impacts sur la croissance de la végétation, la productivité, la structure, la composition et les fonctionnements des écosystèmes comme la fixation du Carbone et les flux d'énergie (**Xia et al 2014**) et conduit à l'accumulation de la litière ce qui limite la régénération des plantes. Les sécheresses prolongées causent également la mort des arbres, les incendies fréquentes et intensifiées,

les infestations des insectes et les maladies sont quelques phénomènes du stress causé par le changement et la variabilité climatique.

- **La biodiversité et écosystèmes :** Un manque d'eau affecte les poissons vivant dans l'eau, ainsi les animaux qui s'abreuvent aux points d'eau.

I.4.2 Aspect social

La sécheresse provoque une sous-alimentation en eau, qu'elle peut causer des pertes humaines, des maladies à transmission hydriques. Dans ce cas, une préservation de certaines sources en eau sera importante, et donc les responsables doivent en urgence préserver certaines sources en eau et prendre les mesures de sécurité pour protéger la santé publique.

I.4.3 Aspect économique

Les sécheresses affectent fortement l'agriculture, dans laquelle une baisse prononcée de la production agricole et des ressources alimentaires. Elle a des impacts négatifs sur d'autres secteurs tels que : la sylviculture, la pêche et le tourisme.

I.5 Caractérisation de la sécheresse

Les épisodes de la sécheresse ont plusieurs caractéristiques interdépendantes et chacun de ces caractéristiques peuvent avoir une influence considérable sur les impacts de ce phénomène (**Mishra et al, 2009**). Par conséquent, le suivi de la sécheresse nécessite une évaluation conjointe de ses caractéristiques ainsi que l'identification de l'événement de sécheresse correspond à l'impact étudié (**Cai et al, 2017**).

L'ampleur de la sécheresse est généralement classée en trois dimensions : intensité, durée temporelle et étendue spatiale. Le moment étant un aspect important. L'ampleur des impacts de la sécheresse est fortement liée au moment où débute le déficit pluviométrique, à son intensité et à sa durée.

L'intensité signifie l'écart entre un indice et sa valeur normale. Un seuil de l'intensité peut être donné pour analyser quand une sécheresse a débuté, quand elle s'est achevée et la région affectée (**Dupigny-Giroux, 2001**). Les seuils de sécheresse sont variables en fonction des endroits. Selon l'OMM (**2018**), on se base sur la variabilité naturelle du phénomène dans une région donnée et on analyse les anomalies par rapport à ce référentiel.

La durée est le second paramètre important de la sécheresse : en effet, si un événement de sécheresse commence rapidement sous certains climats, il lui faut une durée d'au moins deux à trois mois pour s'installer ; elle peut persister durant plusieurs mois ou des années.

A cet effet, les sécheresses sont généralement considérées comme des aléas à évolution lente, de durée moyenne à longue et associées à des climats plus chauds, mais certaines sécheresses remettent en question ces hypothèses.

Les sécheresses soudaines surviennent rapidement et se terminent souvent en quelques jours ou quelques semaines. Des études récentes sur ce type de sécheresse ont tendance à définir ces événements par leur intensification rapide, plutôt que par leur courte durée. Elles sont généralement provoquées par des déficits de précipitations, des températures extrêmement élevées et une augmentation rapide de la demande d'évaporation (**Wang & Yuan, 2018**). Ils sont considérés comme des événements estivaux. La complexité des sécheresses soudaines et leur caractère saisonnier et sous-saisonnier rendent leur prévision difficile, mais la capacité de les prévoir est d'une grande importance dans les systèmes d'alerte précoce (**Mo & Lettenmaier, 2016**).

Par ailleurs, les méga-sécheresses sont définies comme des événements multi décennaux, faisant référence à des périodes longues et anormalement sèches, plus sévères que les sécheresses pluriannuelles enregistrées depuis les années 1880 avec le début de mesures météorologiques régulières (**Williams et al, 2020**).

Les méga-sécheresses historiques ont modifié la structure d'écosystèmes entiers voire ont conduit à leur destruction. De tels événements peuvent être forcés par des facteurs multiples, voire simultanés : surface terrestre ou poussière d'aérosol, changements d'aridité à long terme et rétroactions, défaillances de la mousson, forçage océanique et radiatif ou anomalies climatiques à long terme dues à l'ENSO (**Stahle, 2020**).

La sécheresse des années 2010 dans le sud-ouest des États-Unis d'Amérique, signalé comme similaire à la méga-sécheresse dévastatrice dans cette région. La gravité de cette récente sécheresse peut en partie être attribuée au changement climatique induit par l'homme (**Stahle, 2020**). Cela est également vrai pour de nombreux autres épisodes de sécheresse dans le passé récent (**Samaniego et al, 2018**).

Les sécheresses se distinguent aussi par leurs aspects spatiaux. Les zones affectées par une sécheresse sévère augmentent progressivement et les surfaces d'intensité maximale (les épicycles) se décalent d'une saison à une autre ou bien d'une année à une autre (**WMO, 2011**).

Cependant, le choix d'une caractéristique de sécheresse appropriée pour une recherche particulière sur la sécheresse dépend de l'hydro-climatologie dans la région sélectionnée, du type de sécheresse considéré, de la vulnérabilité de la nature dans cette région, but de l'étude et des informations accessibles pour l'évaluation de la sécheresse (**Fleig et al. 2006**).

I.6 Sécheresse en Algérie

I.6.1 Evénements historiques

L'historique des données climatiques en Algérie montre une présence de sécheresses importantes et fréquentes. En particulier, la partie ouest du pays a connu plusieurs sécheresses majeures.

En 1866, l'Algérie a connu une sécheresse grave qui ne s'est atténuée qu'en 1868, dans laquelle les récoltes ont été maigres durant cette période et des sources historiques font également état de famine, de fléaux acridiens et de Choléra. Ce dernier qui a été particulièrement meurtrier dans la partie sud du pays (Taithe, 2009).

Au cours des années 40, dans le sud d'Oran, la région d'Ain Safra a été affectée par une sécheresse durant la période 1945-1947, dans laquelle 3000 personnes sont mortes de faim et 900000 moutons ont été perdus et 90% du bétail a péri (FAO, 2018).

Plusieurs périodes sèches ont été observées dans le nord entre 1910-1920 et 1938- 1948. Ces sécheresses se sont caractérisées par des famines, des incendies de forêt, des perturbations sociales importantes (Meklati, 2009).

De 1960 à 1990, une diminution continue des apports pluviométriques a été observée dans les zones occidentales et centrales du pays. L'analyse de l'évolution spatiale de la sécheresse montre un déplacement des isohyètes de 400 mm du Sud vers le Nord du pays (Hamlaoui et al., 2011).

Durant les dernières décennies, l'Algérie a connu des sécheresses intenses et particulièrement sévères dans l'Ouest du pays (Ghenim et Megnounif, (2011)).

Une expertise commandée par l'ANRH en 2017 a montré l'existence d'une rupture dans le régime pluviométrique à partir de 1976, en engendrant un déplacement des isohyètes de l'Ouest vers l'Est et du Sud vers le Nord. La carte établie par l'ANRH indique, que la partie Nord-Ouest présente le déficit le plus remarquable et significatif.

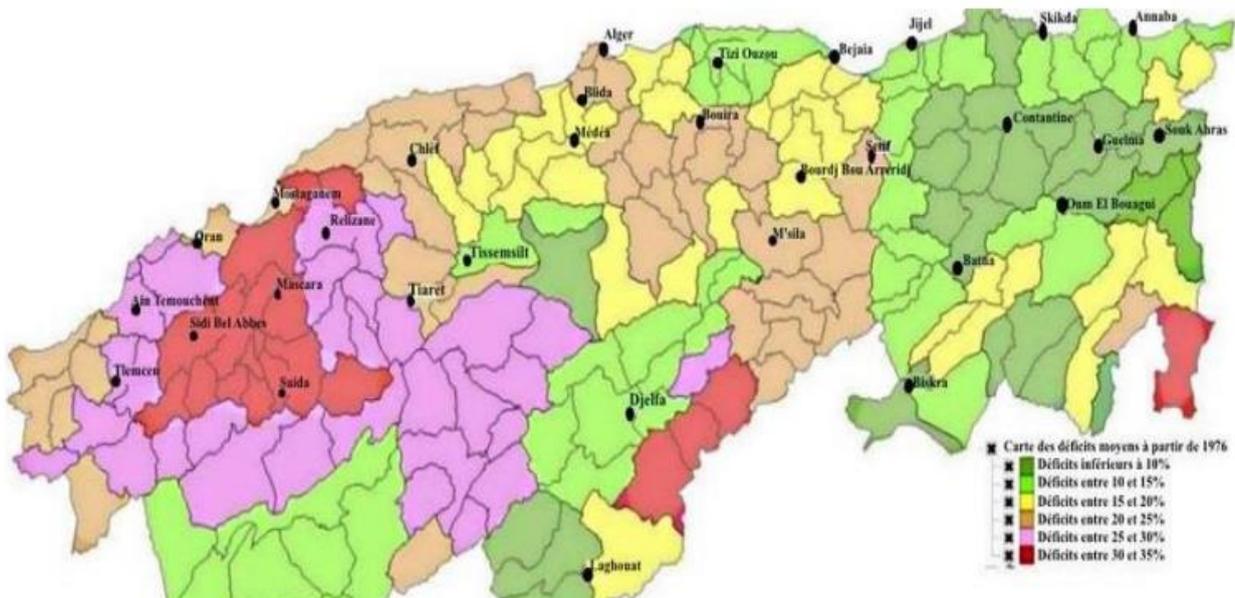


Figure I.1 : Carte des déficits pluviométriques dans le Nord Algérien (ANRH 2017)

I.6.2 Quelques études sur la sécheresse en Algérie

Au cours du dernier siècle, plusieurs travaux ont été réalisés sur l'analyse de la sécheresse en Algérie. Parmi ces travaux citons :

L'étude **Seltzer en 1946**, une analyse détaillée des précipitations durant la période (1911-1938). Seltzer a noté que la variabilité des précipitations annuelles durant cette période a été moins sensible dans les hauts plateaux et l'Atlas saharien, que dans les régions du nord.

Matari et Douguedroit (1995) ont divisé l'Ouest de l'Algérie en plusieurs régions pour une analyse spatio-temporelle de la pluviométrie. Ils ont remarqué que la sécheresse des années 40 est principalement due à une baisse des pluies printanières et celle des années 1980 à une diminution des pluies hivernales.

Meddi et Humbert (2000) ont constaté qu'un déficit pluviométrique a été détecté dans le nord algérien à partir des années 70, ce déficit engendre de graves problèmes sur le secteur socio-économique du pays.

Meddi H. et Meddi M. (2004) ont établi une typologie des sécheresses dans le nord-ouest algérien. Pour atteindre cet objectif, ils ont étudié la tendance des précipitations sur dix stations pluviométriques, utilisant le test de Pettitt, la méthode Bayésienne de LEE et HEGHINIAN et la procédure de segmentation d'Hubert. Ils ont appliqué une méthode simple exprimant le déficit pluviométrique en pourcentage de la moyenne annuelle. Ils ont trouvé qu'une rupture de stationnarité a été détectée à partir des années 1970, qu'elle correspond à un déficit pluviométrique particulièrement net durant la période 1980-1990.

En 2005, Khaldi a étudié la sévérité de la sécheresse dans la partie Nord-Ouest de l'Algérie, par l'utilisation des différentes méthodes comme celles des quintiles et des terciles, les résultats obtenus montrent la persistance et l'abondance des années déficitaires durant les décennies 80-90. L'auteur a conclu la nécessité de gérer et développer des stratégies pour surmonter les effets du phénomène.

Meddi, H et Meddi, M (2009) ont utilisé les chaînes de Markov pour étudier la persistance de la sécheresse à l'échelle annuelle et saisonnière, les données des précipitations de huit stations réparties dans les plaines du centre et de l'Ouest ont été retenues dans cette étude, couvrant la période 1930-2003. Ils ont montré d'une part que à l'échelle annuelle, la probabilité d'avoir une année non sèche après une année considérée comme sèche est plus importante au centre du pays qu'à l'Ouest, et que les plaines de l'ouest ont été caractérisés par une forte tendance d'avoir deux années sèches successives qu'au niveau des plaines du centre. D'autre part, à l'échelle saisonnière une probabilité peu élevée d'avoir un hiver sec après un hiver humide quelle que soit sa nature pour toute la région. Dans le cas d'un hiver sec suivi par un non sec l'année suivante, la probabilité est importante au niveau de la

Mitidja et de Maghnia à l'extrême Ouest de l'Algérie, quelle que soit sa nature pour toute la région. Dans le cas d'un hiver sec suivi par un non sec l'année suivante, la probabilité est importante au niveau de la Mitidja et de Maghnia à l'extrême Ouest de l'Algérie.

Ghenim et al (2010) ont analysé la sécheresse qui frappe la région de Tafna, utilisant des données des précipitations et des débits spécifiques durant la période 1939-2005. Les résultats montrent qu'un déficit pluviométrique grave a été enregistré après 1974-1975, cette décroissance en pluviométrie est responsable d'une baisse d'écoulement de 69 %.

Meddi et al (2010) ont utilisé cinq indices climatiques pour analyser la variabilité temporelle des précipitations annuelles dans deux bassins versants situés dans le Nord-Ouest de l'Algérie. Ils ont montré que la pluviométrie annuelle totale a diminué d'au moins 20% dans les cinq stations considérées.

Saadi et Medjerab (2010) ont analysé la variation des caractéristiques de sécheresse climatique dans le Nord-Ouest Algérien, par l'utilisation de l'indice des précipitations standardisées (SPI), à différentes échelles de temps. Ils ont trouvé que les sécheresses caractérisées par de fortes intensités, de longues durées et de grandes étendues géographiques ont été observées au cours des années 1980.

Ghenim et Megnounif (2011) ont utilisé le SPI (Standardized Precipitation Index) afin d'identifier les fréquences des périodes humides et des périodes sèches, ainsi que le SSFI (Standardized Stream Flow Index) pour déterminer les fréquences d'écoulement déficitaires et excédentaires, dans les sous-bassins du Meffrouche et Béni Bahdel (Nord-Ouest de l'Algérie) durant la période 1946-2009. Ils ont également utilisé la méthode double masse entre les précipitations et les apports en eau, pour analyser l'homogénéité ainsi que le comportement fluvial à long terme (63 ans) en réponse aux apports pluviométriques. Les résultats obtenus montrent que ces bassins ont connu globalement des périodes d'humidité et de sécheresse légères avec une tendance à la sécheresse. Ils ont noté que l'évolution chronologique du SPI et SSFI montre une tendance globale à la baisse et donc à la sécheresse, dans laquelle les valeurs pics sont générées par une succession de déficits ou d'excédents légers, ainsi que la succession de plusieurs années à pluviométrie modérée pouvant générer une année à écoulement abondant. Les résultats obtenus par la méthode double masse montrent l'existence d'une cassure d'homogénéité située vers les années 1980.

Taibi et Souag (2011) ont analysé la variation spatio-temporelle de la sécheresse au Nord Algérien, durant la période 1936-2010. Ils ont calculé le SPI-12 pour 102 stations pluviométriques réparties dans la région d'étude, une analyse en composantes principales (ACP) a été utilisée pour étudier la variabilité spatiale et temporelle des sévérités de sécheresse. Le calcul de SPI montre que la région d'étude a connu deux périodes principales ; une période excédentaire de 1936 à 1975 a été observée à l'Est, suivie d'une période de sécheresse de 1976 à 2001 observée à l'Ouest de la région

d'étude. La régionalisation du SPI par l'ACP a montré cinq régions avec différents degrés de sévérité de la sécheresse. La région des hauts plateaux de l'ouest et du centre est caractérisée par la sécheresse la plus importante et la plus sévère avec un déficit pluviométrique critique. La région de la côte ouest a également été touchée par une importante sécheresse. La région côtière centrale a connu une sécheresse moins sévère. La région de la côte est et la région des hautes terres de l'est ont été touchées par une légère sécheresse.

Adjim et al (2012) ont montré que la diminution importante de la pluviométrie du bassin de la Tafna a été générée par une sécheresse réelle. Ils ont appliqué le test de Pettitt, la statistique de Buishand et la procédure de segmentation d'Hubert pour étudier la tendance et la rupture dans les séries des stations choisies.

Hamlaoui et al (2013) ont analysé la tendance spatio-temporelle des séries chronologiques des précipitations annuelles dans le Nord algérien, trois tests non paramétriques ont été utilisés dans cette étude, à savoir le test de Spearman, le test de Mann- Kendall et le test de Pettitt. Les résultats obtenus indiquent que la partie centrale de la région a été affectée par un déficit pluviométrique.

Meddi et al (2010) ont déterminé les probabilités de transition à la sécheresse dans les plaines du Nord-Ouest et du centre de l'Algérie, en utilisant le SPI-12 et trois indices climatiques. Ils ont noté que la probabilité d'avoir une année sèche suivie d'une autre période sèche est plus importante dans les plaines de l'Ouest que dans le centre.

Nezzal et Belaid (2013) ont illustré l'impact de la variabilité pluviométrique, conjuguée aux facteurs anthropiques, sur la nappe alluviale dans la Mitidja orientale. Ils ont utilisé la méthode de cumul des écarts par rapport à la moyenne, le SPI et les tests de rupture. Les résultats montrent que le déficit pluviométrique répété entre 1974-2002 (plus de 16%) et la surexploitation de la nappe ont engendré une diminution importante du niveau statique de la nappe, dans laquelle la variation du niveau piézométrique est de 1,7 m par an (1995-2002).

Ghenim et Megnounif (2013) ont utilisé le SPI pour examiner l'occurrence de la sécheresse qui affecte le nord algérien, ils ont constaté que les périodes sèches sont amplifiées au-delà du milieu des années 1970.

Meddi et Rahmouni (2014) ont étudié la persistance de la sécheresse aux échelles annuelle et saisonnière dans l'Est de l'Algérie. Ils ont choisi la méthode du quintile (fréquence) pour évaluer les seuils des années sèches et humides. Ils ont noté que pour la zone située à l'Est de la longitude 5° 50', la probabilité d'avoir une année sèche après une année de départ sèche ou non sèche est faible et dépasse à peine 40%. Dans les hautes plaines du sud de Constantine, la probabilité est bien supérieure à 50%.

Khoualdia et al (2014) ont étudié la variabilité spatio-temporelle des précipitations dans le bassin versant de Medjerda (Nord- Est Algérien), ils ont utilisé le test statistique de Pettitt, la statistique de Buishand et l'ellipse de contrôle pour détecter les ruptures au sein des séries temporelles. Les auteurs ont étudié aussi la variation spatiale des précipitations, dans laquelle la cartographie de l'indice pluviométrique a été représentée. Les résultats obtenus montrent que sur l'ensemble des tests de détection de rupture, la majorité des ruptures se localisent dans les décennies 80 et 90, une durée qui apparaît comme déficitaire. Ils ont conclu que le bassin connaît un déficit pluviométrique, une augmentation des pluies estivales et une hausse régulière des variations interannuelles de la température de l'air pourraient être derrière la prédominance des orages de ces décennies.

Tahar et Regad (2015) ont analysé la variation spatio-temporelle de la sécheresse dans quelques sous bassins des Hauts plateaux constantinois, ils ont choisi la méthode de l'analyse fréquentielle pour étudier la variabilité temporelle des pluies annuelles. Plusieurs indices de sécheresse ont été calculés dans cette étude pour caractériser le niveau de sévérité des sécheresses vécues. Les résultats montrent nettement la variabilité interannuelle de la pluviométrie et sa tendance à la baisse, en plus d'une dispersion croissante dans le temps qui a pour origine la grande irrégularité des épisodes excédentaires et déficitaires.

Lazri et al (2015) ont utilisé les chaînes de Markov pour estimer les sécheresses prévues sur la base des précipitations passées au nord algérien, les classes de la sécheresse ont été identifiées par le SPI. Ils ont noté que la probabilité d'avoir une sécheresse de classe sévère/extrême augmente considérablement, passant de la probabilité de 26,5 % en 2005 à une probabilité stable de 57,56 % en 2041.

Djebbouai et Souag (2016) ont utilisé l'indice SPI à trois échelles de temps (3, 6 et 12 mois) pour quantifier la sécheresse, ils ont également développé des modèles mathématiques de prévision de la sécheresse tels que : les réseaux de neurones artificiels (ANN) qui ont été comparés avec les modèles stochastiques traditionnels (modèles ARIMA et SARIMA). Une comparaison a été établie les données observées et les prévisions. Les résultats de cette étude indiquent que le réseau de neurones d'ondelettes couplés (WANN) a été les meilleurs modèles pour la prévision des sécheresses pour toutes les séries chronologiques de SPI et pour des périodes variables entre 1 à 6 mois.

Mega et Medjerab (2016) ont analysé la sécheresse climatique dans les hauts plateaux algériens. Pour cela, plusieurs indices ont été calculés dans cette étude à savoir SPI (Indice de précipitation standardisée), TVDI (Indice de Sécheresse Température-Végétation), TCI (Indice de condition de Température), VCI (Indice de condition de Végétation) et VHI (Indice de santé de la végétation). Ils ont trouvé que la période de 1980-2001 a été caractérisée par plusieurs périodes de sécheresse extrêmes et sévères.

