

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Badji Mokhtar Annaba University
Université Badji Mokhtar – Annaba
Faculté de Technologie



جامعة باجي مختار – عنابة

كلية التكنولوجيا

Département d'Hydraulique

قسم الري

Thèse

Présentée pour obtenir le diplôme de

Doctorat Troisième Cycle

Filière : Hydraulique

Spécialité : Hydraulique Urbaine

Par :

AMARCHI Amina

Thème :

**Tendance des précipitations et évolution des écoulements
dans le cadre du changement climatique dans le Nord Est
algérien.**

Thèse soutenue le date de soutenance devant le jury composé de :

N°	Nom et prénom	Grade	Etablissement	Qualité
01	HEDDAM Salim	Prof.	Université 20 Août 1955 - Skikda	Président
02	ZEGHADNIA Lotfi	Prof.	Université Mohamed Chérif Messaadia – Souk Ahras	Rapporteur
03	LAOUACHERIA Fares	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Co-rapporteur
04	KECHIDA Said	M.C.A	Université Badji Mokhtar -Annaba	Examineur
05	CHEBBAH Lynda	M.C.A	Université Abdelhafid Boussouf - Mila	Examineur

Remerciement

Au terme de ce travail de recherche, je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à sa réalisation et à l'aboutissement de ce parcours doctoral.

Je rends avant tout grâce à **Dieu, le Tout-Puissant**, pour m'avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour surmonter les difficultés rencontrées et mener à bien cette thèse.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à **Monsieur Lotfi ZEGHADNIA, Professeur à l'Université de Souk Ahras**, qui m'a fait l'honneur d'accepter d'assurer la direction de ce travail. Son encadrement scientifique rigoureux, ses conseils judicieux, ainsi que sa disponibilité et sa bienveillance tout au long de ce parcours, ont été pour moi une source d'enrichissement scientifique et personnel.

Je remercie **Monsieur Fares LAOUACHERIA, co-directeur de cette thèse**, pour son soutien et ses précieux conseils tout au long de cette thèse

Mes remerciements les plus respectueux vont à **Pr HEDAME Salim, Dr KECHIDA Said et Dr CHEBAH Lynda**, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de faire partie du jury d'évaluation de cette thèse. Leurs observations pertinentes et leurs suggestions constructives ont permis d'enrichir et d'améliorer le contenu scientifique de ce manuscrit.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance la plus profonde à **ma famille**, en particulier à **mes parents**, pour leurs sacrifices, leur soutien indéfectible et leurs encouragements constants, ainsi qu'à **mon mari**, pour sa compréhension, sa patience et sa présence bienveillante tout au long de cette aventure académique.

Je remercie également mes deux fillettes **Aline et Israa**, source quotidienne de joie et de motivation, qui ont illuminé mon parcours malgré les défis.

À toutes celles et ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réalisation de ce travail, je souhaite exprimer ma gratitude et mon profond respect.

الجفاف هو تحدٍ بيئي كبير يؤثر على توفر المياه والزراعة والاستقرار الاجتماعي والاقتصادي في شمال شرق الجزائر. وكظاهرة بيئية منتشرة، فإن له أيضًا تأثيرات سلبية كبيرة على الإنتاجية الزراعية واستقرار النظم البيئية. ولذلك، فإن التقييم الشامل للجفاف أمر ضروري لإدارة فعالة للموارد المائية وتنفيذ استراتيجيات مراقبة ملائمة.

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم أداء عدة طرق لتقدير مؤشرات الجفاف عبر ثلاثة قطاعات مناخية مختلفة — الشمال (معتدل)، الوسط (شبه قاري) والجنوب (قاري) — تم تحديدها باستخدام تجمع K-Means لبيانات الطقس والموارد المائية التي تغطي الفترة من 1975 إلى 2021. تم استخدام بيانات شهرية من الأمطار ودرجات الحرارة التي تم جمعها من 10 محطات أرساد جوية، بالإضافة إلى بيانات تدفق الأنهار من أربع محطات هيدرولوجية، لحساب ثلاثة مؤشرات جفاف رئيسية: مؤشر الأمطار المعياري (SPI)، مؤشر التعرف على الجفاف (RDI)، ومؤشر جفاف التدفق (SDI). تم حساب هذه المؤشرات باستخدام برنامج DrinC وبرنامج Python وطرق تجريبية على مقاييس زمنية مختلفة (1، 3، 6، و12 شهرًا).

إلى جانب التحليلات التقليدية، تتبنى هذه الدراسة منهجًا هجينًا مبتكرًا يجمع بين طريقتي FITA (تحليل الاتجاهات المبتكرة للترددات والإحصائيات) و ITA (تحليل الاتجاهات المبتكرة). يتيح هذا المنهج تخطي حدود التحليلات الزمنية والمكانية التقليدية من خلال دمج دراسة الاتجاهات التطورية، بما في ذلك التغيرات في التردد وشدة حالات الجفاف.

تكشف النتائج عن أنماط مناخية متجانسة نسبيًا من حيث الأمطار ودرجات الحرارة، ولكن مع تفاوت ملحوظ في تدفقات المياه. يعرض الشمال ظروفًا قريبة من الوضع الطبيعي (متوسط SPI = 0,00023، متوسط RDI = 0,003)، بينما يُظهر الوسط جفافًا مستمرًا (متوسط SPI = 0,0007)، (متوسط RDI = 0,0008)، في حين أن الجنوب يواجه جفافًا شديدًا (متوسط SPI = -0,0004)، (متوسط RDI = -0,0007) أظهرت الاختبارات غير المعلمية Mann-Kruskal-Wallis، Kendall المعدل و Theil-Sen وجود اتجاهات جفاف كبيرة، خاصة في أم البواقي ($Z = -8,620$ ، $p > 0,0001$) وخنشلة ($Z = -6,357$ ، $p > 0,0001$).

أظهر تحليل مؤشر جفاف التدفق (SDI) استقرارًا عامًا في التدفقات، رغم أنه تم تحديد مخاطر جفاف قصيرة الأجل في محطتي مجاز عمار وسد زرداظة. ومع ذلك، سمح منهج FITA-ITA بملاحظة تطورات أكثر دقة: على سبيل المثال، يظهر محطة القالة اتجاهًا صاعدًا لـ SPI12 بنسبة 100٪ (منحدر ITA = 1,160)، بينما تظهر خنشلة اتجاهًا نازلًا لـ SPI12 بنسبة 100٪ (منحدر ITA = -0,846) في مجاز عمار، على الرغم من انخفاض RDI12 بشكل ملحوظ بنسبة 82,61٪ (منحدر ITA = -1,294)، فإن SDI12 يزيد بنسبة 100٪ (منحدر ITA = 0,797)، مما يعكس تحسنًا في التدفقات رغم الجفاف الزراعي المستمر.

تشير هذه الديناميكيات المعقدة إلى زيادة المخاطر على المياه الجوفية، والتصحر، وكذلك على النظم البيئية المائية. إنها تسلط الضوء على ضرورة تنفيذ تدابير تكيفية مستهدفة، تعتمد على مراقبة شاملة ومستمرة للجفاف، تأخذ في الاعتبار الأبعاد الهيدرولوجية والمناخية والزراعية عبر مقاييس زمنية مختلفة.

La sécheresse est un défi environnemental majeur affectant la disponibilité de l'eau, l'agriculture et la stabilité socioéconomique dans le nord-est de l'Algérie. En tant que phénomène environnemental répandu, elle exerce également des effets négatifs importants sur la productivité agricole et la stabilité des écosystèmes. Une évaluation approfondie de la sécheresse est ainsi essentielle pour une gestion efficace des ressources en eau et la mise en place de stratégies de surveillance adaptées.

Cette étude vise à évaluer la performance de plusieurs méthodes d'estimation des indices de sécheresse à travers trois secteurs climatiques distincts — Nord (méditerranéen), Centre (semi-aride) et Sud (aride) — délimités à l'aide d'un regroupement K-Means des données météorologiques et hydrologiques couvrant la période de 1975 à 2021. Des données mensuelles des précipitations et des températures, collectées depuis 10 stations météorologiques, ainsi que des données de débits de cours d'eau provenant de quatre stations hydrologiques, ont été utilisées pour calculer trois indices de sécheresse majeurs : l'Indice de Précipitations Standardisé (SPI), l'Indice de Reconnaissance de la Sécheresse (RDI) et l'Indice de Sécheresse des Débits (SDI). Ces indices ont été calculés à l'aide du logiciel DrinC, de la programmation Python et de méthodes empiriques à différentes échelles temporelles (1, 3, 6 et 12 mois).

Parallèlement aux analyses classiques, cette recherche adopte une approche hybride innovante combinant les méthodes FITA (Frequency Innovative Trends and Statistics Analysis) et ITA (Innovative Trend Analysis). Cette approche permet de dépasser les limites des analyses temporelles et spatiales traditionnelles en intégrant l'étude des tendances évolutives, incluant les variations de fréquence et d'intensité des épisodes de sécheresse.

Les résultats révèlent des schémas climatiques relativement homogènes en termes de précipitations et de températures, mais une hétérogénéité notable dans les débits. Le Nord présente des conditions proches de la normale (SPI-moy = 0,00023, RDI-moy = 0,003), le Centre montre un assèchement en cours (SPI-moy = 0,0007, RDI-moy = 0,0008), tandis que le Sud est confronté à une aridification sévère (SPI-moy = -0,0004, RDI-moy = -0,0007). Des tests non paramétriques (Kruskal-Wallis, Mann-Kendall modifié, Theil-Sen) ont mis en évidence des tendances significatives de dessèchement, notamment à Oum El Bouaghi ($Z = -8,620$, $p < 0,0001$) et Khenchela ($Z = -6,357$, $p < 0,0001$).

L'analyse de l'Indice de Sécheresse des Débits (SDI) a montré un débit globalement stable, bien que des risques de sécheresse à court terme aient été identifiés à Medjaz Amar et au barrage de Zerdaza. Toutefois, l'approche FITA-ITA a permis d'observer des évolutions plus fines : par exemple, El Kalla présente une tendance SPI12 à la hausse à 100 % (pente ITA = 1,160), tandis que Khenchela affiche une tendance SPI12 à la baisse à 100 % (pente ITA = -0,846). À Medjaz Amar, bien que le RDI12 connaisse une baisse marquée de 82,61 % (pente ITA = -1,294), le SDI12 augmente à 100 % (pente ITA = 0,797), reflétant une amélioration des débits malgré une sécheresse agricole persistante.

Ces dynamiques complexes signalent des risques accrus pour les nappes phréatiques, la désertification, ainsi que pour les écosystèmes aquatiques. Elles soulignent l'urgence de mettre en œuvre des mesures d'adaptation ciblées, reposant sur une surveillance intégrée et continue de la sécheresse, prenant en compte à la fois les dimensions hydrologiques, météorologiques et agricoles à différentes échelles temporelles.

Drought is a major environmental challenge affecting water availability, agriculture, and socio-economic stability in northeastern Algeria. As a widespread environmental phenomenon, it also has significant negative impacts on agricultural productivity and ecosystem stability. Therefore, a comprehensive assessment of drought is essential for effective water resource management and the implementation of appropriate monitoring strategies.

This study aims to evaluate the performance of several drought index estimation methods across three distinct climatic regions — North (Mediterranean), Center (semi-arid), and South (arid) — delineated using K-Means clustering of meteorological and hydrological data covering the period from 1975 to 2021. Monthly precipitation and temperature data collected from 10 meteorological stations, along with streamflow data from four hydrological stations, were used to calculate three major drought indices: the Standardized Precipitation Index (SPI), the Reconnaissance Drought Index (RDI), and the Streamflow Drought Index (SDI). These indices were calculated using DrinC software, Python programming, and empirical methods at multiple time scales (1, 3, 6, and 12 months).

In parallel with conventional analyses, this research adopts an innovative hybrid approach combining the Frequency Innovative Trends and Statistics Analysis (FITA) and the Innovative Trend Analysis (ITA) methods. This approach allows researchers to go beyond the limitations of traditional temporal and spatial analyses by incorporating the study of evolving trends, including variations in the frequency and intensity of drought events.

The results reveal relatively homogeneous climatic patterns in terms of precipitation and temperature, but a notable heterogeneity in streamflow. The North displays near-normal conditions (SPI mean = 0.00023, RDI mean = 0.003), the Center shows signs of ongoing drying (SPI mean = 0.0007, RDI mean = 0.0008), while the South faces severe aridification (SPI mean = -0.0004, RDI mean = -0.0007). Non-parametric tests (Kruskal-Wallis, modified Mann-Kendall, Theil-Sen) highlighted significant drying trends, particularly in Oum El Bouaghi ($Z = -8.620$, $p < 0.0001$) and Khenchela ($Z = -6.357$, $p < 0.0001$).

The analysis of the Streamflow Drought Index (SDI) indicated generally stable streamflow, although short-term drought risks were identified at Medjaz Amar and the Zerdaza dam. However, the FITA-ITA approach revealed more nuanced changes: for example, El Kalla showed a 100% increasing SPI12 trend (ITA slope = 1.160), while Khenchela exhibited a 100% decreasing SPI12 trend (ITA slope = -0.846). At Medjaz Amar, although the RDI12 significantly decreased by 82.61% (ITA slope = -1.294), the SDI12 increased by 100% (ITA slope = 0.797), indicating improvements in streamflow despite ongoing agricultural drought.

These complex dynamics signal heightened risks for groundwater resources, desertification, and aquatic ecosystems. They underscore the urgent need for targeted adaptation measures based on integrated and continuous drought monitoring, accounting for hydrological, meteorological, and agricultural dimensions across different temporal scales.

Table des matières

Remerciement	
ملخص	
Résumé	
Abstract	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
INTRODUCTION GENERALE	2
Chapitre I : Présentations générales et concepts en hydrologie : sécheresses	
Introduction.....	7
I.1. La problématique des ressources en eau.....	7
I.1.1. L'eau est une ressource aux multiples facettes :	7
I.1.2. Menaçante	8
I.2. L'hydrologie	9
I.2.1. Définition	9
I.2.3. Objectifs de l'hydrologie de surface	10
I.2.4. Les principaux concepts de l'hydrologie.....	11
I.2.4.1. Le cycle de l'eau	11
I.2.4.2. Les processus hydrologiques.....	11
I.2.4.3. Les ressources en eau	12
I.2.4.4. La gestion des ressources en eau.....	12
I.2.4.5. L'hydrologie isotopique.....	12
I.2.5. Concept de système hydrologique	12
I.2.6. Bilan Hydrologique.....	13
I.2.6.1. Le bilan hydrique.....	14
I.2.6.2. Le bilan hydrologique	15
I.2.7. Impact du cycle saisonnier sur la répartition de l'eau	16
I.3. La sécheresse	16
I.3.1. Définition	17
I.3.2. Le mécanisme naturel de déclenchement d'une sécheresse.....	17

I.3.3. Différents types de sécheresses	17
I.3.4. Les causes de la Sécheresse	17
I.3.5. Les risques de sécheresse dans un contexte de changement climatique	18
I.4. Changement climatique et sécheresse	19
I.4.1. Les changements climatiques rendent les sécheresses plus fréquentes et plus graves	20
I.5. Impacts intégrés des sécheresses	20
I.5.1. Impacts environnementaux	20
I.5.2. Impacts socio-économiques	21
I.5.3. Impacts sanitaires et humains	21
I.5.4. Approche intégrée	21
Conclusion	21

Chapitre II : Aperçu général de l'aire d'étude

Introduction	23
II.1. Description géographique de l'aire d'étude	23
II.2. Topographie :	24
II.3. Occupation du sol	24
II.4. Géologie	25
II.5. Climat	27
II.6. Situation hydrologique	27
II.7. La Base de données	30
II.7.1. Précipitation	31
II.7.1.1. Précipitations annuelles	31
II.7.1.2. Précipitations moyennes mensuelles	33
II.7.1.3. Précipitation saisonnière	35
II.7.2. Température	37
II.7.2.1. Températures annuelles	37
II.7.2.2. Températures moyennes mensuelles	38
II.7.2.3. Températures saisonnières	41
II.7.3. Débit	41
II.7.3.1. Débits annuels	42
II.7.3.2. Débits mensuels	43
Conclusion	44

Chapitre III : Analyses Statistiques

III.1. Analyse d'homogénéité	46
------------------------------------	----

III.2. Test de normalité.....	46
III.3. Test de Kolmogorov-Smirnov	47
III.3.1. Les différentes versions du test	47
III.3.1.1. Cas à un échantillon: adéquation à une loi de distribution fixée.....	47
III.3.1.2. Cas pour deux échantillons: similarité des lois de distribution	48
III.3.2. Conditions pour le rejet de H0	48
III.4. Test de Shapiro–Wilk.....	49
III.5. Test de Levene	52
III.6. Test U de Mann Whitney	54
III.6.1. Hypothèses du test U de Mann-Whitney.....	55
III.6.2. Processus étape par étape pour effectuer le test U de Mann-Whitney	55
III.6.3. Rapport des résultats du test U de Mann-Whitney.....	56
III.6.4. Interprétation des résultats du test U de Mann-Whitney	57
III.7. Test de Kruskal–Wallis	57
III.8. Analyse avancée : Non-homogène.....	61
III.8.1. Test Post-hoc de Dunn	61
III.9. Modélisation : logiciel SPSS.....	61
III.10. Résultats et discussion	62
III.10.1. Fiabilité des données	62
III.10.1.1. Précipitation	62
III.10.1.2. Température.....	63
III.10.1.3. Débits.....	64
III.10.2. Test non paramétrique	64
III.10.2.1. Précipitation	64
III.10.2.2. Température.....	65
III.10.2.3. Débit	66
III.10.3. Analyse avancée : segmentation et tests post-hoc.....	66
Conclusion	69

Chapitre IV : Analyse sectorielle des sécheresses

Introduction.....	71
IV.1. Aperçu des indices de sécheresse	71
IV.1.1. L'indice de précipitation normalisé (SPI).....	71
IV.1.2. Indice de Reconnaissance de la Sécheresse (RDI).....	73
IV.1.3. L'indice de sécheresse hydrologique SDI.....	74

IV.1.4. Regroupement des moyennes K (K-means) :	75
IV.3. Méthodes de détection des tendances	76
IV.3.1. Test de Mann-Kendall.....	76
IV.3.2. Test de Mann-Kendall Modifié (Wang, 2004).....	77
IV.3.3. L'ajustement de Yue et Wang (2004)	77
IV.3.4. Estimateur de Theil-Sen.....	78
IV.4. Matriél utilisé.....	78
IV.4.1. DrinC.....	78
IV.4.2. Le logiciel R.....	80
IV.5. Résultats et discussions.....	81
IV.5.1. Classification géographique et climatique des secteurs des stations météorologiques à l'aide du regroupement des moyennes K (K-means) et de l'analyse des tendances de sécheresse	81
IV.5.2. Validation statistique des tendances du SPI et du RDI.....	82
IV.5.2.1. <i>Distribution fréquentielle des résultats des indices SPI-RDI</i>	84
IV.5.2.2. <i>Interprétation de la carte arborescente (treemap) des tendances de sécheresse (SPI-RDI)</i>	88
IV.5.3. Les statistiques du SDI	91
IV.5.3.1 <i>Distribution fréquentielle des résultats des indices SDI</i>	91
IV.5.3.2. <i>Interprétation de la carte arborescente (treemap) des tendances de sécheresse SDI</i>	94
IV.5.4. Analyse spatiotemporelle des indices de sécheresse.....	95
IV.5.5. Analyse des tendances.....	96
Conclusion	101

Chapitre V : Tendances FITA et ITA

Introduction.....	103
V.1. Analyse de tendance.....	103
V.2. Analyse conceptuelle et visuelle	104
V.3. L'Analyse innovante des tendances (Innovative Trend Analysis (ITA)).....	105
V.4. L'analyse innovante des tendances et des statistiques de fréquence (The Frequency Innovative Trends and Statistics Analysis, FITA)	108
V.5. Résultats	110
V.5.1. La FITA et la variabilité temporelle des indices de sécheresse.....	110
V.5.2. Analyse d'homogénéité.....	112
V.5.3. Analyse fréquentielle et la pente d'ITA	114
V.6. Discussion	115
Conclusion	117

Chapitre VI : Le Modèle de ARIMA

Introduction.....	120
VI.1. Processus aléatoire stationnaires.....	120
VI.1.1. Processus ARMA (p, q) : Modèle autorégressif - Moyenne mobile.....	120
<i>VI.1.1.1. Principales caractéristiques d'un modèle ARMA(p,q)</i>	120
VI.2. Modèles linéaires non-stationnaires.....	122
VI.2.1. Modèle ARIMA (processus autorégressif moyenne mobile intégrer).....	122
VI.3. Test de stationnarité (tests de racine unitaire)	122
VI.3.1. Le test de Dickey-Fuller simple (DF)	123
VI.4. Méthode de Box-Jenkins	125
VI.4.1. L'identification.....	126
VI.4.2. L'Estimation.....	126
IV.4.3. Validation du processus ARMA	126
VI.5. Le code de calcul utilisé (Eviews 13).....	128
VI.6. Résultats et discussion	128
VI.6.1. Étude de la stationnarité.....	128
VI.6.2. Modélisation arma par la méthode de Box-Jenkins	129
Conclusion	144
CONCLUSION GENERALE.....	145
REFERENCES BIBLIOGRAPGIQUES.....	149
PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES	162

Liste des figures

Figure 1.1: Schémas des flux affectant le réservoir du bilan hydrique sur une tranche de sol	17
Figure 1.2 : Schématisation du cycle de l'eau	18
Figure 2.1. Carte géographique de la zone d'étude.....	27
Figure 2.2. Carte topographique de la zone d'étude	28
Figure 2.3. Carte d'occupation du sol de la zone d'étude.....	29
Figure 2.4. Carte géologique des types de sol de la zone d'étude	31
Figure 2.5. Diagramme pour la délimitation des bassins et implantation du réseau hydrographique	32
Figure 2.6. Carte des réseaux hydrographiques des bassins versants	33
Figure 2.7. Carte de la précipitation moyenne annuelle	36
Figure 2.8. Histogramme des précipitations moyennes mensuelles par station.....	38
Figure 2.9. Les pourcentages saisonniers des précipitations par station.....	40
Figure 2.10. Carte des températures moyennes annuelles	42
Figure 2.11. Répartitions mensuelles moyennes, minimales et maximales des températures par station	44
Figure 2.12. Histogramme des températures saisonnières.....	45
Figure 2.13. Les valeurs moyennes, minimales et maximales des débits par station	46
Figure 2.14. Courbes des débits moyens annuels par station.....	47
Figure 2.15. Courbes des débits moyens mensuels par station.....	48
Figure 3.1 : Résultats des tests post-hoc de Dunn pour l'écoulement fluvial de la station Medjez Amar.	71
Figure 3.2 : Résultats des tests post-hoc de Dunn pour l'écoulement fluvial de la station du barrage de Zerdaza.	71
Figure 3.3 : Résultats des tests post-hoc de Dunn pour l'écoulement fluvial de la station Bekkouch Lakhdar	72
Figure 3.4 : Résultats des tests post-hoc de Dunn pour l'écoulement fluvial de la station du barrage de Chefia.	72
Figure 4.1. Organigramme du logiciel DrinC	83
Figure 4.2. L'interface graphique utilisateur (GUI) du logiciel DrinC.	84

Figure 4.3. Classification des secteurs climatiques basée sur le regroupement K-Means.....	86
Figure 4.4. Distribution du SPI-moyen et du RDI-moyen à travers les zones climatiques (Nord, Centre et Sud)	87
Figure 4.5. Analyse du SPI et du RDI pour la partie nord du bassin versant de la Seybouse à travers la station d'Annaba.	88
Figure 4.6. Analyse du SPI et du RDI pour le barrage de Chefia et les stations d'El Kalla dans le bassin versant du Constantinois-Est.....	89
Figure 4.7. Analyse du SPI et du RDI pour les stations de Bekkouch Lakhdar et du barrage de Zerdaza dans le bassin versant du Constantinois Centre (Ouest).	90
Figure 4.8. Analyse du SPI et du RDI pour les stations de Souk Ahras et de Medjez Amar dans les bassins versants de la Medjerda–Mellague Nord et de la Seybouse Centrale.....	90
Figure 4.9. Analyse du SPI et du RDI pour les stations de Khenchela et d'Oum El Bouaghi dans le bassin versant des Hautes Plaines du Constantinois Nord.....	91
Figure 4.10. Analyse du SPI et du RDI pour le bassin versant de la Medjerda–Mellague (partie sud) à travers la station de Tébessa.....	92
Figure 4.11. Analyse multi-échelles du SPI et du RDI des tendances de sécheresse dans le nord de l'Algérie (bassin versant de la Seybouse et Constantinois-Est).....	93
Figure 4.12. SPI et RDI dans le Constantinois Centre (Ouest), la Medjerda–Mellague Nord et la Seybouse Centrale (Nord-Est de l'Algérie).	94
Figure 4.13. Schémas de sécheresse dans les bassins versants du Constantinois Sud et de la Medjerda–Mellague (région de Tébessa).	95
Figure 4.14. Analyse du SDI pour la station du barrage de Chefia dans le bassin versant du Constantinois-Est.....	96
Figure 4.15. Analyse du SDI pour le bassin versant de la Seybous (partie nord) à travers la station de Medjez Amar.....	97
Figure 4.16. Analyse du SDI pour les stations de Bekkouch Lakhdar et Zerdaza dans le bassin versant du Constantinois Centre (Ouest).	97
Figure 4.17. Analyse multi-échelles du SDI de la sévérité de la sécheresse en Algérie du Nord.....	98
Figure 4.18. Variation du SDI (échelle de 12 mois) dans les principales stations de la zone d'étude.	99
Figure 4.19 Variations temporelles du SPI (échelle de 12 mois) pour les stations de la zone d'étude.....	100
Figure 4.20. Tendances du RDI (échelle de 12 mois) à travers les bassins versants de la zone d'étude.	100
Figure 5.1. Modèle de l'Analyse Innovante des Tendances (ITA).....	110
Figure 5.2. Représentation en nuage de points des types de tendances selon l'Analyse Innovante des Tendances (ITA).....	111

Figure 5.3 Analyse de fréquence et analyse innovante des tendances (FITA et ITA) des indices SPI12, RDI12 et SDI12 pour 10 stations du nord-est de l'Algérie (1975–2021).....	114
Figure 5.4 Variabilité temporelle des précipitations, de la température et du débit fluvial dans les stations du nord-est de l'Algérie (1975–2021).....	115
Figure 5.5 : Homogénéité des débits : valeurs p de Kruskal-Wallis et post-hoc de Dunn.....	118
Figure 6.1 : Stratégie du test DF	129
Figure 6.2 : corrélogrammes pour les séries de SPI 12.....	136
Figure 6.3 : corrélogrammes pour les séries de RDI 12.....	138
Figure 6.4 : corrélogrammes pour les séries de SDI 12.....	139
Figure 6.5. : Les corrélogrammes des résidus pour les séries de SPI12	144
Figure 6.6. : Les corrélogrammes des résidus pour les séries de RDI12	146
Figure 6.7. : Des corrélogrammes des résidus pour les séries de SDI12	147

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : les domaines d'application de l'hydrologie dans des différentes sciences	13
Tableau 2.1. Caractéristiques morphologiques des sous bassins versants	34
Tableau 2.2. Coordonnées et types de la base de données des stations par bassin versant.....	35
Tableau 2.3. Les précipitations Moyennes, minimales et maximales annuelles des stations	36
Tableau 2.4. Les précipitations moyennes mensuelles des stations.....	37
Tableau 2.5. Les températures Moyennes, minimales et maximales annuelles des stations	41
Tableau 2.6. Les températures moyennes mensuelles des stations	43
Tableau 3.1 : Résultats des tests de normalité pour les données sur les précipitations.....	67
Tableau 3.2 : Résultats des tests de normalité pour les données de température.	67
Tableau 3.3 : Résultats des tests de normalité pour les données d'écoulement fluvial.	68
Tableau 3.4 : Résultats des tests non paramétriques de Kruskal-Wallis.	69
Tableau 3.5 : Résultats des essais non paramétriques de Kruskal-Wallis pour la température.....	69
Tableau 3.6 : Résultats des tests non paramétriques de Kruskal-Wallis pour l'écoulement fluvial.	70
Tableau 4.1 : Résumé des catégories humides et sèches issues de différents indices de sécheresse en fonction de la valeur de l'indice.....	79
Tableau 4.2. Données d'entrée requises pour chaque indice	83
Tableau 4.3. Classification des secteurs climatiques basée sur le regroupement des moyennes k.	86
Tableau 4.4. Résultats du test de Mann-Kendall pour les tendances SPI et RDI à travers les secteurs climatiques.	87
Tableau 4.5. Résultats du test de Kruskal-Wallis pour les moyennes du SPI et du RDI selon les secteurs climatiques	87
Tableau 4.6. Synthèse des résultats du test de Mann-Kendall modifié pour les indices SPI, RDI et SDI dans les bassins versants du secteur nord de la zone d'étude	101
Tableau 4.7 Résultats du test de Mann-Kendall modifié pour les indices SPI, RDI et SDI dans les stations du centre de la zone d'étude.....	102
Tableau 4.8. Résultats du test de Mann-Kendall modifié mettant en évidence les tendances de sécheresse à long et court terme aux stations de Khenchela et Oum El Bouaghi.....	103
Tableau 5.1. Classification de la sécheresse selon McKee et al.	113

Tableau 5.2: Résultats des tests d'homogénéité des précipitations, de la température et du débit dans les stations du nord-est de l'Algérie (1975-2021).....	116
Tableau 5.3 : Résultats des tests Kruskal–Wallis et post-hoc de Dunn pour l'homogénéité des débits dans les stations du nord-est de l'Algérie (1975–2021)	117
Tableau 5.4 : Fréquences des tendances dérivées de FITA pour SPI12, RDI12 et SDI12 dans les stations du nord-est de l'Algérie (1975–2021).....	119
Tableau 6.1 : les propriétés des fonctions d'autocorrélation simple et partielle du modèle ARMA .	126
Tableau 6.2 : Les valeurs de t-statistique et de p pour la vérification de la stationnarité des stations	132
Tableau 6.3. : Les combinaisons de AR et MA des indices SPI, RDI et SDI pour chaque station	140
Tableau 6.4. : les valeurs du critère de Schwarz et la combinaison (AR , MA) des indices SPI, RDI et SDI pour chaque station.....	141

Liste des abréviations

P : Précipitation

T : Température

Q : Débit

I : Irrigation

Ec : Ruissellement de surface

ETR : Evapotranspiration réelle

Rc : Remontées capillaires

D : Drainage profond

ABH : Agence de Bassin Hydrologique

LULC : Land Use and Land Cover

MNT : Modèle Numérique de Terrain

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

ONM : Office National de la Météorologie

ANBT : Agence Nationale des Barrages et Transferts

K-means : K-moyennes

SPI : L'indice de précipitation normalisé

RDI_n : Indice de Reconnaissance de la Sécheresse normalisé

RDI : Indice de Reconnaissance de la Sécheresse

RDI_{st} : Indice de Reconnaissance de la Sécheresse standardisé

ETP : Evapotranspiration potentielle

SDI : Indice de sécheresse hydrologique

MMK : Test de Mann-Kendall modifié

MK : Test de Mann-Kendall

DrinC : Drought Indices Calculator

F-ITA : Analyse innovante des tendances et des statistiques de fréquence

ITA : Analyse innovante des tendances

DI : Indice de sécheresse

ARIMA : processus autorégressif moyenne mobile intégrer

MA : La moyenne mobile

AR : La partie autorégressive

ARMA (p, q) : Modèle autorégressif - Moyenne mobile

ACF : Fonctions d'autocorrélation

PACF : Fonction d'autocorrélation partielle

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le changement climatique, notamment par l'intensification des phénomènes de sécheresse, est susceptible de provoquer des migrations internes majeures à l'échelle mondiale. Selon un rapport de la Banque mondiale de 2021 sur la migration interne [1], les sécheresses liées au changement climatique pourraient entraîner, d'ici 2050, le déplacement interne de plus de 216 millions de personnes, soit environ 3 % de la population, dans des régions telles que l'Asie de l'Est, l'Asie du Sud, l'Europe de l'Est, l'Afrique du Nord, l'Afrique subsaharienne et l'Amérique latine.