Merabti et al (2017) ont étudié la variabilité spatio-temporelle de la sécheresse dans le nord-est de l'Algérie. Deux indices de sécheresse ont été calculés dans cette étude à savoir le SPI et le RDI, à différentes échelles de temps telles que 3-, 6- et 12 mois. En utilisant l'analyse en composantes principales en mode S (ACP) avec la rotation Varimax (PC- scores) appliquée à la fois au SPI et au RDI. Ils ont aussi appliqué le test de tendance modifié de Mann-Kendall (MMK) à la série chronologique de la valeur moyenne annuelle et mensuelle de PC-scores obtenues par RDI et SPI, et pour toutes les échelles de temps. Les résultats obtenus montrent que les deux indices ayant un comportement cohérent et similaire, avec une légère différence dans laquelle, des sécheresses plus sévères et modérées dans la partie sud de la région d'étude ont été identifiées par le RDI.

Khezazna et al (2017) ont étudié l'évolution spatiale et temporelle de la sécheresse sur le bassin versant de Seybouse (nord-est de l'Algérie) pour les périodes 1970 et 2011. Les auteurs ont analysé les séries de précipitations à l'aide d'un certain nombre de tests (Mann – Kendall, l'estimateur de pente de Sen, Pettitt) et calculé le SPI. Dans l'étude spatiale, une cartographie de l'indice SPI a été faite. Les résultats indiquent que l'évolution de la série pluviométrique moyenne annuelle se caractérise par des irrégularités significatives exprimées par des coefficients de variation significatifs, et une augmentation de cette pluviométrie statistiquement significative. Une répartition hétérogène des précipitations à travers le bassin de Seybouse a été détectée par la cartographie de SPI, dans laquelle la partie centrale du bassin de Seybouse était affectée par des conditions de sécheresse persistantes.

Habibi et al (2018) ont étudié la caractérisation et la prévision des sécheresses météorologiques dans le bassin de Chélif-Zahrez (Algérie). Les précipitations annuelles collectées de 68 stations météorologiques ont été utilisées pour caractériser les événements secs (par le calcul de SPI). Ils ont noté que depuis 1970, le bassin est confronté à des précipitations inférieures à la moyenne, en particulier le centre et le nord du bassin. Les chaînes de Markov ont été utilisées dans cette étude, pour identifier des années de sécheresse consécutives de 2 ans. Les résultats indiquent que les probabilités les plus élevées d'avoir deux années sèches successives se trouvent dans l'ouest et le sud-ouest de la région.

Berhail (2019) a mesuré l'impact du changement climatique sur les ressources en eaux souterraines, en utilisant des séries chronologiques de données sur les précipitations et le ruissellement mesurées dans le bassin de la Tafna (situé à l'ouest de l'Algérie). Ils ont appliqué des indices de sécheresse météorologique tels que : SPI et SPEI et le test statistique de Pettitt. Les résultats indiquent qu'un déficit pluviométrique a été produit vers les années 1970 dans toute la région d'étude. L'impact de cette diminution pluviométrique se reflète sur la recharge de l'aquifère, dans laquelle une baisse des volumes d'eaux mobilisés par l'aquifère a été enregistrée après les années 1987.

Bendjema et al (2019) ont analysé les situations de sécheresse climatique sur une échelle annuelle dans le bassin versant de Mellah (Nord-est algérien), en utilisant des séries chronologiques des précipitations, des températures et des débits durant la période 1979-2010. Ils ont calculé trois indices de sécheresse tels que : SPI (Standardized precipitation index), SSFI (Standardized Stream Flow Index) et STI (Standard Temperature Index) pour localiser plus précisément les périodes de sécheresse par leur intensité, leur durée et leur fréquence. Afin de détecter les années de rupture des séries des précipitations, températures et débits, cinq tests de tendance ont été utilisés dans cette étude à savoir le test de Pettitt, de rang, la méthode Bayésienne de Lee & Heghinian, de Hubert et le test de Buishand. Les auteurs ont noté que la région d'étude a été affectée par des sécheresses continues, dans laquelle cette situation reflète de manière significative les performances de ruissellement. Les résultats obtenus par le calcul de SSFI montrent un déficit sur la période 1987 / 1988-2001/2002 et 2005 / 2006 et 2009 / 2010. Les résultats des tests de tendance montrent que la plupart des ruptures en précipitations se situent en 1996/1997 et 2001/2002, et pour les températures les ruptures ont été détectées en 1980/1981.

Achour et al (2020) ont analysé la variabilité spatio-temporelle de la sécheresse météorologique, une étude de prévision du phénomène a été aussi faite par ces auteurs dans le Nord-ouest de l'Algérie. L'analyse est basée sur des données pluviométriques mensuelles recueillies au cours de la période 1960-2010, dans laquelle l'indice des précipitations standardisé (SPI) a été calculé à différentes échelles de temps (3, 6, 9 et 12 mois). Afin de prévoir la sécheresse avec un pas du temps de 2 mois, un modèle de réseau de neurones artificiels (ANN) sur la base des valeurs de SPI calculées a été utilisé. Les résultats indiquent que le nord-ouest algérien est sévèrement affecté par la sécheresse, et les modèles ANN peuvent représenter un système d'alerte de sécheresse précis avec un délai de 2 mois basé sur des informations sur la sécheresse météorologique.

Hallouz et al (2020) ont analysé les séquences de sécheresse météorologique dans le bassin de Chélif (nord-ouest de l'Algérie), à différentes échelles de temps. En utilisant des données des précipitations quotidiennes de 11 stations pluviométriques. Ils ont analysé les indices climatiques pour 5 modes de circulation atmosphérique : ENSO (El Niño Southern Oscillation), NAO (North Atlantic Oscillation), MO (Mediterranean Oscillation), AMDO (Atlantic Multi- Decadal Oscillation) et WMO (Western Mediterranean Oscillation).

Mega et Medjerab (2021) Ont comparé deux indices de sécheresse à savoir SPI (Indice de précipitation standardisée) et SPDI (Indice de précipitation-sécheresse standardisée) aux échelles de temps de 3 ; 12 et 24 mois, et dans les hauts plateaux algériens. Cette comparaison a été basée sur quatre critères (une analyse statistique descriptive, fréquence des périodes sèches /humides observées, test de Fisher d'égalité de deux variances et le degré de corrélation entre ces deux indices). Les résultats

ont montré qu'une bonne corrélation a été observée entre ces deux indices pour une échelle de 12 mois. Cependant, une divergence entre SPI et SPDI a été notée aux échelles de 3 et 24 mois.

La plupart des études faites en Algérie ont montré une présence des sécheresses au Nord Algérien particulièrement au début des années 70 avec un degré de sévérité varie d'une région à l'autre, avec une sensibilité de la partie Ouest de la région au phénomène.

I.7 Structures nationales travaillant dans la problématique de la sécheresse

En Algérie, il n'existe pas de structure particulière spécifiquement dédiée à la sécheresse alors que le mécanisme de surveillance de la sécheresse est assuré au premier plan par certaines institutions et agences publiques qui appartiennent à plusieurs secteurs d'activité (Safar-Zitoun, 2019). Nous pouvons classer ces structures en deux catégories : la première concerne ceux fortement impliqués pouvant devenir des partenaires clés avec la double particularité d'être à la fois utilisateurs et fournisseurs de données. La deuxième catégorie concerne les structures qui sont appelées à être essentiellement des utilisateurs de l'information sur ce phénomène.

I.7.1 Catégorie des structures fortement impliqués

Ce sont principalement :

- Office National de la Météorologie (ONM) ;
- Agence des Bassins Hydrographiques (ABH) ;
- Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) ;
- Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) ;
- Institut National des Sols, de l'Irrigation et du Drainage (INSID) ;
- Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural (BNEDER) ;
- Agence Nationale sur les Changements Climatiques (ANCC).

I.7.2 Catégorie des structures utilisatrices de l'information sur la sécheresse

Ce sont nombreuses à l'instar de :

- Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie (INRAA) ;
- Laboratoires Universitaires Spécialisés ;
- Centre de Développement des Energies Renouvelables « CDER » ;
- Office National Des Statistiques « ONS » ;
- Agence Spatiale Algérienne (ASAL) ;
- Directions Centrales et Directions de Wilaya de l'Agriculture et du Développement Rural ;
- Institut National de la Recherche Forestière (INRF) ;
- Algérienne Des Eaux (ADE).

Chapitre II

Présentation de la zone d'étude

II.1 Délimitation de la zone d'étude

La zone d'étude se situe dans un bassin versant endoréique réparti entre le bassin versant des Hauts-Plateaux Constantinois et celui de Chott Melghir. Ce bassin se trouve dans l'Est algérien, aux confins orientaux de l'Atlas saharien, plus précisément dans la partie orientale des Aurès. Il est enclavé entre deux chaînes montagneuses, l'Aurès et les Nemencha. Ce bassin est entouré par plusieurs chaînes et plaines montagneuses : Dj Chenntgomma et Dj Aidel au nord-ouest, et Djebel Tadelist et Djebel Bouzendag à l'est et au sud-est.

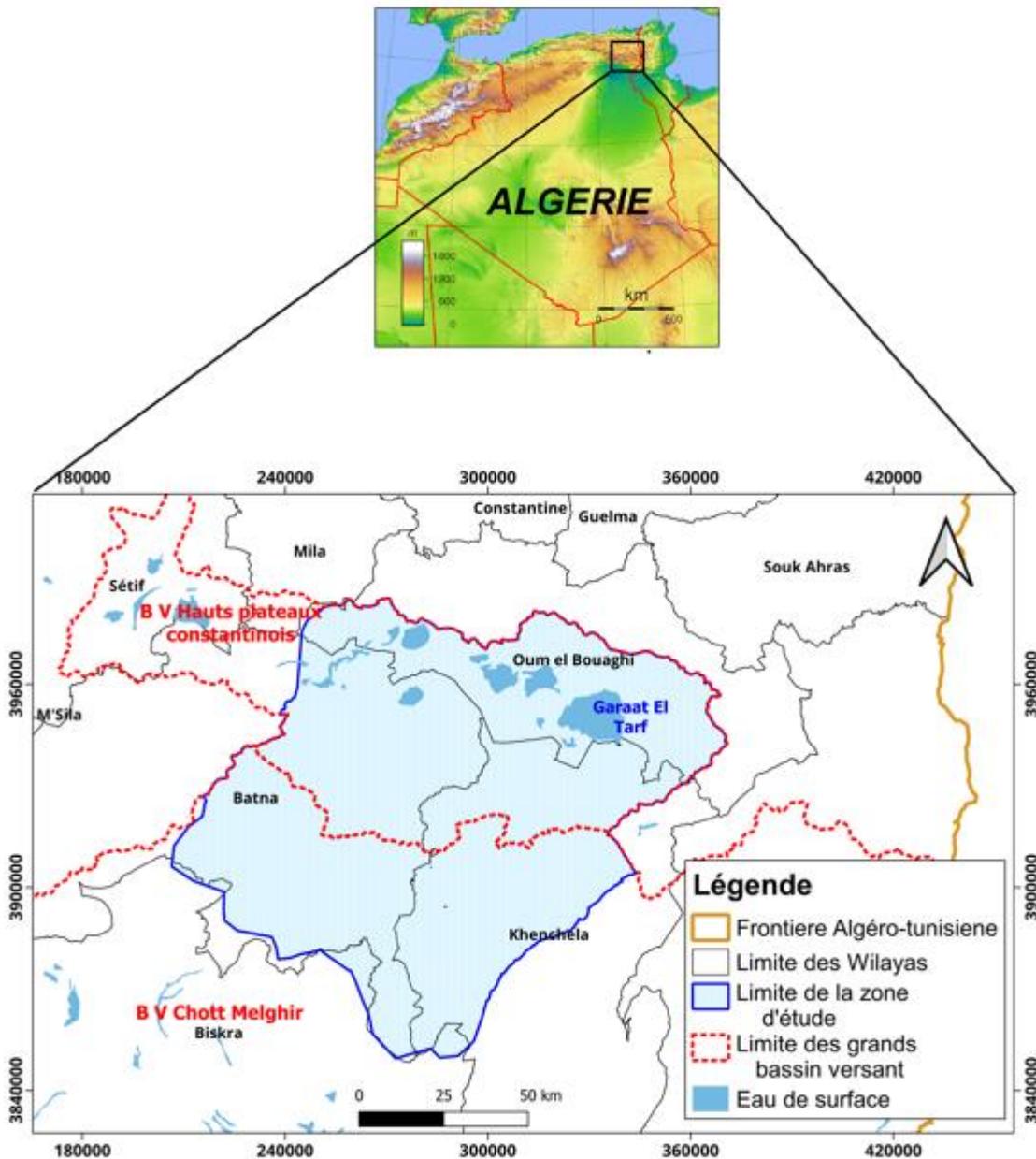


Figure II.1 : Délimitation de la zone d'étude

II.2 Lithologie et perméabilité

Du point de vue lithologique, les formations de la zone d'étude se divisent en quatre catégories : les marnes, les grès, les calcaires fissurés et les alluvions. La diversité lithologique et tectonique du bassin versant étudié influence le ruissellement et la capacité de rétention. Il en résulte une dynamique variable de lessivage des roches et une diversité dans la composition chimique des éléments contenus dans les eaux de ruissellement et les aquifères du bassin versant étudié. Ainsi, l'exploitation des données géologiques de ce bassin a permis de distinguer trois classes de formations ayant des perméabilités différentes : les formations à perméabilité élevée, les formations à perméabilité moyenne, et les formations à perméabilité faible à moyenne (Chakali, 2021 ; Aissam, 2017).

II.3 Relief

La zone d'étude se présente comme un toit puissant à double pente, dissymétrique, ridé et parallèle. Cette série montagneuse, orientée nord-est/sud-ouest (orientation typique de la chaîne atlasique), atteint une altitude de 2200 à 2300 m à ses crêtes. Au nord de cette ligne de crête, la descente rapide sur 10 à 20 km établit la jonction avec les hautes plaines situées à 900 m d'altitude entre Batna et Khenchela. Au sud, un long versant descend sur 50 à 60 km jusqu'au piémont saharien, situé à 100 m d'altitude. Ces plis serrés forment de longues arêtes rectilignes, constituées de crêtes étroites et séparées par de profondes vallées (Koussa & Bouziane, 2019).

II.4 Morphométrie**II.4.1 Caractéristiques de forme du bassin versant****II.4.1.1 Surface du bassin versant**

La surface A du bassin versant est une caractéristique très importante et constitue la base de tout autre calcul. Elle est obtenue à l'aide du logiciel de SIG (QGIS). La surface du bassin versant étudié est de 12826,13 km².

II.4.1.2 Périmètre du bassin versant

Le périmètre P du bassin versant, qui correspond à la longueur de la ligne de partage des eaux, est également déterminé à l'aide du logiciel de SIG (QGIS). Le périmètre du bassin versant étudié est de 565,23 km.

II.4.1.3 Coefficient de compacité de Gravélius

Soit un bassin versant de superficie A et de périmètre P. La forme du bassin versant est mesurée par le coefficient de compacité de Gravélius Kc. Le coefficient de compacité compare le périmètre du bassin versant étudié par rapport au périmètre d'un bassin versant de même surface ayant la forme d'un cercle. Le coefficient de compacité renseigne sur la forme du bassin versant qui a une grande influence sur l'écoulement global du cours d'eau et surtout, sur l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin versant.

$$Kc = 0,282 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} = 0,282 \cdot \frac{565,23}{\sqrt{12826,13}} \quad \text{Eq II.1}$$

$$Kc = 1,41$$

Le bassin versant étudié présente une forme allongée. En raison de cette forme, nous calculons deux dimensions d'un rectangle équivalent.

II.4.1.4 Rectangle équivalent

La notion de rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius, introduite par Roche (1963), permet de comparer facilement des bassins versants entre eux, en ce qui concerne l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement.

$$L = \frac{P + \sqrt{P^2 - 16.A}}{4} \quad \text{et} \quad l = \frac{P - \sqrt{P^2 - 16.A}}{4} \quad \text{Eq II.2}$$

$$L = 225,82 \text{ Km} \quad \quad \quad l = 56,8 \text{ Km}$$

Les dimensions de ce rectangle équivalent montrent que la longueur du bassin versant est quatre fois plus grande que sa largeur.

II.5 Etude climatique

II.5.1 Sélection des stations pluviométriques

Les données pluviométriques utilisées dans cette étude ont été mesurées et fournies par l'organisme responsable du réseau pluviométrique en Algérie, plus exactement l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques connue sous l'abréviation ANRH. Au niveau de la zone d'étude, seulement 14 stations pluviométriques ont été retenues, car elles obéissent à des critères de longueur de séries et de qualité des données (moins de lacunes). Quelques stations ne sont pas prises en compte, en raison de leur courte période d'observation et de leurs nombreuses lacunes. Le tableau 1 présente le nom, le code, les coordonnées géographiques et la période d'observation des stations pluviométriques retenues pour cette étude.

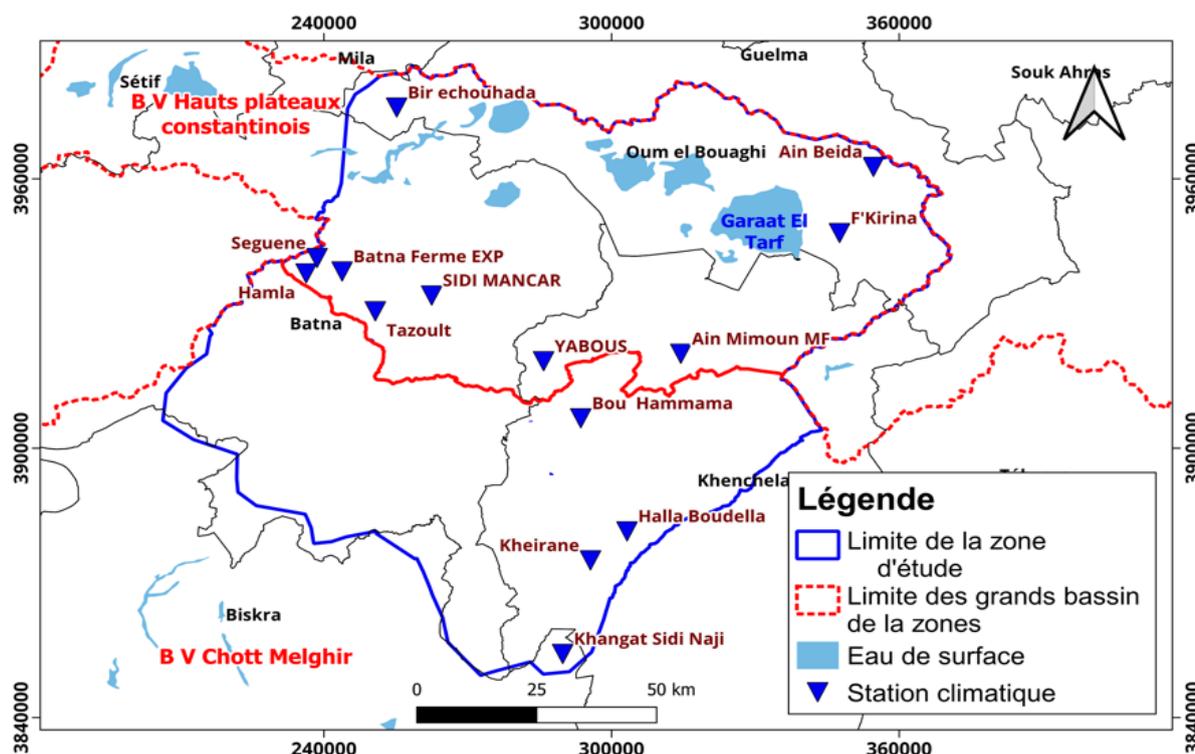


Figure II.2 : Stations pluviométriques retenues pour l'étude

Tableau II.1 : Caractéristiques et période d'observation des stations pluviométriques retenues pour l'étude

Nom de la station	Code de la station	Latitude (Km)	Longitude (Km)	Altitude (m)	Période observation
Halla Boudella	61802	203,42	877,69	750	1967-2010 (43 ans)
Bou Hammama	61803	227,92	866,46	1140	1967-2010 (43 ans)
Kheirane	61805	196,49	870,50	560	1967-2010 (43 ans)
Khangat Sidi Naji	61806	175,31	866,05	300	1967-2010 (43 ans)
Tazoult	70303	248,95	822,17	1180	1967-2002 (35 ans)
Bir Chouhada	70305	295,35	824,60	800	1967-2003 (36 ans)

Hamla	70308	256,42	807,25	1081	1967-2000 (33 ans)
Seguene	70309	260,60	809,30	1400	1967-2000 (33 ans)
Batna Ferme EXP	70316	257,35	814,70	1040	1967-2004 (37 ans)
Sidi Mancar	70410	253,20	833,67	1112	1967-2003 (36 ans)
Yabous	70604	240,10	857,90	1180	1967-2003 (36 ans)
Ain Mimoun MF	70704	243,60	886,35	1055	1967-2003 (36 ans)
Ain Beida	70707	287,70	923,75	998	1967-2005 (38 ans)
F'Kirina	70708	272,55	917,65	875	1967-2000 (33 ans)

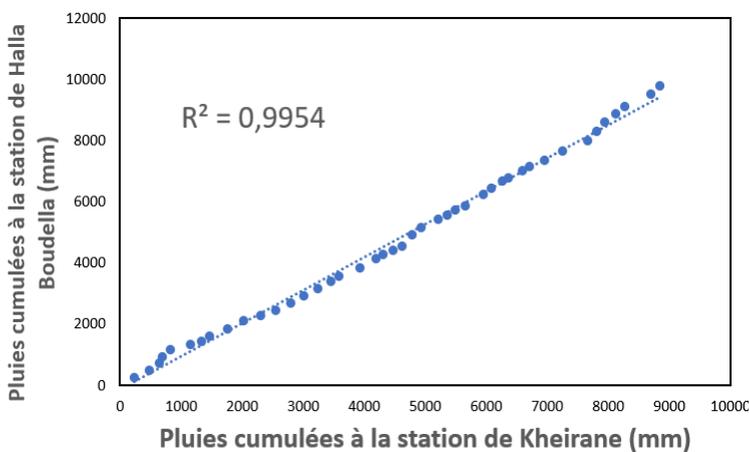
II.5.2 Contrôle de la fiabilité des données : méthode des doubles cumulées

Avant d'analyser les précipitations, il est nécessaire de contrôler la qualité des données et de détecter les erreurs systématiques qui peuvent les affecter. La méthode des doubles cumuls permet de mettre en évidence et de corriger les hétérogénéités au sein des séries de précipitations annuelles. Cette méthode simple consiste à comparer les totaux pluviométriques de chaque poste avec le total cumulé d'une station de référence située dans la même région climatique, ayant une longue période d'enregistrement et ne présentant pas de rupture d'homogénéité. La méthode suppose que la pluviométrie annuelle d'un poste peut être déterminée à partir de celle d'un autre poste par un coefficient multiplicateur, variable dépendante de la relation entre les stations.

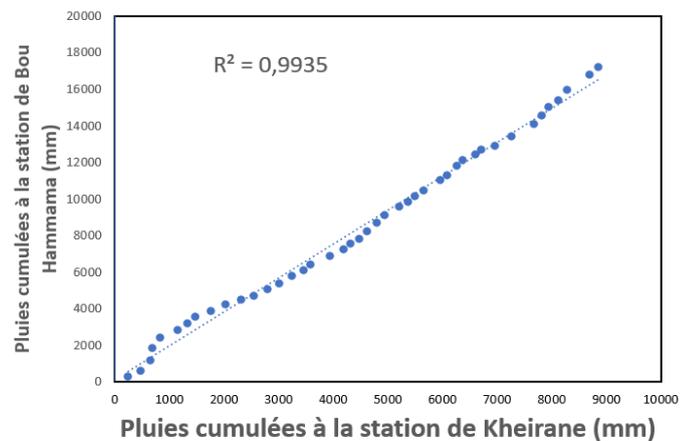
L'application de cette méthode suppose une corrélation positive significative entre les deux totaux annuels. La courbe des valeurs cumulées est obtenue en portant en abscisse les totaux annuels cumulés de la station de référence supposée homogène et en ordonnée les totaux annuels cumulés de la station à contrôler. Si les séries sont homogènes, les points forment une ligne droite avec une certaine dispersion. Si, au contraire, plusieurs segments de droites de pentes différentes apparaissent, la station à vérifier est hétérogène. Dans ce cas, il faudra corriger les données de cette station.

La méthode des doubles cumuls a été utilisée pour vérifier l'homogénéité des totaux annuels de la série pluviométrique par rapport à la station Kheirane, prise comme station de référence pour les stations Halla Boudella, Bou Hammama et Khangat Sidi Naji. Pour les autres stations, la station Batna Ferme EXP a été prise comme référence. Les graphes de la figure 3 présentent le contrôle de l'homogénéité des données pluviométriques par cette méthode. D'après ces graphes, nous constatons que les données pluviométriques de ces stations sont homogènes, car l'alignement des points d'observation est acceptable. De plus, la corrélation linéaire entre les données de ces stations et celles des stations de référence est positive et forte, le coefficient de corrélation étant très élevé et proche de 1.

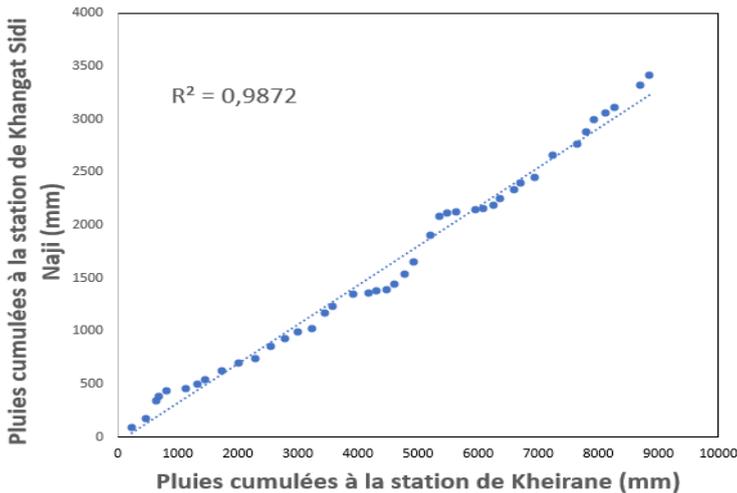
Contrôle de l'homogénéité des données pluviométriques à la station Halla Boudella par la méthode des doubles cumuls



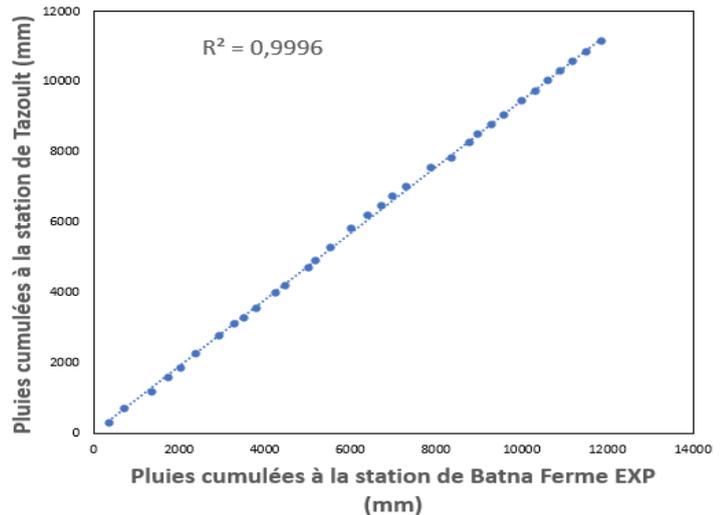
Contrôle de l'homogénéité des données pluviométriques à la station Bou Hammama par la méthode des doubles cumuls



Contrôle de l'homogénéité des données pluviométriques à la station Khangat Sidi Naji par la méthode des doubles cumuls



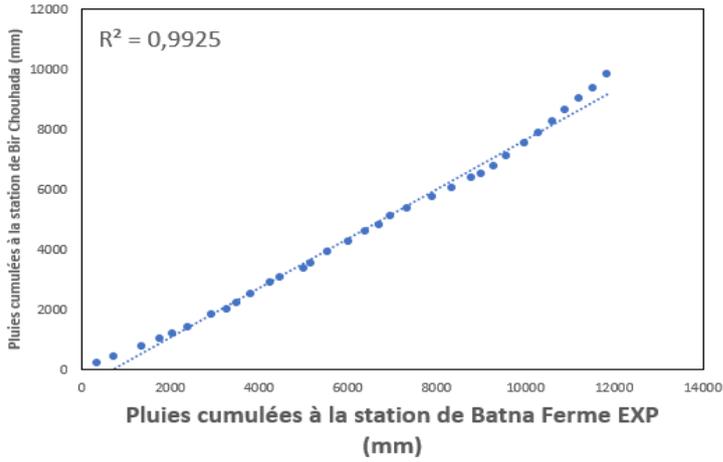
Contrôle de l'homogénéité des données pluviométriques à la station Tazoult par la méthode des doubles cumuls



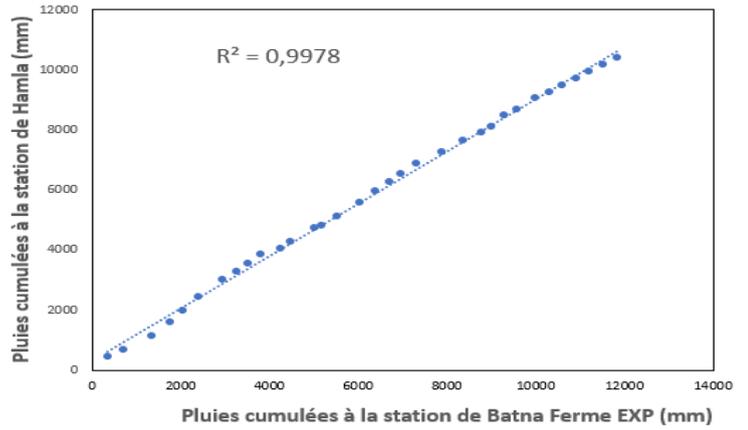
Chapitre II

Présentation de la zone d'étude

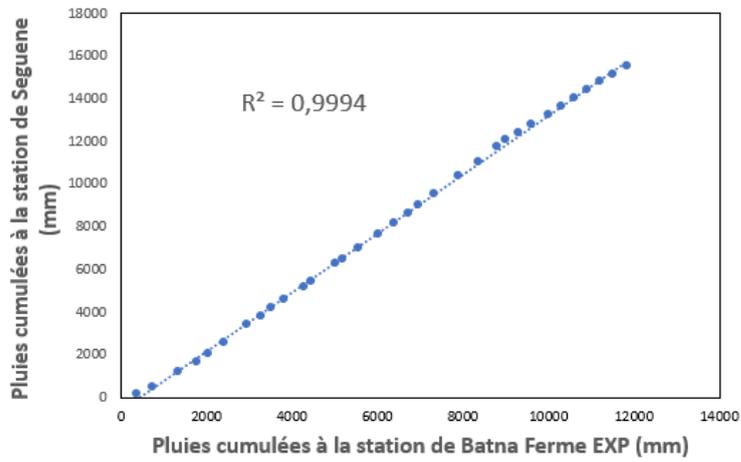
Contrôle de l'homogénéité des données pluviométriques à la station Bir Chouhada par la méthode des doubles cumulés



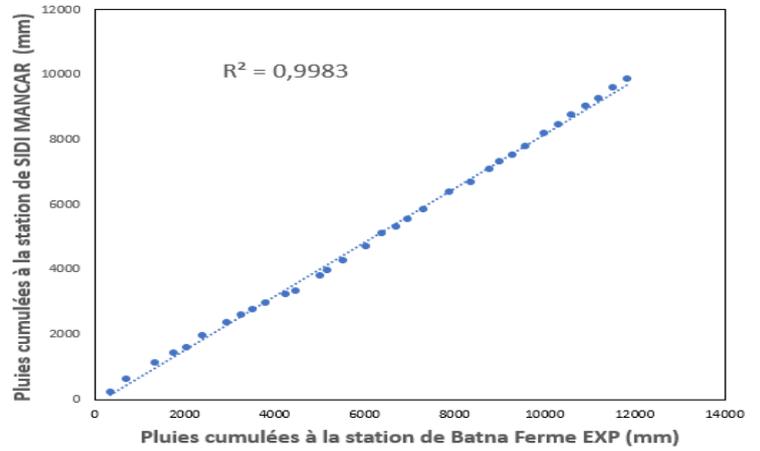
Contrôle de l'homogénéité des données pluviométriques à la station Hamla par la méthode des doubles cumulés



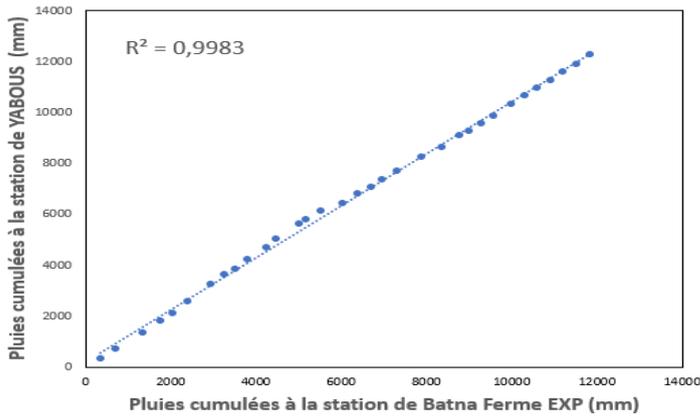
Contrôle de l'homogénéité des données pluviométriques à la station Seguene par la méthode des doubles cumulés



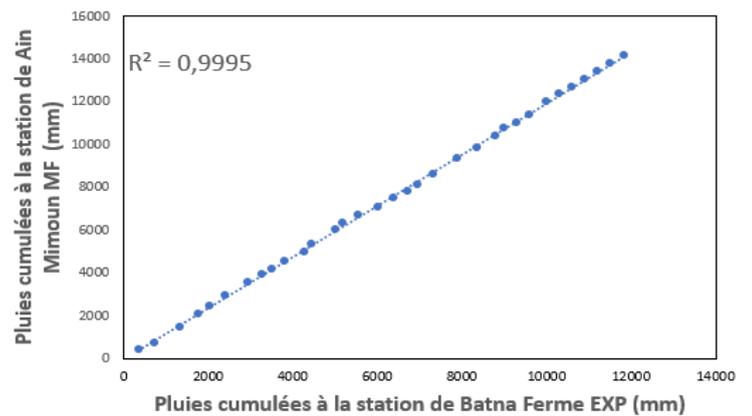
Contrôle de l'homogénéité des données pluviométriques à la station SIDI MANCAR par la méthode des doubles cumulés



Contrôle de l'homogénéité des données pluviométriques à la station YABOUS par la méthode des doubles cumulés



Contrôle de l'homogénéité des données pluviométriques à la station Ain Mimoun MF par la méthode des doubles cumulés



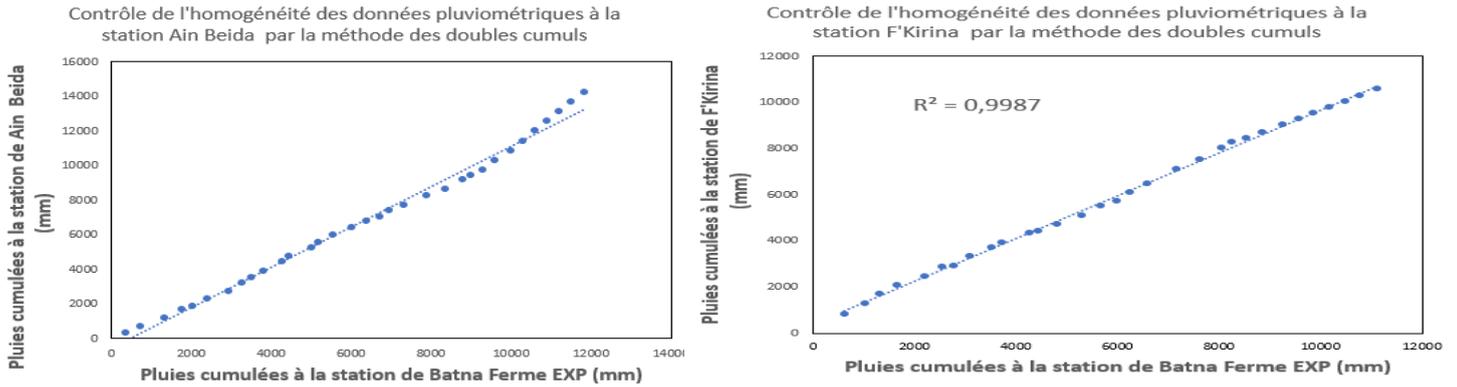


Figure II.3 : Contrôle de l'homogénéité des données pluviométriques des stations étudiées

II.5.3 Vérification de l'homogénéité des stations de référence

La station Kheirane et la station Batna Ferme EXP comme ont été prise des stations de référence, ces dernières ont été contrôlées par le test de Wilcoxon en utilisant les étapes suivantes :

- Nous avons mentionné l'ordre de la pluie de 1 jusqu'à N ;
- Nous avons divisé la série d'observation en deux échantillons X et Y de tailles N_1 et N_2 avec $N_1 < N_2$;
- Nous avons classé la pluie par ordre de grandeur croissant ;
- Nous avons mentionné l'ordre après la classification ;
- Nous avons calculé la somme des rangs W_X de l'échantillon X ;
- Nous avons calculé W_{min} et W_{max} :

$$✓ W_{min} = \frac{(N_1+N_2+1)(N_1-1)}{2} - 1,96 \sqrt{\frac{N_1 N_2 (N_1+N_2+1)}{12}} \tag{Eq II.3}$$

$$✓ W_{max} = (N_1 + N_2 + 1)N_1 - W_{min} \tag{Eq II.4}$$

- Nous avons vérifié cette condition $W_{min} < W_X < W_{max}$ qui prouve que la station étudiée est homogène.

Les résultats de ce test statistique sont présentés dans le **Tableau II.2**.

Tableau II.2 : Résultats du test de Wilcoxon

Taille de l'échantillon X	Taille de l'échantillon Y	W_x	W_{min}	W_{max}	Vérification de la condition	Conclusion
10	33	233	129,82	310,18	$129,82 < 233 < 310,18$	La station Kheirane est homogène
10	33	220	113,69	266,31	$113,69 < 220 < 266,31$	La station Batna Ferme EXP est homogène

II.5.4 Statistiques descriptives

Les caractéristiques statistiques des pluies annuelles des stations étudiées sont résumées dans le tableau II.3. Toutes les stations pluviométriques ont été marquées par une nette différence entre les paramètres de position (moyenne et médiane), à l'exception de la station F'Kirina. L'écart entre le minimum et le maximum est très important au niveau de toutes les stations étudiées. Il est à noter que les hauteurs de pluies annuelles les plus élevés ont été recueillis à la station Seguene, par contre la station Khangat Sidi Naji est la moins arrosée au niveau de la zone d'étude. Les valeurs du coefficient d'aplatissement et du coefficient d'asymétrie montrent que la distribution des séries pluviométriques est globalement asymétrique pour toutes les stations étudiées. Le coefficient de variation annuelle pour les séries de précipitations quant à lui se caractérise par une forte fluctuation.

Tableau II.3 : Caractéristiques statistiques des stations pluviométriques étudiées

Paramètres statistiques	Halla Boudella	Bou Hammama	Kheirane	Khangat Sidi Naji	Tazoult	Bir Chouhada	Hamla
Minimum	96.00	178.70	59.62	7.80	170.70	128.50	69.60
Moyenne	227.40	399.74	205.80	79.47	342.24	295.41	315.16
Médiane	237.12	379.20	181.60	69.00	296.35	327.50	290.50
Maximum	407.20	806.70	429.90	241.03	513.00	451.20	580.90
Écart-type	73.87	135.16	81.75	56.59	100.22	91.22	107.85
Coefficient d'aplatissement	0.03	0.64	0.59	0.86	-1.11	-1.03	-0.03
Coefficient d'asymétrie	0.45	0.79	0.87	1.10	0.27	-0.39	0.24
Coefficient de Variation	32.48	33.81	39.72	71.20	29.28	30.88	34.22

Paramètres statistiques	Seguene	Batna Ferme EXP	Sidi Mancar	Yabous	Ain Mimoun MF	Ain Beida	F'Kirina
Minimum	154.80	176.40	111.10	176.30	226.40	209.1	78
Moyenne	470.95	360.29	312.27	378.15	434.64	427.36	337.23
Médiane	412.60	331.30	290.30	348.10	395.85	455.1	336.8
Maximum	872.50	616.50	536.20	662.20	735.30	625.63	805.7
Écart-type	176.03	109.10	115.68	121.83	123.30	120.02	140.12
Coefficient d'aplatissement	0.24	-0.13	-0.58	0.24	0.29	-1.39	3.08
Coefficient d'asymétrie	0.80	0.62	0.46	0.66	0.87	-0.12	1.17
Coefficient de variation	37.38	30.28	37.05	32.22	28.37	28.08	41.56

II.5.5 Diagramme ombrothermique

Le diagramme ombrothermique représente les courbes des températures et des précipitations pour les douze mois de l'année. L'ordonnée doit être graduée de manière à ce que la pluie est égale 2 fois la température ($P = 2T$). Cela permet de représenter le déroulement annuel des précipitations, des températures et laisser apprécier le rapport entre les précipitations et les températures, puisque la sécheresse apparaît quand la courbe de la température passe au-dessus de la courbe des précipitations.

En analysant le diagramme ombrothermique de trois stations pluviométriques parmi celles étudiées, pour lesquelles nous disposons des données de pluie et de température (figure II.4) pour la période de 2010 à 2023, nous pouvons observer que la période sèche s'étend sur 3 mois (de juin à août) à la station Halla Boudella, sur 5 mois (novembre, juin, juillet, août et avril) à la station Bou Hammama, et sur 4 mois (de juin à septembre) à la station Kheirane. La période humide, quant à elle, s'étend sur les mois restants. Nous pouvons donc en conclure que la saison froide correspond à la période pluvieuse, tandis que la saison chaude correspond à la période sèche.