La sécheresse, un phénomène naturel multifacette, affecte gravement les ressources en eau, l'agriculture et les biotopes, en particulier dans les zones semi-arides comme le nord-est de l'Algérie [2]; [3]. Définie par des périodes prolongées de précipitations réduites, la sécheresse perturbe les systèmes hydrologiques et socio-économiques, nécessitant des techniques avancées de surveillance et de modélisation [4].

Comprendre la sécheresse implique de reconnaître ses effets variés, façonnés par des catégories uniques influençant différents aspects environnementaux. La sécheresse météorologique, signalée par une diminution des précipitations, met en évidence les déficits précoces en eau, mais pourrait ne pas saisir les changements climatiques ultérieurs. La sécheresse agricole, alimentée par la réduction de l'humidité du sol et la perte d'eau par les plantes, indique des difficultés pour les cultures, bien que son évaluation puisse être entravée par des données météorologiques erratiques dans certaines zones. La sécheresse hydrologique, liée à la baisse des débits fluviaux, signale des préoccupations concernant la disponibilité de l'eau, mais son évaluation peut faire face à des obstacles en raison du suivi limité des cours d'eau.

En Algérie, la persistance de conditions sèches depuis les années 1970, caractérisée par une baisse des précipitations et une hausse des températures, a exacerbé la rareté de l'eau ainsi que les risques environnementaux associés ([5]; [6]; [7]; [8]; [9]; [10]; [11]; [12]). L'accroissement global de la fréquence des sécheresses met en évidence l'importance de développer des modèles fiables pour anticiper et atténuer leurs effets. Diverses approches ont été proposées, parmi lesquelles les modèles probabilistes intégrant les caractéristiques combinées de la sécheresse, les méthodes de prévision reposant sur les réseaux neuronaux, ainsi que les techniques hybrides associant indices climatiques et données de télédétection. ([13]; [14]; [15]; [16]; [17]). Les modèles d'apprentissage automatique, tels que les perceptrons multicouches et les forêts aléatoires, améliorent la précision des prévisions ([18]; [19]; [20]; [21]; [22]; [23]).

Cette évolution revêt un caractère particulièrement alarmant, d'autant que les scénarios climatiques projettent d'ici 2050 une baisse des précipitations comprise entre 10 % et 20 %, ainsi qu'une élévation des températures pouvant atteindre jusqu'à 7 °C en saison estivale et 4 °C en saison hivernale. Dans un contexte de climat aride et d'urbanisation croissante, l'Algérie est confrontée à un accroissement des risques liés aux sécheresses récurrentes et aux inondations, tout en faisant face à une demande en eau en constante augmentation. Le pays subit une intensification des épisodes de sécheresse, contribuant à la désertification, à la salinisation des sols et à la dégradation des eaux de surface. Ces phénomènes se traduisent par une irrégularité des précipitations, une baisse des débits hydriques et une fréquence accrue d'événements extrêmes d'inondation. [24]. Le Conseil économique et social national (CNES) rapporte

que l'Algérie figure parmi les pays les plus déficitaires en eau au monde, avec une disponibilité moyenne en eau par habitant de seulement 500 mètres cubes par an, bien en dessous du seuil de pénurie d'eau de la Banque mondiale de 1000 mètres cubes par an [25]. Compte tenu de la gravité des impacts liés à la sécheresse, il est crucial de disposer d'outils d'évaluation robustes pour quantifier son étendue et orienter la gestion des ressources en eau. Les recherches portant sur la sécheresse dans la région méditerranéenne, notamment en Algérie, ont gagné en importance en raison de la vulnérabilité accrue de cette zone aux événements climatiques extrêmes [26]. Plusieurs études ont documenté la fréquence, la durée et la gravité croissantes des sécheresses dans la région [27]. Le nord-est de l'Algérie a été particulièrement affecté, se traduisant par une réduction significative des rendements agricoles ainsi que par une diminution notable des ressources en eau. [28].

La sécheresse se définit à travers trois dimensions majeures : son intensité, sa durée et son extension spatiale. Pour l'évaluer et en assurer le suivi, les chercheurs recourent à plusieurs indicateurs quantitatifs, parmi lesquels l'Indice de Précipitations Standardisé (SPI), l'Indice de Reconnaissance de la Sécheresse (RDI) et l'Indice de Sécheresse des Débits (SDI) [28] [29]. Ces indices offrent des informations cruciales sur la gravité de la sécheresse, permettant aux décideurs de mettre en œuvre des stratégies de mitigation en temps utile. L'indice SPI, développé à l'origine par [30] [31], est largement utilisé en raison de ses faibles exigences en matière de données et de sa flexibilité sur plusieurs échelles temporelles. De même, l'indice RDI est particulièrement utile pour les régions semi-arides et arides, ce qui le rend hautement pertinent pour l'Algérie [32]. L'indice SDI, développé par [33], est un outil clé pour évaluer les sécheresses liées aux débits ([34]; [35]; [36]; [37]; [38]). D'autres indicateurs sont également mobilisés, tels que l'Indice de Sévérité de la Sécheresse de Palmer (PDSI), l'Indice d'Approvisionnement en Eau Superficielle (SWSI), l'Indice de Sécheresse de la Réclamation (RCDI), l'Indice Standardisé Précipitations-Évapotranspiration (SPEI) ainsi que l'Indice des Précipitations Réelles (API) ([28]; [39]; [40]; [3]). Le changement climatique amplifie l'intensité et la fréquence des épisodes de sécheresse en induisant des variations rapides des températures et des régimes de précipitations, ce qui rend indispensable l'analyse approfondie des tendances climatiques [10].

De nombreuses études ont validé l'efficacité des indices SPI, RDI et SDI dans l'évaluation des conditions de sécheresse à travers le monde, notamment au Koweït [41], en Italie [42], au Maroc [43], et en Turquie [44]. En Algérie, les études sur la sécheresse ont utilisé les indices SPI, RDI et SDI pour analyser les tendances climatiques à long terme [45]. Plusieurs chercheurs ont appliqué ces indices dans différentes régions ([46]; [9]). Une étude récente de [47] a identifié un changement global des conditions proches de la normale vers des conditions modérément sèches en utilisant les indices SPI et SPEI. De même, [48] ont mis en évidence une tendance persistante de sécheresse négative à toutes les échelles temporelles. La recherche de [49] utilisant une analyse spatio-temporelle a révélé des intensités de sécheresse variables au nord, au centre et au sud de l'Algérie au cours des deux dernières décennies. De plus, les évaluations historiques de la sécheresse suggèrent une probabilité croissante d'événements de sécheresse extrêmes, avec des projections indiquant une aggravation de la tendance dans les prochaines décennies [50]. Plusieurs études algériennes ont utilisé les indices SDI et SSFI pour évaluer la sécheresse hydrologique, en se concentrant sur les variations des débits et la pénurie d'eau à long terme [46].

Cette étude souligne le rôle déterminant des indices SPI, RDI et SDI dans l'évaluation de la sévérité et de la persistance des épisodes de sécheresse affectant le nord-est de l'Algérie. En appliquant une

approche sectorielle sur différentes échelles temporelles (1, 3, 6 et 12 mois) et en utilisant un regroupement K-means avec un accent particulier sur la réduction de l'influence des coordonnées géographiques (X, Y) et sur l'amplification du rôle des indices SPI et RDI, notre vision est d'évaluer la variabilité de la sécheresse à partir des séries chronologiques de précipitations, de température et de débits couvrant la période 1975–2021. Cette analyse aidera à déterminer si la région peut être considérée comme une unité climatique unique, facilitant ainsi la mise en œuvre de stratégies de gestion de l'eau généralisées pour la préparation aux sécheresses à court, moyen et long terme.

Les méthodes conventionnelles d'analyse des tendances, comme le test de Mann–Kendall, reposent sur des hypothèses restrictives (par exemple, la normalité des données), limitant leur pertinence pour des données climatiques non stationnaires ([51]; [52]; [53]; [54]). Pour surmonter ces contraintes, [53] a introduit l'Analyse des Tendances Innovantes (ITA), une approche non paramétrique qui identifie les tendances par des comparaisons de sous-séries, largement utilisée dans la recherche hydroclimatique. Cette étude présente l'Analyse des Tendances et Statistiques Innovantes en Fréquence (FITA) comme le modèle original, développé par Abu Arra et al. (2024), qui fait progresser l'ITA en intégrant l'analyse de fréquence spectrale pour quantifier les fréquences de classification de la sécheresse (par exemple, modérée, sévère). Contrairement à l'ITA qui se concentre sur les tendances monotones, la FITA détecte les motifs cycliques et les distributions de gravité, la distinguant des modèles prédictifs d'apprentissage automatique comme les perceptrons multicouches et les approches spatiales multicritères, avec sa formulation spectrale détaillée dans la section des méthodes ([55]; [56]).

L'analyse des séries temporelles est un outil essentiel pour comprendre l'évolution et prévoir le comportement futur de nombreux phénomènes naturels et anthropiques. Dans le domaine de l'hydrologie et de la climatologie, elle permet notamment d'anticiper les variations des précipitations, des débits ou encore des indices de sécheresse, informations cruciales pour la gestion durable des ressources en eau. Parmi les approches les plus reconnues, le modèle ARIMA (processus autorégressif moyenne mobile intégré), introduit par Box et Jenkins (1976), s'impose comme une méthode robuste et flexible. Ce modèle repose sur la combinaison de trois composantes : la partie autorégressive (AR), la différenciation intégrée (I) pour stationner la série, et la moyenne mobile (MA) qui tient compte des erreurs passées. Grâce à cette structure, le modèle ARIMA a été largement appliqué dans divers domaines scientifiques, et il s'avère particulièrement pertinent pour la prévision hydrologique et climatique.

Le nord-est de l'Algérie, une région clé pour son économie et sa population, connaît une fréquence croissante des sécheresses, avec des études rapportant une diminution des précipitations de 20 à 30 % et une aridification accrue ([57]; [58]; [59]; [60]). Les études régionales utilisant le test de Mann–Kendall montrent des tendances variées : [61] n'ont trouvé aucune tendance significative dans le bassin de la Tafna (1979–2011), tandis que [48] ont détecté des tendances négatives sur toutes les échelles temporelles (1950–2020) ; [62] ont observé une augmentation des événements de précipitations élevées dans 23 stations, mais [63] ont noté une diminution des précipitations à Annaba depuis juin 2002 (1981–2021) ; [46] ont identifié une phase sèche (1979–2001) suivie d'une phase humide (2002–2009) dans le bassin de Mellah. Bien que l'ITA ait été appliquée aux précipitations régionales, son utilisation avec les indices de sécheresse reste limitée. La FITA, en tant qu'approche de modélisation novatrice, offre un cadre solide pour analyser les tendances SPI, RDI et SDI en intégrant l'analyse de fréquence avec la détection des tendances de l'ITA, offrant des perspectives probabilistes sur les distributions de gravité de la sécheresse.

Cette étude utilise la FITA et l'ITA pour évaluer la dynamique de la sécheresse à travers 10 stations dans le nord-est de l'Algérie (1975–2021), visant à identifier les tendances spatiales et temporelles et à évaluer l'homogénéité des données, soutenant ainsi une gestion intégrée de la sécheresse et une gestion durable des ressources en eau à travers des liens avec les résultats hydrologiques et écologiques.

Chapitre I : Présentations générales et concepts en hydrologie : sécheresses

Introduction

La manière dont les ressources en eau sont réparties influence fortement l'organisation du territoire, les choix d'installation des populations, le développement de leurs activités, ainsi que la croissance des villes. Là où l'eau est présente, elle attire naturellement les habitants, ce qui explique en partie les migrations internes vers le nord du pays. Ce mouvement contribue au phénomène croissant de « littoralisation », caractérisé par une concentration rapide de la population et des activités économiques dans les régions côtières. Cette dynamique exerce une forte pression sur les ressources en eau disponibles, qui peinent à répondre à des besoins toujours plus importants.

En quarante ans, la demande totale en eau – incluant la consommation domestique, l'agriculture, l'industrie et d'autres usages – a été multipliée par quatre. Aujourd'hui, elle dépasse déjà la moitié des ressources naturelles mobilisables. Si cette tendance se poursuit, le seuil critique des ressources renouvelables pourrait être atteint avant le milieu du siècle, comme c'est déjà le cas dans plusieurs pays du sud de la Méditerranée. En parallèle, la surexploitation des nappes phréatiques et la pollution, notamment d'origine industrielle, aggravent la diminution des ressources utilisables.

Dans ce contexte tendu, une concurrence de plus en plus forte s'installe entre les principaux secteurs consommateurs d'eau. Ce phénomène, combiné aux inégalités régionales en matière de disponibilité de l'eau, rend les décisions de répartition de plus en plus complexes. La demande en eau potable a particulièrement augmenté, tant en volume qu'en proportion. Alors qu'elle représentait 16 % de la consommation totale en 1975, elle atteint aujourd'hui 35 %. Durant la même période, la part de l'eau utilisée pour l'agriculture est passée de 80 % à 60 %, tandis que celle destinée à l'industrie est restée relativement stable, autour de 3,5 %. Face à cette évolution, l'accès à l'eau potable est devenu une priorité nationale, reconnue et affirmée par la législation algérienne en matière de gestion de l'eau.

I.1. La problématique des ressources en eau

I.1.1. L'eau est une ressource aux multiples facettes :

Les ressources en eau désignent l'ensemble des formes d'eau présentes sur la Terre, qu'elles soient douces ou salées, et mobilisables par les sociétés humaines ainsi que par les écosystèmes naturels, incluant les eaux de surface (rivières, lacs), les eaux souterraines, les glaciers et les eaux marines, ces dernières nécessitant des traitements spécifiques pour leur exploitation. L'eau constitue une ressource renouvelable régie par le cycle hydrologique, mais sa disponibilité effective demeure limitée sur les plans quantitatif et qualitatif, ce qui en fait un élément structurant des systèmes naturels et socio-économiques, conditionnant directement les trajectoires de développement durable.

Selon l'UNESCO (2021), la pression sur les ressources en eau s'intensifie sous l'effet combiné de la croissance démographique, de l'urbanisation et des changements environnementaux globaux. Elle se caractérise par une forte multifonctionnalité, en tant que ressource vitale indispensable au maintien de la vie et des équilibres écosystémiques [64], ressource économique stratégique mobilisée dans l'agriculture, l'industrie, la production énergétique et le secteur touristique [65], ainsi que ressource sociale et culturelle participant au bien-être humain et portant des valeurs symboliques et identitaires. Cette diversité d'usages engendre des arbitrages complexes entre secteurs concurrents, justifiant une gestion intégrée et durable des ressources hydriques. Par ailleurs, l'eau constitue une ressource

multidimensionnelle impliquant des dimensions écologique et biophysique, en raison de son rôle central dans les cycles naturels et les dynamiques des écosystèmes notamment à travers les bassins versants [66], sociale et culturelle par sa valeur symbolique, esthétique et spirituelle, économique du fait des logiques de rareté et de concurrence entre usages [67], ainsi que spatio-temporelle en raison de la variabilité de sa disponibilité dans l'espace et dans le temps, accentuant les inégalités hydriques. Cette complexité justifie l'adoption de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE), recommandée par le Global Water Partnership.

Toutefois, l'eau est aujourd'hui reconnue comme une ressource hautement vulnérable et stratégique, soumise à des pressions anthropiques croissantes liées à l'urbanisation, la croissance démographique et l'intensification agricole [68], à la dégradation qualitative due à la pollution industrielle, agricole et domestique [69], à la surexploitation des ressources souterraines, ainsi qu'aux perturbations du cycle hydrologique induites par le changement climatique [68]. Ces facteurs contribuent à l'augmentation du stress hydrique mondial, considéré comme critique dans de nombreuses régions [65], avec plus de 30 % de la population mondiale exposée à un stress hydrique élevé (World Resources Institute, 2020), faisant de l'eau un enjeu géopolitique majeur générant des tensions à différentes échelles, locales, nationales et internationales, les institutions internationales recommandent une gestion durable fondée sur l'amélioration de l'efficacité des usages [65], le recyclage et la réutilisation des eaux usées [69], le développement de technologies hydriques telles que le dessalement et l'irrigation de précision, ainsi que la promotion d'une gouvernance participative et de la coopération internationale [66], le GIEC [68] soulignant que l'adaptation des systèmes hydriques constitue un levier essentiel pour réduire la vulnérabilité des territoires face au changement climatique.

I.1.2. Menaçante

L'eau, ressource précieuse, se trouve aujourd'hui sous une pression croissante liée à plusieurs facteurs, tant naturels qu'humains. Le changement climatique, avec la hausse des températures et la multiplication des phénomènes météorologiques extrêmes, perturbe le cycle naturel de l'eau et diminue la disponibilité de l'eau douce [68]. Parallèlement, la pollution due aux activités industrielles, agricoles et domestiques dégrade la qualité de l'eau, rendant une grande partie de cette ressource inutilisable [69]. De plus, la surexploitation des ressources en eau, notamment par l'agriculture intensive et l'urbanisation rapide, accentue les problèmes de pénurie et de stress hydrique [65].

L'eau douce, qui ne représente que 3 % de l'eau totale sur Terre, est donc une ressource fragile qu'il est impératif de préserver et de gérer durablement pour les générations futures [64].

Les principales causes de cette menace sont :

- **Pollution** : Les rejets provenant des industries, des habitations, et des exploitations agricoles (pesticides, engrais, produits chimiques) contaminent les rivières et les nappes souterraines. Les microplastiques et les métaux lourds viennent également aggraver la situation [70].
- **Surmenage et surconsommation** : La consommation d'eau par personne augmente sans cesse, tandis que la population mondiale ne cesse de croître, ce qui met une pression de plus en plus forte sur les ressources disponibles [67].

- **Changements climatiques** : Il accentue les épisodes de sécheresse et de pénurie d'eau, avec des impacts particulièrement sévères sur les régions comme l'Afrique [68].
- **Altération du cycle de l'eau** : La déforestation et la destruction des zones humides perturbent le cycle naturel de l'eau, diminuant l'infiltration des pluies et la capacité naturelle d'épuration [71].

Les conséquences sont multiples :

- **Santé et environnement** : Boire une eau polluée peut provoquer des maladies graves. La pollution détruit les écosystèmes aquatiques et favorise la prolifération d'algues toxiques [72].
- **Économie et sécurité** : La rareté de l'eau peut entraîner des conflits sociaux et géopolitiques liés à son accès, ressource vitale pour tous [73].
- **Migration et précarité** : Les pénuries d'eau forcent parfois des migrations et engendrent des conditions de vie précaires, impactant particulièrement les femmes et les enfants [74].

I.2. L'hydrologie

I.2.1. Définition

L'hydrologie est la science qui étudie l'eau sous toutes ses formes et ses déplacements sur Terre. Elle s'intéresse au cycle de l'eau, c'est-à-dire à la manière dont l'eau se répartit, circule, change d'état et interagit avec l'atmosphère, la surface terrestre et les nappes souterraines. Cette discipline analyse aussi l'origine de l'eau, ses propriétés physiques et chimiques, ainsi que l'impact des activités humaines sur sa disponibilité [75].

Les principaux domaines d'étude de l'hydrologie comprennent :

- **Le cycle de l'eau** : l'ensemble des échanges d'eau entre l'air, le sol et les masses d'eau [76].
- **Le mouvement de l'eau** : les phénomènes de ruissellement, d'infiltration, le débit des rivières, ainsi que la circulation des eaux souterraines [77].
- **Les propriétés de l'eau** : ses propriétés physiques et chimiques [78].
- **Les interactions** : les liens entre l'eau, son environnement et les êtres vivants qui en dépendent [79].

L'hydrologie se décline en plusieurs branches :

- **Hydrologie continentale ou fluviale** : qui étudie les eaux des rivières, fleuves et lacs [80].
- **Hydrologie souterraine (ou hydrogéologie)** : qui s'intéresse aux eaux souterraines [81].
- **Hydrologie urbaine** : qui examine la gestion des eaux dans les villes, notamment le ruissellement des eaux pluviales et l'évacuation des eaux usées [82].

Pour mieux comprendre et prédire le comportement de l'eau, l'hydrologie s'appuie sur des méthodes de terrain et des outils mathématiques. C'est une discipline clé pour gérer durablement les ressources en eau, et pour anticiper les phénomènes extrêmes comme les inondations ou les sécheresses, afin d'en limiter les impacts sur les populations et les écosystèmes [83].

I.2.3. Objectifs de l'hydrologie de surface

L'hydrologie de surface a pour mission principale de mieux comprendre et gérer l'eau qui se trouve à la surface de la Terre, en étudiant ses mouvements, sa répartition et ses variations dans le temps et l'espace. Elle s'intéresse particulièrement aux phénomènes naturels comme les précipitations, l'évaporation, le ruissellement, et aux événements extrêmes tels que les inondations.

Les objectifs principaux de cette discipline peuvent se résumer ainsi :

- **Comprendre les phénomènes hydrologiques** : observer et analyser les processus comme le ruissellement, l'infiltration, l'évaporation, qui évoluent en fonction des changements environnementaux (sécheresse, urbanisation, déforestation...).
- **Constituer des bases de données fiables** : collecter sur le long terme des mesures précises (pluies, débits des rivières, évaporation) pour mieux prévoir et gérer les ressources.
- **Définir les paramètres essentiels** : attribuer des valeurs (ou fourchettes de valeurs) aux différents paramètres nécessaires à la conception et à la gestion d'ouvrages hydrauliques comme les barrages ou les systèmes d'irrigation.

L'hydrologie de surface est au cœur de nombreux aménagements : construction de barrages pour l'eau potable, l'agriculture ou l'industrie, aménagement du territoire pour lutter contre les inondations aussi bien en zones rurales (bassins versants) qu'urbaines. Elle est aussi indispensable à la planification à long terme des ressources en eau.

Cette discipline s'appuie sur des connaissances variées issues de plusieurs sciences, comme le montre le tableau 1.1 ci-dessous.

Tableau 1.1 : les domaines d'application de l'hydrologie dans des différentes sciences

Sciences et techniques	Domaines d'application
Météorologies et Climatologie	Étude des précipitations et des échanges atmosphériques
Géologie, géographie et Pédologie	Analyse du comportement hydrologique des bassins versants
Hydraulique	Mesure et étude des écoulements à la surface libre
Statistique	Traitement des données et simulation
Calcul numérique	Modélisation des crues et optimisation
Informatique	Outils pour calcul, stockage et gestion des données

L'hydrologie de surface a pour objectifs principaux la compréhension, la modélisation et la gestion des ressources en eau présentes à la surface terrestre. Elle s'intéresse au mouvement, à la distribution, et à la variabilité des eaux de surface dans l'espace et le temps, en relation avec les processus hydrologiques tels que les précipitations, l'évapotranspiration, le ruissellement, et les inondations.

Plus spécifiquement, l'hydrologie de surface vise à :

- **Comprendre les processus hydrologiques** : qui régissent l'eau à la surface, comme la pluie, le ruissellement ou le transport des sédiments, afin de mieux appréhender le fonctionnement des bassins versants.
- **Modéliser les systèmes hydrologiques** : pour simuler les écoulements, prévoir les inondations et anticiper les impacts du changement climatique ou des activités humaines.
- **Contribuer à la gestion durable** des ressources en eau, en optimisant leur usage pour l'eau potable, l'agriculture, l'énergie et la préservation des milieux aquatiques.
- **Prévenir les risques liés à l'eau** : notamment les inondations, sécheresses ou érosion, en développant des stratégies et infrastructures adaptées.
- **Surveiller l'état des milieux aquatiques** : afin de mesurer les impacts des pressions humaines et des évolutions environnementales.

En résumé, l'hydrologie de surface offre les connaissances indispensables pour gérer efficacement l'eau de surface, protéger les populations et préserver les écosystèmes face aux risques liés à cette ressource vitale.

1.2.4. Les principaux concepts de l'hydrologie

1.2.4.1. Le cycle de l'eau

Le cycle de l'eau désigne le mouvement permanent de l'eau à travers différents réservoirs de la planète : l'atmosphère, la surface terrestre et le sous-sol. Ce processus inclut plusieurs étapes, comme l'évaporation de l'eau, sa condensation dans l'atmosphère, les précipitations (pluie, neige), l'infiltration dans les sols, le ruissellement en surface, et enfin l'écoulement vers les rivières ou les nappes souterraines [84].

Ce cycle est considéré comme fermé : aucune eau n'entre ni ne sort du système terrestre, elle ne fait que se transformer et circuler. Bien que la planète soit largement recouverte d'eau, l'eau douce — celle qui est directement exploitable par les humains — ne représente qu'une infime part, soit moins de 3 % du total. Et sur cette petite fraction, près des deux tiers sont enfermés dans les glaciers et les calottes polaires, donc difficilement accessibles [65].

1.2.4.2. Les processus hydrologiques

Ce sont les mécanismes qui régissent le mouvement de l'eau dans le cycle hydrologique. Ils incluent:

- **Précipitations** : La chute d'eau de l'atmosphère sous forme de pluie, neige, grêle, etc.
- **Évaporation** : Le passage de l'eau de l'état liquide à l'état gazeux.
- **Transpiration** : L'évaporation de l'eau par les plantes.
- **Infiltration** : La pénétration de l'eau dans le sol.
- **Ruissellement** : L'écoulement de l'eau sur la surface terrestre.
- **Écoulement des eaux souterraines** : Le mouvement de l'eau dans les aquifères.

1.2.4.3. Les ressources en eau

L'hydrologie s'intéresse aussi à l'origine et à la répartition des différentes formes d'eau présentes sur la planète. Cela inclut les eaux de surface comme les rivières et les lacs, les réserves d'eau souterraine contenues dans les nappes phréatiques, les glaciers qui stockent une grande partie de l'eau douce, ainsi que les océans, qui représentent la majeure partie de l'eau disponible sur Terre — bien qu'ils soient salés et donc peu utilisables en l'état [65].

1.2.4.4. La gestion des ressources en eau

L'hydrologie joue un rôle essentiel dans la gestion durable de l'eau. Grâce à l'étude des différents processus du cycle hydrologique, elle fournit des données indispensables pour concevoir, planifier et gérer les infrastructures hydrauliques telles que les barrages, les réseaux d'irrigation ou les systèmes d'évacuation des eaux pluviales. Elle permet également d'anticiper les risques liés à l'eau, comme les inondations ou les périodes de sécheresse, afin de mieux protéger les populations et les ressources naturelles [85].

1.2.4.5. L'hydrologie isotopique

L'hydrologie isotopique est une branche spécialisée de l'hydrologie qui utilise des isotopes naturels présents dans l'eau (comme l'oxygène-18 ou le deutérium) pour tracer et analyser les déplacements de l'eau dans l'environnement. Cette méthode permet notamment d'identifier l'origine des eaux souterraines, de mesurer leur temps de résidence, ou encore de comprendre les échanges entre les différents réservoirs d'eau (pluie, rivières, nappes, etc.) [86].

1.2.5. Concept de système hydrologique

Le cycle hydrologique, bien que naturellement complexe, peut être abordé comme un système structuré, composé d'éléments interconnectés tels que les précipitations, l'évaporation, le ruissellement et l'infiltration. Pour mieux comprendre et modéliser ce cycle, il est utile de le diviser en sous-systèmes interdépendants, chacun jouant un rôle spécifique dans la circulation de l'eau sur Terre.

Ainsi, le cycle global de l'eau peut être conceptualisé à travers trois grandes composantes :

- **Le système hydrologique atmosphérique**, qui englobe les processus de condensation, de précipitation et d'évaporation dans l'atmosphère.
- **Le système hydrologique de surface**, qui concerne l'eau présente à la surface terrestre, notamment les rivières, les lacs et les zones humides.
- **Le système hydrologique souterrain**, qui inclut l'eau infiltrée dans le sol et circulant dans les nappes phréatiques ou aquifères.

Ces systèmes interagissent en permanence, formant un cycle global dans lequel l'eau change d'état et de lieu de stockage, selon les conditions météorologiques, géologiques et topographiques [75].

Le Cycle de l'Eau (ou Cycle Hydrologique)

- **Précipitations** : L'eau qui tombe de l'atmosphère sous forme de pluie, neige ou grêle.

- **Évapotranspiration** : Le processus combiné d'évaporation de l'eau à partir de la surface du sol et de transpiration de l'eau par la végétation.
- **Interception** : L'eau retenue temporairement par la végétation et qui peut s'évaporer sans atteindre le sol.
- **Ruissellement** : L'écoulement de l'eau à la surface du sol, souvent en réponse aux précipitations ou à la fonte des neiges.
- **Infiltration** : Le processus par lequel l'eau pénètre dans le sol et les couches souterraines.
- **Rétention et Stockage** : L'eau peut être stockée dans le sol, la neige, les glaciers et les eaux souterraines.

Concepts Spécifiques à l'Hydrologie

- **Bassin Versant** : Une unité géographique où toute l'eau qui tombe sur sa surface s'écoule vers un même exutoire (rivière, lac, océan).
- **Débit** : Le volume d'eau qui traverse une section transversale d'un cours d'eau par unité de temps, généralement mesuré en m³/s.
- **Régime Hydrologique** : Décrit les variations saisonnières du débit d'une rivière. Il peut être monomodal (un pic de crue par an) ou polymodal (plusieurs pics).
- **Crue et Étiage** : Une crue correspond à une augmentation significative du débit, tandis que l'étiage représente la période de débit le plus faible, souvent en fin d'été.
- **Hydrogramme de Crue** : La représentation graphique de l'évolution du débit au cours du temps lors d'un événement de crue.

Domaines de l'Hydrologie

- **Hydrologie de Surface** : Étudie le ruissellement, l'érosion et les écoulements des rivières.
- **Hydrologie de Subsurface (ou souterraine/hydrogéologie)** : Concerne les mouvements de l'eau dans le sol et les aquifères souterrains, leur qualité, leur captage et leur renouvellement.
- **Hydrologie Urbaine** : Analyse le cycle de l'eau dans les zones urbaines, incluant la production d'eau potable et l'épuration des eaux usées.
- **Hydrométéorologie** : Se concentre sur l'échange d'eau entre l'atmosphère et la surface terrestre, notamment les précipitations et l'évaporation.

1.2.6. Bilan Hydrologique

Dans le cadre du cycle de l'eau, la croissance des cultures dépend principalement de l'eau absorbée par leurs racines, puisée dans le réservoir superficiel constitué par le sol. Cette eau est essentielle à la photosynthèse, qui permet la production de biomasse végétale. Ensuite, l'eau issue des précipitations suit différents chemins : elle peut soit s'infiltrer en profondeur dans le sol (drainage), soit s'écouler en surface sous forme de ruissellement. Une partie de cette eau contribue à recharger les ressources en eau (comme

les nappes souterraines), qui peuvent être utilisées pour l'irrigation si le sol ne retient pas suffisamment d'eau [75].

Pour analyser ces échanges, on distingue deux bilans complémentaires : le bilan hydrique, qui s'intéresse à l'eau dans le sol, et le bilan hydrologique, qui couvre le cycle global de l'eau ([75]; [87]).

1.2.6.1. Le bilan hydrique

Le bilan hydrique repose sur le principe fondamental de conservation de la masse. Concrètement, il s'exprime ainsi : la quantité d'eau reçue (apports) moins la quantité d'eau perdue (pertes) dans un volume de sol donné, sur une période déterminée, correspond à la variation de la quantité d'eau stockée dans ce volume durant cette même période [88] (fig. 1.1).