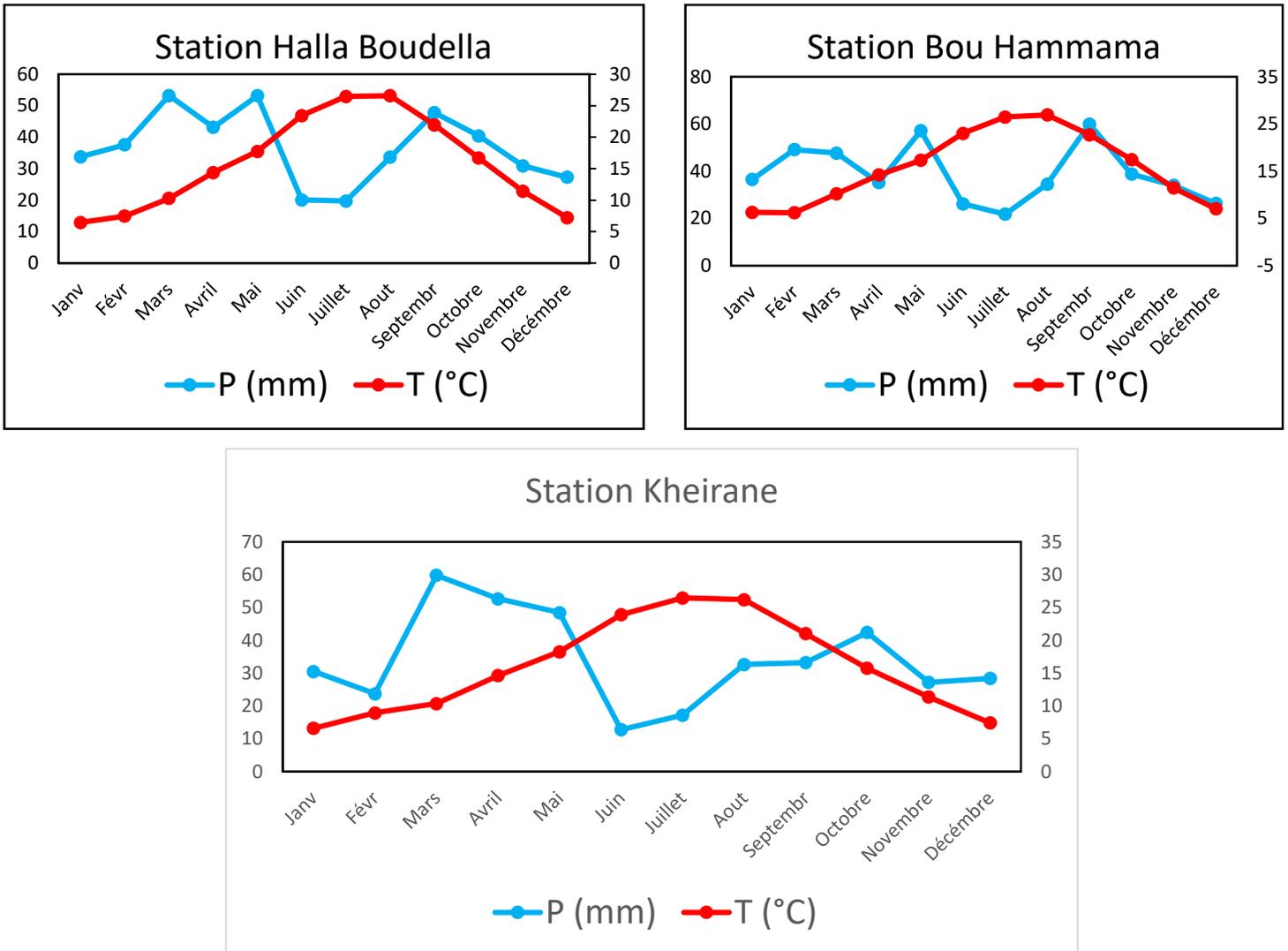


Figure II.4 : Diagrammes ombrothermiques de Gausson et Bagnauls de quelques stations pluviométriques étudiées

II.5.6 Régime climatique

En 1930, Emberger a défini les étages bioclimatiques basés sur deux facteurs : la détermination des saisons sèches et des saisons humides qui est représentée par le quotient pluviothermique défini ci-dessous :

$$Q = \frac{2000 \cdot P}{M^2 - m^2} \quad \text{Eq II.5}$$

Q : Quotient pluviothermique d'Emberger (-).

P : Précipitation moyenne annuelle (mm).

M : Temperature moyenne des maxima du mois le plus chaud (° k).

m : Temperature moyenne des maxima du mois le plus froid (° k).

Les valeurs du quotient pluviométrique d'Emberger des trois stations étudiées ainsi que leurs localisations sur le climagramme d'Emberger sont présentes sur le Tableau II.4 et la Figure II.5.

Tableau II.4 : Caractérisation climatique de quelques stations pluviométriques étudiées

Station	P (mm)	m (° K)	M (° K)	Q (-)	Étage bioclimatique
Station Halla Boudella	190,07	279,59	299,75	32,55	Climat aride à hiver tempéré
Station Bou Hammama	189,32	279,35	300,08	31,52	Climat aride à hiver tempéré
Station Kheirane	190,94	279,75	299,6	33,21	Climat aride à hiver tempéré

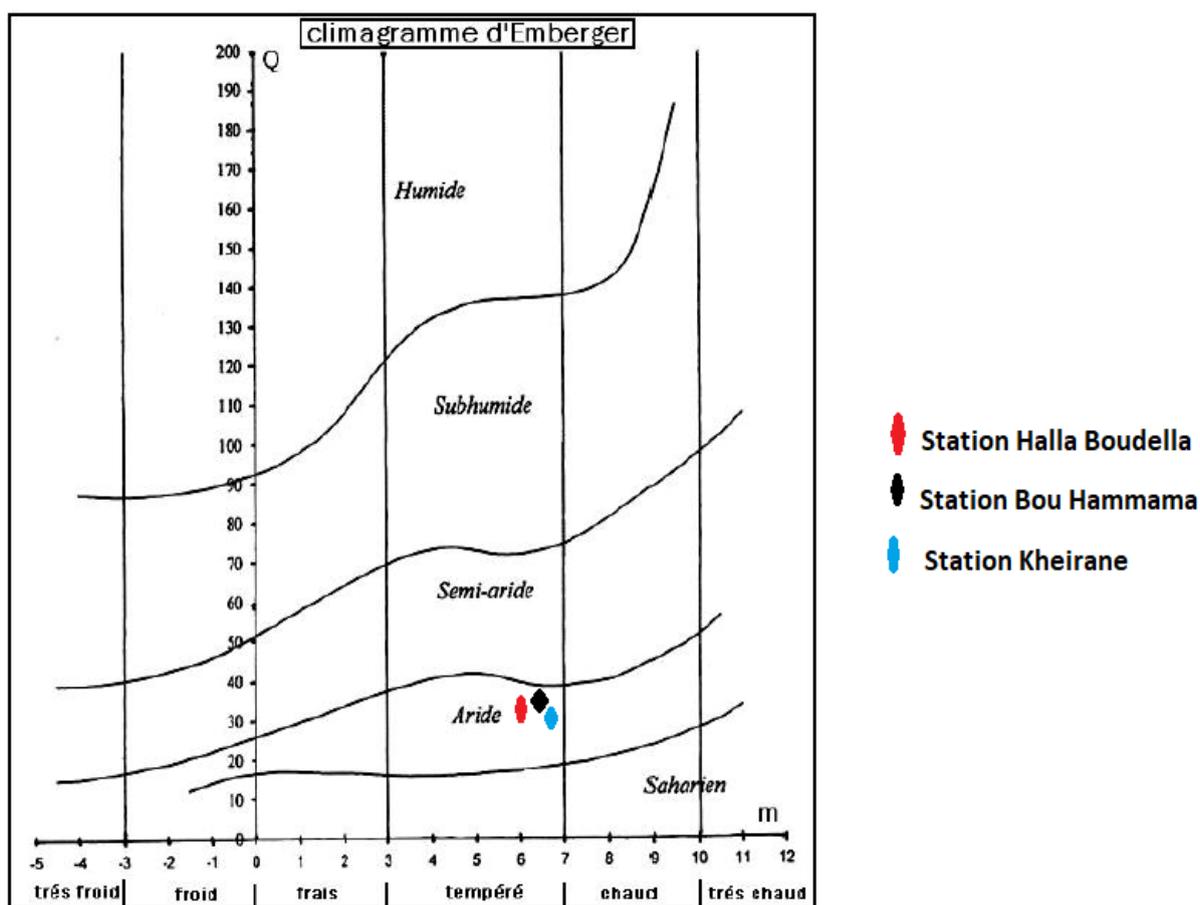


Figure II.5 : Climagramme d'Emberger comportant les stations pluviométriques étudiées

II.5.7 Bilan hydrique selon Thornthwaite

Le bilan permet d'évaluer les apports et les sorties en eau sur une période déterminée. L'évaluation du bilan d'eau est nécessaire aux paramètres physiques du milieu tels que les éléments climatologiques, pédologiques qui interviennent dans le cycle de l'eau. Le calcul de ce bilan est nécessaire pour la connaissance du milieu géographique, pour mieux définir les besoins globaux chiffrés du milieu et essentiellement pour l'évaluation du volume des ressources en eau souterraine (infiltration) et de surface (ruissellement). Le terme d'évapotranspiration désigne la quantité de vapeur d'eau rejetée dans l'atmosphère tant par évaporation directe au niveau du sol lui-même que par transpiration des organes aériens des plantes. L'étude de l'évapotranspiration exige que soient définis deux concepts essentiels : l'évapotranspiration réelle (ETR) et l'évapotranspiration potentielle (ETP). Cette dernière est apparue en particulier avec les travaux de Thornthwaite et se définit comme représentant la quantité d'eau disponible sous forme d'humidité du sol, suffisante pour que les plantes puissent maintenir leur taux de transpiration à un niveau maximal (Zerouali, 2019).

Le bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite est défini comme suit :

$$\text{Pluie} = \text{Evapotranspiration} + \text{Réserve utile de sol} + \text{Excédent}$$

Sachant que :

Excédent = 50 % vont constituer l'écoulement de surface et 50 % vont alimenter les nappes profondes.

L'ETP par la formule de Thornthwaite est calculé de la façon suivante :

$$ETP = 16 \cdot K \cdot \left(10 \cdot \frac{t}{I}\right)^\alpha \quad \text{Eq II.6}$$

ETP : Évapotranspiration potentielle mensuelle (mm).

K : Facteur de correction en fonction de latitude, donné par des tableaux.

t : Température moyenne mensuelle (°C).

I : Total des 12 indices thermiques mensuelles, l'indice thermique mensuel se calcul par la formule suivante :

$$i = (0,2 \cdot t)^{1,514} \quad \text{Eq II.7}$$

$$\alpha = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49 \quad \text{Eq II.8}$$

Dans notre cas, nous avons pris la réserve utile du sol égale à 30 mm. Pour le calcul du bilan hydrique, nous avons utilisé les données d'une station climatique située dans le bassin versant étudié.

Tableau II.5 : Bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite de la station station Halla Boudella

Mois	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUILL	AOU
Pluie (mm)	47,82	40,43	30,91	27,27	33,78	37,6	53,22	43,13	53,2	20,09	19,72	33,67
Température (°C)	21,95	16,68	11,42	7,21	6,44	7,45	10,27	14,39	17,75	23,43	26,48	26,6
K	1,03	0,97	0,86	0,85	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16
I	9,39	6,20	3,49	1,74	1,47	1,83	2,97	4,96	6,81	10,37	12,48	12,56
ETP (mm)	100,69	59,95	28,23	12,95	10,97	13,67	28,32	52,64	82,97	131,91	164,49	156,30
P-ETP (mm)	-52,87	-19,52	2,68	14,32	22,81	23,93	24,90	-9,51	-29,77	-	-144,77	-122,63
Réserve utile (mm)	0,00	0,00	2,68	17,00	30,00	30	30	20,49	0	0	0	0
ETR (mm)	47,82	40,43	28,23	12,95	10,97	13,67	28,32	52,64	73,69	20,09	19,72	33,67
Déficit agricole (mm)	-52,87	-19,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-9,28	-	-144,77	-122,63
Excédent (mm)	0	0,00	0	0	9,81	23,93	24,9	0	0	0	0	0
Ecoulement (mm)	0,31	0,15	0,08	0,04	4,91	14,42	19,66	9,83	4,91	2,46	1,23	0,61

D'après le bilan hydrique pour station Halla Boudella et selon la méthode de Thornthwaite, la réserve utile commence à se reconstituer à partir du mois de novembre pour atteindre son maximum (30 mm) de janvier à mars. Le surplus d'eau alimente le ruissellement et l'infiltration. La réserve utile diminue à partir du mois d'avril jusqu'à ce qu'elle soit totalement épuisée au mois de mai, caractérisant le déficit agricole qui se poursuit jusqu'à octobre. L'ETP atteint son maximum au mois de juillet, son minimum au mois de janvier. L'Excédent à partir du mois de janvier et s'étale jusqu'au mois de mars.

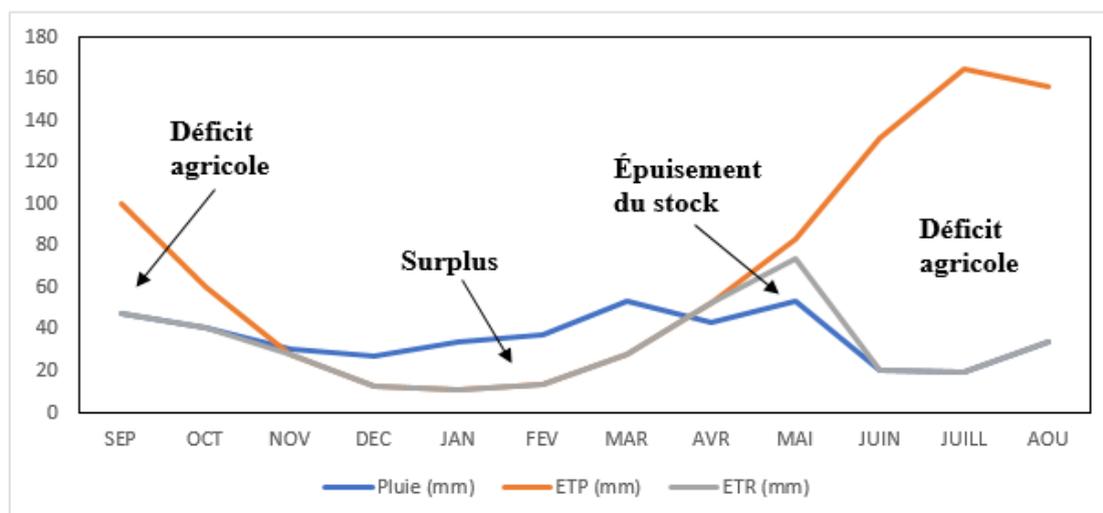


Figure II.6 : Représentation graphique du bilan hydrique de Thornthwaite de la station de Halla Boudella

Chapitre III

Caractérisation de la sécheresse

III.1 Introduction

Les précipitations sont un élément crucial dans l'étude des bassins versants, influençant directement les écosystèmes et les ressources en eau. Ce chapitre se concentre sur l'analyse approfondie des facteurs géographiques qui façonnent la distribution, la concentration et la saisonnalité des précipitations dans le bassin versant étudié. Nous explorerons l'impact spécifique de ces facteurs sur la répartition spatiale des précipitations, leur concentration, ainsi que leur intensité ou agressivité. En outre, une analyse détaillée des tendances pluviométriques sera présentée pour évaluer les évolutions temporelles des précipitations dans la région étudiée. Cette section fournira des insights précieux sur les changements climatiques locaux et leurs implications pour la gestion des ressources en eau. Une évaluation approfondie de la sécheresse météorologique viendra compléter les variations hydrologiques dans le bassin versant, en mettant en lumière les périodes de stress hydrique. Enfin, une analyse de la corrélation entre différents indices de sécheresse permettra de mieux appréhender les relations complexes entre divers paramètres climatiques et leurs manifestations en termes de sécheresse.

III.2 Influence des facteurs géographiques sur la distribution, la concentration et la saisonnalité des précipitations**III.2.1 Influence des facteurs géographiques sur la distribution des précipitations**

La pluviométrie varie en Algérie sous l'influence de plusieurs paramètres géographiques : l'altitude, la latitude, la longitude et la distance à la mer (Meddi et al, 2007).

Les résultats de l'analyse des précipitations intra-annuelles en fonction de l'altitude (Figure III.1) dans le bassin versant étudié révèlent une corrélation significative entre ces deux variables. Le coefficient de détermination R^2 de 0,797 indique que près de 80 % de la variation des précipitations observées peut être expliquée par les différences d'altitude. Cette forte corrélation suggère que l'altitude exerce une influence importante sur la répartition des précipitations dans la région. Plus spécifiquement, il semble y avoir une tendance selon laquelle les précipitations intra-annuelles augmentent avec l'altitude. Cette relation pourrait être expliquée par les effets de l'altitude sur les conditions météorologiques locales, tels que les changements de température, de pression atmosphérique et de circulation des vents, qui influent directement sur la formation et la distribution des précipitations.

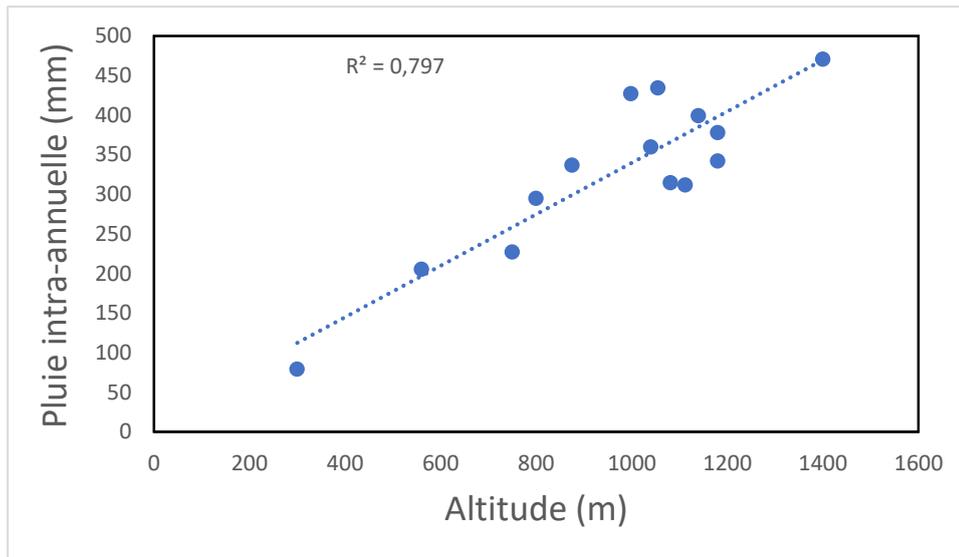


Figure III.1 : Variation de la pluie intra-annuelle en fonction de l’altitude

L'analyse de la variation des précipitations intra-annuelles en fonction de la latitude (Figure III.2) dans le même bassin versant révèle une corrélation moins forte que celle observée avec l'altitude. En effet, le coefficient de détermination R^2 de 0,464 indique que 46,4 % de la variation des précipitations peut être expliquée par les différences de latitude. Cette corrélation modérée suggère que la latitude exerce également une influence sur la répartition des précipitations dans la région, mais de manière moins prononcée que l'altitude. Il est possible que d'autres facteurs, tels que la topographie locale, les effets de microclimat ou les variations saisonnières, puissent jouer un rôle supplémentaire dans la répartition des précipitations observée. Malgré cela, ces résultats confirment que la latitude reste un paramètre important à considérer lors de l'analyse des précipitations intra-annuelles dans ce bassin versant.

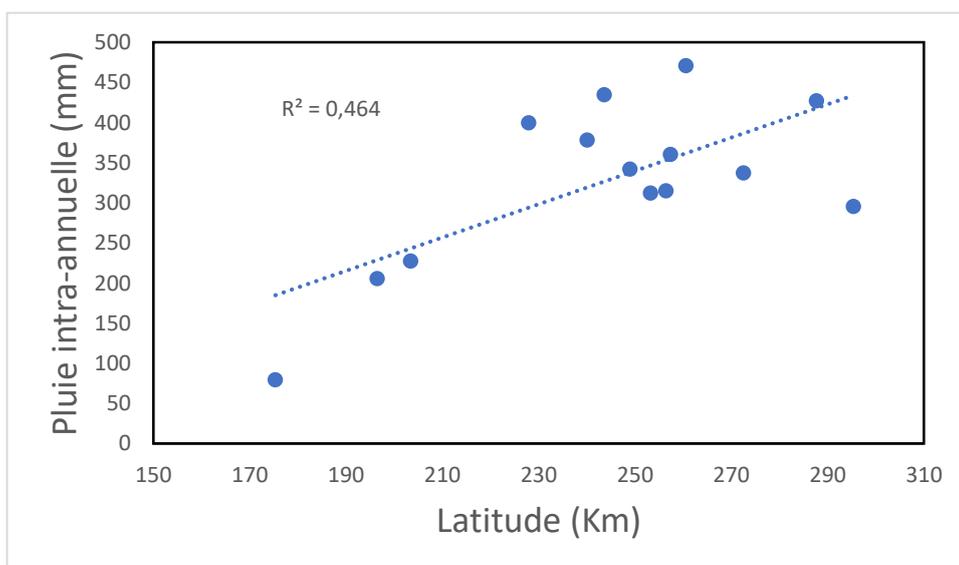


Figure III.2 : Variation de la pluie intra-annuelle en fonction de latitude

L'analyse de la variation des précipitations intra-annuelles en fonction de la longitude (Figure III.3) dans le bassin versant a abouti à des résultats surprenants. En effet, le faible coefficient de détermination R^2 de 0,0009 suggère une corrélation pratiquement nulle entre la longitude et les précipitations intra-annuelles. Cette constatation indique que la longitude semble avoir très peu, voire aucun effet discernable sur la répartition des précipitations dans la région étudiée. Bien que la longitude ne semble pas jouer un rôle significatif dans la répartition des précipitations intra-annuelles dans ce bassin versant, d'autres facteurs géographiques tels que l'altitude et la latitude continuent à mériter une attention particulière dans les études hydrologiques et climatologiques.