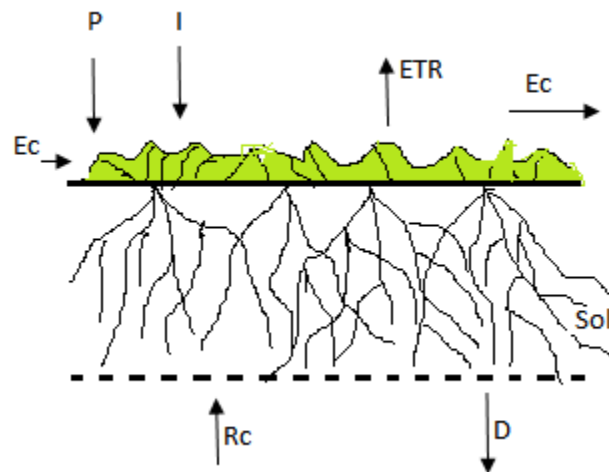


Figure 1.1: Schémas des flux affectant le réservoir du bilan hydrique sur une tranche de sol (adapté de [75]; [87]).

Dans la partie supérieure du système, les apports d'eau proviennent principalement des précipitations (P) et de l'irrigation (I), auxquels s'ajoute ou se soustrait le ruissellement de surface (Ec), selon les situations. Les pertes d'eau correspondent quant à elles à l'évapotranspiration réelle (ETR), c'est-à-dire la somme de l'eau évaporée du sol et celle transpirée par les plantes ([89]; [90]).

En bas du système, les apports peuvent venir des remontées capillaires (Rc), surtout lorsque la nappe phréatique est peu profonde, tandis que les pertes se produisent par drainage profond (D) [91].

Dans ce bilan, les échanges horizontaux d'eau dans le sol, comme ceux qui se produisent sur des pentes, sont négligés pour se concentrer uniquement sur les transferts verticaux [92].

Le volume de sol pris en compte correspond à la profondeur du système racinaire. L'équation du bilan hydrique s'écrit alors ainsi :

$$\Delta S = P + I - ETR - D + Rc \pm Ec,$$

où ΔS est la variation du stock d'eau dans le volume de sol pendant la période considérée.

En pratique, on utilise généralement une équation simplifiée dans laquelle les termes d'écoulement latéral et de remontées capillaires ont été négligés :

$$\Delta S = P + I - ETR - D$$

Le ruissellement latéral, lorsqu'il est présent, constitue un élément important du bilan hydrologique. Toutefois, dans le cadre de notre étude, nous allons l'écarter. De même, bien que les remontées capillaires puissent souvent être négligées, leur rôle devient significatif en période de forte sécheresse. En effet, [93] ainsi que [94] ont estimé que ces remontées, provenant des couches profondes situées à plus de 170 cm de profondeur, apportent environ 100 mm d'eau. Cela représente près de 30 % des 340 mm prélevés par évapotranspiration réelle (ETR) durant le cycle du blé d'hiver sur le site de la Minière (Yvelines). Une valeur similaire de 100 mm a été mesurée en 1979 sur ce même site pour la culture de luzerne, pour une ETR totale de 435 mm ([93]; [94]).

1.2.6.2. Le bilan hydrologique

Si l'on se concentre maintenant sur la phase suivante du cycle de l'eau, comme le montre la figure 1.2, on s'intéresse aux quantités d'eau qui pénètrent dans le sol pour alimenter les nappes phréatiques via le drainage, ainsi qu'à celle qui s'écoule en surface vers les cours d'eau par le ruissellement. Cette distinction conduit à la notion de « pluie efficace » pour les hydrologues, définie comme la différence entre la pluie totale et l'évapotranspiration [75]. Cette définition diffère de celle des agronomes, pour qui la « pluie efficace » correspond à l'eau réellement disponible pour le sol, soit la pluie moins l'interception par la végétation et le ruissellement [95]. L'eau écoulée ainsi alimente les ressources renouvelables en eau, se répartissant selon la perméabilité du sol en trois flux : le ruissellement de surface alimentant les cours d'eau [80], le drainage par infiltration superficielle rechargeant les nappes phréatiques [81], et le drainage profond qui alimente les nappes souterraines plus profondes [96].

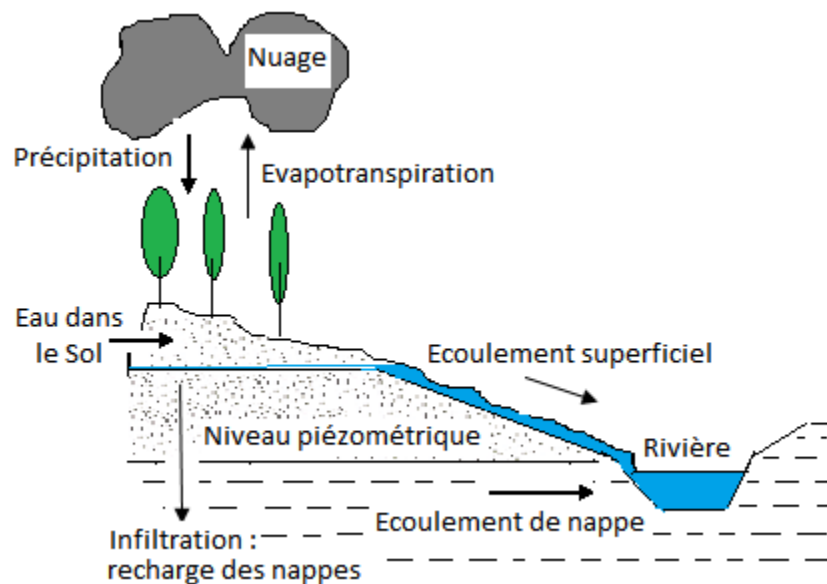


Figure 1.2 : Schématisation du cycle de l'eau [96].

Ces éléments rappellent que l'eau disponible pour l'agriculture provient à la fois de la recharge du réservoir superficiel du sol accessible aux racines, ainsi que d'une ressource supplémentaire qui peut être

mobilisée pour l'irrigation. Par exemple, dans un bassin versant en Tunisie, le volume d'eau stocké dans les sols a été estimé à environ un million de mètres cubes, soit près de sept fois la capacité de stockage du lac collinaire construit pour l'irrigation des cultures [97].

I.2.7. Impact du cycle saisonnier sur la répartition de l'eau

- **Précipitations et ruissellement** : Les précipitations, qui comprennent la pluie, la neige, le grésil et la grêle, sont le moteur principal du cycle de l'eau. Elles alimentent les rivières, les lacs, les nappes phréatiques et les glaciers.
- **Évaporation et transpiration** : Pendant les saisons chaudes, l'évaporation et la transpiration augmentent, réduisant ainsi le ruissellement et la quantité d'eau disponible dans les cours d'eau et les sols.
- **Variation saisonnière des débits des rivières** : Les débits des rivières varient en fonction des saisons. Les périodes de fortes précipitations correspondent à des débits élevés, tandis que les périodes de sécheresse entraînent une diminution du débit.
- **Impact sur les réserves d'eau** : Les variations saisonnières influencent la recharge des nappes phréatiques et des glaciers. En saison hivernale, la fonte des neiges et des glaciers contribue à l'alimentation des réserves en eau douce, tandis qu'en période estivale, l'augmentation de la demande en eau peut entraîner une diminution significative de ces réserves.
- **Régions géographiques** : La répartition de l'eau est également liée à la géographie des régions. Les zones montagneuses reçoivent plus de précipitations que les zones désertiques, ce qui entraîne une répartition inégale de l'eau à travers le globe.

En résumé, le cycle saisonnier joue un rôle crucial dans la répartition de l'eau à travers l'espace, en influençant les précipitations, l'évaporation, le ruissellement et la recharge des réserves d'eau. Par exemples :

- Dans les régions méditerranéennes, les étés secs et chauds entraînent une diminution des débits des rivières et une augmentation de la demande en eau pour l'agriculture et l'irrigation.
- Dans les régions polaires, les saisons froides entraînent la formation de glace et de neige, qui se transforment en eau pendant les périodes de fonte, alimentant les rivières et les lacs.
- Les régions arides et semi-arides connaissent des périodes de sécheresse prolongées, ce qui peut entraîner des pénuries d'eau et des conflits liés à l'accès à la ressource.

I.3. La sécheresse

La sécheresse est un phénomène de plus en plus fréquent dans certaines régions du globe. Mais qu'entend-on vraiment par sécheresse ? Quelles en sont les causes et les conséquences ? Quels sont les risques actuels liés à ce phénomène ? Voici un aperçu complet pour mieux comprendre la sécheresse.

I.3.1. Définition

La sécheresse est un état climatique caractérisé par un manque anormal d'eau dans les sols, les rivières, les lacs et les nappes souterraines. Elle résulte souvent d'une baisse prolongée des précipitations, parfois aggravée par une évaporation excessive due à des températures élevées et à une faible humidité. Ce phénomène peut également être accentué par des facteurs humains, comme l'artificialisation des sols [98].

La sécheresse affecte gravement les écosystèmes naturels ainsi que les activités humaines. Elle fragilise la biodiversité et met en danger des secteurs essentiels tels que l'agriculture ou la production d'énergie. Dans les cas extrêmes, elle peut même menacer la santé des populations et la stabilité économique et sociale [99].

I.3.2. Le mécanisme naturel de déclenchement d'une sécheresse

Le principal déclencheur de la sécheresse météorologique est un déficit prolongé de précipitations, dont la durée dépend du climat local, du type de végétation et d'autres facteurs. Lorsque ce manque d'eau dure, il entraîne un assèchement progressif des sols (sécheresse édaphique) et des milieux aquatiques (sécheresse hydrologique). Le nombre de jours sans pluie nécessaires pour que la sécheresse s'installe varie selon la saison, le type de sol et la végétation. Par exemple, en été, ce délai est souvent plus court qu'au printemps [100].

Les conditions des saisons précédentes jouent également un rôle important : un hiver particulièrement sec peut accroître le risque de sécheresse pendant l'été suivant. Les sécheresses sévères sont souvent le résultat de plusieurs saisons consécutives marquées par des déficits importants en pluie.

I.3.3. Différents types de sécheresses

On distingue plusieurs formes de sécheresse selon leurs causes et impacts [101]:

- **Sécheresse météorologique** : absence prolongée de pluie.
- **Sécheresse édaphique** : manque d'humidité dans le sol, souvent lié à la sécheresse météorologique.
- **Sécheresse hydrologique** : déficit en eau dans les cours d'eau, nappes ou réservoirs, qui peut aussi être aggravé par une mauvaise gestion des ressources.

I.3.4. Les causes de la Sécheresse

Les causes principales sont :

- **Causes naturelles** [68]:
 - Manque durable de précipitations, surtout en automne et hiver, qui empêche la recharge des nappes.
 - Présence prolongée d'anticyclones qui apportent de l'air chaud et sec.

- Températures élevées, notamment en été, qui augmentent l'évaporation et la transpiration des plantes.
- **Causes humaines [102]:**
 - Usage intensif et parfois excessif de l'eau par l'agriculture, l'industrie ou les besoins domestiques.
 - Gestion inadaptée des ressources, pollution et urbanisation, qui réduisent la disponibilité de l'eau.

Ces facteurs sont souvent liés entre eux : par exemple, le changement climatique tend à allonger les périodes sèches et à augmenter les températures, accentuant ainsi la sécheresse.

I.3.5. Les risques de sécheresse dans un contexte de changement climatique

Le changement climatique augmente les risques de sécheresse en Europe et dans le monde, se traduisant par des températures plus élevées, moins de précipitations estivales et une évaporation accrue, ce qui assèche les sols et les cours d'eau. Cette intensification des sécheresses a des impacts majeurs : elle menace la biodiversité, dégrade la qualité de l'eau, perturbe l'approvisionnement en eau potable, affecte l'agriculture, augmente les risques d'incendies et peut forcer des migrations, entraînant des conséquences socio-économiques graves [103].

Impacts du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des sécheresses

- **Augmentation des températures et baisse des précipitations** : Le changement climatique entraîne des températures plus élevées et une diminution des précipitations en été dans de nombreuses régions, particulièrement en Europe.
- **Augmentation de l'évaporation** : Ces conditions favorisent l'évaporation de l'eau des sols, des lacs et des cours d'eau, creusant le déficit en eau.
- **Intensification et durée** : Les épisodes de sécheresse deviennent plus fréquents, plus graves et plus durables.

Conséquences sur les milieux naturels et la biodiversité [104]

- **Impact sur les écosystèmes aquatiques** : La baisse des niveaux d'eau affecte les espèces aquatiques et la végétation.
- **Détérioration qualitative des ressources en eau** : La réduction de la dilution des polluants combinée au réchauffement des eaux favorise leur dégradation.
- **Risques de désertification** : Certaines régions, notamment le pourtour méditerranéen, voient leur aridité s'accroître, augmentant le risque de désertification.

Conséquences pour les populations et l'économie

- **Pénurie d'eau potable** : L'approvisionnement en eau potable peut être perturbé, forçant les communes à prendre des mesures d'urgence.

- **Impact sur l'agriculture et l'élevage :** Les rendements agricoles diminuent, et l'élevage est impacté par le manque d'eau pour les animaux.
- **Risque d'incendies :** Les périodes de sécheresse sont propices au déclenchement et à la propagation d'incendies.
- **Conséquences socio-économiques :** Les sécheresses peuvent entraîner des déplacements de populations, des tensions sur les ressources en eau et des impacts négatifs sur l'économie (production, emploi, commerce).

I.4. Changement climatique et sécheresse

Le changement climatique amplifie la fréquence, la durée ainsi que l'intensité des épisodes de sécheresse. L'augmentation des températures entraîne une intensification du taux d'évaporation, ce qui assèche les sols, les cours d'eau, les lacs et même les feuilles des plantes. Paradoxalement, un air plus chaud retient plus d'humidité — environ 7 % de plus par degré Celsius — ce qui modifie la fréquence et l'intensité des précipitations. Lorsque la pluie ou la neige tombent, le sol asséché ne peut souvent pas absorber rapidement cet apport. De plus, les températures plus élevées font fondre plus tôt et plus vite la neige des montagnes, réduisant ainsi la durée pendant laquelle les plantes et sols bénéficient du ruissellement ([105]; [106]).

Le réchauffement climatique, par son effet direct sur les températures et la modification des précipitations, réduit les réserves en eau disponibles (neige, glaciers, nappes phréatiques) et prolonge les épisodes de sécheresse, ce qui menace gravement les écosystèmes, l'agriculture, et l'approvisionnement en eau potable, avec des conséquences majeures pour les sociétés humaines [107].

Comment le climat influence la sécheresse

- **L'élévation des températures :** Elle induit une accélération de l'évaporation de l'eau à partir des sols, des cours d'eau et des plans d'eau. [108].
- **Altération des régimes pluviométriques** les régimes pluviométriques sont modifiés, avec moins de pluie régulière, ce qui accentue le déficit hydrique ([109]; [110]).
- **Diminution des réserves d'eau :** la combinaison d'une chaleur accrue et de pluies moins abondantes réduit les stocks d'eau dans la neige, les glaciers et les nappes souterraines, rendant les sécheresses plus longues et sévères [111].

Conséquences des sécheresses accrues

- **Impact sur les écosystèmes :** le stress hydrique provoque la mort de nombreuses plantes, fragilisant les milieux naturels [112].
- **Conséquences agricoles :** L'agriculture, très dépendante de l'eau, subit les effets directs des sécheresses, ce qui peut entraîner des pertes de récoltes et une augmentation de la consommation d'eau pour l'irrigation [105].
- **Risques pour les populations :** l'accès à l'eau potable se complique, particulièrement dans les pays en développement où les groupes vulnérables sont les plus touchés [107].

- **Répercussions économiques** : les sécheresses prolongées impactent lourdement la production agricole, l'énergie et l'activité industrielle, freinant la croissance économique [105].

Perspectives d'avenir

- **Augmentation de la fréquence et de l'intensité** : Des études montrent que la fréquence, l'intensité et la durée des sécheresses ont déjà augmenté et devraient continuer à le faire au cours du 21^e siècle [105].
- **Risques croissants** : Le risque de sécheresses extrêmes augmente avec chaque degré supplémentaire de réchauffement climatique, rendant la situation de plus en plus critique pour la sécurité hydrique mondiale [105].

I.4.1. Les changements climatiques rendent les sécheresses plus fréquentes et plus graves

Les changements climatiques devraient augmenter la fréquence et la sévérité des sécheresses dans certaines régions du Canada déjà confrontées à des pénuries d'eau, notamment le sud des Prairies et l'intérieur de la Colombie-Britannique [107]. Une sécheresse se définit comme une période prolongée de conditions anormalement sèches, entraînant des pénuries d'eau significatives affectant les écosystèmes naturels, l'agriculture et les populations humaines.

- En raison des changements climatiques, la fréquence et la sévérité des sécheresses se sont accrues à l'échelle mondiale, une tendance qui est projetée pour se renforcer à l'avenir [105]; [112]).
- Les changements climatiques intensifient les sécheresses en modifiant les régimes de précipitations et en augmentant les températures, ce qui rend les écosystèmes plus vulnérables aux périodes sèches. La hausse thermique accroît les taux d'évaporation ainsi que la consommation d'eau par la végétation, exerçant une pression supplémentaire sur les ressources hydriques [108], entraînant des conditions de sol plus sèches et une pénurie d'eau [106].
- Les températures mondiales en hausse modifient les régimes de précipitations ([109]; [110]), réduisent la couverture de neige et réduisent les apports en eau issus des glaciers à mesure que ceux-ci rétrécissent.
- Les changements climatiques accélèrent également le développement de sécheresses, rendant les « sécheresses éclair » plus courantes [113]. Cette nouvelle réalité rend les prévisions et la surveillance des sécheresses plus difficiles.
- Au cours du 21^e siècle, la superficie totale des terres soumises à des sécheresses devrait augmenter; plus de 40 % de la superficie des terres mondiales devrait connaître un assèchement toute l'année d'ici la fin du siècle, même dans les scénarios de faibles émissions ([105]; [111]).

I.5. Impacts intégrés des sécheresses

I.5.1. Impacts environnementaux

Les sécheresses entraînent une dégradation progressive des écosystèmes naturels. Elles favorisent :

- La dégradation et l'appauvrissement des sols ;

- La réduction de la couverture végétale ;
- La perte de biodiversité ;
- L'avancée des phénomènes de désertification [114].

I.5.2. Impacts socio-économiques

Les conséquences économiques de la sécheresse affectent principalement les secteurs dépendants des ressources en eau, notamment l'agriculture. Elles se traduisent par :

- Une baisse des rendements agricoles ;
- Une diminution des ressources pastorales ;
- Une augmentation des coûts liés à l'approvisionnement en eau ;
- Une aggravation de l'insécurité alimentaire [65].

I.5.3. Impacts sanitaires et humains

Les sécheresses influencent également les conditions de vie et la santé des populations. Parmi les principaux impacts :

- La propagation de certaines maladies liées à la qualité de l'eau ;
- La dégradation des conditions d'hygiène et d'assainissement ;
- L'augmentation des déplacements et migrations climatiques [67].

I.5.4. Approche intégrée

Les impacts des sécheresses résultent d'interactions complexes entre facteurs climatiques, environnementaux et socio-économiques. Ainsi, une approche intégrée de gestion des ressources en eau et des risques climatiques est nécessaire afin de renforcer la résilience des territoires et de favoriser une adaptation durable face aux changements climatiques.

Conclusion

L'eau est une ressource vitale pour la vie, l'économie et l'équilibre des écosystèmes. Sa distribution inégale dans l'espace et dans le temps en fait un enjeu stratégique crucial, surtout dans les zones arides. L'hydrologie nous aide à comprendre la dynamique de cette ressource essentielle.

Cependant, le changement climatique, amplifié par les activités humaines, bouleverse ces équilibres naturels. La hausse des températures, les modifications des précipitations et l'intensification de l'évapotranspiration rendent les sécheresses plus fréquentes et plus sévères, menaçant la sécurité hydrique, alimentaire et sanitaire de millions de personnes. Ces sécheresses fragilisent les ressources en eau, dégradent les écosystèmes, affectent l'agriculture, accélèrent la désertification et creusent les inégalités sociales.

Pour relever ces défis, il est indispensable d'adopter une gestion intégrée, durable et collaborative des ressources en eau, impliquant scientifiques, décideurs et citoyens. Protéger cette ressource précieuse est une urgence planétaire pour assurer un avenir viable aux générations présentes et futures [105].

Chapitre II : Aperçu général de l'aire d'étude

Introduction

Dans ce chapitre, une analyse approfondie a été menée sur une zone géographique bien définie afin de mieux comprendre les interactions entre les paramètres climatiques et hydrologiques. Cette section présente une description détaillée de la zone d'étude, en abordant sa situation géographique, sa topographie, sa géologie, son occupation du sol, son climat ainsi que son réseau hydrographique. Par ailleurs, les caractéristiques des données utilisées, notamment les précipitations, les températures et les débits, seront également présentées.

II.1. Description géographique de l'aire d'étude

Conformément au découpage hydrographique, le territoire algérien est actuellement subdivisé en cinq régions hydrographiques, gérées depuis 1996 par des structures administratives appelées Agences de Bassin Hydrologique (ABH). (Fig 2.1) [28]:

- Région 1 : Oranais-Chott Chergui ;
- Région 2 : Chellif-Zahrez ;
- Région 3 : Algérois-Soummam-Hodna ;
- Région 4 : Constantinois-Seybouse-Mellegue ;
- Région 5 : Sahara. [28]

L'aire d'étude est située dans le nord-est de l'Algérie, s'étendant entre la longitude 6°41' et 8°39' E et les latitudes 35°12' et 36°57' N, couvrant une superficie totale de 22 354 km² avec une population de 5396900 habitants en 2020, répartis sur huit wilayas : Annaba, El Tarf, Guelma, Skikda, Souk-Ahras, Oum-El Bouaghi, Khenchela, et Tebessa. Elle est bordée par la Mer Méditerranée au nord, par la Tunisie à l'est, par le bassin hydrographique du Sahara au sud et par la région hydrographique d'Algérois-Hodna-Soummam à l'ouest (Fig. 2.1).



Figure 2.1. Carte géographique de la zone d'étude [28]

II.2. Topographie :

La topographie de la zone est caractérisée par les montagnes Tellian, qui forment une crête le long de la mer Méditerranée jusqu'à la frontière tunisienne. La zone est divisée en quatre (04) gammes d'altitude le long d'un axe nord-sud : la gamme de 0 à 400 m comprend la bande côtière nord de l'Atlas Tellien, englobe les vallées de l'Oued Guebli et de l'Oued Safsaf, la dépression de l'Azzaba, les plaines de Guerbes, Annaba-Skikda, Annaba et Tarf, ainsi que les collines côtières d'El-Kala. La zone située entre 400 et 800 mètres d'altitude comprend les monts Skikda-l'Eddough, les hautes plaines de Chelghoum-Laïd, Sadrata-Taoura, Oum-El-Bouaghi, Ain-Beida, El-Madher-Chemora, Bir-El-Ater, ainsi que les collines de l'Oued Zenati [28]; la gamme de 800 à 1200 m comprend les hauts plateaux de Khenchela et d'Ain-Djasser ; et la zone de 1200 à 2200 m comprend les montagnes d'Aurès (El-Mahmel, 2200 m) et les montagnes de Tébessa [115] (Fig. 2.2).

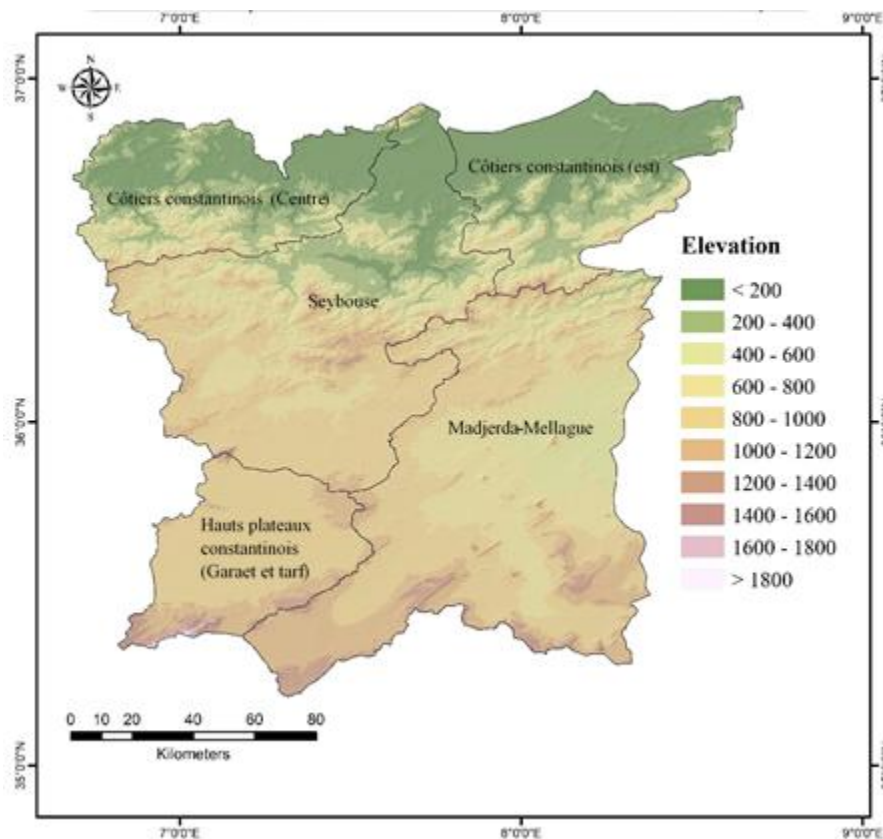


Figure 2.2. Carte topographique de la zone d'étude

II.3. Occupation du sol

La carte mondiale de l'occupation et de l'utilisation des sols (LULC : Land Use and Land Cover) a été produite à partir d'une base de données raster à très haute résolution (10 m) [28], issue des satellites Sentinel-1 et Sentinel-2 via la plateforme World Cover de l'Agence spatiale européenne (ESA), puis reclassée en huit catégories principales (surface d'eau, zones arborées, végétation inondée, terres cultivées, pâturages, zones urbaines et sols nus), à l'aide d'un modèle de classification basé sur l'intelligence artificielle développé par Impact Observatory et entraîné à partir de milliards de pixels annotés par la National Geographic Society, le tout appliqué aux images Sentinel-2 de niveau 2A via

l'ordinateur planétaire de Microsoft, traitant chaque année plus de 400 000 observations terrestres (ESA, 2024).

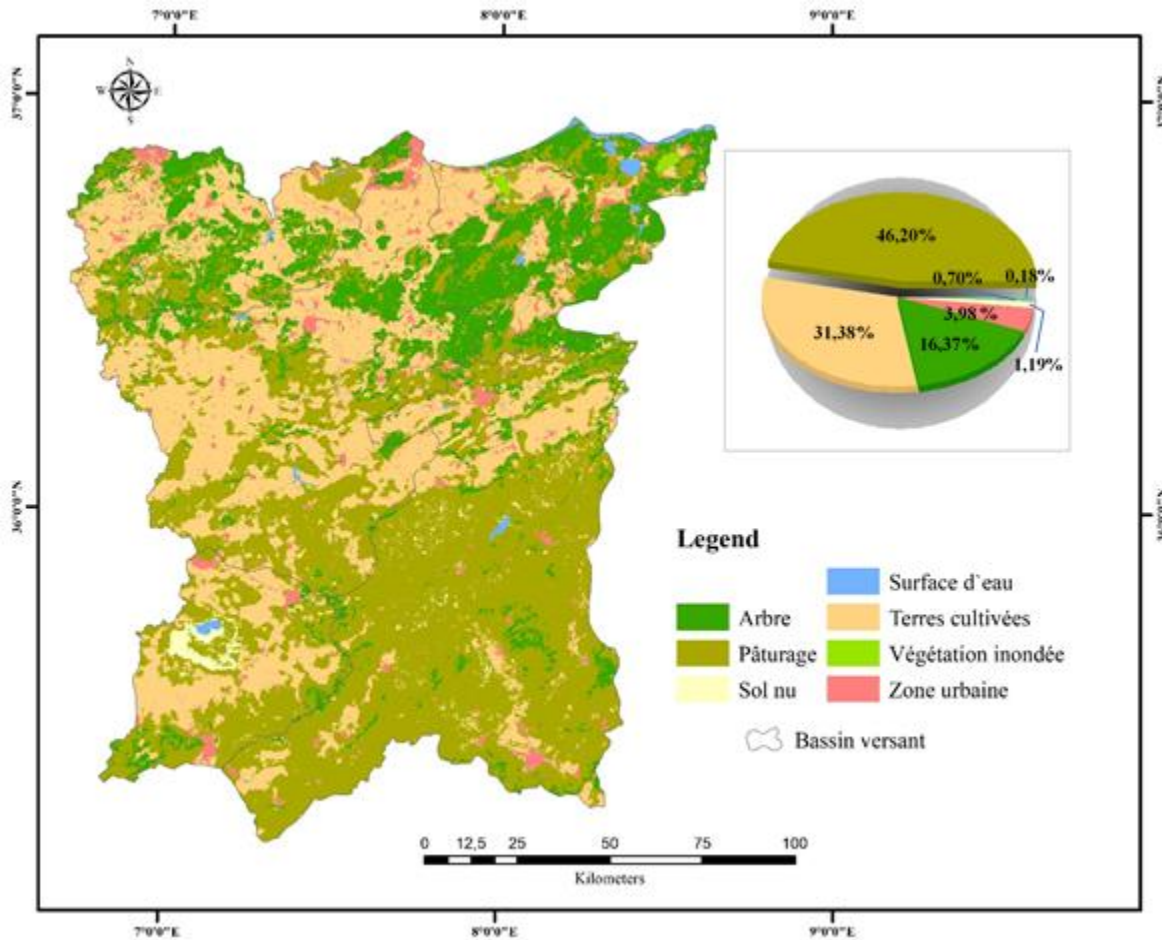


Figure 2.3. Carte d'occupation du sol de l'aire d'étude

L'analyse de la carte d'occupation du sol représentée dans la figure 2.3 révèle que la classe dominante est celle des pâturages, représentant environ 46,20 % de la superficie totale, avec une concentration marquée dans le sud du bassin versant de la Medjerda-Mellègue. En seconde position, on trouve les terres cultivées, qui occupent 31,38 % de la surface, principalement situées au nord, notamment dans les plaines agricoles.

Les zones arborées couvrent 16,37 % du territoire et sont essentiellement localisées le long des chaînes montagneuses au nord ainsi que dans les monts des Aurès. Les zones urbaines représentent 3,98 % et sont concentrées dans les provinces.

Les autres catégories d'occupation du sol apparaissent de manière plus marginale et dispersée : sols nus (1,19 %), surfaces d'eau (0,70 %) et végétation inondée (0,18 %).

II.4. Géologie

L'Algérie du Nord-Est se distingue par une riche diversité géologique, fruit d'une histoire tectonique complexe associée à la création de l'Atlas et aux déplacements alpins. Deux grandes structures

géologiques dominent cette région : l'Atlas Tellien au nord et l'Atlas Saharien au sud, qui sont séparés par les Hautes Plaines Constantinoises. Le substrat est essentiellement composé de formations sédimentaires du Mésozoïque et du Cénozoïque (telles que les calcaires, les marnes et les grès), auxquelles s'ajoutent des formations flyschiques dans les régions plus instables, comme l'Edough ou le massif de Collo. Ces formations géologiques ont conduit à la création de divers types de sols : les calcaires encouragent l'apparition de sols bruns calciques ou rouges méditerranéens, alors que les marnes et argiles produisent des vertisols ou des sols hydromorphes dans les vallées basses (par exemple : vallée du Seybouse). Le fait que des failles actives et des zones sujettes à des tremblements de terre (telles que Constantine ou Mila) soient présentes est une preuve tangible de l'activité tectonique dans la région, ayant un impact indirect sur la stabilité et le développement des sols [116].

La figure 2.4. désigne la classification FAO-UNESCO des sols, qui est un système normalisé largement utilisé en pédologie et en cartographie pédologique. Chaque code représente un type de sol spécifique, accompagné de ses propriétés dominantes, permettant une identification rapide et harmonisée à l'échelle internationale.

Bc : chronic cambisols : Cambisols chroniques : Sols jeunes, modérément évolués, avec un horizon B peu différencié ; "chronique" indique une stabilité prolongée dans le temps.

Bk : calcic cambisols : Cambisols calcaires : Sols jeunes à horizon B peu évolué, contenant une accumulation notable de carbonate de calcium (calcaire).

La : albic luvisols : Luvisols albique : Sols lessivés présentant un horizon clair (albique) en surface dû au lessivage de l'argile et de la matière organique.

Lg : gleyic luvisols : Luvisols gleyiques : Sols lessivés affectés par une hydromorphie (gley), liée à une saturation prolongée en eau.

Vc : chronic vertisols : Vertisols chroniques : Sols argileux riches en smectites, à forte expansion/contraction saisonnière, stables depuis longtemps.

Vp : pellic vertisols : Vertisols pelliques : Sols argileux noirs, riches en matière organique et très gonflants, souvent situés en zones semi-arides.

Wr : planosols : Planosols : Sols présentant un horizon supérieur bien drainé au-dessus d'un horizon dense et imperméable, provoquant un engorgement superficiel.

Xh : haplic xerosols : Xérosols hapliques : Sols typiques des zones arides à très arides, à profil simple sans accumulation importante de sels ou de carbonates.

Xk : clasic xerosols : Xérosols calcaires : Sols arides avec accumulation marquée de carbonates dans le profil.

Zo: orthic solonchaks : Solonchaks orthiques : Sols salins typiques, présentant une forte concentration de sels solubles à proximité de la surface.

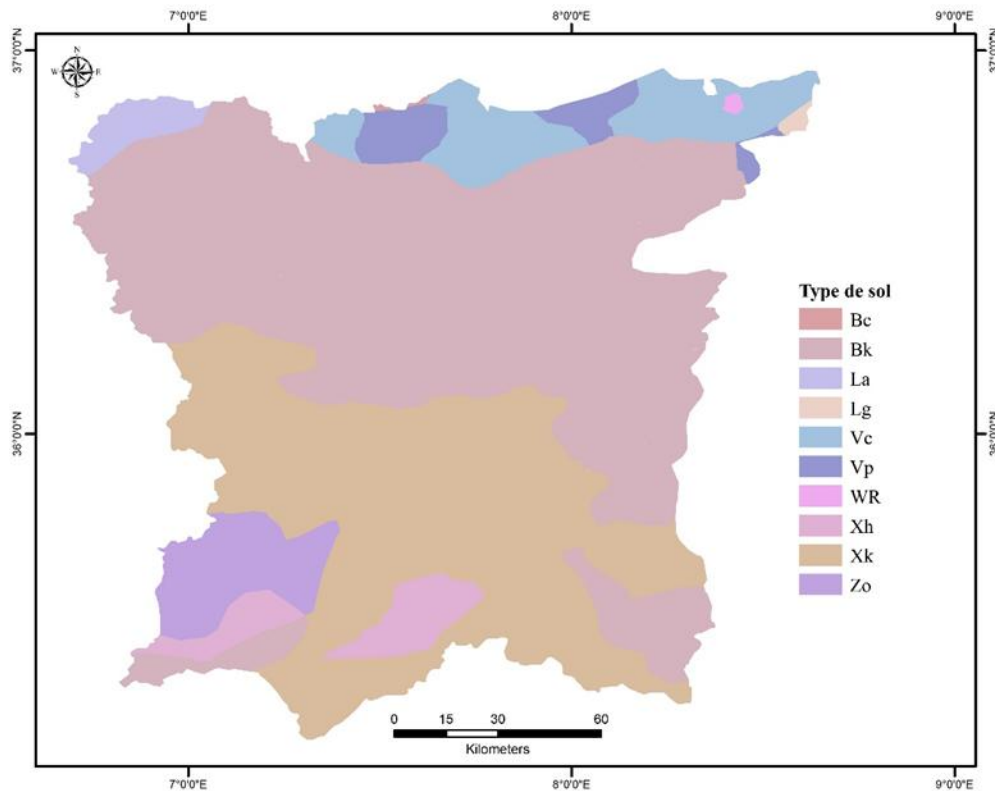


Figure 2.4. Carte géologique des types de sol de la zone d'étude

II.5. Climat

La région Nord-Est de l'Algérie présente un climat méditerranéen avec une influence continentale, marqué par des étés chauds et secs, et des hivers doux à frisquets et humides. Dans les régions côtières (Annaba, Skikda), la température moyenne annuelle oscille entre 15 °C et 18 °C, tandis qu'elle peut chuter à 10 °C dans les zones montagneuses de l'intérieur (Aurès, Souk Ahras). La distribution des précipitations varie en fonction de l'altitude et de la proximité de la mer : elles excèdent 1000 mm/an dans les régions côtières et forestières (Edough, Collo), tandis qu'elles diminuent à 400-600 mm/an dans les hauts plateaux (Guelma, Oum El Bouaghi). Cette répartition inégale encourage une variabilité significative de l'hydrologie et augmente le risque d'un stress hydrique saisonnier, surtout durant l'été. Ainsi, le climat joue un rôle structurant dans l'organisation des activités humaines, en particulier l'agriculture qui est fortement tributaire des précipitations hivernales [117].

II.6. Situation hydrologique

Le réseau hydrographique désigne l'ensemble des cours d'eau, qu'ils soient naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui assurent l'écoulement des eaux à la surface terrestre.

Sa configuration dépend de plusieurs facteurs, notamment la nature et la structure géologique du substratum, la topographie (pente des terrains), ainsi que les conditions climatiques de la région, qui influencent directement sa densité et son organisation.

Le réseau hydrologique des sous-bassins a été élaboré à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) d'une résolution spatiale de 30 mètres, permettant de reconstituer le chevelu hydrographique et de

déterminer les ordres des cours d'eau. Le MNT, qui représente en trois dimensions la surface topographique terrestre à partir des données altimétriques, exclut les éléments en surface tels que la végétation et les constructions.

Les données issues du MNT ont été exploitées pour générer la carte des pentes, délimiter le bassin versant principal et extraire le réseau hydrographique associé. Cette extraction a été effectuée à l'aide du logiciel ArcGIS 10.8, selon une méthodologie structurée illustrée à la figure 2.5 ci-dessous.

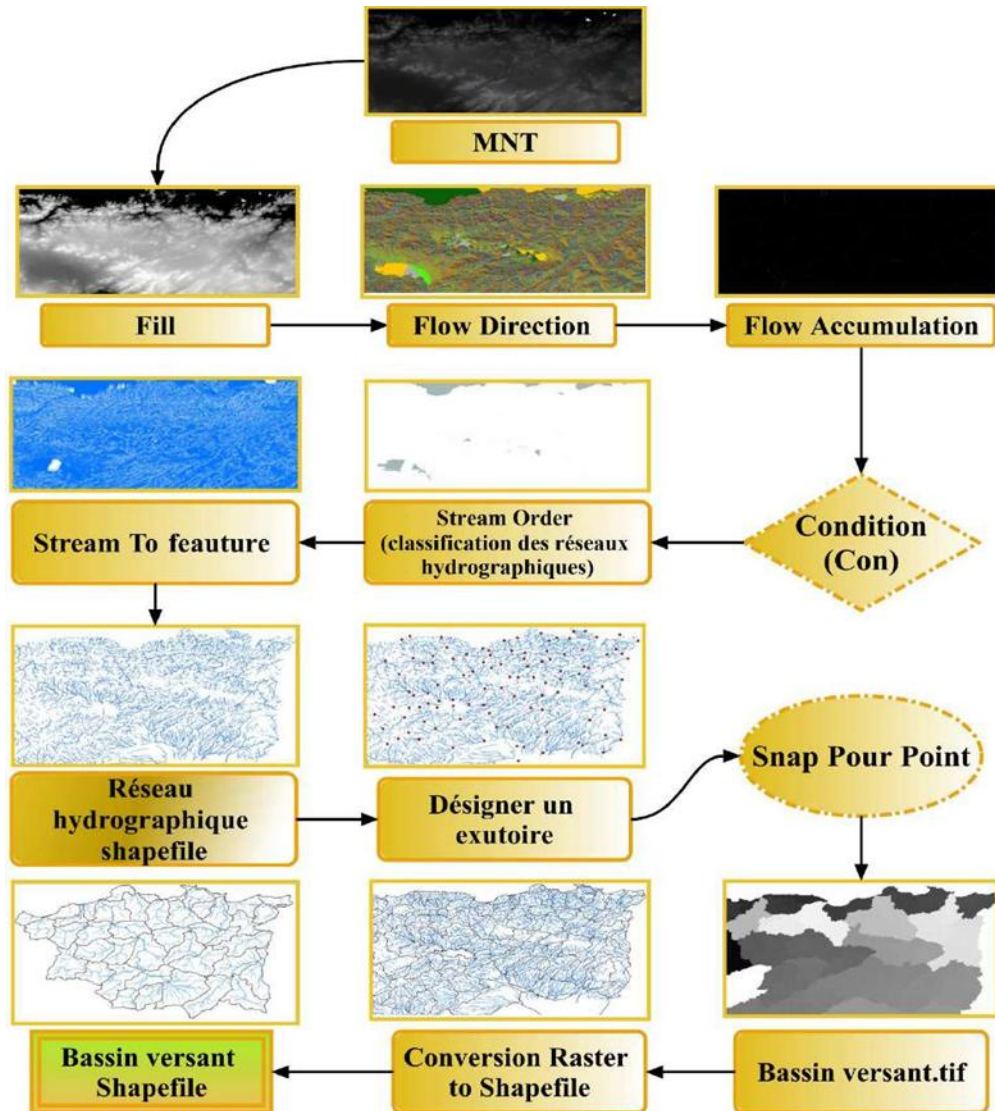


Figure 2.5. Diagramme pour la délimitation des bassins et implantation du réseau hydrographique

Le processus commence par l'application de l'outil Fill, destiné à corriger les imperfections du MNT, notamment les dépressions fermées ou "cuvettes", qui perturbent l'écoulement. Ensuite, les directions d'écoulement (Flow Direction) et l'accumulation des flux (Flow Accumulation) sont calculées pour chaque cellule du modèle. Le choix du seuil d'accumulation est crucial, car il influence la densité du réseau extrait : un seuil faible produit un réseau plus dense, tandis qu'un seuil élevé tend à simplifier le réseau.

Une fois le réseau hydrologique généré, d'autres analyses sont menées pour classer les cours d'eau selon leur hiérarchie. La délimitation topographique des bassins versants repose sur la localisation d'un exutoire unique, à partir duquel les lignes de crête sont tracées. L'outil Watershed permet alors de délimiter les sous-bassins associés à chaque exutoire. Ces unités sont ensuite converties en polygones et intégrées à la surface totale drainée, incluant les plans d'eau.

La hiérarchisation du réseau hydrographique est réalisée selon la méthode de Strahler (1964), qui attribue un ordre au cours d'eau en fonction de sa position dans le réseau : un segment sans affluent est de premier ordre ; deux segments de même ordre fusionnent pour former un segment d'ordre supérieur, et ainsi de suite. (Fig. 2.6)

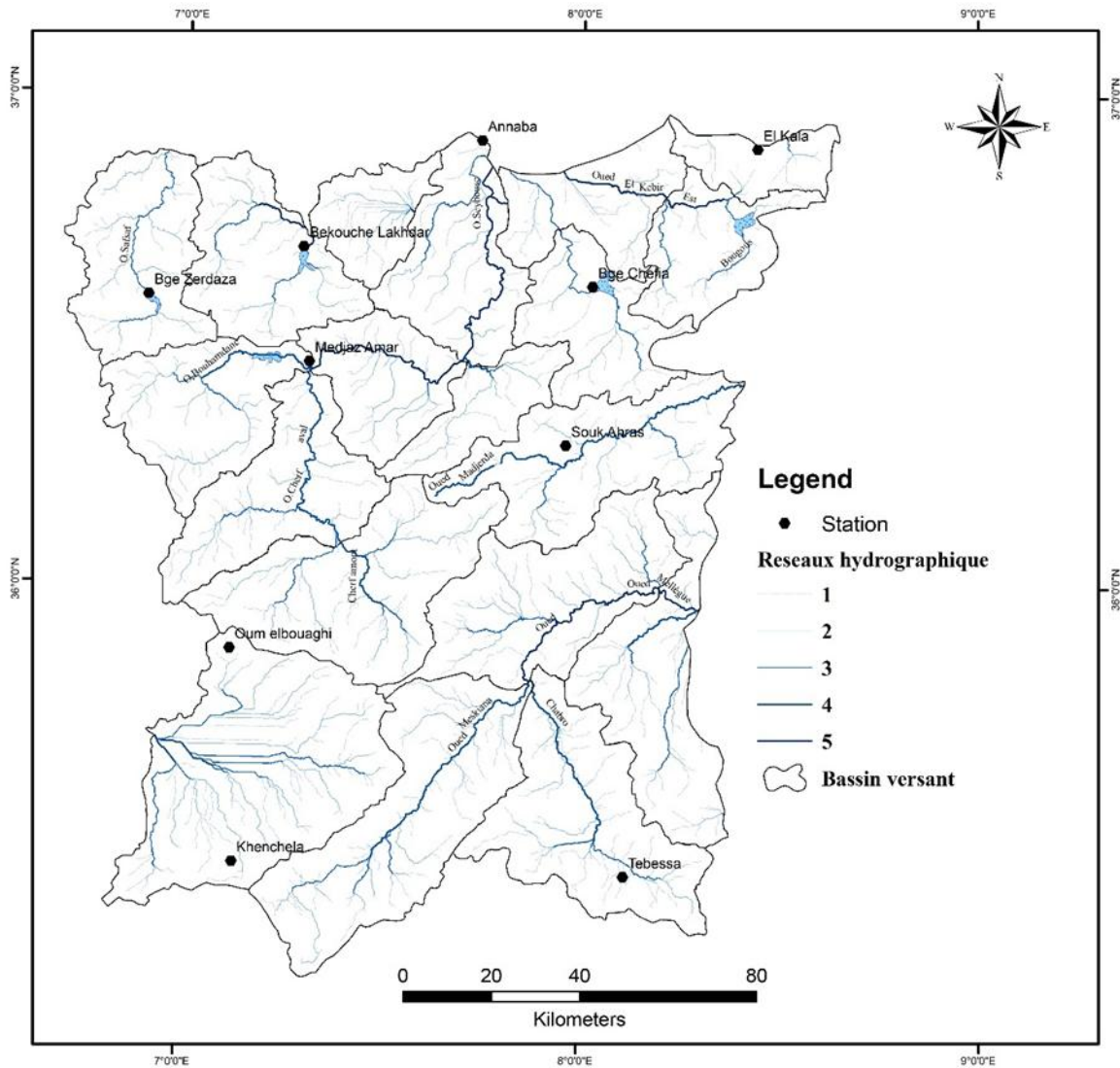


Figure 2.6. Carte des réseaux hydrographiques des bassins versants

Le tableau 2.1 ci-dessous représente le découpage des bassins versants de notre région hydrographique ont sous bassins versants désignant leurs code, surface, longueurs des oueds permanents, longueur des oueds temporaires et longueur totale.

Tableau 2.1. Caractéristiques morphologiques des sous bassins versants

Bassin versant	Nom de sous bassin	Code sous bassin	Surface Km ²	Longueur des oueds permanents Lp en Km	Longueur des oueds temporaires Lt en Km	Longueur totale en Km
MEDERDA-MELLAGUE 12	Oued MADJERDA	1201	1505	154,85	555,04	709,89
	Oued MESKIANA	1202	1878	220,35	1054,23	1274,57
	Oued CHABRO	1203	1567	119,59	689,82	809,42
	Oued MELLAGUE AMONT	1204	1505	116,71	550,61	667,32
	Oued MELLAGUE AVAL	1205	1415	103,91	539,13	643,04
SEYBOUSE 14	Oued CHERF AMONT	1401	1739	243,13	1211,36	1454,49
	Oued CHERF AVAL	1402	1166	190,38	904,48	1094,87
	Oued BOUHAMDANE	1403	1136	158,28	895,22	1053,49
	Oued SEYBOUSE MOYENNE	1404	818	177,20	723,44	900,63
	Oued MELAH	1405	555	85,65	344,66	430,31
	Oued SEYBOUSE MARITIME	1406	1057	235,59	716,19	951,78
CONSTANTINOIS EST 03	Oued BOUNAMOUSA	0315	348	139,07	570,02	709,09
	Oued KEBIR EST	0316	1062	146,92	530,65	677,57
	Oued MAFRAGH	0317	744	113,35	301,52	414,87
	COTIERS LA CALLE	0318	355	33,07	192,82	225,89
CONSTANTINOIS CENTRE 03	Oued SAFSAF	0309	1130	219,21	946,30	1165,51
	Oued KEBIR HAMMAM	0311	1223	256,49	1050,35	1306,83
	Lac FETZARA	0313	721	56,80	351,93	408,73
HAUTS PLATEAUX CONSTANTINOIS	GARAET ET TARF	0707	2430	185,07	1220,64	1405,71

II.7. La Base de données

A ce stade, des données climatiques et hydrologiques essentielles ont été recueillies pour appuyer l'étude. La base de données a été obtenue à partir de dix (10) stations météorologiques couvrant la période hydrologique de 1975 – 2021 (Tab. 2.2).

Les données relatives aux précipitations ont été obtenues auprès de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). Par ailleurs, les données de température proviennent de l'Office National de la Météorologie (ONM), tandis que les informations sur les débits fluviaux ont été collectées par l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) ainsi que par le département d'hydraulique de la wilaya de

Skikda. Cet ensemble de données constitue une base solide pour l'analyse de la variabilité climatique à long terme et des tendances hydrologiques dans la région étudiée.

Tableau 2.2. Coordonnées et types de la base de données des stations par bassin versant

Bassin versant	Stations	Wilaya	Coordonnées		Base de Données
			X (km)	Y (km)	
Seybouse	Annaba	Annaba	951.1000	411.3500	P, T
	Medjez Amar	Guelma	907.2298	360.4421	P, T, D
Constantinois (Est)	El Kalla	El Taref	1012.3078	415.0438	P, T
	Barrage Chefia	El Taref	977.1500	381.3000	P, T, D
Constantinois (Centre)	Barrage Zerdaza	Skikda	875.3000	374.6000	P, T, D
	Bekkouch Lakhdar	Skikda	898.9990	386.2050	P, T, D
Madjerda-Mellague	Souk Ahras	Souk Ahras	971.2980	343.7510	P, T
	Tébessa	Tébessa	991.9000	247.2000	P, T
HAUTS PLATEAUX CONSTANTINOIS	Oum El Bouaghi	Oum El Bouaghi	898.2859	293.5758	P, T
	Khenchela	Khenchela	903.9185	249.4205	P, T

P : Précipitation, **T** : Température, **D** : Débit

II.7.1. Précipitation

L'étude des précipitations constitue une étape essentielle dans l'analyse hydrologique, car elles représentent la principale source d'alimentation des ressources en eau de surface et souterraines. Leur variabilité spatiale et temporelle affecte directement le régime hydrologique des cours d'eau, la recharge des nappes phréatiques ainsi que les risques d'inondation et de sécheresse. L'analyse pluviométrique facilite la compréhension du comportement hydrologique d'un bassin versant, permet d'identifier les tendances climatiques et fournit des données essentielles pour la gestion durable des ressources en eau ainsi que pour la planification des aménagements hydrauliques.

II.7.1.1. Précipitations annuelles

L'analyse des précipitations annuelles constitue une étape fondamentale pour comprendre la variabilité climatique et ses impacts sur les ressources en eau. Cette analyse met en lumière les tendances, les variations interannuelles ainsi que les anomalies pluviométriques, qui influencent directement la disponibilité en eau, la recharge des nappes, l'activité agricole et la gestion des risques hydrologiques tels que les sécheresses et les inondations. L'étude s'appuie généralement sur des séries chronologiques de données pluviométriques provenant de stations météorologiques ou de bases climatiques, et utilise des méthodes statistiques (moyenne, écart-type, coefficient de variation, indice de variabilité, etc.) pour quantifier l'hétérogénéité spatiale et temporelle des précipitations. Ce type d'analyse apporte des informations clés pour la planification et la gestion durable des ressources en eau à l'échelle d'un bassin versant ou d'une région..

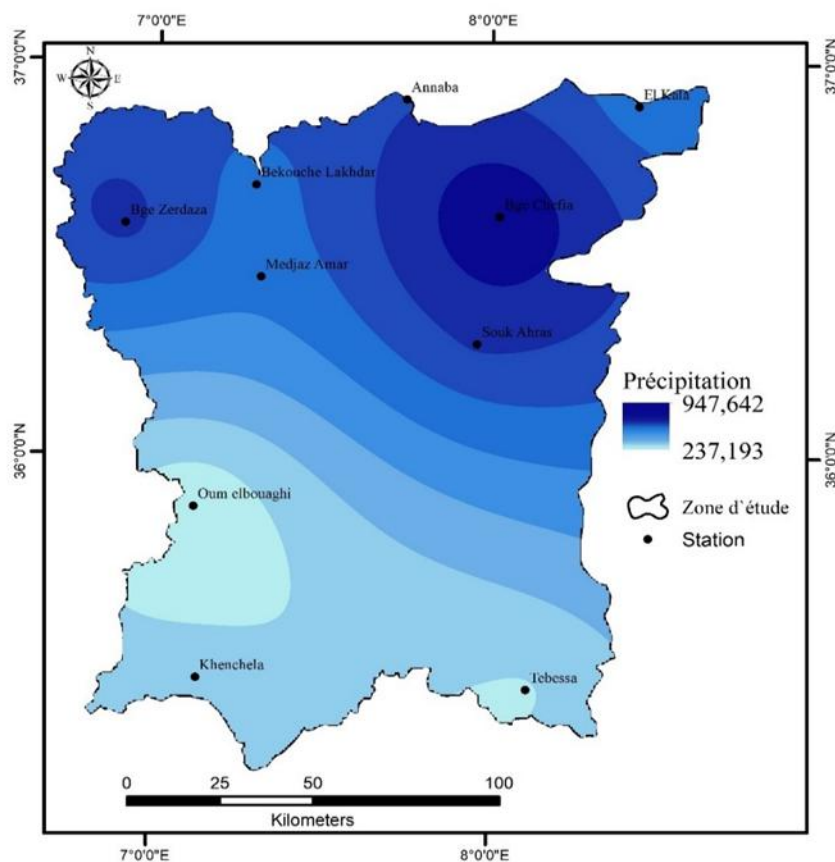


Figure 2.7. Carte de la précipitation moyenne annuelle

Tableau 2.3. Les précipitations Moyennes, minimales et maximales annuelles des stations

Stations	Précipitation (mm)		
	Moyenne	Minimum	Maximum
Annaba	659,343	346,000	1008,000
El Kalla	569,475	276,959	943,061
Barrage Chefia	784,050	353,700	1261,400
Medjez Amar	568,089	202,330	946,400
Barrage Zerdaza	687,078	421,800	1039,400
Bekkouch Lakhdar	582,024	187,100	989,400
Souk Ahras	676,166	342,379	1134,653
Tébessa	368,796	185,000	624,000
Oum El Bouaghi	315,208	163,590	518,119
Khenchela	407,147	196,496	751,000

Les pluies moyennes annuelles sont comprises dans l'ensemble entre 500 et 900 mm dans le Nord et centre de notre région d'étude. Des pluies moyennes inférieures à 500 mm sont enregistrées aux stations situées au sud.

La moyenne annuelle des précipitations observées à la station de barrage Chefia (784,050 mm) est plus élevée que celle de Oum El Bouaghi (315,208 mm) est plus faible

En effet, nous observons une année exceptionnelle ayant touché les stations de barrage Chefia en 1986/1987 avec 1261,400 mm, Souk-Ahras en 2003/2004 avec 1134,653 mm et Annaba en 2004/2005 avec 1008,000 mm et barrage Zerdaza en 1984/1985 avec 1039,400. Le minimum est enregistré en 1993/1994 avec 185 mm à la station de Tébessa, et 196,496 mm à Khenchela et il est de 163,590 mm enregistré en 2000/2001 au niveau de Oum El Bouaghi.

II.7.1.2. Précipitations moyennes mensuelles

L'analyse des précipitations moyennes mensuelles constitue une étape essentielle pour comprendre la répartition et la variabilité des ressources en eau dans un bassin versant. Elle permet d'identifier les périodes humides et sèches au cours de l'année, de caractériser le régime pluviométrique et d'évaluer son impact sur les activités agricoles, hydrologiques et environnementales. L'étude de cette répartition mensuelle fournit ainsi des informations précieuses pour la planification et la gestion durable des ressources en eau, en particulier dans les régions soumises à une forte variabilité climatique.

Tableau 2.4. Les précipitations moyennes mensuelles des stations

	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août
Annaba	38,257	62,792	104,162	98,102	100,100	80,107	70,591	55,025	33,191	8,738	1,445	6,833
El Kalla	49,401	41,070	107,613	94,719	46,948	67,680	57,991	68,102	23,748	3,107	2,127	6,968
Barrage Chefia	40,006	72,018	111,903	114,276	110,597	90,128	86,962	76,426	53,095	14,656	3,189	10,794
Medjez Amar	37,918	36,412	66,879	91,425	82,043	57,424	63,270	55,286	40,716	21,921	4,205	10,589
Barrage Zerdaza	36,628	55,358	88,549	113,488	100,666	88,874	75,067	58,655	42,926	12,038	4,243	10,585
Bekkouch Lakhdar	26,826	49,264	80,646	100,060	85,651	80,701	70,063	47,915	26,314	7,638	1,134	5,810
Souk Ahras	39,771	47,914	80,262	97,483	96,856	76,461	81,229	66,091	46,604	19,448	5,573	18,475
Tébessa	46,484	31,124	33,523	30,610	27,221	24,708	41,316	33,623	37,014	26,497	13,353	23,322
Oum El Bouaghi	31,669	24,844	31,415	22,763	24,747	26,178	35,781	27,735	44,019	21,953	7,117	17,760
Khenchela	35,566	50,470	42,683	32,935	25,113	34,187	35,934	21,839	49,187	34,888	16,606	27,739

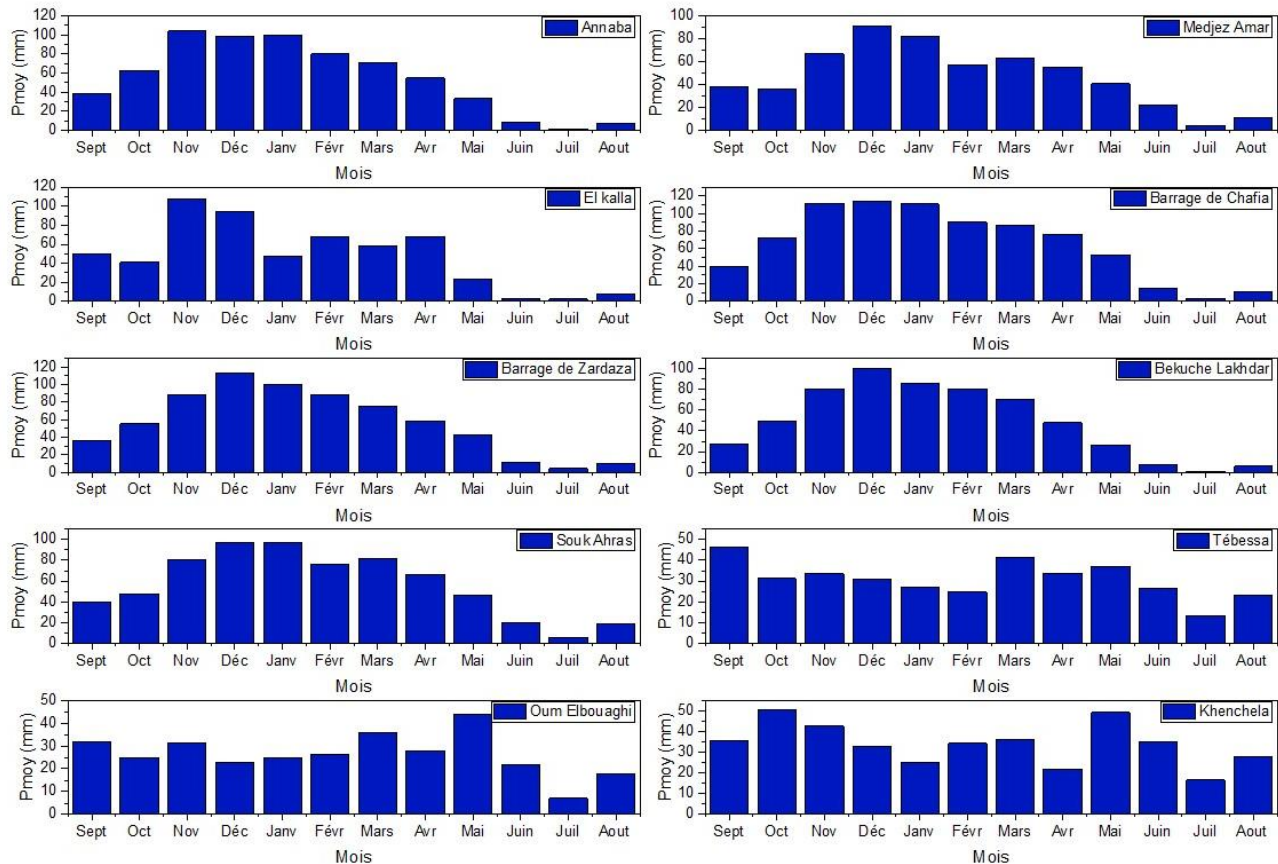


Figure 2.8. Histogramme des précipitations moyennes mensuelles par station

La figure ci-dessus illustre les hauteurs mensuelles de précipitations (en mm) enregistrées dans différentes stations de notre zone d'étude. On observe que le régime pluviométrique des trois stations situées au nord — Annaba, El Kalla et Barrage Chefia — se distingue par des pics de précipitations à des périodes différentes. Le mois le plus pluvieux est décembre à la station de Barrage Chefia, avec une hauteur de 114,276 mm. À El Kalla, c'est en novembre que les précipitations sont les plus importantes, tandis qu'à Annaba, ce maximum est atteint en janvier. En revanche, juillet est le mois le plus sec pour l'ensemble de ces trois stations, avec des cumuls très faibles : 1,445 mm à Annaba, 2,127 mm à El Kalla, et 3,189 mm à Barrage Chefia.