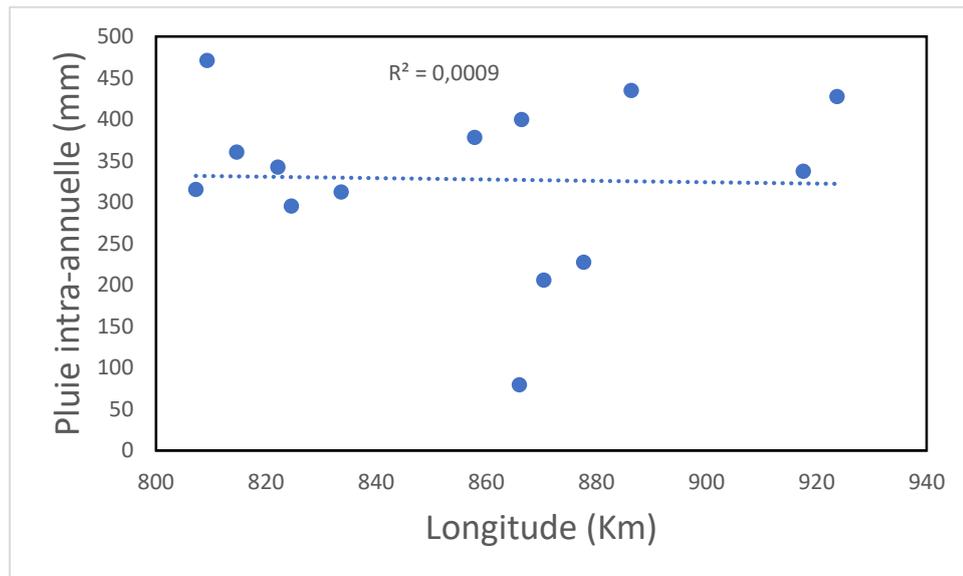


Figure III.3 : Variation de la pluie intra-annuelle en fonction de la longitude

III.2.2 Influence des facteurs géographiques sur la concentration des précipitations

Oliver (1980) a introduit l'Indice de Concentration des Précipitations (PCI) pour étudier la concentration de la pluviométrie au cours de l'année hydrologique par une classification présentée dans le tableau ci-dessous (Karim et al, 2016). L'indice PCI est donné par l'expression suivante :

$$PCI = \frac{\sum_{i=1}^{12} Pm_i^2}{(\sum_{i=1}^{12} pm)^2} \cdot 100 \quad \text{Eq III.1}$$

Pm_i : Pluie mensuelle au mois i .

Tableau III.1 : Classification de la sécheresse selon les valeurs de PCI

PCI	Classification (concentration)
<10	régulières
de 10 à 15	modérément saisonnière
de 15 à 20	saisonnière
de 20 à 50	fortement saisonnière
de 50 à 100	fortement irrégulière

L'analyse de l'indice de concentration des précipitations (PCI) des stations du bassin versant étudié révèle une diversité de niveaux de concentration des précipitations. Sur les stations étudiées, les valeurs de PCI varient de manière significative, allant de 13,7 à 29,97. La classification des résultats montre que la plupart des stations présentent une concentration modérée à saisonnière des précipitations, avec des valeurs de PCI se situant entre 10 et 20. Quelques stations, cependant, affichent des valeurs plus élevées, dépassant 20, ce qui indique une concentration plus forte et plus saisonnière des précipitations. Ces résultats suggèrent que la distribution des précipitations dans le bassin versant étudié peut varier considérablement d'une station à l'autre, reflétant probablement des différences dans les conditions géographiques locales, telles que l'altitude, la latitude, la topographie, et d'autres facteurs influençant les régimes de précipitations.

Tableau III.2 : Indice de concentration des précipitations des stations du bassin versant étudié

Stations	PCI	Concentration
61802	16,67	Saisonnière
61803	14,9	Modérément saisonnière
61805	20,78	Fortement saisonnière
61806	29,97	Fortement saisonnière
70303	14,13	Modérément saisonnière
70305	15,17	Saisonnière
70308	15,78	Saisonnière
70309	14,54	Modérément saisonnière
70316	14,15	Modérément saisonnière
70410	14,79	Modérément saisonnière
70604	15,51	Saisonnière
70704	14,25	Modérément saisonnière
70707	14,13	Modérément saisonnière
70708	13,7	Modérément saisonnière

Les résultats de l'analyse de la variation de l'indice de concentration des précipitations (PCI) en fonction des facteurs géographiques (Figure III.4) sont révélateurs des influences différenciées de ces variables sur la répartition des précipitations dans le bassin versant étudié. L'altitude, avec un coefficient de détermination R^2 de 0,6571, apparaît comme le facteur le plus significatif, expliquant près de 66 % de la variation observée dans le PCI. Cette corrélation soutenue suggère que l'altitude joue un rôle crucial dans la concentration des précipitations, probablement en influençant les

conditions atmosphériques locales et les modèles de circulation des masses d'air. En revanche, la latitude, bien que significative avec un coefficient de détermination R^2 de 0,5865, semble exercer une influence légèrement moindre que l'altitude sur la variation du PCI. Cela indique que les différences latitudinales dans le bassin versant contribuent également à la variabilité des précipitations, mais dans une moindre mesure que l'altitude. Enfin, la longitude présente un faible coefficient de détermination R^2 de 0,0058, suggérant une corrélation presque négligeable entre ce facteur et le PCI. Ces résultats mettent en lumière l'importance de considérer l'altitude et la latitude comme des déterminants clés dans l'étude de la répartition des précipitations, tandis que la longitude semble jouer un rôle beaucoup moins significatif dans ce contexte particulier.

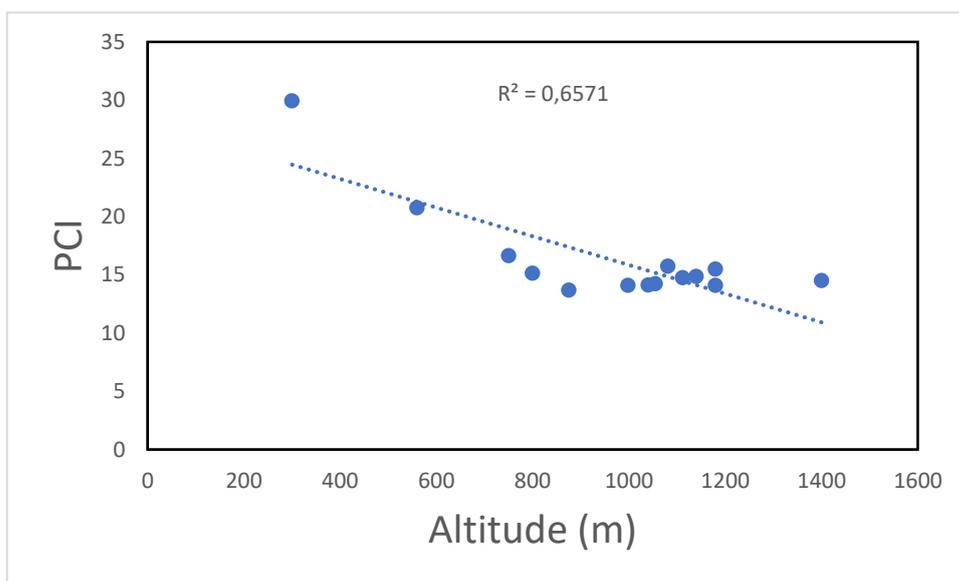


Figure III.4 : Variation de PCI en fonction de l'altitude

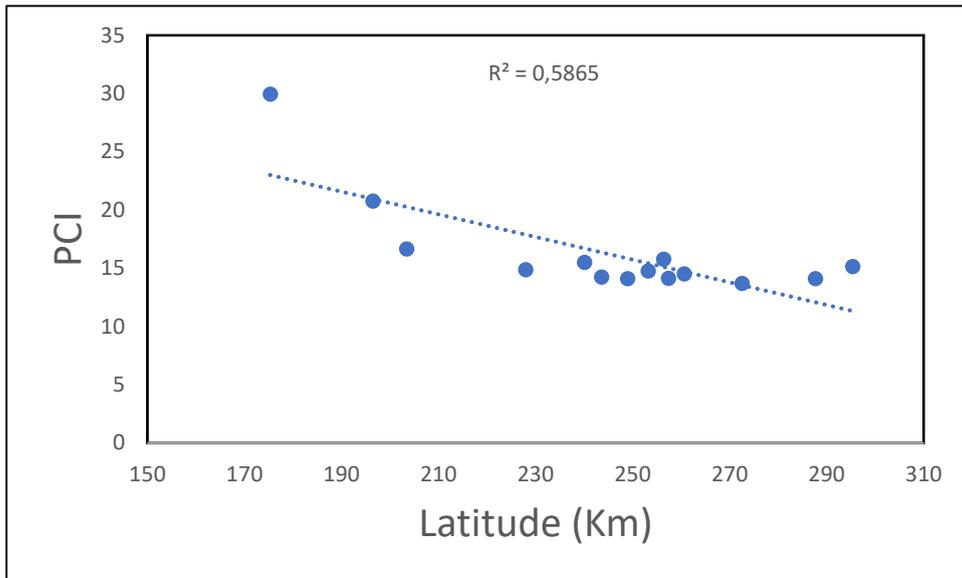


Figure III.5 : Variation de PCI en fonction de latitude

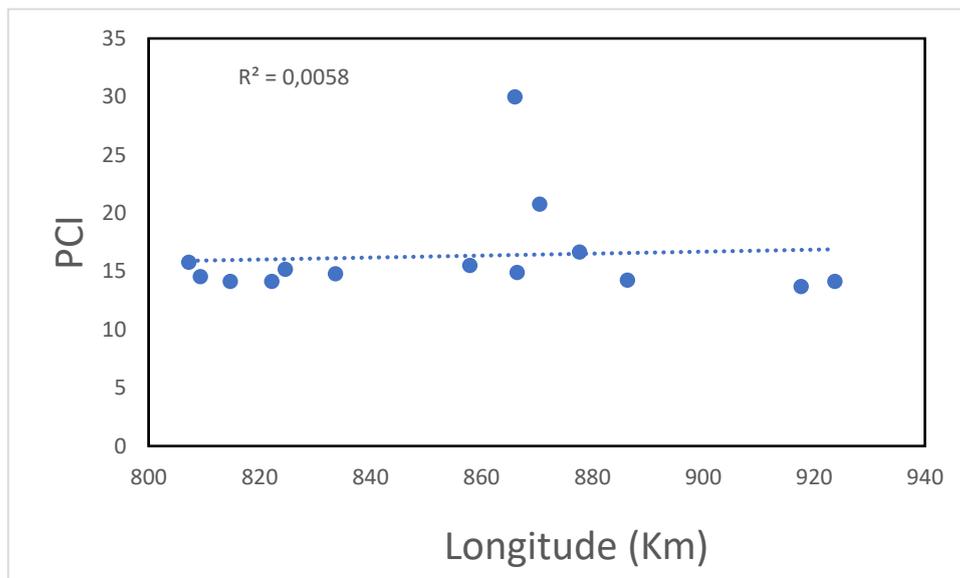


Figure III.6 : Variation de PCI en fonction de la longitude

L'indice de saisonnalité (SI), mesure la quantification du degré de variabilité des précipitations tout au long de l'année. (Walsh et Lawler 1981) ont proposés l'indice de saisonnalité des précipitations (SI) défini dans l'équation suivante :

$$SI = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^n \left| X_n - \frac{R}{12} \right| \quad \text{Eq III.2}$$

X_n : Précipitation totale mensuelle (mm).

R : Précipitation totale annuelle (mm).

Cet indice, qui est simplement la somme des écarts absolus des précipitations mensuelles moyennes par rapport aux précipitations mensuelles globales moyenne, divisée par les précipitations annuelles moyennes, il évalue le contraste saisonnier des quantités de précipitations mensuelles à savoir les mois secs ou humides. En théorie, cet indice peut varier de zéro à 1,83. Dans le tableau ci-dessous, sont représenté la classe (SI) pour les différents régimes des précipitations (Nekkache & Megnounif, 2013).

Tableau III.3 : Différentes classes de SI

Classes SI	Régime des précipitations
$\leq 0,19$	Précipitations uniformément réparties tout au long de l'année
0,20–0,39	Précipitations également réparties tout au long de l'année, mais avec une saison bien plus humide
0,40–0,59	Plutôt saisonnier avec une courte saison plus sèche
0,60–0,79	Saisonnier
0,80–0,99	Nettement saisonnier avec une longue saison sèche
1.00–1.19	La plupart des précipitations concentrées en 3 mois
$\geq 1,20$	Saisonnalité extrême, avec presque toutes les précipitations en 1 à 2 mois

L'analyse de l'indice de saisonnalité (SI) des précipitations des stations du bassin versant étudié (tableau) révèle une prédominance de régimes saisonniers, avec des valeurs de SI se situant principalement entre 0,62 et 1,09. Comparativement aux résultats obtenus avec l'indice de concentration des précipitations (PCI), qui mesure la concentration des précipitations sur l'ensemble de l'année, l'indice de saisonnalité (SI) fournit des informations supplémentaires sur la distribution temporelle des précipitations. Alors que le PCI met l'accent sur la variabilité de la concentration des précipitations dans l'année, le SI se concentre davantage sur la répartition saisonnière des précipitations et la durée relative des saisons sèches et humides. Cette comparaison souligne l'importance d'utiliser plusieurs indices hydrologiques pour obtenir une vision complète des régimes de précipitations dans une région donnée, ce qui peut être essentiel pour la planification des ressources en eau et la prise de décisions en matière de gestion des risques liés aux précipitations.

Tableau III.4 : Indice de saisonnalité des précipitations des stations du bassin versant étudié

Station	SI	Classification
61802	0,76	Saisonnier
61803	0,68	Saisonnier
61805	0,83	Nettement saisonnier avec une longue saison sèche
61806	1,09	La plupart des précipitations concentrées en 3 mois
70303	0,68	Saisonnier
70305	0,7	Saisonnier
70308	0,76	Saisonnier
70309	0,7	Saisonnier
70316	0,66	Saisonnier
70410	0,68	Saisonnier
70604	0,71	Saisonnier
70704	0,65	Saisonnier
70707	0,66	Saisonnier
70708	0,62	Saisonnier

L'analyse de la corrélation entre l'indice de saisonnalité (SI) et l'indice de concentration des précipitations (PCI) dans le bassin versant étudié a abouti à des résultats significatifs. Avec un coefficient de détermination R^2 remarquablement élevé de 0,9678, ces résultats indiquent une forte relation entre la variabilité de la saisonnalité des précipitations et la concentration des précipitations sur l'ensemble de l'année. Cette corrélation met en évidence le lien étroit entre la distribution temporelle des précipitations et leur répartition annuelle. En effet, les stations présentant des fluctuations marquées dans la saisonnalité des précipitations tendent également à afficher des variations substantielles dans la concentration des précipitations tout au long de l'année, et inversement. Cette observation suggère que les régions où les précipitations sont fortement concentrées sur une période spécifique de l'année peuvent également présenter une saisonnalité plus prononcée dans leurs précipitations, et vice versa.

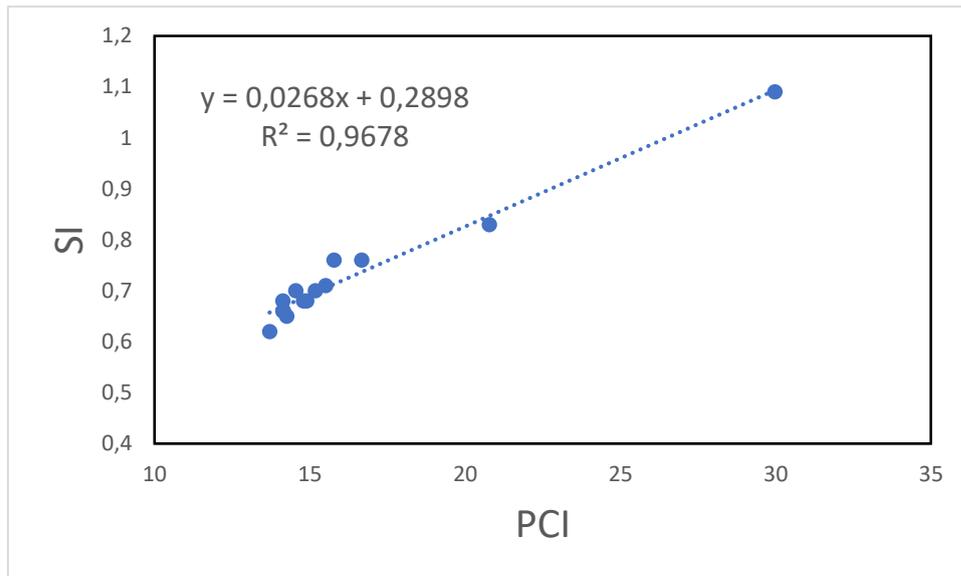


Figure III.7 : Variation de SI en fonction de PCI

La figure montre la variation de l'indice de saisonnalité (SI) en fonction de l'altitude, de la latitude et de la longitude dans le bassin versant étudié. Les coefficients de détermination obtenus révèlent des niveaux variables de corrélation entre l'indice de saisonnalité et les facteurs géographiques étudiés. Tout d'abord, l'altitude présente un coefficient de détermination R^2 de 0,5684, ce qui indique une corrélation modérée entre l'altitude et la saisonnalité des précipitations. Cette corrélation suggère que l'altitude peut influencer la distribution temporelle des précipitations dans le bassin versant, probablement en raison de son effet sur les conditions atmosphériques locales et les schémas de circulation des masses d'air. De manière similaire, la latitude affiche également un coefficient de détermination R^2 significatif de 0,5747, indiquant une corrélation modérée avec la saisonnalité des précipitations. Cela suggère que la latitude peut également jouer un rôle dans la variation saisonnière des précipitations, peut-être en raison de différences dans l'incidence du rayonnement solaire et des vents dominants selon la position géographique. En revanche, la longitude présente un coefficient de détermination R^2 très faible de 0,0015, indiquant une corrélation presque négligeable avec la saisonnalité des précipitations. Cela suggère que la longitude a peu d'influence sur la variation saisonnière des précipitations dans le bassin versant étudié.

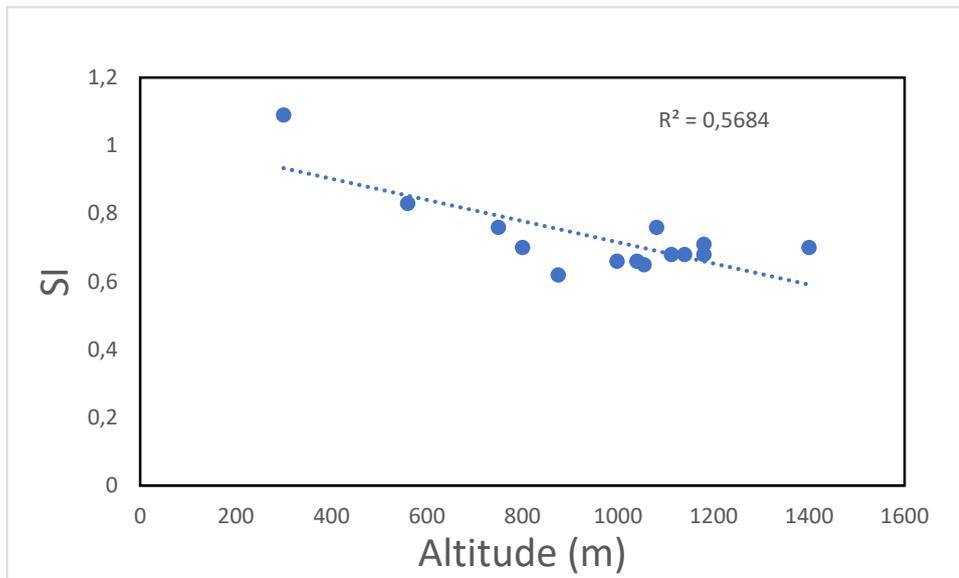


Figure III.8 : Variation de SI en fonction de l'altitude

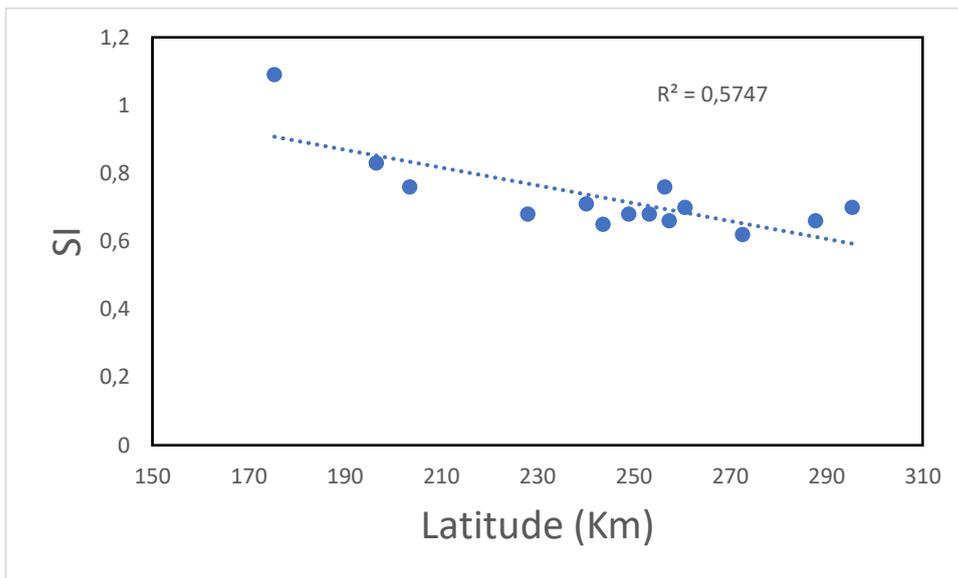


Figure III.9 : Variation de SI en fonction de latitude

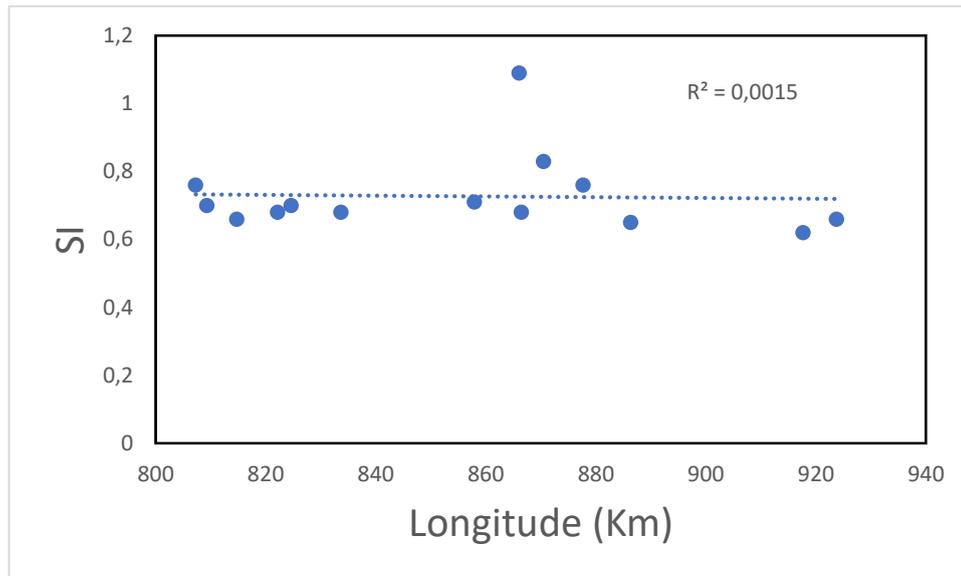


Figure III.10 : Variation de SI en fonction de longitude

III.2.3 Influence des facteurs géographiques sur l’agressivité des précipitations

Fournier propose l’indice d’agressivité des précipitations (IFM : Index Fournier Modified) en 1960, après, cet indice a été modifié par Arnoldus en 1980. La classification de Fournier est présentée dans le tableau ci-dessous. Selon Fournier et Arnoldus, l’indice IFM est donné par l’équation suivante (Velasco & Costes, 2009) :

$$IFM = \sum_{i=1}^{12} \frac{Pm_i^2}{Pa} \quad \text{Eq III.3}$$

Pm_i : Pluie mensuelle au mois i .