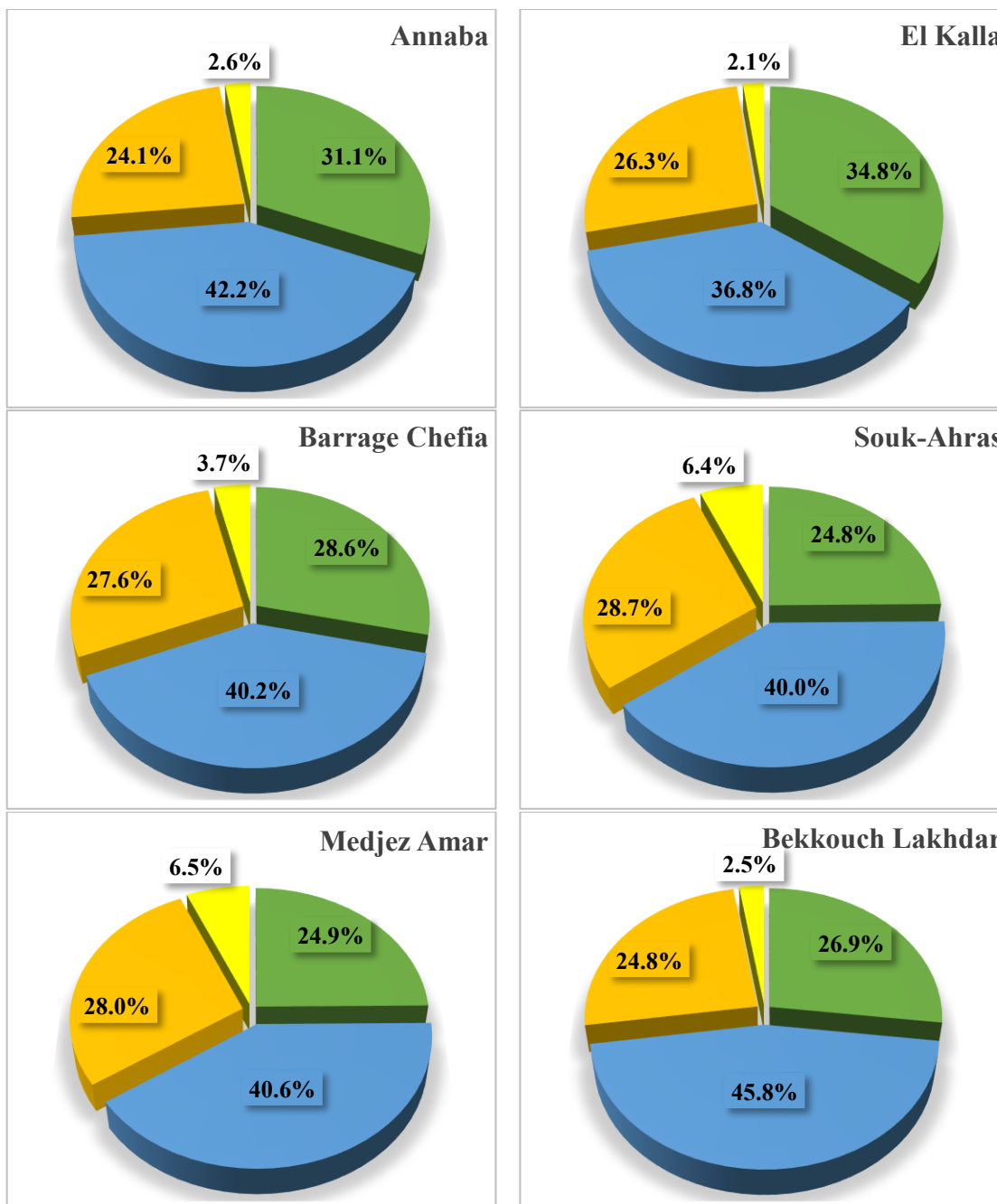
La courbe représentant l'évolution des précipitations mensuelles moyennes au centre de la région met en évidence l'irrégularité du régime pluviométrique. Le mois de décembre reste le plus arrosé, avec des valeurs atteignant 113,488 mm à la station de Barrage Zerdaza, 100,060 mm à Bekkouch Lakhdar, 97,483 mm à Souk-Ahras, et 91,425 mm à Medjez Amar. À l'opposé, le mois de juillet marque un creux important : 4,205 mm à Medjez Amar, 4,243 mm à Barrage Zerdaza, 1,134 mm à Bekkouch Lakhdar, et 5,573 mm à Souk-Ahras.

Dans le sud de la région, les données issues des stations (présentées dans le tableau 21) confirment une variation des précipitations soumise aux rythmes saisonniers. Les moyennes mensuelles indiquent que les maxima sont atteints à des périodes différentes selon les stations : en octobre à Khenchela (50,470 mm), en mai à Oum El Bouaghi (44,019 mm) et en septembre à Tébessa (46,484 mm). Le mois de juillet

reste le moins pluvieux dans cette zone également, avec des hauteurs de 7,117 mm à Oum El Bouaghi, 13,353 mm à Tébessa, et 16,606 mm à Khenchela.

II.7.1.3. Précipitation saisonnière

L'interprétation des données pluviométriques selon une répartition saisonnière est faite suivant les saisons agricoles (Automne : Septembre, Octobre et Novembre, Hiver : Décembre, Janvier et Février, Printemps : Mars, Avril et Mai, Été : Juin, Juillet et Aout).



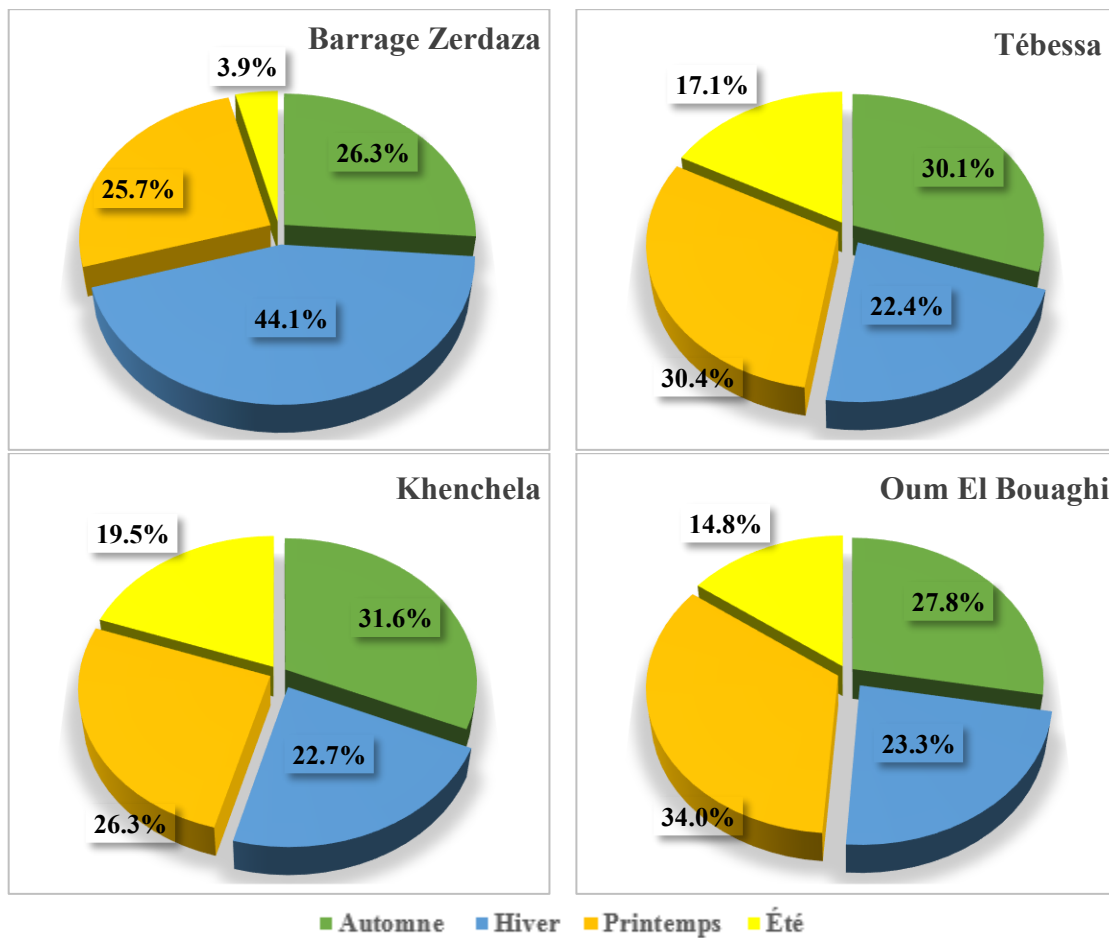


Figure 2.9. Les pourcentages saisonniers des précipitations par station

L'analyse des précipitations saisonnières moyennes dans les dix stations révèle une variation climatique marquée entre le nord, le centre et le sud de la région étudiée. Au nord (Annaba, El Kalla, Barrage Chefia), le régime pluviométrique est typiquement méditerranéen, avec une nette prédominance des précipitations hivernales (entre 36 % et 42 %), suivies de l'automne et du printemps, alors que l'été y reste très sec (autour de 2 à 4 %). Au centre (Souk-Ahras, Medjez Amar, Bekkouch Lakhdar, Barrage Zerdaza), on observe une répartition plus équilibrée entre hiver, printemps et automne, bien que l'hiver reste généralement dominant (près de 40 à 45 %), tandis que l'été y est légèrement plus humide que dans le nord, notamment à Souk-Ahras et Medjez Amar où il dépasse les 6 %. En revanche, dans les stations du sud (Tébessa, Khenchela, Oum El Bouaghi), le régime pluviométrique change significativement : le printemps devient la saison la plus arrosée (jusqu'à 34 % à Oum El Bouaghi), suivi de l'automne, avec une part estivale inhabituellement élevée (jusqu'à 19,5 % à Khenchela), et un recul net des précipitations hivernales (autour de 22 à 23 %). Cette transition traduit le passage d'un climat méditerranéen humide au nord vers un climat plus continental et irrégulier au sud, influencé par l'altitude et l'éloignement de la mer, avec des conséquences importantes sur la gestion de l'eau, l'irrigation agricole et l'aménagement du territoire.

En résumé, le climat de notre région a des saisons distinctes, avec une période humide et fraîche et une période sèche et chaude. Cela correspondrait à un climat méditerranéen semi-humide au nord et à un climat semi-aride au sud.

II.7.2. Température

Les précipitations ne constituent pas l'unique paramètre définissant le climat dans le temps et l'espace ; d'autres facteurs, tels que la température de l'air, jouent également un rôle déterminant.

L'analyse de la température constitue un élément fondamental dans l'étude du climat, car elle influence directement les processus hydrologiques, agricoles et écologiques. L'évolution des températures, qu'elle soit quotidienne, mensuelle ou annuelle, permet de caractériser le régime thermique d'une région et de mettre en évidence ses particularités climatiques. L'étude de la variabilité des températures est également essentielle pour évaluer les impacts du changement climatique, comprendre les besoins en ressources en eau et adapter les activités humaines, notamment agricoles, aux conditions locales.

II.7.2.1. Températures annuelles

La température moyenne annuelle est un indicateur climatique essentiel qui représente la valeur moyenne des températures observées tout au long d'une année. Elle permet de caractériser le régime thermique général d'une région et de comparer son évolution d'une année à l'autre. L'étude de la température moyenne annuelle est particulièrement importante pour évaluer les tendances climatiques à long terme, détecter les effets du réchauffement global et analyser leurs répercussions sur les ressources naturelles, l'agriculture et les écosystèmes.

Les données correspondantes aux températures que nous possédons sont des valeurs moyennes mensuelles et annuelles mesurées à 10 stations durant 46 ans (1975/1976 - 2020/2021).

Tableau 2.5. Les températures Moyennes, minimales et maximales annuelles des stations

Stations	Température (°C)		
	Moyenne	Minimum	Maximum
Annaba	17,98	16,80	18,95
El Kalla	17,88	15,82	19,33
Barrage Chefia	24,75	18,93	31,42
Medjez Amar	18,19	16,47	19,88
Barrage Zerdaza	17,97	16,72	19,74
Bekkouch Lakhdar	18,68	17,43	20,45
Souk Ahras	16,06	14,11	17,58
Tébessa	16,54	14,60	19,78
Oum El Bouaghi	17,18	15,18	18,83
Khenchela	17,42	15,30	18,70

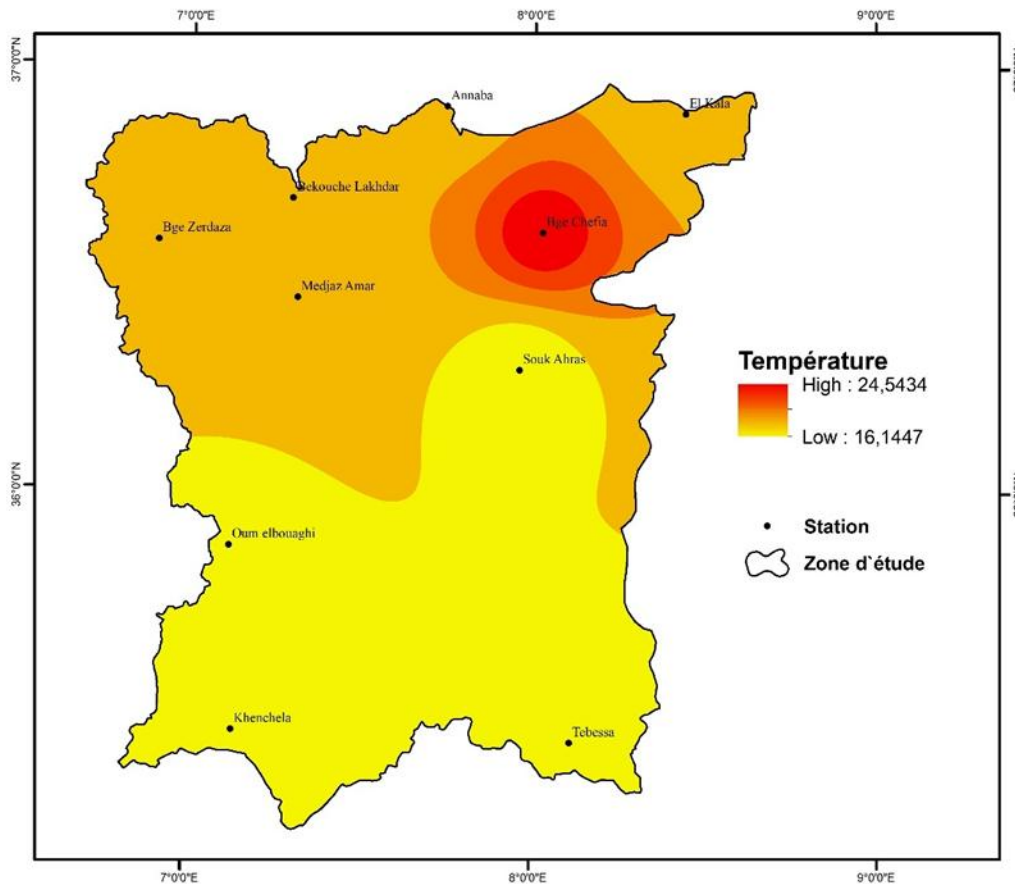


Figure 2.10. Carte des températures moyennes annuelles

Dans la partie nord de la zone d'étude, les températures annuelles oscillent entre 17 et 24 °C, avec des maxima pouvant dépasser 30 °C, en particulier au niveau des stations situées près du barrage Chefia. Les températures les plus basses, comprises entre 14 et 17 °C, se situent quant à elles dans la zone sud.

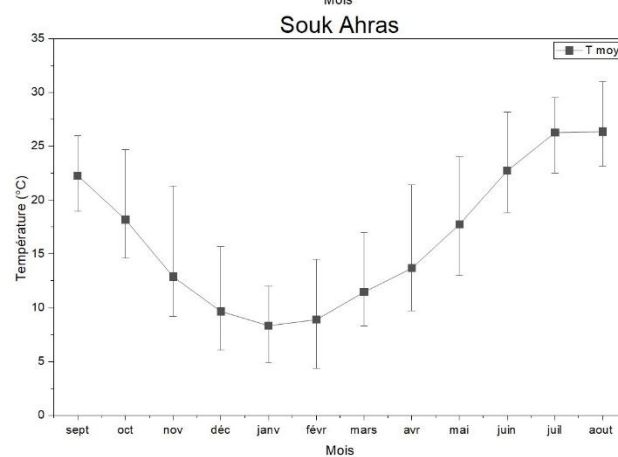
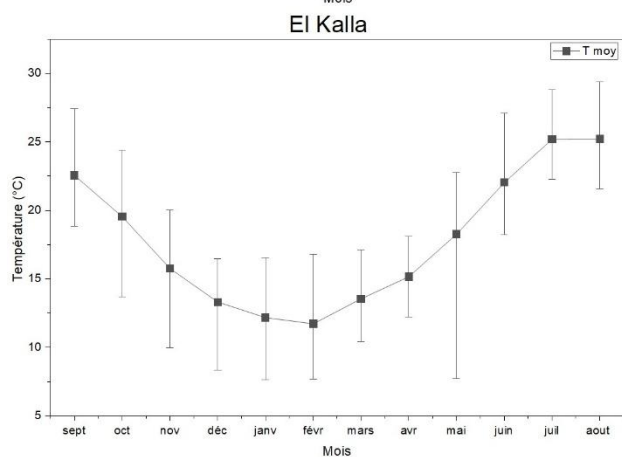
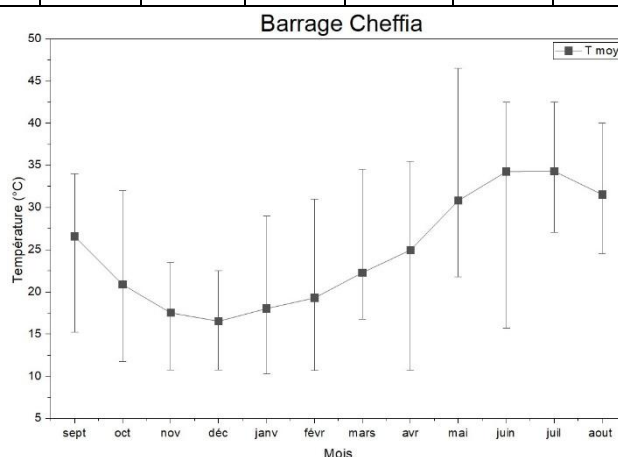
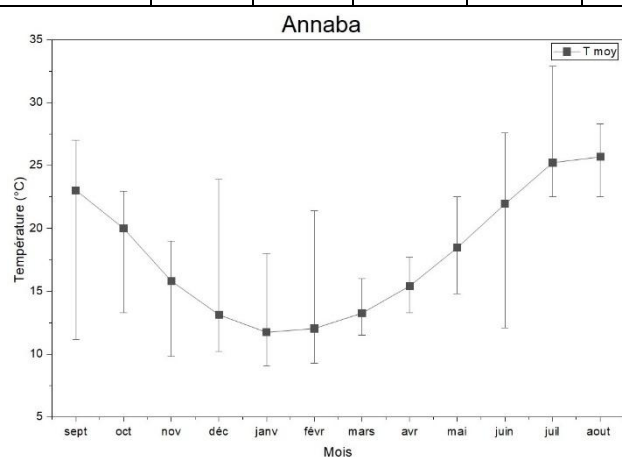
Les stations du centre enregistrent des températures moyenne annuelles varient entre 16 °C et 18°C.

II.7.2.2. Températures moyennes mensuelles

L'analyse des températures moyennes mensuelles permet de mettre en évidence la variabilité thermique au cours de l'année. Elle consiste à calculer la moyenne des températures enregistrées chaque mois, offrant ainsi une vision claire des contrastes saisonniers (hiver, été, intersaisons). Cette approche est utile pour identifier les périodes froides ou chaudes, suivre les fluctuations climatiques et mieux comprendre les relations entre température, précipitations et autres paramètres climatiques. Elle constitue également un indicateur essentiel pour l'agriculture, la gestion de l'eau et l'évaluation des impacts du changement climatique.

Tableau 2.6. Les températures moyennes mensuelles des stations

	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août
Annaba	23,03	20,00	15,81	13,13	11,73	12,04	13,26	15,41	18,47	21,94	25,22	25,68
El Kalla	22,56	19,55	15,77	13,32	12,18	11,73	13,55	15,17	18,27	22,03	25,20	25,21
Barrage Chefia	31,55	26,57	20,86	17,52	16,52	18,02	19,29	22,29	24,96	30,83	34,26	34,28
Medjez Amar	24,63	19,89	15,55	10,95	10,50	10,72	12,70	15,10	18,90	24,29	27,41	27,70
Barrage Zerdaza	23,73	20,41	16,30	12,93	12,29	11,99	13,61	15,48	18,36	21,29	24,33	24,95
Bekkouch Lakhdar	24,44	21,12	17,01	13,64	13,00	12,70	14,32	16,19	19,07	22,00	25,03	25,66
Souk Ahras	22,28	18,19	12,88	9,66	8,34	8,90	11,46	13,67	17,76	22,73	26,27	26,35
Tébessa	21,96	17,41	10,90	7,67	6,68	7,80	10,39	13,98	18,68	23,76	27,19	26,33
Oum El Bouaghi	23,18	18,45	12,09	8,67	7,51	8,59	11,34	14,59	19,76	25,12	28,84	28,13
Khenchela	23,34	18,97	12,36	8,80	7,49	9,05	11,55	15,36	20,45	25,38	28,44	27,97



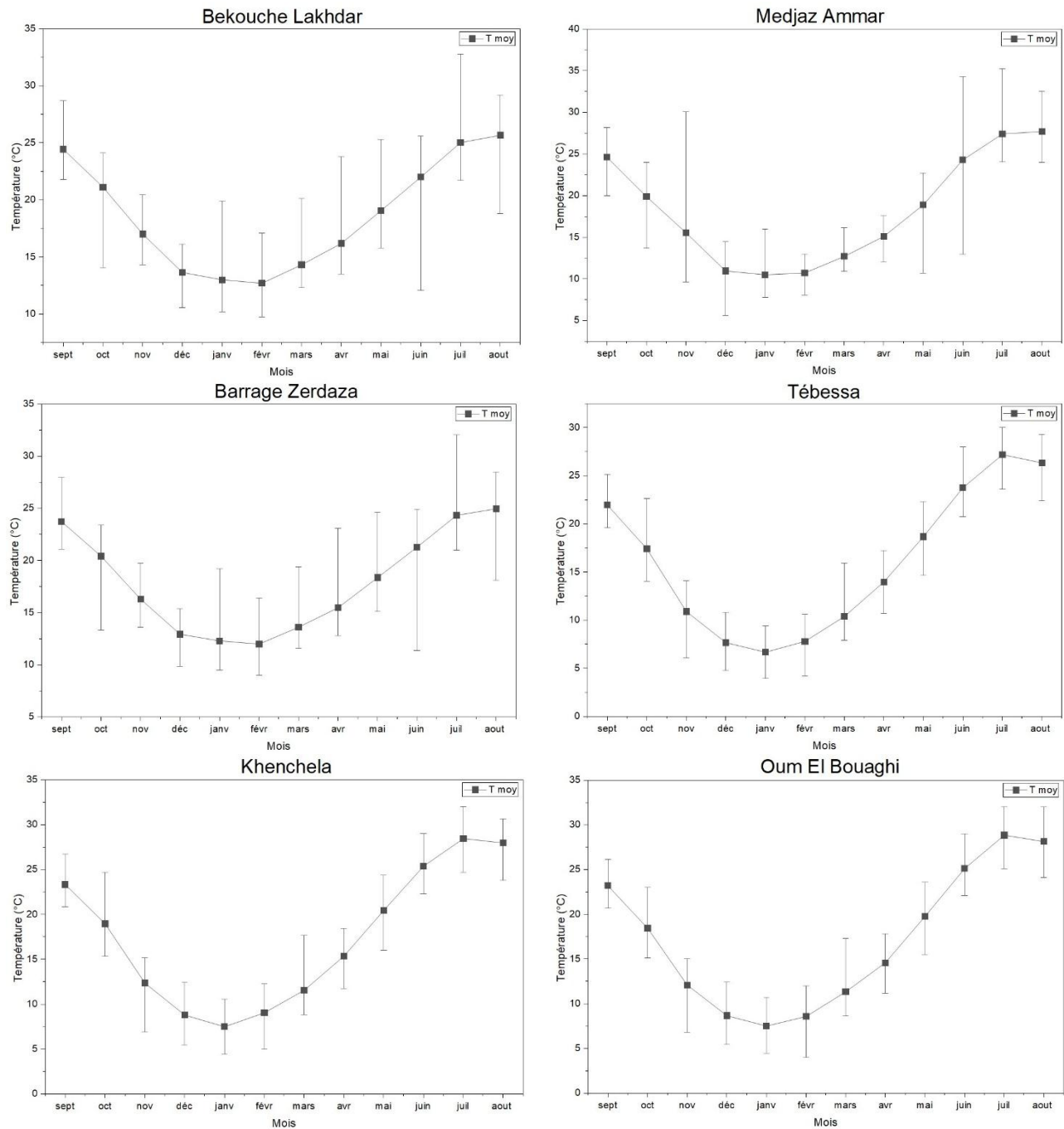


Figure 2.11. Répartitions mensuelles moyennes, minimales et maximales des températures par station

D'après la figure, les températures les plus basses, correspondant à la période froide, se situent entre novembre et avril, avec un minimum observé en janvier, variant de 11 à 16 °C. Les températures élevées, caractérisant la période chaude, dépassent 30 °C durant les mois de juin à septembre, avec un pic en août où la station du barrage Chefia enregistre une température maximale de 34,28 °C.

Les données recueillies dans les quatre stations de mesure révèlent un schéma inverse à celui des précipitations. La variation des températures suit une courbe en forme de « U », avec des minimums enregistrés en février pour les stations de Bekkouch Lakhdar (12,70 °C) et Barrage Zerdaza (11,99 °C),

tandis qu'à Medjez Amar (10,50 °C) et Souk-Ahras (8,34 °C), le minimum est observé en janvier. Les températures maximales sont relevées au cours du mois d'août.

Selon la figure 2.11, les températures sont particulièrement basses en janvier, augmentent progressivement pour atteindre un pic en juillet et août, puis diminuent progressivement de septembre à décembre.

Le mois de janvier constitue la période la plus froide pour les trois stations, avec des températures moyennes mensuelles de 8,80 °C à Khenchela, 8,67 °C à Oum El Bouaghi et 7,67 °C à Tébessa. En revanche, juillet correspond au mois le plus chaud, avec des températures moyennes mensuelles de 28,44 °C à Khenchela, 28,84 °C à Oum El Bouaghi et 27,19 °C à Tébessa.

II.7.2.3. Températures saisonnières

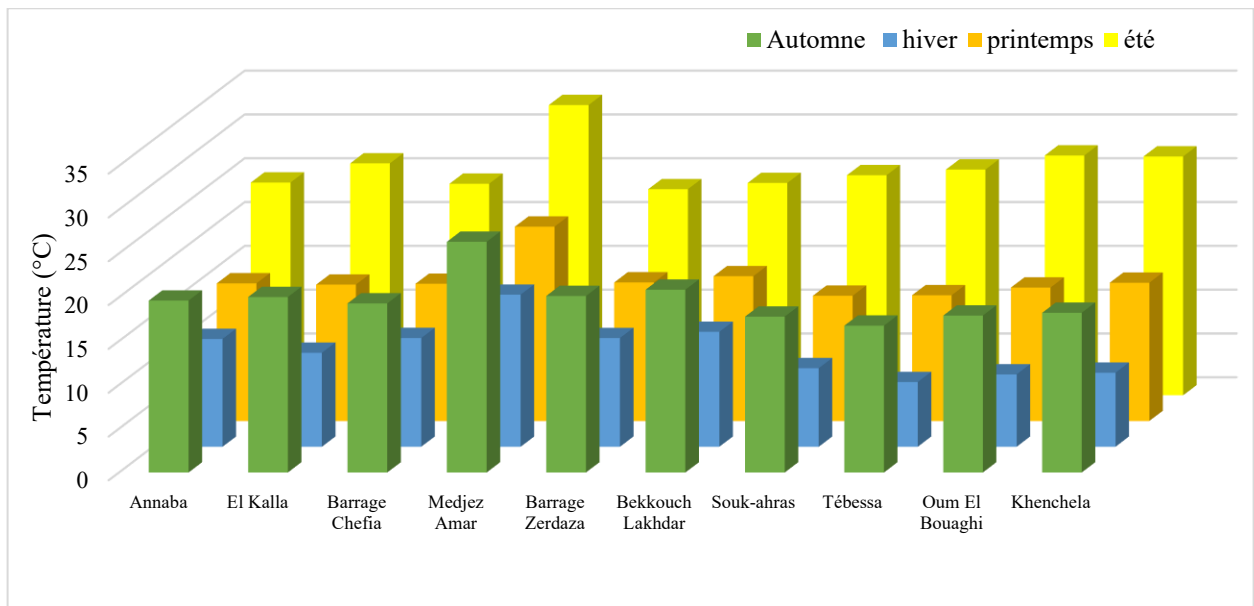


Figure 2.12. Histogramme des températures saisonnières

II.7.3. Débit

Le débit d'un cours d'eau représente la quantité d'eau qui traverse une section donnée de la rivière par unité de temps, généralement exprimée en mètres cubes par seconde (m³/s). Il s'agit de l'un des paramètres hydrologiques les plus importants pour caractériser le régime d'un bassin versant. L'analyse des débits permet de distinguer plusieurs indicateurs :

- **Le débit moyen** : qui traduit la ressource en eau disponible sur une période donnée.
- **Le débit maximum** : qui renseigne sur les crues et les risques d'inondation.
- **Le débit minimum** : indicateur de l'étiage et des périodes de sécheresse.

Les variations temporelles des débits fluviaux sont fortement influencées par les précipitations, la température, la géologie, l'occupation des sols ainsi que par les aménagements hydrauliques. Par conséquent, l'analyse des débits constitue une source d'informations essentielles pour la gestion intégrée

des ressources en eau, l'irrigation, l'alimentation en eau potable, la production hydroélectrique et la prévention des risques hydrologiques.

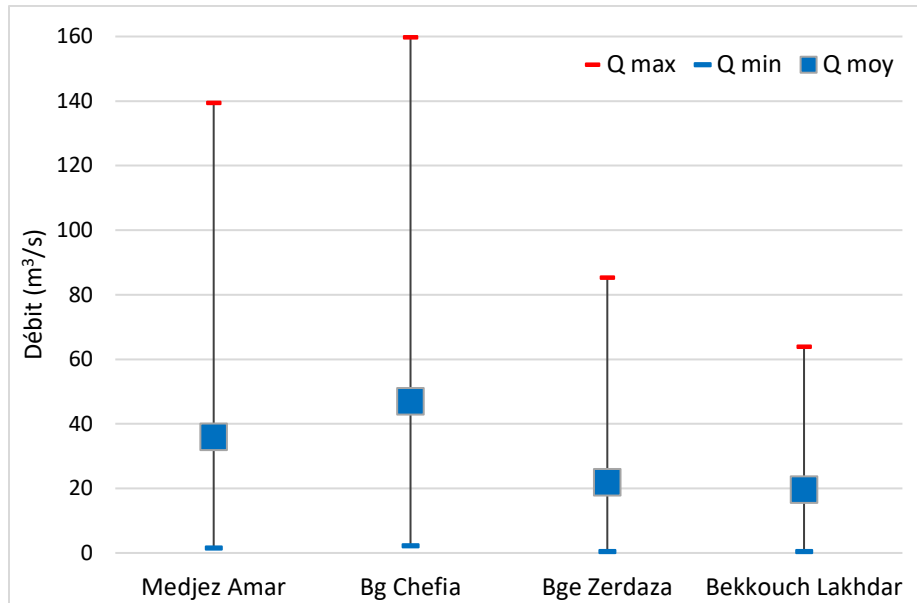


Figure 2.13. Les valeurs moyennes, minimales et maximales des débits par station

La figure 2.13 illustre les valeurs moyennes, minimales et maximales des débits couvrant une période de 46 années (1975/1976 – 2020/2021) au niveau de quatre (04) stations. On observe que les valeurs moyennes et maximales des débits sont de l'ordre de (Moy = 47.01 m³/s et Max =159.78 m³/s), (Moy = 35.96 m³/s et Max =139.51 m³/s), (Moy = 21.84 m³/s et Max =58.38 m³/s) et (Moy = 19.64 m³/s et Max =63.94 m³/s) respectivement dans les stations : Barrage Chefia, Medjez Amar, Barrage Zerdaza et Bekkouch Lakhdar. Tandis que les valeurs minimales des débits sont de l'ordre de 2.29 m³/s, 1.56 m³/s, 0.47 m³/s et 0.46 m³/s dans les stations Barrage Chefia, Medjez Amar, Bekkouch Lakhdar et Barrage Zerdaza successivement.

II.7.3.1. Débits annuels

L'étude des débits moyens annuels dans quatre stations hydrométriques permet d'appréhender le fonctionnement hydrologique des cours d'eau sur une base pluriannuelle. Ces débits reflètent l'influence de plusieurs facteurs naturels (climat, topographie, géologie) et anthropiques (urbanisation, barrages, prélèvements). L'analyse comparative permet de mieux comprendre la dynamique des eaux de surface à l'échelle régionale ou nationale.

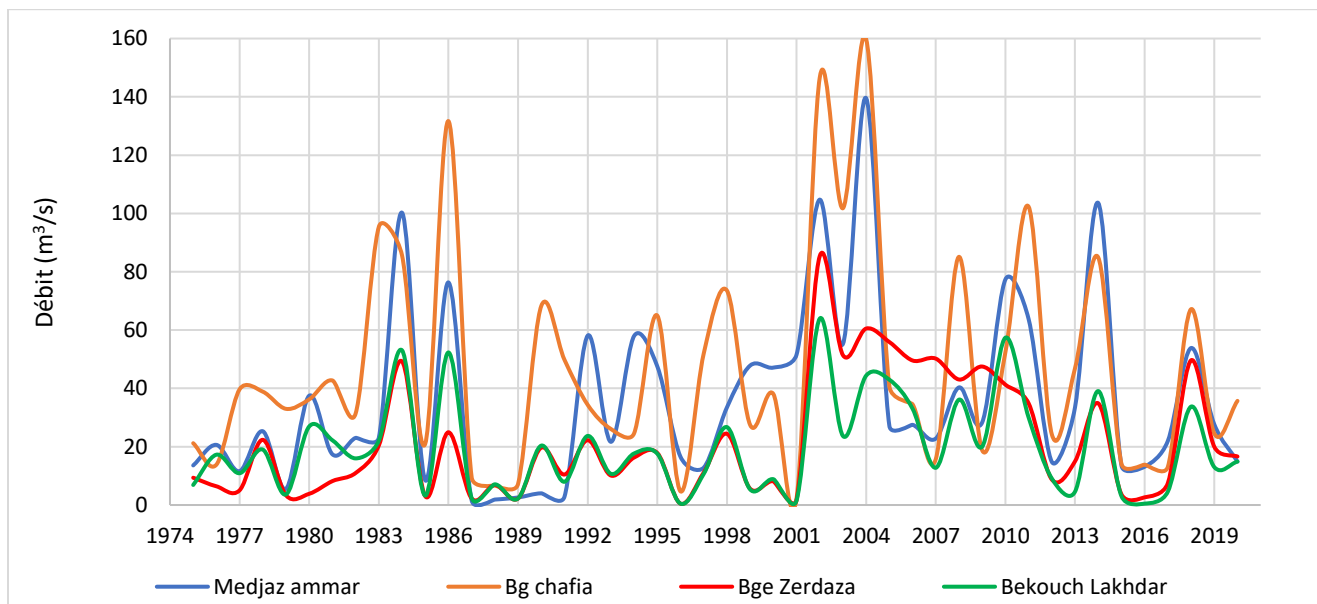


Figure 2.14. Courbes des débits moyens annuels par station

Débits les plus élevés : en 2004, les stations Barrage Chefia et Medjez amar présentent les débits les plus élevés, avec respectivement $159,78 \text{ m}^3/\text{s}$ et $139,51 \text{ m}^3/\text{s}$, par contre en 2002 les stations Bekkouch Lakhdar et Barrage Zerdaza présentent les débits les plus élevés, avec respectivement $85,38 \text{ m}^3/\text{s}$ et $63,94 \text{ m}^3/\text{s}$. Ces valeurs s'expliquent principalement par la taille importante de leurs bassins versants ainsi qu'une pluviométrie abondante. (Fig. 2.14)

Débits les plus faibles : en 2001, la station Barrage chefia affiche une valeur plus faible de débit de $2,29 \text{ m}^3/\text{s}$, ainsi qu'en 1987 la station Medjez Amar affiche une valeur faible de débit de $1,56 \text{ m}^3/\text{s}$, tandis qu'en 1996, les stations Bekkouch Lakhdar et Barrage Zerdaza affichent les plus faibles débits ($< 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$). Ces faibles valeurs peuvent résulter de bassins plus petits, situés dans des zones moins arrosées ou très anthropisées (présence de barrages, prélèvements agricoles...). (Fig. 2.14)

II.7.3.2. Débits mensuels

L'étude des débits moyens mensuels permet d'analyser le régime hydrologique des cours d'eau, c'est-à-dire la répartition saisonnière de l'écoulement. L'analyse comparée des courbes de quatre stations hydrométriques permet d'identifier les variations temporelles du débit sur une année type et de les relier à des facteurs climatiques, géographiques et anthropiques

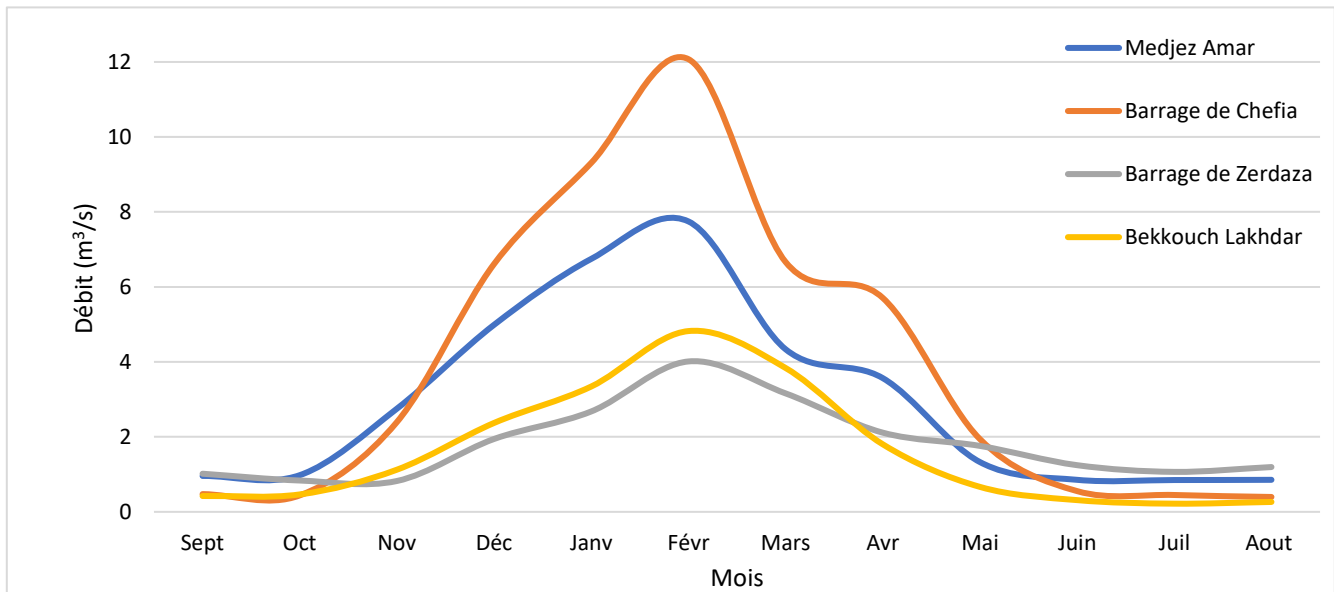


Figure 2.15. Courbes des débits moyens mensuels par station

La figure 2.15 représente la variation mensuelle des débits durant 46 ans dans quatre (04) stations hydrométriques, dont on observe que les valeurs maximales sont de l'ordre de 12.074 m³/s, 7.746 m³/s, 4.821 m³/s et 4.011 m³/s successivement dans les stations Barrage Chefia, Medjez Amar, Bekkouch Lakhdar et Barrage Zerdaza en février. Par contre, dans le mois de Août, les stations Barrage Chefia, Medjez Amar, Bekkouch Lakhdar donnent des valeurs minimales des débits (< 1 m³/s), et la station de Barrage Zerdaza affiche une valeur faible de 1.017 m³/s en septembre.

Conclusion

L'étude des caractéristiques naturelles et hydrométéorologiques du Nord-Est algérien constitue une étape fondamentale pour la compréhension des dynamiques environnementales et la mise en place d'une analyse rigoureuse de la sécheresse. Ce chapitre a permis de dresser un cadre détaillé intégrant la situation géographique, la topographie, la géologie, l'occupation du sol, le climat et le réseau hydrographique, afin de contextualiser les facteurs influençant les ressources en eau de la région.

La région étudiée présente une forte hétérogénéité spatiale : reliefs contrastés (zones montagneuses, piémonts, plaines), substrats géologiques diversifiés influençant l'infiltration et le ruissellement, occupations du sol marquées par l'agriculture, les forêts et l'urbanisation croissante.

La base de données collectée (précipitations, températures, débits) à différentes échelles temporelles (annuelle, mensuelle et saisonnière) constitue un fondement solide pour mener une analyse statistique approfondie.

Chapitre III : Analyses Statistiques

Introduction

L'analyse statistique occupe une place fondamentale en hydrologie et en climatologie, car elle permet de transformer les données brutes en informations fiables et scientifiquement exploitables [118]. Elle sert à caractériser les séries temporelles, à examiner leur distribution, leur homogénéité et leur normalité, ainsi qu'à détecter d'éventuelles tendances, anomalies ou ruptures structurelles [119]. La qualité des données constitue cependant un élément déterminant pour assurer la robustesse de ces analyses. Des données complètes, cohérentes et exemptes d'erreurs permettent d'identifier correctement les tendances et les cycles climatiques, tout en réduisant les incertitudes.

Dans ce travail, un ensemble de procédures de contrôle de qualité a été appliqué afin de garantir la fiabilité des séries hydrométéorologiques. Les valeurs manquantes ont été imputées par interpolation linéaire lorsque les lacunes étaient inférieures à 5 %, les valeurs aberrantes ont été retirées lorsqu'elles dépassaient trois écarts-types par rapport à la moyenne, et la cohérence interne des données a été vérifiée par validation croisée avec des stations voisines. De plus, l'homogénéité des séries a été évaluée selon les approches recommandées par [30] et [120], garantissant que les variations observées reflètent des phénomènes climatiques réels et non des changements dans les conditions de mesure.

Ces traitements constituent une base indispensable pour interpréter de manière fiable les évolutions des séries étudiées, analyser la variabilité climatique et soutenir une gestion durable des ressources en eau ([121] ; [122]).

III.1. Analyse d'homogénéité

Dans le cadre de l'analyse statistique des séries hydrologiques et climatiques, plusieurs tests sont utilisés pour vérifier les hypothèses de distribution, d'homogénéité et de comparaison entre échantillons. Les tests de normalité, tels que le Kolmogorov–Smirnov [123] et le Shapiro–Wilk [124], permettent de déterminer si les données suivent une loi normale, condition préalable à l'application de nombreux tests paramétriques. Lorsque les hypothèses de normalité ne sont pas respectées, on recourt aux tests non paramétriques. Le test de Kruskal–Wallis [125] est une alternative non paramétrique à l'ANOVA, permettant de comparer la médiane de plusieurs groupes indépendants. En cas de différence significative, un test post-hoc de Dunn [126] est utilisé pour identifier les groupes qui diffèrent entre eux. Concernant l'homogénéité des variances, le test de Levene [127] est couramment employé pour vérifier si la dispersion des données est comparable entre groupes. Enfin, pour la comparaison de deux échantillons indépendants, le test U de Mann–Whitney [128] constitue une alternative robuste au test t de Student lorsque l'hypothèse de normalité n'est pas respectée. L'utilisation combinée de ces tests garantit la rigueur méthodologique, la validité statistique et la fiabilité des résultats obtenus dans l'étude des données hydrométéorologiques.

III.2. Test de normalité

Le test de normalité est une étape cruciale pour déterminer si les tests paramétriques peuvent être appliqués ou si des méthodes non paramétriques doivent être utilisées à la place. Plusieurs tests statistiques sont largement utilisés à cette fin. y compris : test de Shapiro-Wilk. Test de Kolmogorov-Smirnov et test d'Anderson-Darling ([129]; [130]).

III.3. Test de Kolmogorov-Smirnov

Né en 1933 grâce aux travaux de Andreï Nicolaiévitch Kolmogorov et étendu à la comparaison de deux échantillons en 1939 par ceux de Vladimir Ivanovitch Smirnov, le test de Kolmogorov-Smirnov est une approche non paramétrique permettant de tester l'adéquation de la distribution d'une variable continue "X" à une loi de distribution fixée. Ce test peut également être utilisé pour comparer les distributions de "X|_{Y=g1}" et "X|_{Y=g2}", les sous-échantillons de X restreints aux deux groupes "g₁ , g₂" d'une variable "Y", en vérifiant si leur fonction de répartition sont similaires.

L'obligation de connaître à priori le(s) paramètre(s) de la distribution à laquelle on veut se comparer implique que ce test est peu puissant. De plus, il faut préciser que le test de Kolmogorov-Smirnov présente une certaine sensibilité lorsque l'on compare le centre des distributions contrairement à lorsqu'il s'agit des queues.

III.3.1. Les différentes versions du test

III.3.1.1. Cas à un échantillon: adéquation à une loi de distribution fixée

Hypothèses préliminaires: Variable "X" continue, paramètre(s) connu(s).

Soit "F_n" et "F", respectivement les fonctions de répartition observée et théorique de "X". On notera "n" le nombre d'observations de "X". La statistique "D" du test de Kolmogorov-Smirnov est alors :

$$D = \max_{x \in [1, n]} |F_n(x) - F(x)| = \max_{x \in [1, n]} \left(\left| F_n(x) - \frac{i-1}{n} \right|, \left| \frac{i}{n} - F(x) \right| \right)$$

Cette statistique de test suit une loi de « Kolmogorov-Smirnov » de paramètre "n" et l'hypothèse "H₀" est:

"X" Suit la loi que l'on a fixée / F_x = F

Avec "D_{n,1-α}" la valeur seuil de la distribution de la statistique de test pour une confiance "α" et pour le paramètre "n", les hypothèses alternatives sont alors,

- H₁ : F < F_n , soit D⁺ = max_{x ∈ [1, n]} ($\frac{i}{n} - F(X_i)$) > D_{n,1-α}⁺ , pour un test unilatéral à droite ;

- H₁ : F > F_n , soit D⁻ = max_{x ∈ [1, n]} (F(X_i) - $\frac{i-1}{n}$) > D_{n,1-α}⁻ , pour un test unilatéral à gauche ;

- H₁ : F ≠ F_n , soit D = max_{x ∈ [1, n]} ($\left| \frac{i}{n} - F(X_i) \right|, \left| F(X_i) - \frac{i-1}{n} \right|$) > D_{n,1-α} , pour un test bilatéral.

Calcul de la p-valeur exacte :

La p-valeur "p" associée à la statistique de test "D_{obs}" de Kolmogorov-Smirnov se détermine au travers de la formule suivante:

$$p = P(D_{obs} > D_{n,1-\alpha}) = 1 - 2 \cdot \sum_{k=1}^{+\infty} (-1)^{k+1} e^{-2k^2 n \cdot D_{obs}^2}$$

Ce calcul itératif convergeant rapidement. Notamment, à partir de k ≥ 3 itérations.

III.3.1.2. Cas pour deux échantillons: similarité des lois de distribution

Hypothèses préliminaires: "X" continue et "Y" binaire.

Soient "F₁" la fonction de répartition de "X_{|Y=g₁}" et "F₂" celle de "X_{|Y=g₂}". On notera "n₁" le nombre d'observations de "X_{|Y=g₁}" et "n₂" celui de "X_{|Y=g₂}". La statistique "D" du test de Kolmogorov-Smirnov est alors:

$$D = \max_{x \in [1, n]} |F_1(x) - F_2(x)|$$

Cette statistique de test suit une loi de Kolmogorov-Smirnov de paramètres (n₁, n₂) et l'hypothèse "H₀" est:

"X_{|Y=g₁}" et "X_{|Y=g₂}" ont même loi de distribution / F₁ = F₂

Avec "D_{n₁,n₂,1-α}" la valeur seuil de la distribution de la statistique de test pour une confiance "α" et pour les paramètres (n₁, n₂), les hypothèses alternatives sont alors :

- H₁ : F₁ < F₂ , soit D⁺ = max_{x ∈ [1, n]} (F₁(x) - F₂(x)) > D_{n₁,n₂,1-α}⁺ , pour un test unilatéral à droite ;
- H₁ : F₁ > F₂ , soit D⁻ = max_{x ∈ [1, n]} (F₂(x) - F₁(x)) > D_{n₁,n₂,1-α}⁻ , pour un test unilatéral à gauche ;
- H₁ : F₁ ≠ F₂ , soit D = max_{x ∈ [1, n]} (|F₁(x) - F₂(x)|) > D_{n₁,n₂,1-α} , pour un test bilatéral.

A noter que : c(α) = √(-1/2 ln(α)) avec "α" le seuil fixé.

III.3.2. Conditions pour le rejet de H₀

Étant donné la formule utilisée

$$\max_{x \in [1, n]} |F_n(x) - F(x)| / \max_{x \in [1, n]} (|F_1(x) - F_2(x)|)$$

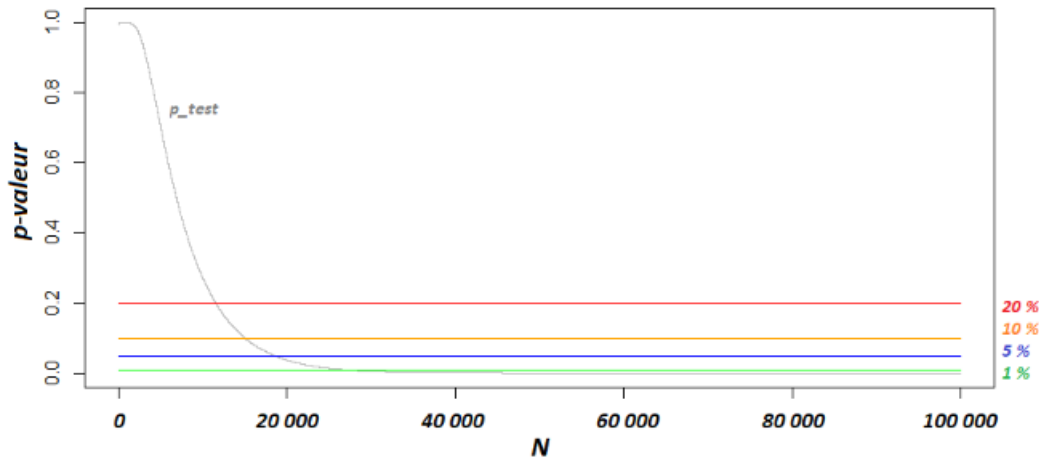
L'idée du test de Kolmogorov Smirnov repose sur la comparaison directe des fonctions de répartition des deux distributions en en retenant l'écart le plus grand.

On note "D_{obs}" la valeur de la statistique de test de Kolmogorov-Smirnov et "D" celle liée à sa distribution globale, On rejettera "H₀" au risque "α" si P(D_{obs} > D_{n,1-α}) < α / P(D_{obs} > D_{n₁,n₂,1-α}) < α soit que plus la statistique de test "D_{obs}" est grande (et donc l'écart est grand) et plus on a de chance de rejeter notre hypothèse.

Tendance lorsque : n → ∞

On s'intéresse désormais à la résistance du test de Kolmogorov-Smirnov au fur et à mesure que la taille d'échantillon croît. Nous fixons une statistique de test D_{test} = 0,01, soit un cas fictif correspondant à une différence particulièrement faible entre les deux fonctions de répartition que l'on compare. Le résultat attendu est que, quelle que soit la taille de l'échantillon, l'hypothèse nulle d'égalité des fonctions de répartition (H₀) ne devrait pas être rejetée. Le graphique ci-dessous illustre l'évolution de la p-valeur associée à la statistique D_{test}, fixée, en fonction de l'augmentation de la taille de l'échantillon n, allant de 10 à 100 000 observations.

De manière préliminaire, l'hypothèse nulle associée à la statistique de test de Kolmogorov-Smirnov (D_{test}) est maintenue jusqu'à une taille d'échantillon $n = 11\,499$, avec une p-valeur supérieure à 20 %. Entre $n = 11\,500$ et $n = 18\,436$, l'hypothèse nulle est rejetée avec un risque modéré, la p-valeur se situant entre 5 % et 20 %. Enfin, pour $n = 26\,483$, la p-valeur devient inférieure à 1 %, ce qui indique un rejet significatif de l'hypothèse nulle.



Cette simulation illustre que le test de Kolmogorov-Smirnov est affecté par la problématique des grands échantillons. Toutefois, bien que cette observation doive être nuancée ici en raison d'une statistique de test (D_{test}) particulièrement faible, il apparaît que ce test offre une certaine robustesse, permettant son utilisation sur des échantillons de taille relativement importante.

III.4. Test de Shapiro–Wilk

Publié en 1965 par Samuel Sanford Shapiro et Martin Bradbury Wilk, le test de Shapiro-Wilk est une méthode statistique permettant d'évaluer la normalité d'une variable continue "X" [131].

Initialement, le test de Shapiro-Wilk était applicable uniquement à des échantillons de taille comprise entre 3 et 50 observations. En 1972, Shapiro et Francia ont étendu cette plage aux échantillons jusqu'à 100 observations. Par la suite, en 1982, J. P. Royston a permis l'utilisation du test pour des échantillons de taille comprise entre 3 et 2000. Enfin, en 1997, M. Mahibbur Rahman et Z. Govindarajulu ont repoussé cette limite jusqu'à 5000 observations [131].

On pose " a_i " le coefficient de pondération associé à l'individu " $i \in [1, n]$ " et " n " la taille de "X". En notant $E[c]$ la partie entière de c , et en supposant que les observations de X sont ordonnées par ordre croissant, la statistique du test de Shapiro-Wilk, notée W , est définie comme suit :

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^{E[\frac{n}{2}]} a_i \times (X_{n-i+1} - X_i) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

Elle suit une loi de Shapiro-Wilk et l'hypothèse " H_0 " est:

"X" suit une loi normale / $F_x = F_{L(\mu_x, \sigma_x)}$

Avec " $W_{1-\alpha}$ " la valeur seuil de la distribution de la statistique de test "W" pour une confiance " α ", l'hypothèse alternative est alors,

$$H_1 : F_X = F_{L(\mu_X, \sigma_X)}, \text{ soit } W < W_{1-\alpha}$$

La table de Shapiro-Wilk:

Dans un premier temps, on trouvera la table des coefficients ($a_1, \dots, a_{E(n/2)}$) :

table des coefficients a_i pour le test W de Shapiro-Wilk
(Biometrika 1965)

n \ i	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0,664 6	0,643 1	0,623 3	0,605 2	0,588 8	0,573 9	0,560 1	0,547 5	0,536 8	0,525 1	0,515 0
2	0,241 3	0,280 6	0,303 1	0,316 4	0,324 4	0,329 1	0,331 5	0,332 5	0,332 5	0,331 8	0,330 6
3	0,000 0	0,087 5	0,140 1	0,174 3	0,197 6	0,214 1	0,226 0	0,234 7	0,241 2	0,246 0	0,249 5
4			0,000 0	0,055 1	0,094 7	0,122 4	0,142 9	0,158 6	0,170 7	0,180 2	0,187 8
5					0,000 0	0,039 9	0,069 5	0,092 2	0,109 9	0,124 0	0,135 3
6							0,000 0	0,030 3	0,053 9	0,072 7	0,088 0
7									0,000 0	0,024 0	0,043 3
8											0,000 0

n \ i	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
1	0,432 8	0,429 1	0,425 4	0,422 0	0,418 8	0,415 6	0,412 7	0,409 5	0,406 8	0,404 0	0,401 5
2	0,299 2	0,295 8	0,294 4	0,292 1	0,289 8	0,287 6	0,285 4	0,283 4	0,281 3	0,279 4	0,277 4
3	0,251 0	0,249 9	0,248 7	0,247 5	0,246 3	0,245 1	0,243 9	0,242 7	0,241 5	0,240 3	0,239 1
4	0,215 1	0,215 0	0,214 8	0,214 5	0,214 1	0,213 7	0,213 2	0,212 7	0,212 1	0,211 6	0,211 0
5	0,185 7	0,185 4	0,187 0	0,187 4	0,187 8	0,188 0	0,188 2	0,188 3	0,188 3	0,188 3	0,188 1
6	0,160 1	0,161 6	0,163 0	0,164 1	0,165 1	0,166 0	0,166 7	0,167 3	0,167 8	0,168 3	0,168 6
7	0,137 2	0,139 5	0,141 5	0,143 3	0,144 9	0,146 3	0,147 5	0,148 7	0,149 6	0,150 5	0,151 3
8	0,116 2	0,119 2	0,121 9	0,124 3	0,126 5	0,128 4	0,130 1	0,131 7	0,133 1	0,134 4	0,135 6
9	0,096 5	0,100 2	0,103 6	0,106 6	0,109 3	0,111 8	0,114 0	0,116 0	0,117 9	0,119 5	0,121 1
10	0,077 8	0,082 2	0,086 2	0,089 9	0,093 1	0,096 1	0,098 8	0,101 3	0,103 6	0,105 6	0,107 5
11	0,059 8	0,065 0	0,069 7	0,073 9	0,077 7	0,081 2	0,084 4	0,087 3	0,090 0	0,0 2 4	0,094 7
12	0,042 4	0,048 3	0,053 7	0,058 5	0,062 9	0,066 9	0,070 8	0,073 9	0,077 0	0,079 8	0,082 4
13	0,025 3	0,032 0	0,038 1	0,043 5	0,048 5	0,053 0	0,057 2	0,061 0	0,064 5	0,067 7	0,070 6
14	0,008 4	0,015 9	0,022 7	0,028 9	0,034 4	0,039 5	0,044 1	0,048 4	0,052 3	0,055 9	0,059 2
15		0,000 0	0,007 6	0,014 4	0,020 6	0,026 2	0,031 4	0,036 1	0,040 4	0,044 4	0,048 1
16				0,000 0	0,006 8	0,013 1	0,018 7	0,023 9	0,028 7	0,033 1	0,037 2
17						0,000 0	0,005 2	0,011 9	0,017 2	0,022 0	0,026 4
18								0,000 0	0,005 7	0,011 0	0,015 8
19										0,000 0	0,005 3

Puis celle de la loi de Shapiro-Wilk :

Table 4b : table des valeurs limites W_α de $W = \frac{b^2}{Z^2}$
pour les risques $\alpha = 5\%$ et 1%
(Biometrika 1965)

n	Risque 5 %	Risque 1 %
	$W_{0,05}$	$W_{0,01}$
5	0,762	0,686
6	0,788	0,713
7	0,803	0,730
8	0,818	0,749
9	0,829	0,764
10	0,842	0,781
11	0,850	0,792
12	0,859	0,805
13	0,866	0,814
14	0,874	0,825
15	0,881	0,835
16	0,887	0,844
17	0,892	0,851
18	0,897	0,858
19	0,901	0,863
20	0,905	0,868
21	0,908	0,873
22	0,911	0,878
23	0,914	0,881
24	0,916	0,884
25	0,918	0,888
26	0,920	0,891
27	0,923	0,894
28	0,924	0,896
29	0,926	0,898
30	0,927	0,900
31	0,929	0,902
32	0,930	0,904
33	0,931	0,906
34	0,933	0,908
35	0,934	0,910
36	0,935	0,912
37	0,936	0,914
38	0,938	0,916
39	0,939	0,917
40	0,940	0,919
41	0,941	0,920
42	0,942	0,922
43	0,943	0,923
44	0,944	0,924
45	0,945	0,926
46	0,945	0,927
47	0,946	0,928
48	0,947	0,929
49	0,947	0,929
50	0,947	0,930

Calcul de la p-valeur exacte :

Le calcul de la p-valeur exacte associée au test de Shapiro-Wilk repose sur l'algorithme développé par J. P. Royston, désigné sous le nom AS 181.2. Cet algorithme s'appuie sur la résolution de polynômes algébriques d'ordre 3 et 4. On note W_{obs} la valeur observée de la statistique de test Shapiro-Wilk, et:

- Si $n = 3$, alors $p = \frac{6}{\pi} \cdot [\arcsin(W_{obs}) - \arcsin(\sqrt{0,75})]$;

- Si $n \in [4, 11]$, alors on applique le changement de variable: $W' = \log(1 - W_{obs})$ et on calcul dans un premier temps le polynôme suivant:

$$g = -2,273 + 0,459 \cdot n$$

- Si $W' > g$ alors: $p < 0,0001$

- Sinon on applique le second changement de variable: $W'' = -\log(g - W')$. On calcul les deux polynômes suivants qui permettront de déterminer les paramètres adéquats de la loi de distribution (normale) de la statistique de test:

$$\mu_W = 0,544 - 0,39978 \cdot n + 0,025054 \cdot n^2 - 0,0006714 \cdot n^3$$

$$\sigma_W = \exp(1,3822 - 0,77857 \cdot n + 0,062767 \cdot n^2 - 0,0020322 \cdot n^3)$$

Alors, $p = F_{L(\mu_W, \sigma_W^2)}(W'') = F_{L(0,1)}\left(\frac{W'' - \mu_W}{\sigma_W}\right)$ et dont on trouvera une méthode de calcul dans la section réservée au test de Shapiro-Francia.

Si $n \geq 12$, alors on applique le changement de variable: $W' = \log(1 - W_{obs})$. On calcul les deux polynômes suivants qui permettront de déterminer les paramètres adéquats de la loi de distribution (normale) de la statistique de test:

$$\mu_W = -1,5861 - 0,31082 \log(n) - 0,083751 \cdot \log(n)^2 + 0,0038915 \cdot \log(n)^3$$

$$\sigma_W = \exp(-0,4803 - 0,082676 \cdot \log(n) + 0,0030302 \cdot \log(n)^2)$$

Alors, $p = F_{L(\mu_W, \sigma_W^2)}(W') = F_{L(0,1)}\left(\frac{W' - \mu_W}{\sigma_W}\right)$ et dont on trouvera une méthode de calcul dans la section réservée au test de Shapiro-Francia.

A noter que, par construction, le test de Shapiro-Wilk est unilatéral à droite.

Conditions pour le rejet de "H₀":

Plus la statistique de test s'éloigne de **1** et plus grande sont les chances de rejeter "H₀". Finalement $W \rightarrow \mathbf{0}$,

– quand le numérateur, c'est-à-dire la combinaison linéaire non-biaisée optimale,

$$\sum_{i=1}^{E\left[\frac{n}{2}\right]} a_i \times (X_{n-i+1} - X_i) \rightarrow 0 \Rightarrow \forall i \in [1, \delta], X_{n-i+1} - X_i \rightarrow 0$$

δ : correspondant au terme à partir duquel les coefficients de Shapiro-Wilk deviennent particulièrement proche de 0. Ce résultat équivaut à dire que la différence entre les valeurs les plus petites de "X" et celles les plus grandes sont particulièrement proches, ce qui est à l'opposé de la configuration de la loi normale;

– quand le dénominateur $\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \rightarrow \infty$, c'est-à-dire quand la variance empirique est trop forte.

La distribution normale peut alors être vue comme une pente de coefficient **1** sur un diagramme P-P et la statistique de test de Shapiro-Wilk permet de mesurer de combien les données s'éloignent de cette droite.

III.5. Test de Levene

Publié en 1960 suite aux travaux d'Howard Levene, le test de Levene est une approche paramétrique permettant de tester si les sous échantillons " $X|_{Y=g1}, \dots, X|_{Y=gK}$ ", de "X" variable continue et restreint aux $K \geq 2$ groupes d'une variable "Y" qualitative, ont même variance.

L'hypothèse d'utilisation du test de Levene est que les sous échantillons " $X|_{Y=g1}, \dots, X|_{Y=gK}$ " suivent une loi normale.

Hypothèses préliminaires : " X " continue et " Y " polychotomique. Normalité des distributions.

La statistique du test de Levene est :

$$W = \frac{n - K}{K - 1} \cdot \frac{\sum_{k=1}^K n_k \cdot (\bar{Z}_k - \bar{Z})^2}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{n_k} ((Z_k)_i - \bar{Z}_k)^2}$$

Avec $(Z_k)_i = |(X|_{Y=k})_i - \bar{X}_k|$ et $\bar{Z} = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{n_k} (Z_k)_i}{K}$

La statistique du test de Levene suit une loi de Fisher-Snedecor de paramètres $(K-1, n-K)$ et l'hypothèse " H_0 " est :

Égalité des variances / $\sigma_1^2 = \dots = \sigma_K^2$

On pose $F_{K-1, n-K, 1-\alpha}$ la valeur seuil de la distribution de la statistique de test de Levene pour une confiance " α ", l'hypothèse alternative est alors,

$H_1 : \exists k, k' \text{ H1 Tel que } \sigma_k^2 \neq \sigma_{k'}^2, \text{ soit } W \notin \left[F_{K-1, n-K, 1-\frac{\alpha}{2}}, F_{K-1, n-K, \frac{\alpha}{2}} \right], \text{ pour un test bilatéral}$

Du fait de son approche multi classe, le test n'admet pas de version unilatérale à droite ou à gauche.