Pa : Pluie annuelle de l’année considérée.

Tableau III.5 : Classification de la sécheresse selon les valeurs de IFM

IFM	Classification (Agressivité)
0-60	régulières
60-90	modérément saisonnière
90-120	saisonnière
120-160	fortement saisonnière
160	fortement irrégulière

L'analyse des résultats de l'indice d'agressivité des précipitations (IFM) pour les différentes stations du bassin versant (Tableau III.6) met en évidence une diversité dans les caractéristiques des précipitations observées. La plupart des stations présentent des valeurs d'IFM correspondant à une classification "régulière", ce qui suggère une répartition relativement uniforme des événements de précipitations sans tendance marquée à des variations saisonnières significatives. Cependant, quelques stations affichent des valeurs d'IFM indiquant une agressivité modérée ou saisonnière, ce qui implique des variations dans l'intensité et la fréquence des précipitations au fil des saisons. En comparaison avec les classifications obtenues pour l'indice de concentration des précipitations (PCI) et l'indice de saisonnalité (SI), ces résultats soulignent la complémentarité des différents indices dans la caractérisation des régimes de précipitations. Alors que le PCI évalue la concentration annuelle des précipitations et le SI met en lumière la saisonnalité des précipitations, l'IFM fournit des informations sur l'intensité des événements de précipitations individuels.

Tableau III.6 : Indice d'agressivité des précipitations des stations du bassin versant étudié

Station	IFM	Agressivité
61802	36,98	Régulière
61803	58,03	Régulière
61805	40,80	Régulière
61806	18,70	Régulière
70303	47,93	Régulière
70305	42,57	Régulière
70308	48,85	Régulière
70309	67,09	Modérément saisonnier
70316	50,17	Régulière
70410	45,26	Régulière
70604	57,90	Régulière
70704	62,04	Modérément saisonnier
70707	59,77	Régulière
70708	47,63	Régulière

L'analyse de la corrélation entre l'indice d'agressivité des précipitations (IFM) et les facteurs géographiques tels que l'altitude, la latitude et la longitude dans le bassin versant étudié a révélé des tendances intéressantes. Premièrement, le coefficient de détermination R^2 élevé de 0,7537 pour l'altitude suggère une corrélation significative entre l'altitude et l'agressivité des précipitations. Cette corrélation met en évidence l'influence de l'altitude sur l'intensité des événements de précipitations, ce qui est cohérent avec les observations précédentes indiquant que les régions de haute altitude peuvent être sujettes à des précipitations plus intenses en raison de processus atmosphériques spécifiques liés à l'élévation. En revanche, le coefficient de détermination R^2 pour la latitude est moins élevé, avec une valeur de 0,3375. Cela suggère une corrélation plus faible entre la latitude et l'agressivité des précipitations, indiquant que les variations de latitude ont une influence moindre sur l'intensité des précipitations dans le bassin versant étudié. De même, le coefficient de détermination R^2 très faible de 0,0003 pour la longitude indique une corrélation quasiment négligeable entre la longitude et l'agressivité des précipitations. Ces résultats suggèrent que la position géographique est un facteur moins déterminant dans l'explication de la variabilité de l'agressivité des précipitations dans la région étudiée, comparativement à l'altitude. Ces résultats soulignent l'importance de considérer l'altitude comme un déterminant clé de l'agressivité des précipitations, tandis que la latitude et la longitude semblent avoir une influence moindre.

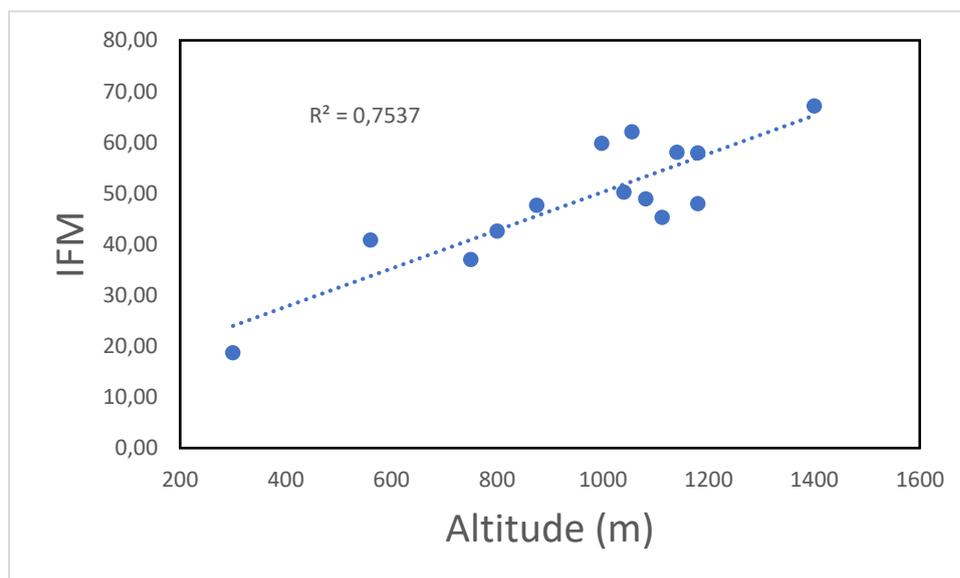


Figure III.11 : Variation de IFM en fonction de l'altitude

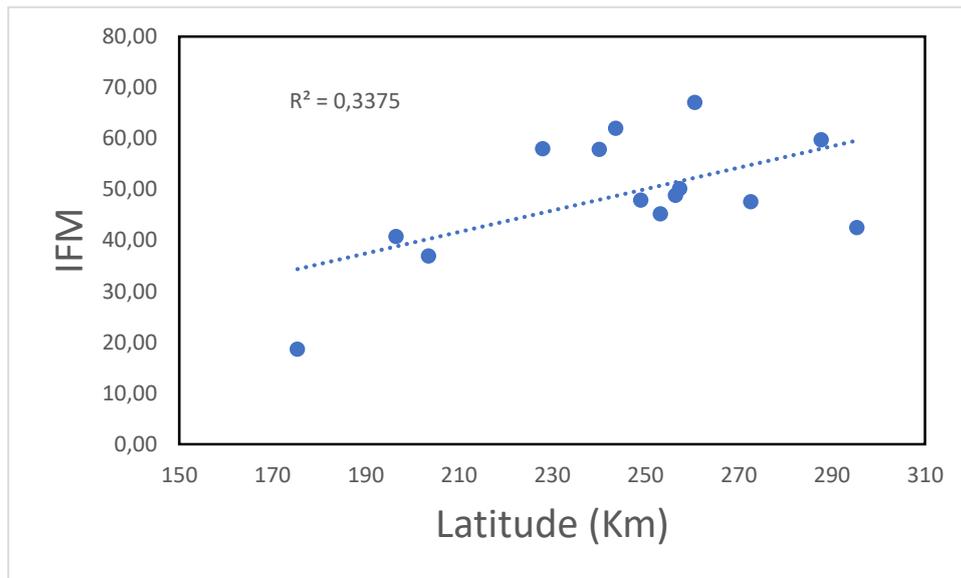


Figure III.12: Variation de IFM en fonction de latitude

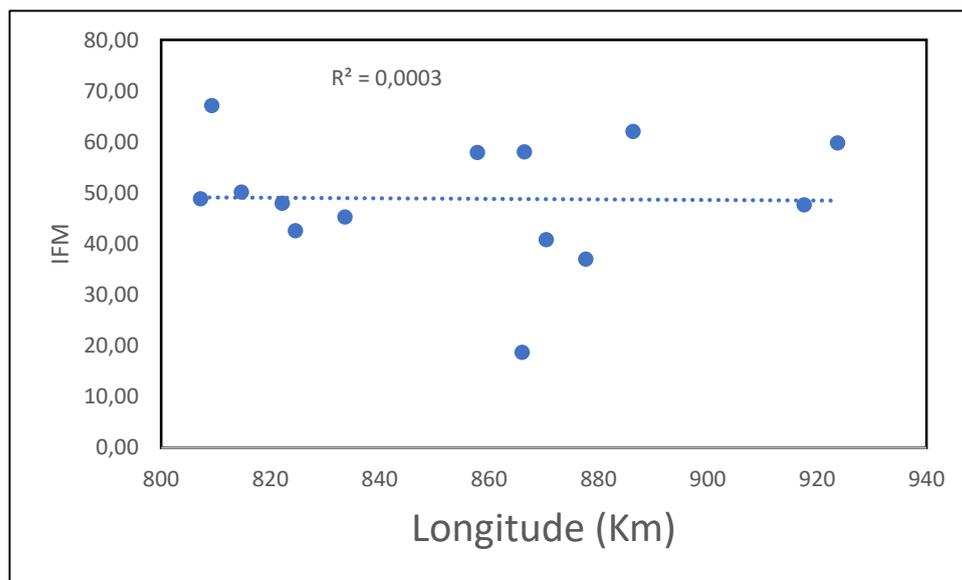


Figure III.13 : Variation de IFM en fonction de longitude

III.3 Analyse des tendances pluviométriques

Le test de Mann-Kendall (MK) est adopté pour déterminer la présence ou l'absence de tendance linéaire dans les séries climatiques analysées. Selon Mann et Kendall, ce test non paramétrique, basé sur le rang permet de déterminer si la corrélation entre le temps et la variable d'étude est significative ou pas. Soit (x_1, \dots, x_n) un échantillon de valeurs indépendantes relative à une variable aléatoire X dont

on cherche à évaluer la stationnarité (Saadi et al, 2019). La statistique de Mann-Kendall est définie comme suit :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad \text{Eq III.4}$$

$$\text{Où} \quad \begin{cases} \text{sgn}(x_j - x_i) = 1, & \text{si } (x_j - x_i) > 0 \\ \text{sgn}(x_j - x_i) = 0, & \text{si } (x_j - x_i) = 0 \\ \text{sgn}(x_j - x_i) = -1, & \text{si } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad \text{Eq III.5}$$

Une valeur positive de S dénote une tendance à la hausse, ce qui signifie que les observations augmentent progressivement avec le temps. En revanche, une valeur négative de S indique une tendance à la baisse, ce qui suggère une diminution graduelle des observations au fil du temps. Il est important de noter que la significativité de la valeur positive et négative est évaluée en comparaison avec la valeur critique ou seuil de significativité du test. De plus, il est pertinent de mentionner que S est distribué asymptotiquement selon une distribution normale, avec une moyenne de zéro et une variance déterminée par l'équation suivante :

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)] \quad \text{Eq III.6}$$

Où n est le nombre de données de la série, m est le nombre de groupes liés et t_i est le nombre de données dans le groupe d'ordre i.

Si l'échantillon contient dix données ou plus, la loi de la statistique de test Z ci-dessous sera approchée par une gaussienne centrée réduite.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{si } S > 0 \\ 0, & \text{si } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad \text{Eq III.7}$$

Le test de Pettitt est un test non paramétrique de détection d'une rupture unique à date inconnue. Les hypothèses du test sont H₀ : la série est stationnaire et H₁: la série présente une rupture. La statistique de test K est calculée de la façon suivante (Kang & Yusof, 2012) :

$$K = \text{Max}|U_t| \quad \text{Eq III.8}$$

$$\text{Avec} \quad U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N \text{sgn}(x_i - x_j) \quad \text{Eq III.9}$$

$$\text{Où} \quad \begin{cases} \text{sgn}(x_i - x_j) = 1, & \text{si } (x_i - x_j) > 0 \\ \text{sgn}(x_i - x_j) = 0, & \text{si } (x_i - x_j) = 0 \\ \text{sgn}(x_i - x_j) = -1, & \text{si } (x_i - x_j) < 0 \end{cases} \quad \text{Eq III.10}$$

Soit α représentant un risque de première espèce. H₀ est rejetée si une certaine probabilité calculée à partir d'une série chronologique étudiée est inférieure à α :

$$P(K_N > K) \approx 2 \exp\left(\frac{-6K^2}{N^2 + N^3}\right) \quad \text{Eq III.11}$$

L'indice de variation permet de déterminer le pourcentage de variations de la moyenne de la série considérée d'une sous période T_i autour de la période T considérée. Pour les variables dont la série chronologique présente une rupture, cette méthode précise le pourcentage de variation de la moyenne autour de la date de rupture et s'obtient par la formule suivante :

$$ID = \left(\frac{\bar{x}_j - \bar{x}_i}{\bar{x}_i} \right) * 100 \quad \text{Eq III.12}$$

Où ID est l'indice de variation (%), \bar{x}_j est la moyenne de la période après la rupture et \bar{x}_i est la moyenne de la période avant la rupture.

L'analyse des tendances monotones et des ruptures dans les séries pluviométriques des 14 stations de la zone d'étude offre des insights supplémentaires sur les régimes de précipitations, en complément des indices PCI, SI et IFM précédemment étudiés. Les résultats du test de Mann-Kendall indiquent que la plupart des stations ne présentent pas de tendance significative au fil du temps, ce qui suggère une stabilité relative dans les précipitations observées. Cependant, pour les stations 70305 et 70707, une tendance à la hausse est observée, indiquant une augmentation progressive des précipitations au fil du temps dans ces régions spécifiques. D'autre part, la station 70308 présente une tendance à la baisse, suggérant une diminution progressive des précipitations au fil des années.

En ce qui concerne les ruptures dans les séries pluviométriques, le test de Pettitt révèle que la plupart des stations n'ont pas connu de rupture significative dans leurs données de précipitations. Cependant, la station 70707 présente une rupture identifiée en 1995, associée à un excédent de précipitations de 39,93%. Cette rupture peut indiquer un changement abrupt dans les régimes de précipitations à cette période, ce qui pourrait avoir des implications importantes pour la gestion des ressources en eau et la planification des mesures d'adaptation.

Tableau III.7 : Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués sur les précipitations annuelles

61802												
Paramètres climatiques	Test de Mann-Kendall						Test de Pettitt					
	S	varS	tau	p-value	z	Tendance	p-value	Rupture	Date de rupture	Moyenne avant rupture	Moyenne après rupture	Excédent (%)
Pluie (mm)	144	9129.33	0.1596	0.1345	1.4966	Pas de tendance	0.07736	Pas de rupture	-	-	-	-

61803												
Paramètres climatiques	Test de Mann-Kendall						Test de Pettitt					
	S	varS	tau	p-value	z	Tendance	p-value	Rupture	Date de rupture	Moyenne avant rupture	Moyenne après rupture	Excédent (%)
Pluie (mm)	125	9128.33	0.1386	0.1943	1.2979	Pas de tendance	0.1047	Pas de rupture	-	-	-	-

61805												
Paramètres climatiques	Test de Mann-Kendall						Test de Pettitt					
	S	varS	tau	p-value	z	Tendance	p-value	Rupture	Date de rupture	Moyenne avant rupture	Moyenne après rupture	Excédent (%)
Pluie (mm)	-62	9129.33	-0.0687	0.5232	-0.6384	Pas de tendance	0.6435	Pas de rupture	-	-	-	-

61806												
Paramètres climatiques	Test de Mann-Kendall						Test de Pettitt					
	S	varS	tau	p-value	z	Tendance	p-value	Rupture	Date de rupture	Moyenne avant rupture	Moyenne après rupture	Excédent (%)
Pluie (mm)	98	9129.33	0.1086	0.31	1.0152	Pas de tendance	0.31	Pas de rupture	-	-	-	-

70303												
Paramètres climatiques	Test de Mann-Kendall						Test de Pettitt					
	S	varS	tau	p-value	z	Tendance	p-value	Rupture	Date de rupture	Moyenne avant rupture	Moyenne après rupture	Excédent (%)
Pluie (mm)	-55	4521	-0.0995	0.4219	-0.8031	Pas de tendance	0.5246	Pas de rupture	-	-	-	-

70305												
Paramètres climatiques	Test de Mann-Kendall						Test de Pettitt					
	S	varS	tau	p-value	z	Tendance	p-value	Rupture	Date de rupture	Moyenne avant rupture	Moyenne après rupture	Excédent (%)
Pluie (mm)	204	4930	0.3473	0.00383	2.8912	Tendance à la hausse	0.02956	Pas de rupture	-	-	-	-

70308												
Paramètres climatiques	Test de Mann-Kendall						Test de Pettitt					
	S	varS	tau	p-value	z	Tendance	p-value	Rupture	Date de rupture	Moyenne avant rupture	Moyenne après rupture	Excédent (%)
Pluie (mm)	-198	4148.67	-0.3786	0.00222	-3.0585	Tendance à la baisse	0.03158	Pas de rupture	-	-	-	-

70309												
Paramètres climatiques	Test de Mann-Kendall						Test de Pettitt					
	S	varS	tau	p-value	z	Tendance	p-value	Rupture	Date de rupture	Moyenne avant rupture	Moyenne après rupture	Excédent (%)
Pluie (mm)	-41	4137	-0.0788	0.534	-0.6219	Pas de tendance	0.262	Pas de rupture	-	-	-	-

70316												
Paramètres climatiques	Test de Mann-Kendall						Test de Pettitt					
	S	varS	tau	p-value	z	Tendance	p-value	Rupture	Date de rupture	Moyenne avant rupture	Moyenne après rupture	Excédent (%)
Pluie (mm)	-85	5817.67	-0.1291	0.2708	-1.1013	Pas de tendance	0.4237	Pas de rupture	-	-	-	-

70410												
Paramètres climatiques	Test de Mann-Kendall						Test de Pettitt					
	S	varS	tau	p-value	z	Tendance	p-value	Rupture	Date de rupture	Moyenne avant rupture	Moyenne après rupture	Excédent (%)
Pluie (mm)	81	4958.33	0.1361	0.2559	1.1361	Pas de tendance	0.8741	Pas de rupture	-	-	-	-

70604												
Paramètres climatiques	Test de Mann-Kendall						Test de Pettitt					
	S	varS	tau	p-value	z	Tendance	p-value	Rupture	Date de rupture	Moyenne avant rupture	Moyenne après rupture	Excédent (%)
Pluie (mm)	-46	4930	-0.0783	0.5216	-0.6409	Pas de tendance	0.3629	Pas de rupture	-	-	-	-

70704												
Paramètres climatiques	Test de Mann-Kendall						Test de Pettitt					
	S	varS	tau	p-value	z	Tendance	p-value	Rupture	Date de rupture	Moyenne avant rupture	Moyenne après rupture	Excédent (%)
Pluie (mm)	-77	5361.67	-0.1237	0.2993	-1.0379	Pas de tendance	0.4523	Pas de rupture	-	-	-	-

70707												
Paramètres climatiques	Test de Mann-Kendall						Test de Pettitt					
	S	varS	tau	p-value	z	Tendance	p-value	Rupture	Date de rupture	Moyenne avant rupture	Moyenne après rupture	Excédent (%)
Pluie (mm)	265	6833.67	0.3576	0.00140	3.1936	Tendance à la hausse	0.00229	Présence de rupture	1995	384.10	537.48	39.93

70708												
Paramètres climatiques	Test de Mann-Kendall						Test de Pettitt					
	S	varS	tau	p-value	z	Tendance	p-value	Rupture	Date de rupture	Moyenne avant rupture	Moyenne après rupture	Excédent (%)
Pluie (mm)	-144	4165.33	-0.2727	0.0267	-2.2157	Pas de tendance	0.03876	Pas de rupture	-	-	-	-

III.4 Evaluation de la sécheresse météorologique

L'indice de Précipitation Standardisé (SPI) est basé sur des calculs statistiques des précipitations pendant une longue période (30 ans au moins). Le SPI est développé en 1993 par McKEE de l'université de l'État du Colorado, pour la détermination des déficits pluviométriques. C'est un indice très important, puissant et simple à calculer. Les données sur les précipitations constituent en fait le seul paramètre requis. En outre, l'indice SPI se révèle tout aussi efficace pour analyser les périodes des cycles humides que les périodes des cycles secs. L'expression la plus simple pour calculer SPI est (McKee et al, 1993) :

$$SPI = \frac{P_i - P_m}{\sigma} \quad \text{Eq III.13}$$

P_i : Précipitations de l'année i .