Tendance pour le rejet de " H_0 ":

Plus la statistique de test " W " est grande et plus l'on a de chance de rejeter " H_0 ", ce qui revient à étudier:

$$W \rightarrow \infty \Rightarrow \frac{n - K}{K - 1} \cdot \frac{\sum_{k=1}^K n_k \cdot (\bar{Z}_k - \bar{Z})^2}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{n_k} ((Z_k)_i - \bar{Z}_k)^2} \rightarrow \infty$$

$$\Rightarrow \sum_{k=1}^K n_k \cdot (\bar{Z}_k - \bar{Z})^2 \rightarrow \infty \text{ ou } \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{n_k} ((Z_k)_i - \bar{Z}_k)^2 \rightarrow 0$$

$$\Rightarrow \bar{Z}_k \gg \bar{Z} \text{ ou } \forall i, k, (Z_k)_i \approx \bar{Z}_k$$

Le premier cas implique qu'au moins l'une des moyennes \bar{Z}_k s'éloigne fortement de la moyenne globale et pondérée des " Z ". Le second cas implique que la dispersion des $(Z_k)_i$ autour de leur moyenne respective de groupe est faible, soit une localisation concentrée autour d'elle.

Calcul de la p-valeur exacte :

La loi à laquelle reporter la statistique de test W de Levene ou de Brown-Forsythe est celle de Fisher-Snedecor de paramètres $(K-1, n-K)$. Par conséquent, avec $B(\dots)$ la fonction bêta et $B(\dots)$ la fonction bêta incomplète, et dans le cas bilatéral :

$$p = P(F_{obs} > F_{K-1, n-K, 1-\alpha}) = 2 \cdot \left(1 - \frac{B(z, N)}{B(N)}\right)$$

Avec,

$$- Z = \frac{(n_1-1)F_{obs}}{(n_1-1)F_{obs}+(n_2-1)} ;$$

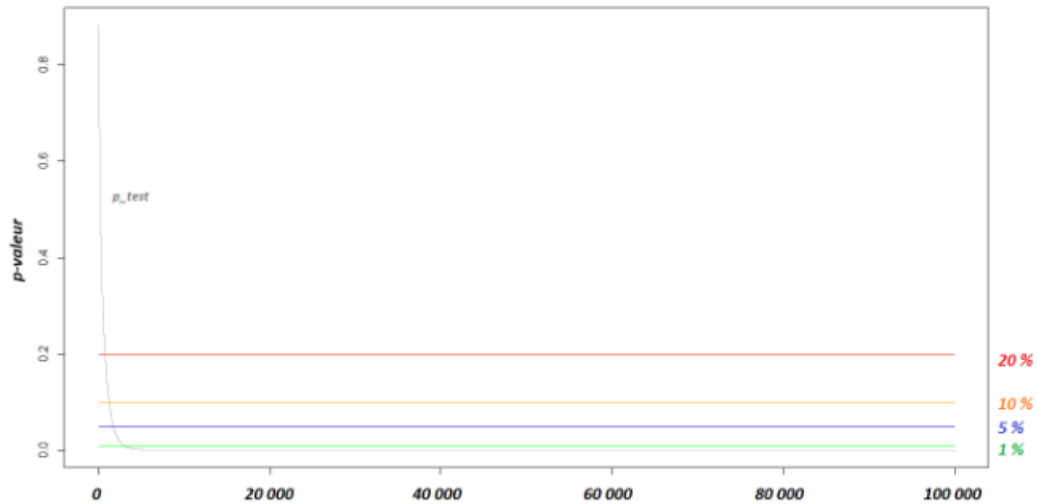
$$- B(N) = \frac{\Gamma(\frac{n_1-1}{2})\Gamma(\frac{n_2-1}{2})}{\Gamma(\frac{n_1+n_2-1}{2})} ;$$

$$- B(z, N) = z^{\frac{n_1-1}{2}} \left(\frac{2}{n_1-1} + \sum_{k=1}^K \frac{\prod_{j=1}^k (j-(n_2-2))}{k!(n_1-1+k)} z^k \right).$$

Cette formule converge assez rapidement pour "K" faible.

Tendance lorsque $n \rightarrow \infty$:

L'étude porte désormais sur la robustesse du test de Levene, noté W , en fonction de l'augmentation de la taille de l'échantillon. La statistique est fixée à 1,1, représentant un scénario fictif où les écarts entre les variances comparées sont particulièrement faibles. Le résultat attendu est que, quelle que soit la taille de l'échantillon, l'hypothèse nulle H_0 d'égalité des variances ne soit pas rejetée. Le graphique ci-dessous illustre l'évolution de la p-valeur p associée à la statistique de test W_{test} fixée, en fonction de l'accroissement de la taille de l'échantillon n , allant de 10 à 100 000 observations.



De manière approximative, l'hypothèse sous-jacente à la construction de la statistique de test W de Levene est maintenue jusqu'à une taille d'échantillon de $n = 714$ (avec une p-valeur supérieure à 20 %). Au-delà de $n = 1183$, on est conduit à rejeter l'hypothèse nulle H_0 avec un risque modéré, la p-valeur se situant entre 20 % et 5 %. Enfin, lorsque n atteint 2914, la p-valeur devient inférieure à 1 %.

Cette simulation révèle que le test W de Levene est affecté par la malédiction des grands échantillons, et ce, dès un nombre relativement faible d'observations n .

III.6. Test U de Mann Whitney

Le test U de Mann-Whitney, également appelé test des rangs de Wilcoxon, constitue une alternative non paramétrique au test t de Student pour la comparaison des distributions de deux échantillons

indépendants, sans nécessiter l'hypothèse de normalité des données ([132]; [133]). Proposé initialement par Wilcoxon en 1945, puis par Mann et Whitney en 1947, ce test présente l'avantage majeur de sa simplicité d'application, bien que cela puisse en limiter certains usages.

Comme tout test statistique, il repose sur la comparaison des observations à une distribution de référence (au moins asymptotique) afin de déterminer la probabilité d'observer les données sous l'hypothèse nulle. Une valeur p faible conduit au rejet de cette hypothèse.

Le test de Mann-Whitney est particulièrement adapté aux données ordinales, de comptage ou continues ne respectant pas la normalité. Il est également reconnu pour sa robustesse face aux valeurs aberrantes et aux distributions asymétriques, ce qui en fait un outil précieux pour les data scientists dans divers contextes analytiques. [134]

III.6.1. Hypothèses du test U de Mann-Whitney

L'efficacité du test U de Mann-Whitney dépend du respect de certaines hypothèses préalables [134]:

Indépendance des observations : Cette hypothèse fondamentale implique que chaque observation est indépendante des autres, sans corrélation ni dépendance entre les unités d'observation. [134].

Échantillonnage aléatoire à partir de populations : Les données doivent être échantillonnées de manière aléatoire au sein des populations étudiées, c'est-à-dire que chaque observation doit être prélevée indépendamment des autres [134].

Données ordinales : Le test de Mann-Whitney est particulièrement adapté aux données ordinales, de comptage ou continues ne respectant pas l'hypothèse de normalité. En revanche, lorsque les données continues suivent une distribution normale, le test t paramétrique constitue une alternative plus appropriée, offrant une puissance statistique supérieure dans ce contexte [134].

La violation de ces hypothèses peut entraîner des résultats biaisés ou erronés. Il est donc essentiel de vérifier et de valider ces conditions préalables avant de procéder à l'application du test U de Mann-Whitney [134].

III.6.2. Processus étape par étape pour effectuer le test U de Mann-Whitney

La réalisation du test U de Mann-Whitney, en tant que méthode non paramétrique, nécessite le respect de plusieurs étapes méthodologiques.

1. Trier les données : La procédure débute par la combinaison des deux ensembles de données, suivie du classement de toutes les observations par ordre croissant. Chaque observation se voit attribuer un rang, la valeur la plus faible recevant le rang 1. En cas de valeurs identiques (données liées), celles-ci se voient attribuer le rang moyen correspondant [134].

2. Calculer la somme des rangs : Les rangs attribués sont ensuite sommés séparément pour chaque groupe, conduisant à deux totaux distincts correspondant aux groupes comparés.

3. Calculer la statistique U : La statistique U pour chaque groupe peut être calculée selon les formules suivantes : $U_1 = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1+1)}{2} - R_1$ et $U_2 = n_1 n_2 + \frac{n_2(n_2+1)}{2} - R_2$ où n_1 et n_2 représentent les tailles

des deux échantillons, et R_1 et R_2 sont respectivement les sommes des rangs attribués aux observations du premier et du deuxième groupe. Ainsi, deux valeurs de U sont obtenues, une pour chaque groupe. [134]

4. Trouvez la plus petite valeur U : La valeur U retenue pour le test correspond à la plus petite des deux statistiques U calculées pour les groupes comparés.

5. Déterminer l'importance : La statistique U obtenue est comparée à la valeur critique issue des tables de distribution de Mann-Whitney, laquelle dépend des tailles des échantillons. Lorsque la statistique U calculée est inférieure ou égale à cette valeur critique, la différence entre les groupes est jugée statistiquement significative.

6. Effectuer un test d'hypothèse: Sur la base de la valeur p associée à la statistique U (généralement, un seuil de 0,05 est retenu), on décide de rejeter ou de ne pas rejeter l'hypothèse nulle. Cette dernière, notée H_0 , postule que les distributions des deux groupes comparés sont identiques.

III.6.3. Rapport des résultats du test U de Mann-Whitney

Lors de la présentation des résultats du test U de Mann-Whitney, il est essentiel de fournir des informations détaillées permettant au lecteur de comprendre et d'évaluer la validité des conclusions. Un rapport complet doit inclure les éléments clés suivants [134]:

Décrire le test : Indiquez explicitement que le test de Mann-Whitney a été réalisé, en justifiant son choix, généralement en raison de la nature ordinale des données ou du non-respect de l'hypothèse de normalité.

Tailles des échantillons de rapports : Indiquez les tailles des échantillons comparés, afin de situer l'ampleur et l'interprétation de la statistique U obtenue.

Fournir les statistiques de test : Présentez la valeur exacte de la statistique U , la valeur p associée, ainsi que la corrélation rang-bisérial utilisée comme indicateur de la taille de l'effet.

Statistiques descriptives actuelles : Intégrez la médiane de chaque groupe, puisque le test de Mann-Whitney évalue principalement les différences de position centrale. Il est également important de fournir une mesure de la dispersion associée à chaque groupe.

Énoncez le résultat : Précisez si le résultat obtenu est statistiquement significatif et discutez des implications de ce résultat par rapport à votre hypothèse ou question de recherche.

Discutez de la taille de l'effet : Analysez les implications pratiques de la corrélation rang-bisériale : une valeur absolue élevée indique une taille d'effet importante, traduisant une signification pratique notable.

Signaler des informations pertinentes supplémentaires : Présentez toute autre analyse ou test pertinent ayant motivé le choix du test U de Mann-Whitney. Par exemple, la réalisation préalable d'un test de normalité, tel que Shapiro-Wilk ou Kolmogorov-Smirnov, ayant révélé une distribution non normale des données, justifie l'emploi du test non paramétrique plutôt qu'un test t . L'intégration de ces éléments assure une meilleure transparence dans le processus décisionnel statistique. [134].

III.6.4. Interprétation des résultats du test U de Mann-Whitney

L'interprétation des résultats du test U de Mann-Whitney nécessite une compréhension conjointe de la statistique U, de la valeur p et de la taille de l'effet :

Statistique U : La statistique U correspond à la somme des rangs attribués aux observations des deux groupes. La plus petite des deux valeurs U calculées est retenue pour le test. Une statistique U faible indique que le premier groupe comporte principalement des rangs bas tandis que le second groupe présente des rangs élevés, suggérant ainsi une différence significative entre les groupes [134].

Valeur P : La valeur p permet d'évaluer la signification statistique des résultats du test. Une valeur p inférieure au seuil de signification prédéfini (généralement 0,05) indique que la différence observée entre les deux groupes est statistiquement significative, conduisant au rejet de l'hypothèse nulle, laquelle postule l'absence de différence entre les groupes [134].

Taille de l'effet : Au-delà de la valeur p, il est indispensable de considérer la taille de l'effet, qui quantifie l'ampleur de la différence entre les groupes. Dans le cadre du test U de Mann-Whitney, cette taille d'effet est fréquemment estimée par la corrélation rang-bisériale. Contrairement à la valeur p, la taille de l'effet est indépendante de la taille des échantillons, offrant ainsi une compréhension plus directe de l'importance de la différence observée. La corrélation rang-bisériale, mesurée sur une échelle de -1 à +1, fournit une estimation standardisée de l'effet, facilitant la comparaison entre différentes études ou jeux de données. Une valeur proche de ± 1 indique une forte association, où les rangs d'un groupe sont systématiquement supérieurs à ceux de l'autre, tandis qu'une valeur proche de zéro suggère un effet faible ou absent. Cette interprétation de la taille de l'effet contribue à une meilleure appréciation non seulement de l'existence mais aussi de la pertinence pratique de la différence entre les groupes [134].

III.7. Test de Kruskal–Wallis

Publié en 1952 par William Henry Kruskal et Wilson Allen Wallis, le test de Kruskal-Wallis est une méthode non paramétrique utilisée pour évaluer si les sous-échantillons ($X|_{Y=1}, \dots, X|_{Y=K}$), d'une variable continue X (transformée en rangs) ou ordinale, répartis en $K \geq 2$ groupes selon la variable Y , présentent des différences significatives entre leurs rangs médians. [135].

Le test de Kruskal-Wallis est souvent présenté comme l'équivalent non paramétrique de l'ANOVA, bien qu'il s'agisse d'une approximation imparfaite. En effet, son hypothèse nulle repose sur l'homogénéité des distributions aléatoires des sous-échantillons $X|_{Y=k}, \forall k \in [1, K]$, tandis que l'ANOVA teste l'égalité des moyennes pondérées par leur variance. Ainsi, le test de Kruskal-Wallis ne constitue pas un équivalent strict de l'ANOVA. Cependant, en présence de normalité et d'homoscédasticité, il conserve une puissance statistique comparable à celle de l'ANOVA [135].

Hypothèse préliminaire: Variable "X" continue ou ordinale et variable "Y" qualitative à $K \geq 2$ groupes.

Soit "R" le vecteur des rangs associés à la variable "X". Pour "K" groupes on note l'effectif $n_k, \forall k \in \{1, \dots, K\}$ et $n = \sum_{k=1}^K n_k$ l'effectif total. La formule du test de Kruskal-Wallis est:

$$H = (n - 1) \cdot \frac{\sum_{k=1}^K n_k \cdot (R|_{Y=k} - \bar{R})^2}{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}$$

$$H = (n - 1) \cdot \frac{\sum_{k=1}^K n_k \cdot (R|_{Y=k} - \bar{R})^2}{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2} = \frac{12}{n \cdot (n + 1)} \sum_{k=1}^K \frac{\sum_{i=1}^{n_k} [(R|_{Y=k})_i]^2}{n_k} - 3(n + 1)$$

En cas de présence de rangs ex-æquos, un correctif doit être appliqué. La formule de la statistique de test devient alors :

$$H = \frac{H}{1 - \frac{\sum_{e=1}^E t_e^3 - t_e}{N^3 - N}}$$

avec :

- E : nombre de « paquets » d'ex-æquos ;
- t_e , nombre d'ex-æquos du « paquet » "e".

Elle suit une loi du χ^2 à $d = K - 1$ degrés de liberté et l'hypothèse "H₀" est :

Les médianes sont identiques : $mediane(R|_{Y=1}) = \dots = mediane(R|_{Y=K})$

Avec $\chi_{d,1-\alpha}^2$ la valeur seuil de la distribution de la statistique de test du χ^2 pour une confiance α et pour "d" degrés de liberté, l'hypothèses alternative est alors,

- H_1 : $\exists k_1, k_2$ tel que $mediane(X|_{Y=k_1}) \neq mediane(X|_{Y=k_2})$, soit $\chi^2 \geq \chi_{d,1-\alpha}^2$, pour un test unilatéral
- Le test du χ^2 ne propose pas de forme bilatérale pour "H₁" car basé sur une approche ordinale.

La table de la loi de Kruskal-Wallis :

Lorsque la variable Y comporte $K \leq 3$ catégories, chacune contenant au maximum cinq observations sans valeurs ex aequo, il est recommandé de se référer directement à la table de la loi de Kruskal-Wallis pour l'évaluation du test.

Table The Kruskal-Wallis test

Critical region : $H \geq$ tabulated value

			K=3		K=4				K=5								
Sample size			α = 0.05	α = 0.01	Sample size		α = 0.05	α = 0.01	Sample size		α = 0.05	α = 0.01					
2	2	2	-	-	2	2	1	1	-	-	-	-					
3	2	1	-	-	2	2	2	1	5.679	-	2	2	2	1	1	6.750	-
3	2	2	4.714	-	2	2	2	2	6.167	6.667	2	2	2	2	1	7.133	7.533
3	3	1	5.143	-	3	1	1	1	-	-	2	2	2	2	2	7.418	8.291
3	3	2	5.361	-	3	2	1	1	-	-	3	1	1	1	1	-	-
3	3	3	5.600	7.200	3	2	2	1	5.833	-	3	2	1	1	1	6.583	-
4	2	1	-	-	3	2	2	2	6.333	7.133	3	2	2	1	1	6.800	7.600
4	2	2	5.333	-	3	3	1	1	6.333	-	3	2	2	2	1	7.300	8.127
4	3	1	5.208	-	3	3	2	1	6.344	7.200	3	2	2	2	2	7.682	8.682
4	3	2	5.444	6.444	3	3	2	2	6.527	7.638	3	3	1	1	1	7.111	-
4	3	3	5.791	6.745	3	3	3	1	6.600	7.400	3	3	2	1	1	7.200	8.073
4	4	1	4.967	6.667	3	3	3	2	6.727	8.015	3	3	2	2	1	7.591	8.576
4	4	2	5.455	7.036	3	3	3	3	7.000	8.538	3	3	2	2	2	7.910	9.115
4	4	3	5.598	7.144	4	1	1	1	-	-	3	3	3	1	1	7.576	8.424
4	4	4	5.692	7.654	4	2	1	1	5.833	-	3	3	3	2	1	7.769	9.051
5	2	1	5.000	-	4	2	2	1	6.133	7.000	3	3	3	2	2	8.044	9.505
5	2	2	5.160	6.533	4	2	2	2	6.545	7.391	3	3	3	3	1	8.000	9.451
5	3	1	4.960	-	4	3	1	1	6.178	7.067	3	3	3	3	2	8.200	9.876
5	3	2	5.251	6.909	4	3	2	1	6.309	7.455	3	3	3	3	3	8.333	10.20
5	3	3	5.648	7.079	4	3	2	2	6.621	7.871							
5	4	1	4.985	6.955	4	3	3	1	6.545	7.758							
5	4	2	5.273	7.205	4	3	3	2	6.795	8.333							
5	4	3	5.650	7.445	4	3	3	3	6.984	8.659							
5	4	4	5.657	7.760	4	4	1	1	5.945	7.909							
5	5	1	5.127	7.309	4	4	2	1	6.388	7.909							
5	5	2	5.338	7.338	4	4	2	2	6.731	8.346							
5	5	3	5.705	7.578	4	4	3	1	6.635	8.231							
5	5	4	5.666	7.823	4	4	3	2	6.874	8.621							
5	5	5	5.780	8.000	4	4	3	3	7.038	8.876							
6	1	1	-	-	4	4	4	1	6.725	8.588							
6	2	1	4.822	-	4	4	4	2	6.957	8.871							
6	2	2	5.345	6.655	4	4	4	3	7.142	9.075							
6	3	1	4.855	6.873	4	4	4	4	7.235	9.287							
6	3	2	5.348	6.970													
6	3	3	5.615	7.410													
6	4	1	4.947	7.106													
6	4	2	5.340	7.340													
6	4	3	5.610	7.50													
6	4	4	5.681	7.795													
6	5	1	4.990	7.182													
6	5	2	5.338	7.376													
6	5	3	5.602	7.590													
6	5	4	5.661	7.936													
6	5	5	5.729	8.028													
6	6	1	4.945	7.121													
6	6	2	5.410	7.467													
6	6	3	5.625	7.725													
6	6	4	5.725	8.000													
6	6	5	5.765	8.124													
6	6	6	5.801	8.222													
7	7	7	5.819	8.378													
8	8	8	5.805	8.465													

Calcul de la p-valeur exacte :

La statistique de test de Kruskal-Wallis suit, sous l'hypothèse nulle, une loi du χ^2 avec d degrés de liberté. En fonction de la configuration de la variable X, c'est la version unilatérale de cette distribution qui est utilisée pour le calcul de la p-valeur exacte [135] :

$$p = P(\chi_{obs}^2 > \chi_{d,1-\alpha}^2) = 1 - \frac{\gamma\left(\frac{d}{2}, \frac{\chi_{obs}^2}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{d}{2}\right)}$$

, avec $\Gamma(\cdot)$ la fonction gamma et $\gamma(\cdot, \cdot)$ la fonction gamma incomplète de formule :

$$\gamma\left(\frac{d}{2}, \frac{\chi_{obs}^2}{2}\right) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k \left(\frac{\chi_{obs}^2}{2}\right)^{\frac{d}{2}+k}}{k! \left(\frac{d}{2} + k\right)}$$

Tendance pour le rejet de "H₀":

Deux cas se distinguent. Celui où $H \rightarrow 0$ et l'on accepte "H₀" et celui où $H \rightarrow +\infty$ et l'on rejette "H₀".

Concernant le premier cas :

$$\begin{aligned}
 H \rightarrow 0 &\Rightarrow (N - 1) \cdot \frac{\sum_{k=1}^K n_k \cdot (R|_{Y=k} - \bar{R})^2}{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2} \rightarrow 0 \\
 &\Rightarrow \sum_{k=1}^K n_k \cdot (R|_{Y=k} - \bar{R})^2 \rightarrow 0 \\
 &\Rightarrow \forall k, R|_{Y=k} - \bar{R} \rightarrow 0 \\
 &\Rightarrow \forall k, R|_{Y=k} \rightarrow \bar{R}
 \end{aligned}$$

L'hypothèse nulle suppose que les moyennes des rangs de chaque sous-échantillon sont égales à la moyenne globale, traduisant ainsi une distribution aléatoire uniforme. Il est notable que le dénominateur de la statistique de test tend vers l'infini uniquement lorsque la taille de l'échantillon devient très grande [135].

Pour le second cas :

$$H = (N - 1) \cdot \frac{\sum_{k=1}^K n_k \cdot (R|_{Y=k} - \bar{R})^2}{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2} \rightarrow +\infty$$

Il est à noter que, compte tenu de sa formule, le dénominateur ne converge jamais vers zéro, sauf dans le cas exceptionnel — qui ne devrait pas se produire — où l'ensemble "X" serait constitué uniquement de valeurs identiques, entraînant ainsi des rangs tous ex-æquos.

Par conséquent, le numérateur a le plus d'influence sur le résultat de la statistique de test. Ainsi :

$$\sum_{k=1}^K n_k \cdot (R|_{Y=k} - \bar{R})^2 \rightarrow +\infty \Rightarrow \exists k, R|_{Y=k} \gg \gg \gg \bar{R}$$

Une des propriétés fondamentales du test de Kruskal-Wallis est que la différence d'un seul rang moyen par rapport aux autres suffit à rendre le test significatif, conduisant ainsi au rejet de l'hypothèse nulle "H₀" [135].

Il est instructif d'observer que ce test évalue l'écart entre les moyennes des rangs de chaque groupe et la moyenne globale, en tenant compte de la dispersion des rangs individuels autour de cette moyenne. Ce mécanisme permet de mesurer la variabilité au sein d'un échantillon homogène. Par exemple, le rapport prend la valeur 1 lorsque le nombre d'observations de "X" est égal au nombre de groupes de "Y" [135].

Tendance lorsque $n \rightarrow \infty$:

Nous examinons à présent la robustesse du test de Kruskal-Wallis à mesure que la taille de l'échantillon augmente. Puisqu'il repose sur la loi du χ^2 , qui ne dépend pas directement de la taille de l'échantillon "n", on peut logiquement s'attendre à ce qu'il soit moins sensible à la malédiction des grands échantillons. [135].

Toutefois, en regardant la formule d'usage de la statistique de test on peut être interpellé par les coefficients multiplicateurs $(n - 1)$ et nk , $k \in [1, n]$ qui, en augmentant, pour des valeurs faibles et stables des $R|_{Y=k} - \bar{R}$ vont faire hausser la valeur de "H". Constat similaire concernant le dénominateur : $\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2$. La conséquence ne sera pas un rejet abusif, étant donné la construction du test mais du non-rejet de "H₀" si "n" devient trop grand [135].

Il faudra alors des différences de plus en plus marquées au fur et à mesure que "n" croît pour que l'on puisse rejeter "H₀" [135].

III.8. Analyse avancée : Non-homogène

Lorsqu'un test non paramétrique révèle une absence d'homogénéité des données, cela signifie que des différences significatives existent entre les groupes comparés. Afin d'identifier précisément les groupes responsables de ces écarts, des tests post-hoc tels que ceux de Dunn, Nemenyi, Conover ou van der Waerden sont généralement appliqués. Cette démarche permet non seulement de cibler les différences spécifiques, mais aussi d'améliorer la fiabilité de l'analyse statistique. De plus, la segmentation du jeu de données en ensembles homogènes contribue à une interprétation plus fine et plus rigoureuse des résultats ([136]; [129]).

III.8.1. Test Post-hoc de Dunn

Le test de Dunn (Dunn, 1964) est un test post-hoc non paramétrique utilisé après un test de Kruskal-Wallis afin de détecter les différences spécifiques entre groupes, en comparant les sommes des rangs deux à deux, tout en corrigeant pour les comparaisons multiples. Le test de Conover-Iman [137] constitue une variante plus puissante [129]. La statistique du test de Dunn (Q) est calculée comme suit :

$$Q = \frac{R_i - R_j}{\sqrt{\frac{N(N+1)}{12} \sum \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)}}$$

Où R_i et R_j sont les sommes des rangs pour les groupes i et j . N est le nombre total d'observations. et n_i et n_j sont la taille des échantillons des groupes. Le résultat du test donne des valeurs p . qui sont comparés à un niveau de signification ($\alpha = 0,05$). Si la valeur p est inférieure à α , la différence entre les groupes comparés est considérée comme statistiquement significative ([138]; [139]; [140]; [141]. [126]; [142]; [143]).

III.9. Modélisation : logiciel SPSS

Dans le cadre de ce travail, le logiciel SPSS (Statistical Package for the Social Sciences, IBM SPSS Statistics) a été utilisé comme outil principal pour l'analyse statistique des données recueillies. SPSS est un logiciel de référence dans le domaine de la recherche scientifique car il combine une interface intuitive et des capacités avancées de traitement statistique. Il permet d'effectuer des analyses descriptives (moyennes, médianes, variances, fréquences, histogrammes) ainsi que des analyses inférentielles plus complexes, qu'elles soient paramétriques ou non paramétriques.

Un des principaux avantages de SPSS réside dans sa capacité à gérer de grands volumes de données et à fournir des résultats précis et reproductibles. Les tests sont accessibles via des menus clairs (*Analyse → Statistiques descriptives, Analyse → Non paramétrique, Comparer les moyennes*, etc.) et les sorties fournies incluent à la fois les statistiques descriptives, la valeur de la statistique de test, la significativité (p-value) et, le cas échéant, les intervalles de confiance. Ces informations sont essentielles pour confirmer ou rejeter des hypothèses de recherche.

Dans ce mémoire, SPSS a été utilisé à plusieurs niveaux :

- Pour tester la normalité des distributions (tests de Kolmogorov–Smirnov et Shapiro–Wilk).
- Pour vérifier l’homogénéité des variances (test de Levene).
- Pour comparer les moyennes ou médianes entre groupes indépendants (test U de Mann–Whitney et test de Kruskal–Wallis).
- Pour approfondir l’analyse des différences significatives entre groupes à travers des tests post-hoc adaptés (test de Dunn).

Grâce à ses fonctionnalités graphiques (nuages de points, diagrammes en boîte, histogrammes, courbes de tendance), SPSS facilite également la visualisation et l’interprétation des résultats statistiques, ce qui constitue un atout majeur dans l’analyse des phénomènes hydrologiques et climatiques. L’ensemble de ces outils permet ainsi d’assurer une démarche méthodologique rigoureuse, garantissant la fiabilité et la validité scientifique des résultats obtenus.

III.10. Résultats et discussion

III.10.1. Fiabilité des données

La qualité de l’ensemble de données constitue un facteur crucial pour garantir la précision et la fiabilité des analyses statistiques. Les tableaux 03, 04 et 05 résument les résultats des tests de normalité appliqués aux données de précipitations, de température et de débits à travers plusieurs stations situées dans la zone d’étude.

III.10.1.1. Précipitation

Dans le tableau 3.1, les tests de Kolmogorov-Smirnov (KS) et de Shapiro-Wilk (SW) ont été utilisés afin d’évaluer la normalité des données issues des stations météorologiques du Nord-Est de l’Algérie. Les résultats montrent des écarts significatifs par rapport à la normalité, comme l’indiquent les valeurs de la statistique KS variant entre 0,143 et 0,189 et celles de la statistique SW comprises entre 0,786 et 0,867, avec des valeurs de P (p-values) égales à 0,000 pour l’ensemble des stations. Ces résultats conduisent au rejet de l’hypothèse nulle de normalité, confirmant que les données ne suivent pas une loi normale. Par conséquent, il devient nécessaire de recourir à des méthodes statistiques non paramétriques pour les analyses ultérieures, afin de garantir une détection fiable des tendances et une évaluation hydrologique précise.

Tableau 3.1 : Résultats des tests de normalité pour les données sur les précipitations.

Stations	Kolmogorov-Smirnov (KS)	Shapiro-Wilk (SW)	Valeur P
	Statistique	Statistique	
Annaba	0.163	0.867	0.000
Barrage Zerdaza	0.166	0.834	0.000
Bekkouch Lakhdar	0.189	0.819	0.000
Barrage Chefia	0.155	0.866	0.000
Medjez Amar	0.164	0.838	0.000
El Kalla	0.171	0.841	0.000
Khenchela	0.179	0.786	0.000
Oum El Bouaghi	0.158	0.819	0.000
Souk Ahras	0.162	0.830	0.000
Tébessa	0.143	0.853	0.000

III.10.1.2. Température

À l’instar des données pluviométriques, le tableau 3.2 présente les résultats des tests de Kolmogorov-Smirnov (KS) et de Shapiro-Wilk (SW) appliqués aux données de température dans différentes stations. Les résultats montrent des écarts significatifs par rapport à la normalité, avec des valeurs de la statistique KS comprises entre 0,143 et 0,189 et des valeurs de la statistique SW comprises entre 0,786 et 0,867, accompagnées de valeur P (p-values) égales à 0,000 pour l’ensemble des stations. Ces résultats conduisent au rejet de l’hypothèse nulle de normalité, confirmant que l’ensemble des données de température ne suit pas une distribution normale. Par conséquent, le recours à des méthodes statistiques non paramétriques s’avère nécessaire pour les analyses ultérieures, afin d’évaluer avec précision les tendances et la variabilité des températures dans la zone d’étude.

Tableau 3.2 : Résultats des tests de normalité pour les données de température.