P_m : Moyenne de l'ensemble des précipitations interannuelles de la période prise.

σ : Ecart – type interannuel de toute la série.

Tableau III.8 : Classification de la sécheresse selon les valeurs de SPI

SPI	Classification
2,0 et plus	Extrêmement humide
de 1,5 à 1,99	Très humide
de 1,0 à 1,49	Modérément humide
de -0,99 à 0,99	Proche de la normale
de -1,0 à -1,49	Modérément sec
de -1,5 à -1,99	Très sec
-2 et moins	Extrêmement sec

Les figures III.13 et III.14 illustrent respectivement l'incidence des différentes catégories de sécheresse sur les 14 stations de la zone d'étude, exprimées en années (Figure III.13) et en pourcentages (Figure III.14). Les résultats de l'analyse du pourcentage d'occurrence des différentes catégories de sécheresse révèlent une diversité dans les conditions climatiques de la zone d'étude. La catégorie la plus fréquemment observée est « Proche de la normale », représentant près de 70% des années étudiées, ce qui suggère une stabilité dans les schémas climatiques régionaux. Ces constatations sont cohérentes avec les résultats du test de Mann-Kendall, qui a montré que la plupart des stations n'ont pas présenté de tendance significative au fil du temps. Cependant, les périodes de conditions humides et sèches sont également présentes, bien que moins fréquentes. La période la plus commune parmi les conditions humides (Extrêmement humide, Très humide, Modérément humide) représente environ 16% des années, tandis que la période la plus fréquente parmi les conditions sèches (Modérément sec, Très sec, Extrêmement sec) représente environ 14% des années. Cette répartition équilibrée entre les

périodes humides et sèches suggère une certaine dynamique climatique dans la zone d'étude, ce qui souligne l'importance de surveiller de près ces variations pour une gestion efficace des ressources et une adaptation aux changements environnementaux.

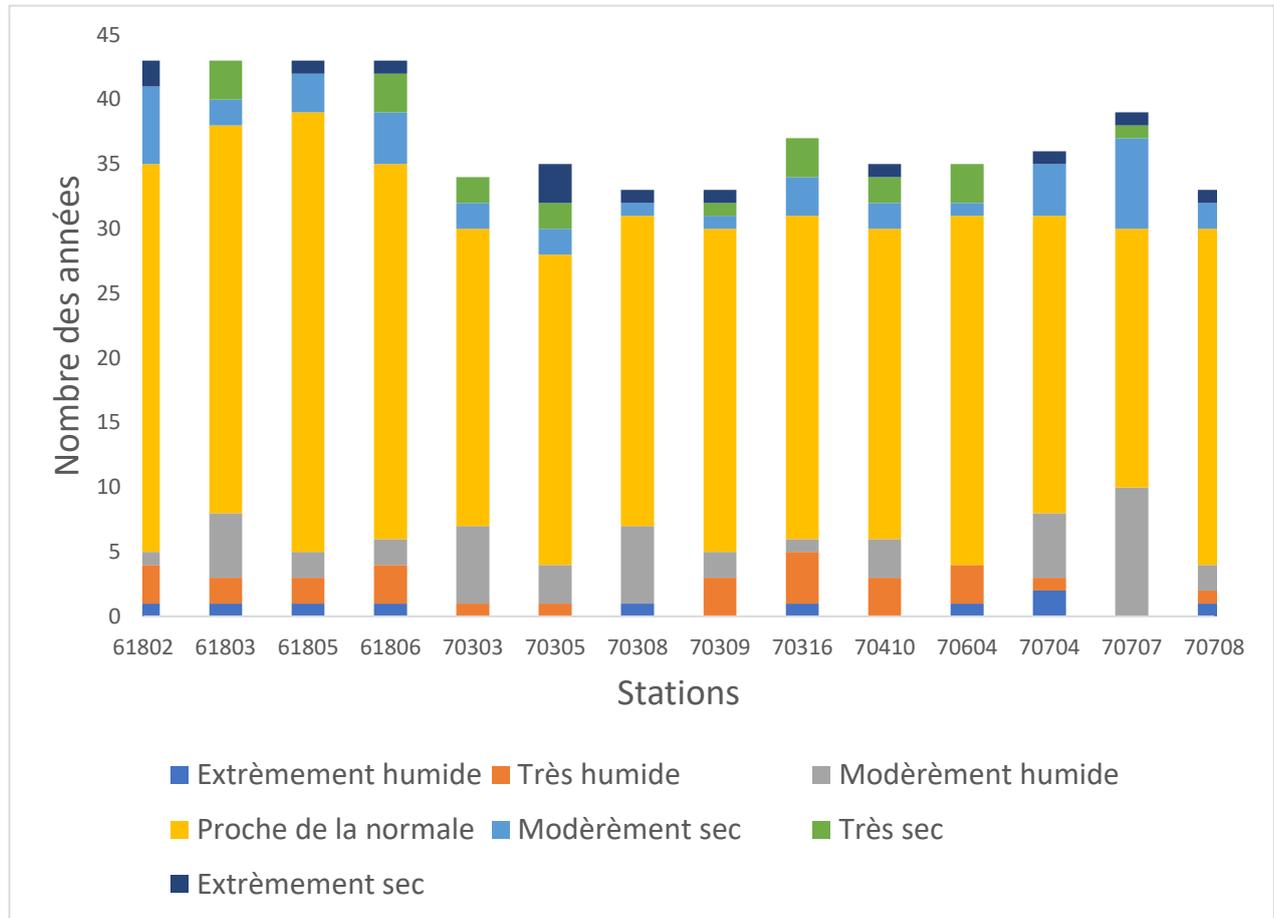


Figure III.14 : Classification de la sécheresse annuelle par SPI pour chaque station pluviométrique

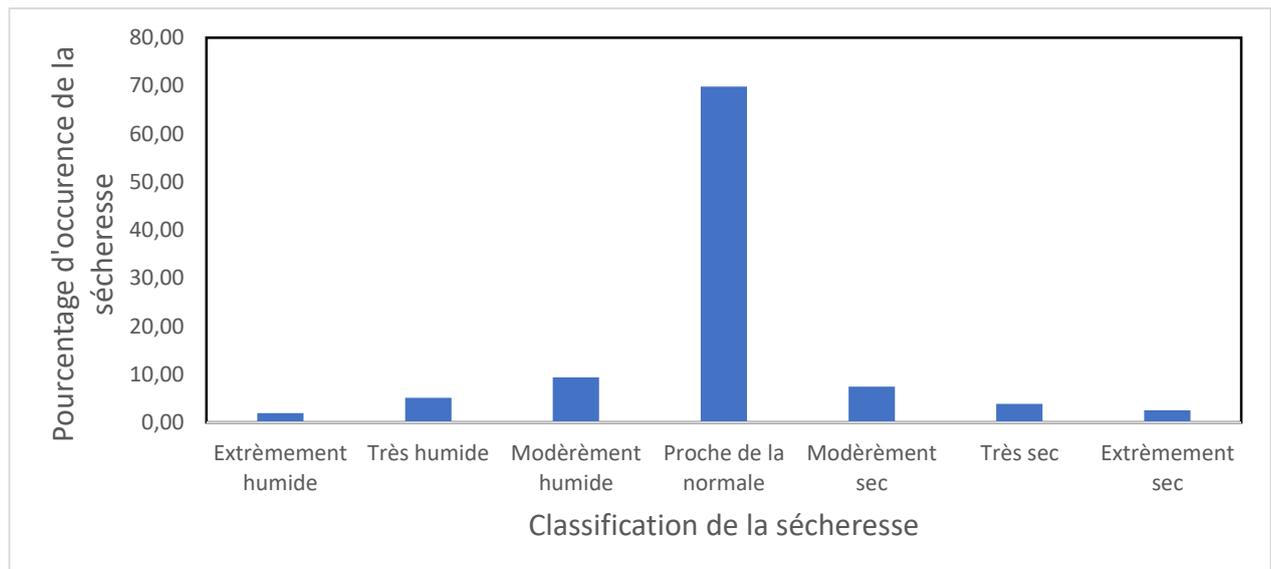


Figure III.15 : Pourcentage moyenne d'occurrence de la sécheresse selon l'indice SPI

La figure III.15 représente le pourcentage de stations touchées par différentes classifications de sécheresse au fil des années. Les années caractérisées par des conditions plus humides (extrêmement, très et modérément humide) comprennent 1972, 1973, 1975, 1976, 1982, 1984, 1985, 1989, 1990, 1991, 1992, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001 et 2002. Notamment, l'année 1972 se démarque comme celle présentant le pourcentage le plus élevé d'extrêmement humide, tandis que 1990 est associée au plus grand pourcentage de très humide. Les années 1972 et 1992 se distinguent avec les pourcentages les plus élevés de conditions modérément humides. Les années où la catégorie « Proche de la normale » prédomine sont plus fréquentes, représentant jusqu'à 74,19 % des années étudiées, indiquant une stabilité relative des conditions climatiques. L'année 1980 se distingue particulièrement, avec un pourcentage de conditions proches de la normale atteignant 100 %, mettant en évidence une stabilité climatique remarquable pour cette année. Les sécheresses modérées, très et extrêmement sont observées au cours des années 1972, 1973, 1974, 1977, 1978, 1979, 1981, 1983, 1985, 1986, 1987, 1988, 1989, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1998, 2000 et 2001. Plus spécifiquement, les années 1983 et 1987 se distinguent avec les plus grands pourcentages respectivement pour les conditions très sèches et modérément sèches. Il est également intéressant de noter que l'année 1983 est associée à des conditions extrêmement sèches, ajoutant une dimension notable à son caractère exceptionnel.

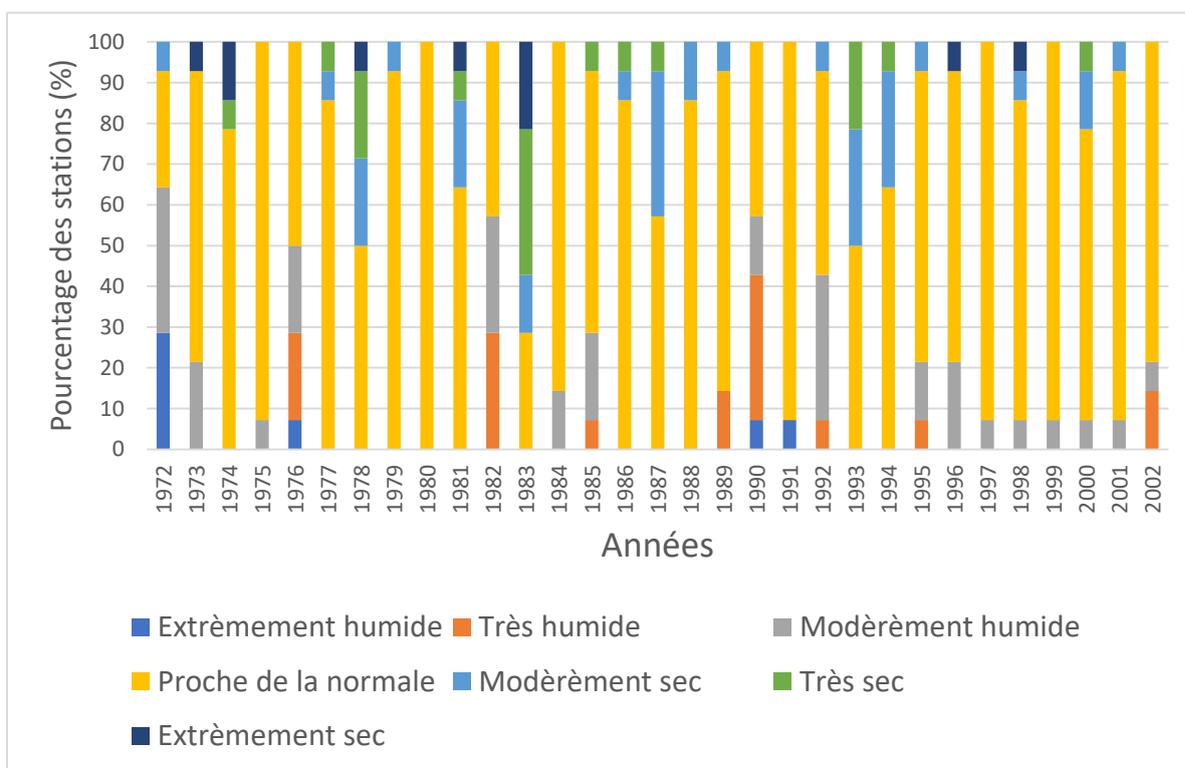


Figure III.16 : Pourcentage de stations affectées par les différentes catégories de sécheresse

La figure III.16 représente la comparaison par décennie de l'indice SPI. D'après cette figure, nous constatons :

- Pour la décennie 1972-1981 : Cette période présente une proportion relativement équilibrée entre les conditions humides et les conditions sèches, avec une nette prédominance des conditions proches de la normale (71,43 %). Cela suggère une stabilité climatique relative au cours de cette période, avec des schémas climatiques généralement conformes à la normale ;
- Pour la décennie 1982-1991 : On observe une légère augmentation des conditions humides par rapport à la décennie précédente, accompagnée d'une légère diminution des conditions proches de la normale (66,43 %). Cela suggère une certaine variabilité climatique au cours de cette période, avec une tendance légèrement plus humide par rapport à la décennie précédente ;
- Pour la décennie 1992-2002 : Cette période montre une légère diminution des conditions humides par rapport à la décennie précédente, tandis que les conditions proches de la normale diminuent également (73,38 %). Les conditions sèches restent relativement stables (13,64 %). Ces résultats suggèrent une période de stabilité climatique similaire à la décennie précédente, avec une légère tendance à la sécheresse.

Bien que les variations entre les décennies ne soient pas très prononcées, on observe des tendances subtiles dans les classifications de sécheresse, avec une légère augmentation des conditions humides dans la décennie 1982-1991, suivie d'une légère diminution dans la décennie 1992-2002. Cependant, les conditions proches de la normale restent dominantes au cours de toutes les décennies, suggérant une certaine stabilité climatique dans la zone d'étude sur la période étudiée.

La décennie de 1982-1991 se distingue par une humidité relativement élevée par rapport aux autres périodes. Ces résultats suggèrent que la période étudiée peut être divisée en trois phases : une période caractérisée par un climat relativement stable et modéré, suivie par une phase plus humide, puis à nouveau par une stabilité climatique avec une légère tendance vers des conditions plus sèches.

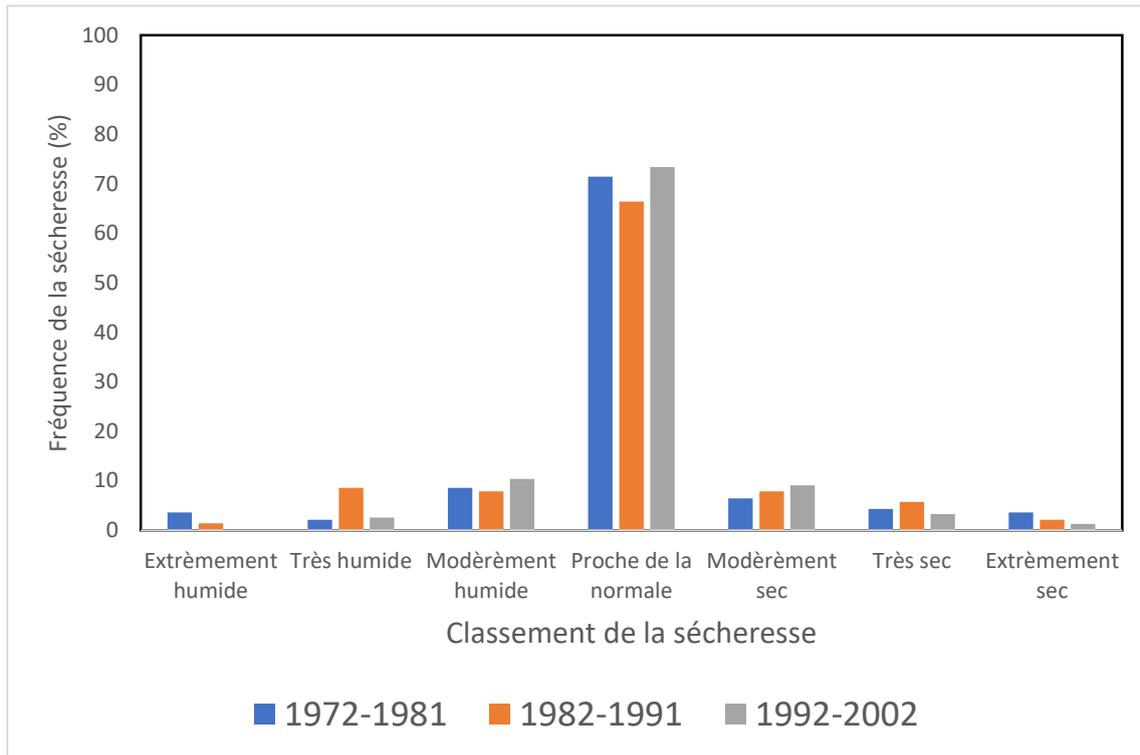


Figure III.17 : Fréquences des classes de l'indice SPI pour trois décennies successives

III.5 Corrélation entre différents indices de sécheresse

L'indice d'anomalie des précipitations (RAI Rainfall Anomaly Index) considère deux anomalies, l'une positive et l'autre négative. Tout d'abord, les données de précipitations sont répertoriées par ordre décroissant. Moyenne des dix valeurs les plus élevées pour former un seuil d'anomalie positif et moyenne des dix valeurs les plus basses pour former un seuil s'anomalie négatif (Hansel et al, 2016).

Anomalie positive $P - \bar{P} > 0$

Anomalie négative $P - \bar{P} < 0$

Si l'anomalie est positive, $RAI = 3 * \frac{P - \bar{P}}{\bar{m} - \bar{P}}$ Eq III.14

Si l'anomalie est négative, $RAI = -3 * \frac{P - \bar{P}}{\bar{x} - \bar{P}}$ Eq III.15

P : Précipitation annuelle (mm).

\bar{P} : Précipitation moyenne de la série (mm).

\bar{m} : Moyenne des dix valeurs les plus élevées (mm)

\bar{x} : Moyenne des dix valeurs les plus faibles (mm)

Tableau III.9 : Classification de la sécheresse selon les valeurs du RAI

Classification du RAI	Valeur
Extrêmement humide	> 0,3
Modérément humide	0,3 à -0,3
Près de normal	-0,3 à -1,2
Sécheresse modérée	-1,2 à -2,1
Sécheresse sévère	-2,1 à -3
Sécheresse extrême	< -3

Les résultats du coefficient de corrélation de Pearson entre les indices de sécheresse SPI, IFM et RAI pour les 14 stations du bassin versant étudié révèlent des valeurs significatives, variant entre un minimum de $r = 0,6$ et un maximum de $r = 1$. Une forte corrélation, avec $r \geq 0,99$, est observée entre les indices SPI et RAI pour toutes les stations, suggérant une cohérence remarquable entre ces deux indices dans l'évaluation des conditions de sécheresse. En revanche, les corrélations entre SPI et IFM, ainsi qu'entre IFM et RAI, montrent des niveaux de corrélation légèrement inférieurs, soulignant une cohérence moindre entre ces paires d'indices.

Tableau III.10 : Corrélation entre différents indices de sécheresse

61802			
	SPI	IFM	RAI
SPI	1		
IFM	0,73776	1	
RAI	0,99975	0,73894	1
61803			
	SPI	IFM	RAI
SPI	1		
IFM	0,75549	1	
RAI	1	0,75549	1
61805			
	SPI	IFM	RAI
SPI	1		
IFM	0,70343	1	
RAI	0,99698	0,70355	1

61806			
	SPI	IFM	RAI
SPI	1		
IFM	0,65697	1	
RAI	0,99552	0,65644	1
70303			
	SPI	IFM	RAI
SPI	1		
IFM	0,93398	1	
RAI	0,99884	0,99884	1
70305			
	SPI	IFM	RAI
SPI	1		
IFM	0,59671	1	
RAI	0,99875	0,59178	1
70308			
	SPI	IFM	RAI
SPI	1		
IFM	0,77602	1	
RAI	0,9996	0,78374	1
70309			
	SPI	IFM	RAI
SPI	1		
IFM	0,89753	1	
RAI	0,99574	0,90485	1
70316			
	SPI	IFM	RAI
SPI	1		
IFM	0,8124	1	
RAI	0,9968	0,81896	1

70410			
	SPI	IFM	RAI
SPI	1		
IFM	0,81763	1	
RAI	0,99853	0,81024	1
70604			
	SPI	IFM	RAI
SPI	1		
IFM	0,72949	1	
RAI	0,99765	0,73882	1
70704			
	SPI	IFM	RAI
SPI	1		
IFM	0,77037	1	
RAI	0,99534	0,7715	1
70707			
	SPI	IFM	RAI
SPI	1		
IFM	0,89527	1	
RAI	0,99991	0,89526	1
70708			
	SPI	IFM	RAI
SPI	1		
IFM	0,91939	1	
RAI	0,99908	0,91654	1

Conclusion Générale

Conclusion Générale

La sécheresse se caractérise par un déficit prolongé et significatif en eau, ayant des répercussions sur la flore, la faune et les sociétés. Ce phénomène, qui a affecté les populations au cours des dernières décennies, est principalement influencé par les structures climatiques. La sécheresse se manifeste sur de longues périodes (généralement des décennies ou plus) et à grande échelle, et peut même être permanente dans certaines régions habituellement humides. Sa gravité varie en fonction de l'hétérogénéité spatiale des précipitations, ce qui signifie qu'elle peut fluctuer en réponse aux conditions géographiques et climatiques locales.

Dans les régions semi-arides de l'Algérie, les périodes de sécheresse se caractérisent par des niveaux de précipitations insuffisants et des débits très faibles dans les principaux cours d'eau des bassins versants. Pendant ces périodes, les ressources en eau de surface diminuent considérablement, ce qui rend parfois difficile la satisfaction des besoins en eau potable et agricole. Afin de mieux gérer ces situations, il est devenu essentiel de comprendre les facteurs climatiques et d'étudier la sécheresse à travers l'estimation d'indicateurs appropriés.

Ce travail vise à caractériser la sécheresse en appliquant divers indices à l'échelle annuelle dans un bassin versant endoréique comprenant 14 stations pluviométriques. Ces stations sont réparties entre le bassin versant des Hauts-Plateaux Constantinois et celui de Chott Melghir. L'objectif est de définir les paramètres de sécheresse et d'identifier les années comme normales, sèches ou humides.

L'étude des paramètres physiques révèle que le bassin versant étudié se caractérise par une forme allongée, avec un indice de compacité $K_c = 1,41$. Il s'étend sur une vaste superficie de 12826,13 km² et est soumis à un climat aride avec des hivers tempérés.

Les résultats montrent que l'altitude joue un rôle prédominant dans la répartition des précipitations, expliquant près de 80 % de leur variation observée, suivie par la latitude qui, bien que moins influente, explique 46,4 % de cette variation. En revanche, la longitude semble avoir un effet négligeable, voire inexistant, sur la répartition des précipitations dans la région étudiée.

Les résultats de l'influence des facteurs géographiques sur la concentration des précipitations révèlent une variation significative du PCI entre les stations du bassin versant, avec la plupart affichant une concentration modérée à saisonnière des précipitations. L'altitude ressort comme le principal facteur influençant la concentration des précipitations, expliquant environ 66 % de la variation du PCI, tandis que la latitude contribue également, mais de manière moins prononcée. En revanche, la longitude présente une corrélation pratiquement négligeable avec le PCI, indiquant un impact minimal sur la concentration des précipitations dans la région

étudiée.

La corrélation entre l'indice de saisonnalité (SI) et l'indice de concentration des précipitations (PCI) est forte, soulignant le lien étroit entre la distribution temporelle et annuelle des précipitations, avec l'altitude et la latitude ayant des influences modérées sur la saisonnalité des précipitations, contrairement à la longitude qui a un impact négligeable.

L'analyse de l'indice d'agressivité des précipitations (IFM) montre que la plupart des stations présentent une répartition uniforme des précipitations, tandis que quelques stations indiquent une agressivité modérément saisonnière, et révèle une forte corrélation entre l'IFM et l'altitude, une corrélation modérée avec la latitude, et une corrélation négligeable avec la longitude.

L'étude des tendances pluviométriques révèle une stabilité générale des précipitations dans la plupart des stations, avec des tendances à la hausse pour les stations 70305 et 70707, une tendance à la baisse pour la station 70308, et une rupture significative en 1995 pour la station 70707, associée à un excédent de précipitations de 39,93 %.

L'évaluation de la sécheresse météorologique de la zone d'étude montre que près de 70 % des années étudiées sont "Proches de la normale", indiquant une stabilité climatique, avec des périodes humides et sèches représentant respectivement environ 16 % et 14 % des années. L'analyse du SPI met en évidence des années spécifiques marquées par des conditions extrêmement humides (1972), très humides (1990), modérément humides (1972 et 1992), proches de la normale (1980), très sèches (1983) et modérément sèches (1987), indiquant une stabilité relative avec quelques années de variations climatiques notables.

Les résultats par décennie de l'indice SPI montrent une stabilité climatique globale avec une prédominance des conditions proches de la normale, bien que la décennie 1982-1991 se distingue par une humidité relativement élevée, tandis que les décennies 1972-1981 et 1992-2001 montrent une légère tendance vers des conditions plus sèches.

Les résultats soulignent que l'indice SPI et RAI sont fiables pour l'évaluation de la sécheresse, avec une forte corrélation remarquablement cohérente entre ces deux indices pour toutes les stations du bassin versant étudié, tandis que les corrélations entre SPI et IFM, ainsi qu'entre IFM et RAI, montrent des niveaux de cohérence relativement moindres.

La caractérisation de la sécheresse est cruciale pour la gestion de cette problématique. L'emploi des indices de sécheresse constitue une approche pratique pour transformer des volumes importants de données en informations quantitatives exploitables, utilisées notamment dans la prévision, la déclaration des niveaux, la planification des mesures d'urgence et l'évaluation des impacts de la sécheresse.

Pour améliorer la surveillance et la prévision des sécheresses, nous recommandons les actions suivantes :

- Améliorer l'accessibilité aux données météorologiques ;
- Restaurer et étendre le réseau des stations climatologiques pour assurer une couverture spatiale adéquate des observations météorologiques à travers le pays ;
- Installer des systèmes de suivi et de prévention des risques de sécheresse afin d'atténuer leurs impacts négatifs sur les secteurs socioéconomiques, notamment la production pastorale et agricole ;
- Développer des méthodologies améliorées intégrant les technologies de télédétection et de radar au sol pour surveiller et gérer les sécheresses ;
- Utiliser les techniques des systèmes d'information géographique (SIG) pour obtenir des représentations spatiales améliorées des sécheresses ;
- Renforcer les capacités des climatologues et des utilisateurs concernés ;
- Diffuser des bulletins climatologiques mensuels et saisonniers, ainsi que des messages d'alerte précoce sur l'évolution des phénomènes climatiques extrêmes et leurs effets associés, à l'échelle régionale.

Références bibliographiques

Achour, K., Meddi, M., Zeroual, A. et al. (2020). Spatio-temporal analysis and forecasting of drought in the plains of northwestern Algeria using the standardized precipitation index. *J Earth SystSci* 129, 42.

Adjim, H., Djedid, A., et Chettih, M. (2012). Variabilité climatique et sécheresse : cas du bassin versant de la Tafna. *Proceedings Regards croisés Nord / Sud Actes du 1^{er} colloque « Eau et climat au Maghreb »* Revue Eau et Climat au Maghreb N° 1.

Aissam, G. (2017). Étude hydrologique et hydrochimique du bassin versant du barrage de babar sur oued el arab région est de l'Algérie. Thèse de Magister (2009), Université de Batna 2.

Bendjema, L., Baba-Hamed, K., et Bouanani, A. (2019). Characterization of the climatic drought indices application to the Mellah catchment, North-East of Algeria. *Journal of Water and Land Development*; 2019; No 43; 28-40.

Berhail, S. The impact of climate change on groundwater resources in northwestern Algeria. *Arab J Geosci* 12, 770 (2019).

Cai, X., Shafiee-Jood, M., Apurv, T., Ge, Y., Kokoszka, S. 2017 : Key issues in drought preparedness: reflections on experiences and strategies in the United States and selected countries. *Water Secur.*

Chakali, A. N. (2021). La Géoprospective territoriale et son application sur le développement en zone de montagne Oued El Arabe (Doctoral dissertation, Université de Batna 2.

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

Djebouai, S. (2016). Méthodes de l'intelligence artificielle pour la prévision des sécheresses. Thèse du doctorat. FGC.USTHB. Alger. N : 53/2016-C/GC.

Djebbouai, S., Souag-Gamane, D. (2016). Drought Forecasting Using Neural Networks, Wavelet Neural Networks, and Stochastic Models: Case of the Algerois Basin in North Algeria. *Water Resour Manage* 30, 2445–2464.

Dupigny-Giroux, L.A. 2001 : Towards characterizing and planning for drought in Vermont : Part I. A climatological perspective. *Journal of the American Water Resources Association*. ;37(3):505-525.

FAO (2018) : Drought Characteristics and Management in North Africa and the Near East. FAO Water Report 45. FAO, Water for Food, Daugherty Global Institute, University of Nebraska. Near East & North Africa.

Fleig, A. K., Tallaksen, L. M. Hisdal, H. and Demuth S. 2006 : A global evaluation of stream flow drought characteristics, *Hydrol. Earth Syst.Sci.*,10(4), 535–552, doi :10.5194/ 10–535-2006.

Ghenim, A., Megnounif, A., Seddini, A., Terfous, A. (2010). Fluctuations hydro-pluviométriques du bassin versant de l'Oued Tafna à Béni Bahdel (Nord-Ouest Algérien). *Sécheresse*, 21 :115-120.

Ghenim, A.N, et Megnounif, A. (2011). Caractérisation de la sécheresse par les indices SPI et SSFI (Nord-Ouest de l'Algérie). *Revue scientifique et Technique. LJEE N°18* : 59-77.

Ghenim, A.N, et Megnounif, A. (2013). Spatial and temporal assessment of drought in Northern Algeria. Seventeenth International Water Technology Conference, IWTC17 Istanbul, 5-7 November 2013.

Habibi, B., Meddi, M., Torfs, P.J.J.F., Remaoun, M., et Van Lanen, H.A.J. (2018). Characteristics and prediction of meteorological drought using stochastic models in the semi-arid Chéllif- Zahrez basin (Algeria). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 16, 15-31.

Hallouz, F., Meddi, M., Mahé, G. et al. (2020). Analysis of meteorological drought sequences at various timescales in semi-arid climate : case of the Cheliff watershed (Northwest of Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*. 13, 280.

Hamlaoui, L., Mesbah, M., Souag, D. et Medjerab, A. (2013). Detecting hydro-climatic change using spatiotemporal analysis of rainfall time series in Western Algeria. *Natural Hazards* 65, 1293–1311.

Hamlaoui, L., Mesbah, M., Souag, D. et Medjerab, A. (2013). Detecting hydro-climatic change using spatiotemporal analysis of rainfall time series in Western Algeria. *Natural Hazards* 65, 1293–1311.

Hansel, S., Schucknecht, A., & Matschullat, J. (2016). The Modified Rainfall Anomaly Index (mRAI)—is this an alternative to the Standardised Precipitation Index (SPI) in evaluating future extreme precipitation characteristics. *Theoretical and applied climatology*, 123, 827-844.

Hong Y., Zhang H., Huang L., Li D., Song F. 2016 : Overexpression of a stress-responsive NAC transcription factor gene ONAC022 improves drought and salt tolerance in rice. *Front. Plant Sci.* 7:4 10.3389/fpls.2016.00004.

Kang, H. M., & Yusof, F. (2012). Homogeneity tests on daily rainfall series. *Int. J. Contemp. Math. Sciences*, 7(1), 9-22.

Karim, D. F., Rubasi, D. K. A. H., & Saleh, D. A. A. (2016). The road pavement condition index (PCI) evaluation and maintenance : a case study of Yemen. *Organization, technology & management in construction : an international journal*, 8(1), 1446-1455.

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 (Doctorat), Université d'Oran, Algérie.

Khezazna, A., Amarchi, H., Derdous, O., & Bousakhria, F. (2017). Drought monitoring in the Seybouse basin (Algeria) over the last decades. *Journal of Water and Land Development*, 33(1), 79–88.

Khouldia, W., Djebbar, Y, Hammar, Y (2014). Characterization of Climate Variability : Case of Watershed Medjerda (North East of Algeria). *Rev. Sci. Technol., Synthèse* 29 : 6-23.

Koussa, M., & Bouziane, M. T. (2019). Estimation des paramètres de l'érosion hydrique par Approche SIG/USLE: cas du bassin versant de l'Oued Arab (région de Khenchela, Nord-Est de l'Algérie). *Agriculture and Forestry Journal*, 3(1), 36-45.

Lazri, M., Ameer, S., Brucker, J. M., Lahdir, M. & Sehad, M. (2015). Analysis of drought areas in northern Algeria using Markov chains. *Journal of Earth System Sciences* 124 (1), 61–70.

Le Houerou, N (1995), Climate change drought and desertification intergovernmental panel on climate change (IPCC) Working group II adaptation et mitigation, 53p.

Matari, A. et Douguedroit, A. (1995). Chronologie des précipitations et des sécheresses dans l'ouest Algérien. Les stratégies pour le contrôle des sécheresses. 9^e conférence régionale afro-asiatique des irrigations et du drainage, 5-6 juin 1995, Alger, Algérie, Compte rendu, pp. 166-278.

McKee, T. B., Doesken, N. J. & Kliest, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, pp. 179–184.

Meddi, H., & Meddi, M. (2004). Sécheresse et spatialisation des précipitations dans le nord-ouest de l'Algérie. *International Symposium (Terre et Eau), Annaba, Algeria, Novembre 21-23.*

Meddi, H., & Meddi, M. (2009). Etude de la persistance de la sécheresse au niveau de sept plaines algériennes par utilisation des chaînes de Markov (1930-2003). *Courrier du Savoir – N° 09* : 39 - 48.

Meddi, Hind, and Mohamed Meddi (2007). Variabilité Spatiale et Temporelle Des Précipitations du Nord-Ouest De L'Algérie. *Geographia Technica* 2 : 49-55.

Meddi, M., & Humbert, J. (2000). Etude des potentialités de l'écoulement fluvial dans le Nord de l'Algérie en vue d'une réalimentation des aquifères. 'Eaux sauvages, eaux domestiques. Hommage à Lucette DAVY. Publications de l'Université de Provence- France.

Meddi, M., & Rahmouni, A.W. (2014). Rainfall regime evolution and drought forecasting in eastern Algeria. Proceeding of Friend-Water 2014. Montpellier. France.

Meddi, M., Assani, A. A. & Meddi, H. (2010). Temporal variability of annual rainfall in the Macta and Tafna catchments, Northwestern Algeria. *Water Resources Management* 24, 3817–3833.

Mega, N., & Medjerab, A. (2016). WITHDRAWN : Study of Climatic Drought in Algerian High Plateaus using Standardized Precipitation Index and Observations from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*.

Meklati, A. (2009). La mise en place d'un plan d'intervention en cas de sécheresse pour la wilaya d'Alger. Mémoire de Magister, Université M'Hamed Bouguera- Boumerdes (UMBB). Algérie. Faculté des sciences de l'Ingénieur, Département génie de l'environnement LRTA.

Merabti, A., Martins, D.S., Meddi, M. et al. (2017). Spatial and Time Variability of Drought Based on SPI and RDI with Various Time Scales. *Water Resources Management*. 32, 1087–1100.

Mishra, A.K, Singh, V.P, Desai VR. 2009 : Drought characterization: a probabilistic approach. *Stoch Environ Res Risk Assess*. Springer-Verlag ;23 :41–55.

Mishra, A.K, Singh, V.P. 2010 : A review of drought concepts," *Journal of Hydrology*, vol. 391, no. 1-2, pp. 202–216.

Mo, K.C. and Lettenmaier, D.P. 2016 : Precipitation deficit flash droughts over the United States. *Journal of Hydrometeorology*, vol. 17, no. 4, pp. 1169–1184.

Mukherjee, S., Mishra, A. & Trenberth, K.E. 2018 : Climate Change and Drought: a Perspective on Drought Indices. *Curr Clim Change Rep* 4, 145–163. <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0098-x>.

Nekkache, A., & Megnounif, A. (2013). Analyse des précipitations dans le Nord-Ouest algérien.

Nezzal, F., & Iftini-Belaid, Z, (2013). Variabilité climatique et impacts anthropiques sur la nappe alluviale de la Mitidja Orientale (Baie d'Alger). *Revue Scientifique et Technique. LJEE* N°21 et 22. Spécial Colloque CIREDD'2013.

OMM, 2018 : Les systèmes d'alerte précoce multidangers – liste de contrôle.

Saadi, H. & Medjerab, A. (2010). Etude et suivi de la sécheresse climatique dans le Nord- Ouest de l'Algérie (Doctoral dissertation).

Saadi, Z., Shahid, S., Ismail, T., Chung, E. S., & Wang, X. J. (2019). Trends analysis of rainfall and rainfall extremes in Sarawak, Malaysia using modified Mann–Kendall test. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 131, 263-277.

Safar-Zitoun M, 2019 : Plan National Secheresse Algerie Lignes Directrices En Vue De Son Operationnalisation, Consultant CNULCD.

Samaniego, L., S. Thober, R. Kumar, N. Wanders, O. Rakovec, M. Pan, M. Zink, J. Sheffield, E.F. Wood and A. Marx. 2018 : Anthropogenic warming exacerbates European soil moisture droughts. *Nature Climate Change*, vol. 8, no. 5, pp. 421–426.

Seltzer, P. (1946). Le climat de l'Algérie, Alger, Institut de Météorologie et de Physique du Globe, Carbonnel, 219 p.

Stahle, D.W. 2020 : Anthropogenic megadrought. *Science*, vol. 368, no. 6488, pp. 238–23.

SZCZYPTA, C. (2012). Hydrologie Spatiale pour le Suivi des Sécheresses du Bassin Méditerranéen. Institut National Polytechnique de Toulouse, France.

Tahar, H & Regad, N. (2015). Variabilité Climatique et Ressources en eau en milieu Semi-aride : Cas des bassins versants des oueds Chemora, Reboa et Gueiss (Hauts Plateaux Constantinois, Algérie). *Analale Universitatii Bucuresti. Seria Geografie*.

Taibi, S. et Souag, D. (2011). Regionalization of drought in Northern Algeria using a standardized precipitation index (1936–2010). *Proceedings of the IV International Workshop on Hydrological Extremes from Prediction to Prevention of Hydrological Risk in Mediterranean Countries*. University of Calabria, Soil Protection Department, Cosenza, Italy.

Taithe, B.O, (2009). Humanitarianism and Colonialism: Religious Responses to the Algerian drought and famine of 1866-1870, in ICM & CP (Eds), *Natural Hazards: Responses and Strategies in Global Perspective*. Lexington Books, Lanham, MD, pp. 137-164.

Tate, E. & Gustard, A. 2000 : Drought Definition: A Hydrological Perspective. 10.1007/978-94-015-9472-13.

Velasco, I., & Costes, G. (2009). Modified Fournier and rainfall concentration indices, as estimators of soil erosion factors, Sinaloa, Mexico ; Indices de Fournier modificado y de concentracion de la precipitacion, como estimadores del factor de riesgo de la erosion, en Sinaloa, Mexico.

Verrecchia R, E, Lanen W, Abarbanell J, (1995), Analysts' forecasts as proxies for investor beliefs in empirical research, *Journal of Accounting and Economics*, Volume 20, Issue 1, July 1995, Pages 31-60.

Wang, L. and Yuan, X. 2018 : Two types of flash drought and their connections with seasonal drought. *Advances in Atmospheric Sciences*, vol. 35, no. 12, pp. 1478–1490.

Watson, R.T., Zinyoera, M.C., and Moss, R.H. *Climate Change 1995 : Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change : Scientific-Technical Analysis*. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge : Cambridge University Press.

Wilhite D. Chapter 1. 2000 : Drought as a natural hazard: concepts and definitions. Drought Mitigation Center Faculty.

Wilhite, D & Glantz, M. 1985 : Understanding: the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. Water International.

Wilhite, D.A. & Buchanan-Smith, M. (2005). Drought as Hazard : Understanding the Natural and Social Context. In: Wilhite, D.A. (ed) Drought and Water Crises: Sciences, technology, and management issues. CRC Press, Boca Raton, FL, pp : 3 - 29.

Williams, A.P., Cook, E.R. Smerdon, J.E. Cook, B.I. Abatzoglou, J.T. Bolles, K. Baek, S.H. Badger, A.M. Livneh, B. 2020 : Large contribution from anthropogenic warming to an emerging North American megadrought.

WMO Report (2006). Drought Monitoring and Early Warning : Concepts, Progress and Future Challenges. WMO Report N°.1006, World Meteorological Organization.

WMO, 2011 : Proceedings of an Expert Meeting 2–4 June, 2010, Murcia, Spain.

Xia, Y., M. Ek, C. Peters-Lidard, D. Mocko, M. Svoboda, J. Sheffield, and E. Wood, (2014), Application of USDM statistics in NLDAS-2 : Optimal blended NLDAS drought index over the continental United States. J. Geophys. Res. Atmos., 119, 2947–2965.

Yihdego, Y. 2016 : Drought and groundwater quality in coastal area.”In Handbook of drought and water scarcity (HDWS) : Vol. 2: Environmental impacts and analysis of drought and water scarcity, edited by S. Eslamian and F. A. Eslamian. Boca Raton, FL : Francis & Taylor.

Zerouali, B. (2019). Evaluation et gestion de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau de la Wilaya de Tizi Ouzou (Doctoral dissertation, Université de Laghouat-Amar Telidji).