Stations	Kolmogorov-Smirnov (KS)	Shapiro-Wilk (SW)	Valeur P
	Statistique	Statistique	
Annaba	0.106	0.938	0.000
Barrage Chefia	0.082	0.973	0.000
Medjez Amar	0.107	0.938	0.000
El Kalla	0.098	0.956	0.000
Khenchela	0.102	0.936	0.000
Oum El Bouaghi	0.107	0.938	0.000
Souk Ahras	0.092	0.952	0.000
Tébessa	0.107	0.933	0.000
Bekkouch Lakhdar	0.106	0.945	0.000
Barrage Zerdaza	0.097	0,959	0.000

III.10.1.3. Débits

Les résultats des tests de normalité appliqués aux débits, présentés dans le tableau 3.3, révèlent des écarts importants par rapport à la loi normale dans plusieurs stations. Les valeurs de la statistique de Kolmogorov-Smirnov (KS) varient entre 0,254 et 0,313, tandis que celles de la statistique de Shapiro-Wilk (SW) se situent entre 0,506 et 0,697, avec des valeurs P (p-values) égales à 0,000 pour l'ensemble des sites. Ces résultats conduisent au rejet de l'hypothèse nulle de normalité, confirmant que les données de débits ne suivent pas une distribution normale. Par conséquent, l'utilisation de méthodes non paramétriques s'avère nécessaire pour les analyses statistiques ultérieures, afin de garantir des évaluations fiables des tendances hydrologiques et des conditions de sécheresse dans la région étudiée.

Tableau 3.3 : Résultats des tests de normalité pour les données d'écoulement fluvial.

Stations	Kolmogorov-Smirnov (KS)	Shapiro-Wilk (SW)	Valeur P
	<i>Statistique</i>	<i>Statistique</i>	
Barrage de Zerdaza	0.254	0.697	0.000
Bekkouch Lakhdar	0.308	0.552	0.000
Barrage Chefia	0.313	0.526	0.000
Medjez Amar	0.313	0.506	0.000

III.10.2. Test non paramétrique

Compte tenu des résultats présentés dans les tableaux 3.1, 3.2 et 3.3, qui indiquent que les données de précipitations, de température et de débits ne suivent pas une distribution normale, l'application de méthodes statistiques non paramétriques s'impose pour les analyses ultérieures.

III.10.2.1. Précipitation

Le tableau 3.4 présente les résultats du test de Kruskal-Wallis appliqué aux données pluviométriques de différentes stations. Les résultats montrent l'absence de différences significatives dans les distributions de précipitations entre les stations, avec la plupart des p-values proches de 1,000. Il est à noter que certaines stations, telles que Khenchela (p = 0,489), Oum El Bouaghi (p = 0,266) et Tébessa (p = 0,190), présentent des valeurs P (p-values) plus faibles ; toutefois, celles-ci demeurent supérieures au seuil de signification de 0,05, indiquant que les différences ne sont pas statistiquement significatives. Les valeurs de la statistique H varient entre 16,329 et 54,206, avec 46 ans pour l'ensemble des stations. Ces résultats confirment que les distributions pluviométriques dans la zone d'étude ne diffèrent pas de manière significative, renforçant ainsi la nécessité de recourir à des techniques statistiques non paramétriques afin de garantir des analyses plus fiables des tendances hydrologiques.

Tableau 3.4 : Résultats des tests non paramétriques de Kruskal-Wallis.

Stations	Kruskal-Wallis H	Valeur P
Annaba	19.219	1.000
Barrage Zerdaza	23.975	0.997
Bekkouch Lakhdar	30.092	0.966
Barrage Chefia	22.431	0.999
Medjez Amar	27.455	0.986
El Kalla	16.329	1.000
Khenchela	45.598	0.489
Oum El Bouaghi	51.546	0.266
Souk Ahras	27.650	0.985
Tébessa	54.206	0.190

III.10.2.2. Température

Comme le montre le tableau 3.5, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis appliqué aux données de température de différentes stations révèle un schéma différent de celui observé pour les précipitations. Les distributions de température apparaissent très similaires dans la majorité des stations, avec des p-values de 1,000 pour Annaba, Medjez Amar, Khenchela et Tébessa, indiquant l'absence de différences statistiquement significatives entre ces localités.

Les valeurs de la statistique H demeurent relativement faibles, telles que 8,047 pour Annaba et 8,144 pour Oum El Bouaghi, ce qui suggère une variation minimale dans les classements de température entre ces stations. En revanche, Bge Chefia présente une valeur de H nettement plus élevée (59,171) avec une p-value de 0,092. Bien que ce résultat ne soit pas statistiquement significatif, il suggère que la distribution des températures à Bge Chefia s'écarte davantage de celle observée dans les autres stations de la région étudiée. Ces résultats indiquent que, si la plupart des stations présentent des distributions de température similaires, certaines localisations peuvent toutefois connaître des variations locales qui méritent une analyse plus approfondie.

Tableau 3.5 : Résultats des essais non paramétriques de Kruskal-Wallis pour la température

Stations	Kruskal-Wallis H	Valeur P
Annaba	8.047	1.000
Barrage Chefia	59.171	0.092
Medjez Amar	9.094	1.000
El Kalla	15.962	1.000
Khenchela	8.892	1.000
Oum El Bouaghi	8.144	1.000
Souk Ahras	21.635	0.999
Tébessa	9.078	1.000
Bekkouch Lakhdar	9.563	1.000
Barrage Zerdaza	9.123	1.000

III.10.2.3. Débit

L'analyse des données de débit fluvial par le test de Kruskal-Wallis (Tableau 3.6) révèle une variabilité significative, avec des statistiques H variant de 82,067 à 236,29. Des différences marquées sont observées au barrage de Zerdaza ($p = 0,000$, $H = 236,29$), Bekouche Lakhdar ($p = 0,000$, $H = 137,997$), barrage de Chafia ($p = 0,01$, $H = 82,067$) et Medjaz Amar ($p = 0,001$, $H = 117,542$), où les p-values inférieures à 0,05 rejettent l'hypothèse nulle de distributions similaires. Les données de débit n'étaient pas disponibles pour Annaba, El Kala, Khenchela, Oum El Bouaghi, Souk Ahras et Tébessa, limitant l'analyse aux quatre stations mentionnées. Ces résultats mettent en évidence l'hétérogénéité des débits, nécessitant l'emploi de méthodes non paramétriques pour évaluer précisément la variabilité hydrologique dans la région.

Tableau 3.6 : Résultats des tests non paramétriques de Kruskal-Wallis pour l'écoulement fluvial.

Stations	Kruskal-Wallis H	Valeur P
Barrage de Zerdaza	236.29	0.000
Bekkouch Lakhdar	137.997	0.000
Barrage Chafia	82.067	0.01
Medjez Amar	117.542	0.001

III.10.3. Analyse avancée : segmentation et tests post-hoc

Comme l'illustrent les tableaux 3.3 et 3.6, les données de débits présentent une hétérogénéité significative, rendant nécessaire l'application de techniques avancées afin de permettre des comparaisons pertinentes entre plusieurs groupes de manière pair-à-pair. Pour y remédier, la segmentation a été employée comme une méthode efficace permettant de diviser les jeux de données hétérogènes en sous-groupes plus homogènes, offrant ainsi une analyse plus précise et structurée. Par la suite, le test post-hoc de Dunn a été utilisé pour approfondir l'examen des différences entre les groupes. Après plusieurs essais, la période de segmentation la plus appropriée a été déterminée à 46 groupes, correspondant à 46 années, comme le montrent les figures 3.1, 3.2, 3.3 et 3.4. Cette approche garantit une évaluation rigoureuse des tendances hydrologiques et des variations des débits, renforçant la robustesse de l'analyse globale.

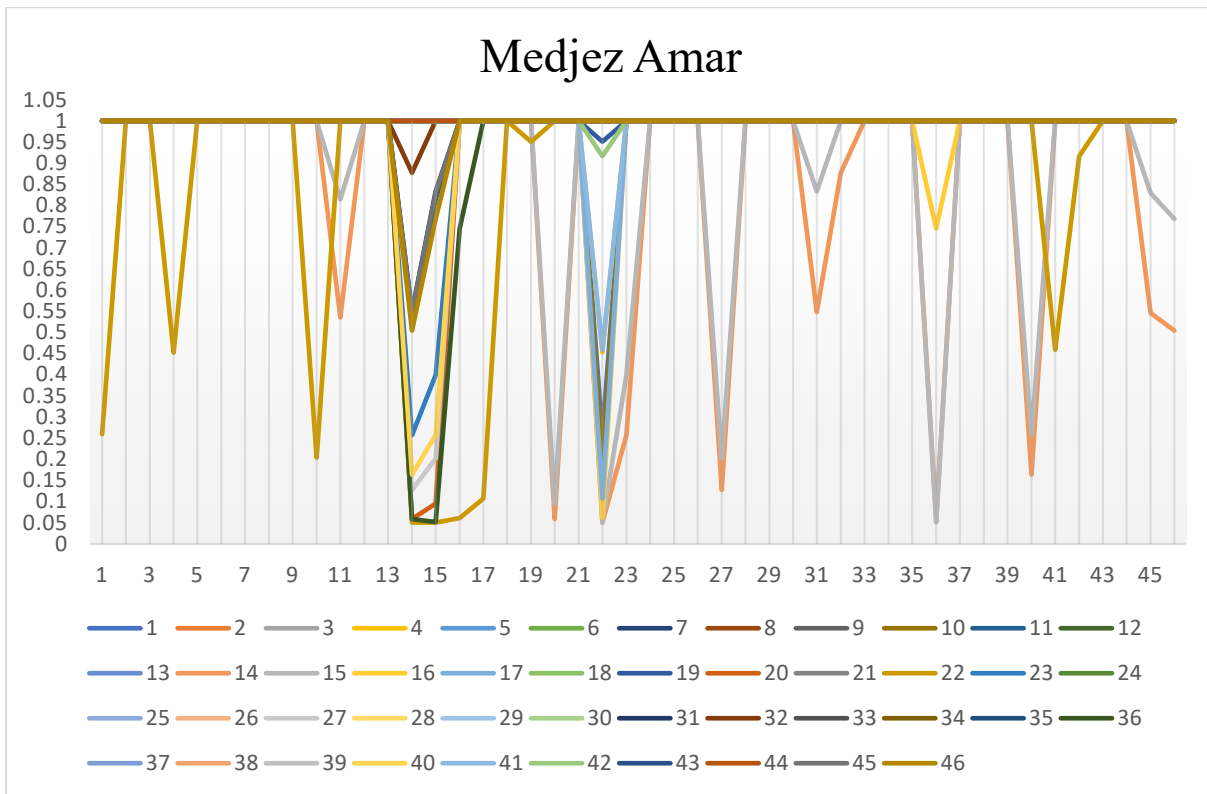


Figure 3.1 : Résultats des tests post-hoc de Dunn pour l'écoulement fluvial de la station Medjez Amar.

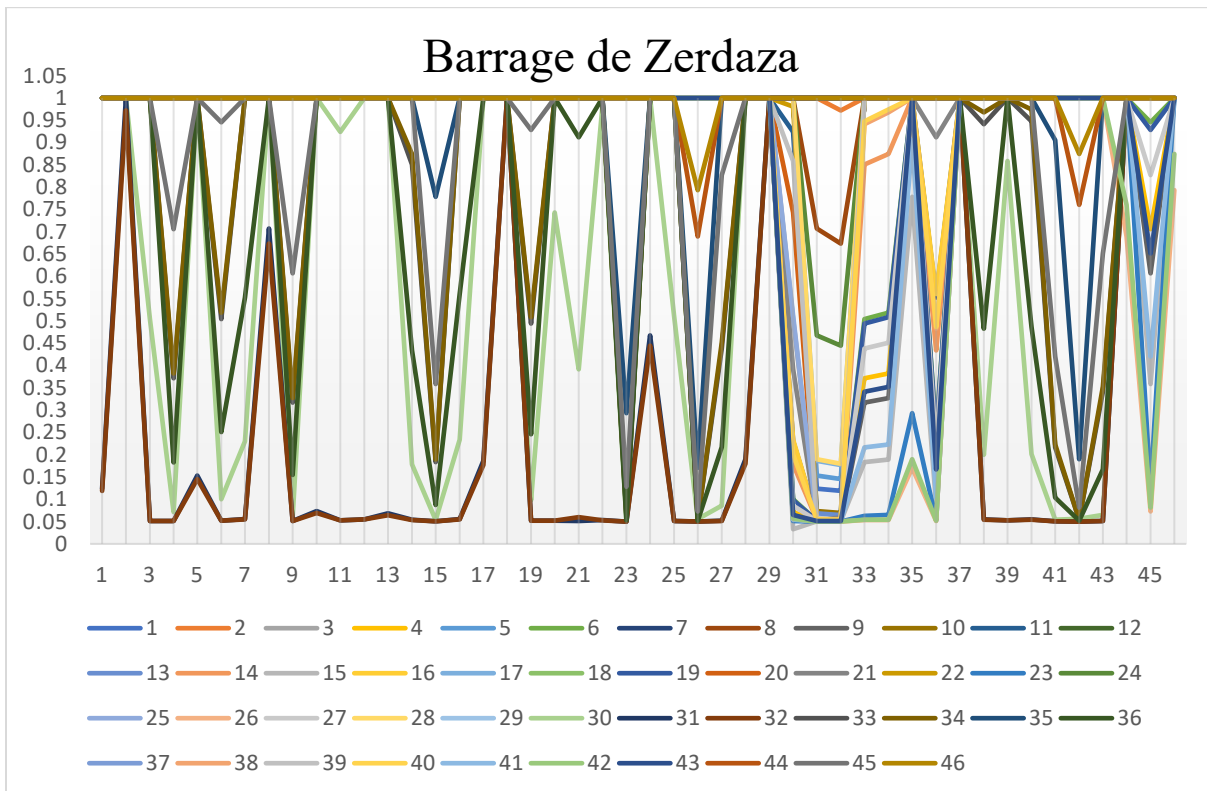


Figure 3.2 : Résultats des tests post-hoc de Dunn pour l'écoulement fluvial de la station du barrage de Zerdaza.

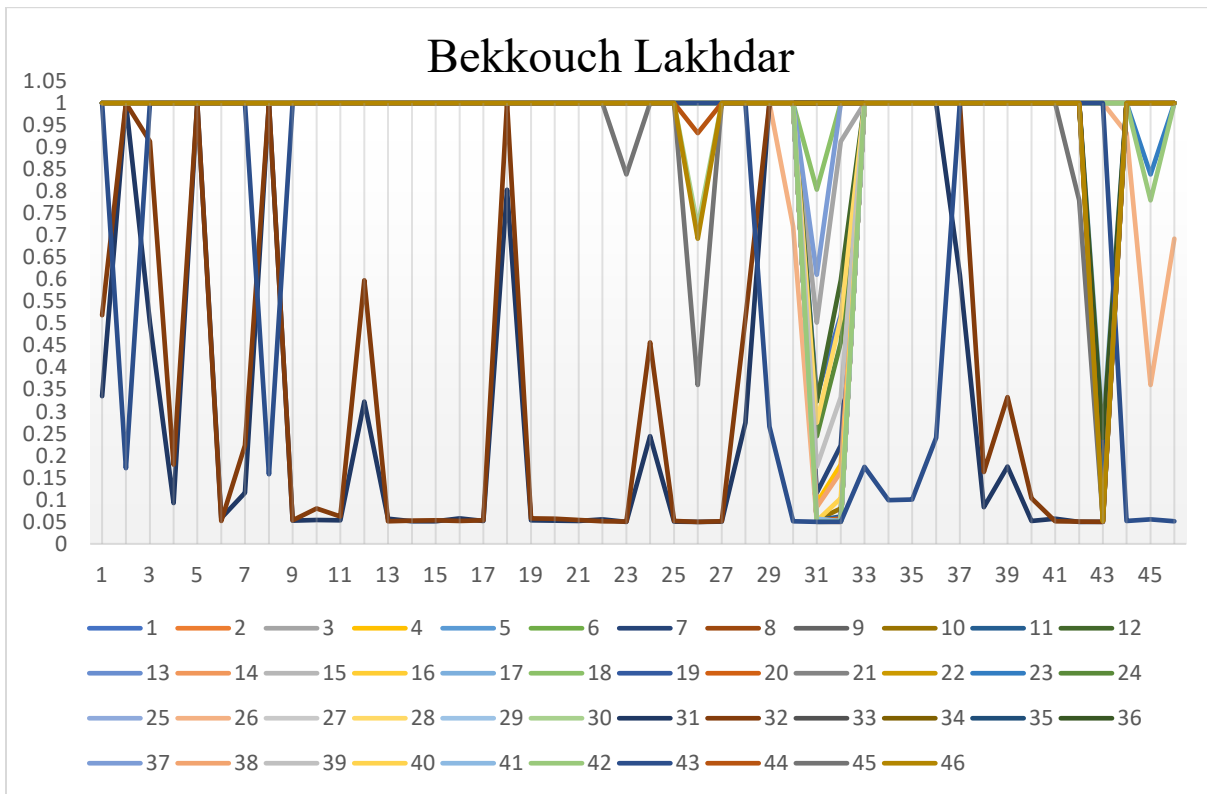


Figure 3.3 : Résultats des tests post-hoc de Dunn pour l'écoulement fluvial de la station Bekkouch Lakhdar

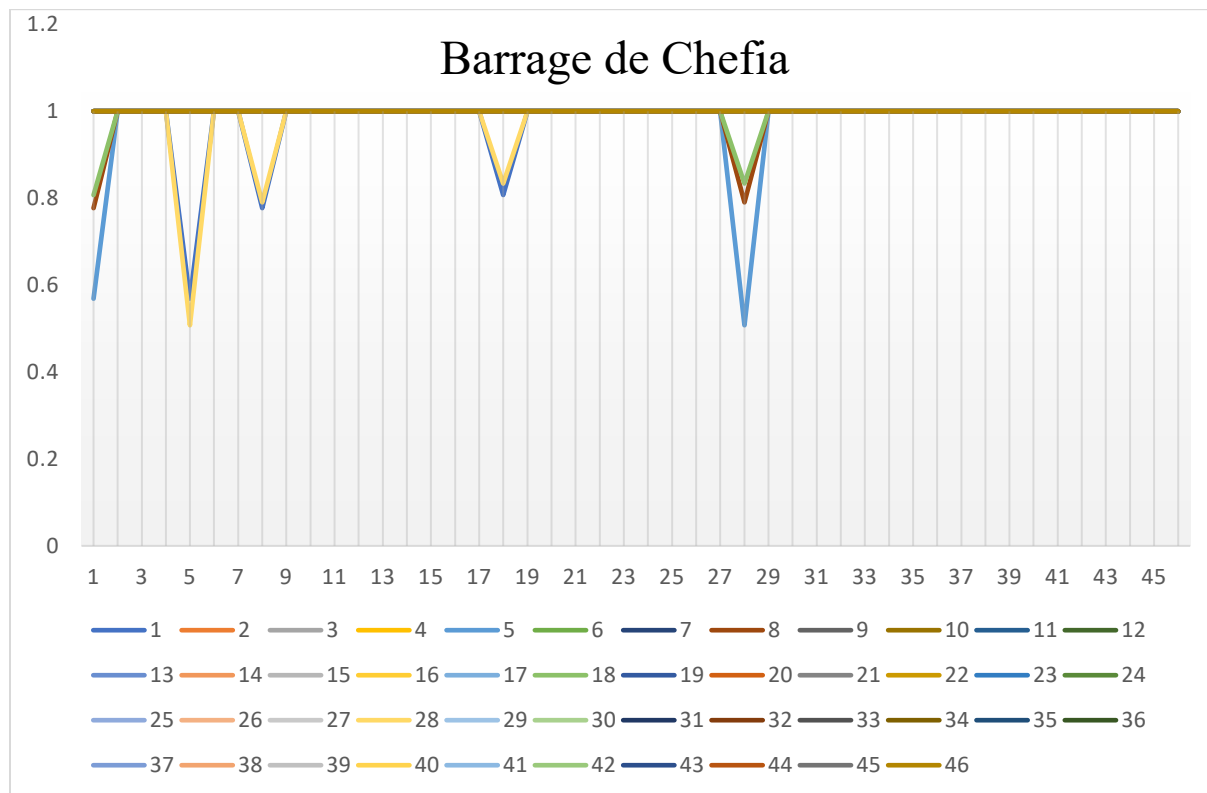


Figure 3.4 : Résultats des tests post-hoc de Dunn pour l'écoulement fluvial de la station du barrage de Chefia.

Les résultats présentés dans les figures 3.1, 3.2, 3.3 et 3.4 montrent que les régimes de débits à la station de Medjez Amar demeurent relativement homogènes à travers les différentes périodes. Les statistiques du test de Dunn pour les stations de Medjez Amar, du barrage Zerdaza et de Bekkouch Lakhdar s'approchent du seuil de signification de 0,05, indiquant des différences marginales. Cependant, dans l'ensemble, les résultats confirment l'absence de différences statistiquement significatives entre les segments de débits analysés.

À l'inverse, pour la station du barrage de Chefia, les résultats du test post-hoc de Dunn révèlent des p-values systématiquement supérieures à 0,4, confirmant l'absence de différences significatives dans les distributions des débits entre les groupes.

Ces constats suggèrent que les régimes hydrologiques des stations analysées présentent une similarité statistique, ce qui implique que les fluctuations de débits observées sont probablement influencées par des facteurs régionaux communs plutôt que par des conditions locales distinctes. Par conséquent, le comportement de ces stations peut être considéré comme homogène en termes de régimes de débits, ce qui soutient la fiabilité des évaluations hydrologiques à l'échelle régionale.

Conclusion

Les tests statistiques appliqués ont montré que les séries de précipitations, de températures et de débits ne suivent pas une distribution normale, ce qui a justifié l'usage de méthodes non paramétriques. Le test de Kruskal-Wallis a confirmé une homogénéité météorologique relative entre les stations, validée par des analyses post-hoc, qui n'ont révélé que quelques écarts marginaux non significatifs. En revanche, l'analyse hydrologique a mis en évidence une hétérogénéité significative des débits, le test de Dunn identifiant distinctement les groupes formés par Medjaz Amar, le barrage de Zerdaza et Bekouche Lakhdar. Ces résultats soulignent que les variations observées sont essentiellement liées à des facteurs régionaux communs pour la météorologie, tout en reflétant une diversité hydrologique importante entre les bassins, renforçant ainsi la pertinence et la fiabilité de l'approche méthodologique adoptée.

Chapitre IV : Analyse sectorielle des sécheresses

Introduction

Ce chapitre porte sur l'évaluation de l'intensité et de la durée des sécheresses dans le Nord-Est de l'Algérie, en mobilisant conjointement les indices SPI, RDI et SDI appliqués à des séries de données pluviométriques, thermiques et hydrologiques couvrant la période 1975-2021. L'approche sectorielle adoptée, couplée à une classification par K-moyennes (K-means), vise à mieux cerner la variabilité spatio-temporelle des sécheresses et à déterminer si la région peut être considérée comme une unité climatique homogène, afin d'orienter les stratégies de gestion durable de l'eau à court, moyen et long terme.

IV.1. Aperçu des indices de sécheresse

La sécheresse est l'une des catastrophes naturelles les plus dévastatrices, affectant de vastes régions à l'échelle mondiale et engendrant de graves impacts socio-économiques et environnementaux [144]. Les catastrophes naturelles, y compris les sécheresses, représentent environ 22 % des pertes économiques mondiales ([2]; [145]).

À l'instar d'autres événements climatiques extrêmes, les sécheresses peuvent être caractérisées par leur sévérité, leur localisation, leur durée et leur période d'occurrence. L'évaluation des conditions de sécheresse repose sur des indices, qui sont des représentations numériques dérivées de données climatiques ou hydrométéorologiques [103]. Ces indices jouent un rôle essentiel dans le suivi des sécheresses, les systèmes d'alerte précoce et l'évaluation de leurs impacts.

Bien que la sécheresse soit généralement considérée comme un phénomène régional, son évaluation s'appuie sur des données collectées dans des stations météorologiques, lesquelles servent de points de référence pour de plus vastes zones [120]. Plusieurs méthodologies existent pour le suivi des sécheresses, basées soit sur un indicateur unique, soit sur une combinaison de plusieurs indices afin d'améliorer la précision et la capacité prédictive.

IV.1.1. L'indice de précipitation normalisé (SPI)

L'indice de précipitation normalisé (Standardized Precipitation Index SPI) mis au point par McKee et al. (1993), est un outil largement utilisé pour quantifier les déficits de précipitations. L'SPI est calculé à un endroit donné sur la base des enregistrements historiques de précipitations couvrant la période d'intérêt.

Le calcul du SPI repose sur l'ajustement de la série chronologique des précipitations à long terme, correspondant à une période donnée, à une loi de probabilité appropriée. Cette loi est ensuite transformée en une distribution normale, de manière à ce que la valeur moyenne du SPI, pour la localité et la période étudiées, soit égale à zéro ([30]; [146]).

Des valeurs positives de l'indice SPI indiquent des précipitations supérieures à la médiane, tandis que des valeurs négatives traduisent des précipitations inférieures à la médiane. Grâce à sa normalisation, le SPI offre une représentation unifiée des conditions climatiques, qu'elles soient plus humides ou plus sèches. [147]

La fonction de densité de probabilité pour la distribution gamma définie par ([148] ; [149]; [150]) :

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \cdot x > 0 \quad 4.1$$

Avec :

- $x > 0$: la précipitation
- $\alpha > 0$: le paramètre de forme
- $\beta > 0$: le paramètre d'échelle
- $\Gamma(\alpha)$: la fonction gamma définie par :

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad 4.2$$

Les paramètres α et β de la fonction de densité de probabilité gamma sont estimés pour chaque station et pour chaque échelle temporelle considérée (1, 3, 6, 9, 12 mois, etc.). L'estimation du maximum de vraisemblance (Thom 1958) permet de déterminer les valeurs de α et β , données par les expressions suivantes [147]:

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad \hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}} \quad 4.3$$

Où :

- $\hat{\alpha}$ et $\hat{\beta}$ sont les estimateurs de α et β
- \bar{x} la moyenne de la série de données de précipitations

Pour n observations, le paramètre A est calculé comme suit :

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad 4.4$$

Les paramètres ainsi obtenus sont ensuite utilisés pour déterminer la probabilité cumulée d'un événement de précipitation observé, pour le mois et l'échelle temporelle considérés, au niveau de la station étudiée. Étant donné que la fonction gamma n'est pas définie pour $x = 0$ et que la distribution des précipitations peut inclure des valeurs nulles, la probabilité cumulée s'exprime alors comme suit :

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad 4.5$$

Où :

- **q** représente la probabilité d'une précipitation nulle
- **G(x)** désigne la probabilité cumulée de la fonction gamma incomplète :

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^{\hat{\alpha}} \Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x t^{\hat{\alpha}-1} e^{-t/\hat{\beta}} dt \quad 4.6$$

Si m correspond au nombre de zéros dans une série temporelle de précipitations, alors q peut être estimé par m/n . La probabilité cumulée $H(x)$ est ensuite transformée en une variable aléatoire normale standardisée z , de moyenne nulle et de variance unitaire [151], ce qui correspond à la valeur du SPI.

$$SPI = \varphi^{-1}(H(x)) \quad 4.7$$

Où : φ désigne la fonction de répartition de la loi normale standard.

Selon l'indice SPI, un événement de sécheresse est identifié lorsque l'indice atteint de façon continue une intensité inférieure ou égale à 1,0. L'événement prend fin lorsque le SPI redevient positif. Chaque épisode de sécheresse est donc caractérisé par une durée, définie par son début et sa fin, ainsi qu'une intensité mensuelle. L'ampleur de la sécheresse est quantifiée par la somme des valeurs négatives du SPI enregistrées durant l'événement [152].

En règle générale, les précipitations mensuelles ne suivent pas une distribution normale. Une transformation est donc appliquée afin que les valeurs du SPI dérivées suivent une loi normale. Le SPI représente ainsi le nombre d'écart-types par lequel une valeur observée s'écarte de la moyenne à long terme, considérée comme une variable aléatoire normalement distribuée. Une interprétation des classes de valeurs résultantes est présentée dans le Tableau 4.1 [153] [147].

IV.1.2. Indice de Reconnaissance de la Sécheresse (RDI)

L'indice de sécheresse RDI (Reconnaissance Drought Index) est un indice météorologique généralisé conçu pour l'évaluation de la sécheresse, offrant une estimation plus précise des déficits hydriques en tenant compte à la fois des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle (ETP) ([32] ; [120]). Contrairement à de nombreux indices traditionnels de sécheresse, le RDI fournit une représentation globale des conditions de sécheresse, ce qui le rend particulièrement pertinent pour comparer la sévérité des sécheresses dans des régions aux caractéristiques climatiques diverses. Bien que le RDI présente une tendance similaire à celle du SPI, il se distingue par une plus grande sensibilité aux variations environnementales, faisant de lui un outil précieux pour la surveillance de la sécheresse [154]. Il existe de nombreuses équations pour calculer l'évapotranspiration potentielle, parmi ces méthodes : formule de Thornthwaite (1948), formule de Turc (1961), formule de Blaney Criddle (1950), formule de Penman-Monteith (1965) et la formule de Hargreaves (1985).

- **ETP mensuels selon la formule de Thornthwaite :**

La formule de Thornthwaite permet d'estimer l'évapotranspiration potentielle à l'échelle mensuelle en un lieu en fonction des températures moyennes mensuelles et de la latitude de ce lieu.

Si l'humidité est exprimée en mm, la formule de Thornthwaite s'écrit :

$$ETP(m) = 16 \times \left[\frac{10 \times \bar{T}}{5} \right]^\alpha \times F(m, \varphi) \quad 4.8$$

Avec :

ETP(m) : l'évapotranspiration moyenne du mois m ($m=1$ à 12) en mm.

T : moyenne interannuelle des températures du mois en °C.

$$\alpha = 0,06 \times I + 5$$

I: indice thermique annuel :

F (m, φ) : facteur correctif fonction du mois (m) et de la latitude.

- **Méthode de calcul RDI**

Un avantage majeur du RDI réside dans son applicabilité universelle, permettant l'évaluation de la sécheresse dans divers contextes climatiques [147]. Le calcul du RDI s'appuie sur les données de précipitations et d'évapotranspiration potentielle (PET), et il peut être exprimé sous trois formes : la valeur initiale (α_k), le RDI normalisé (RDI_n) et le RDI standardisé (RDI_{st}).

La valeur initiale α_k du RDI peut être calculée pour l'année i sur une base temporelle de k mois, à l'aide de l'équation suivante :

$$\alpha_k^i = \frac{\sum_{j=1}^k P_{ij}}{\sum_{j=1}^k PET_{ij}} \cdot i = 1(1)N \text{ et } j = 1(1)k \quad 4.9$$

Où P_{ij} et PET_{ij} représentent respectivement les valeurs de précipitation et d'évapotranspiration potentielle pour le mois j de l'année hydrologique i .

Les valeurs de α_k suivent généralement des distributions log-normale et gamma dans un large éventail de régions et d'échelles temporelles, comme cela a été démontré ([155]; [156]). En supposant que la distribution log-normale soit applicable, l'équation suivante peut être utilisée pour calculer le RDI standardisé (RDI_{st}) :

$$RDI_{st}^{(i)} = \frac{y^{(i)} - \bar{y}}{\hat{\sigma}_y} \quad 4.10$$

Où $y^{(i)}$ correspond à (α_k^i), \bar{y}_k représente sa moyenne arithmétique, et $\hat{\sigma}_y$ son écart-type.

Des valeurs positives de l'indice RDI standardisé (RDI_{st}) indiquent des périodes humides, tandis que des valeurs négatives traduisent des périodes sèches, par rapport aux conditions normales de la région. La sévérité de la sécheresse est classée en niveaux faible, modéré, sévère et extrême, sur la base des seuils définis pour le RDI (Tableau 4.1).

IV.1.3. L'indice de sécheresse hydrologique SDI

L'indice de sécheresse hydrologique SDI (Streamflow Drought Index), développé par [33], étend le concept de l'indice de précipitation standardisé (SPI) en utilisant des données mensuelles de débits fluviaux pour quantifier les conditions de sécheresse hydrologique. Le SDI applique des techniques de normalisation similaires à celles du SPI, ce qui permet d'identifier aussi bien les périodes humides que sèches, tout en évaluant l'intensité de la sécheresse.

Le SDI est particulièrement utile pour la détection et le suivi des épisodes de sécheresse à l'échelle de stations hydrométriques spécifiques, bien qu'il ne soit pas toujours représentatif de l'ensemble d'un bassin versant. Le calcul du SDI repose sur les valeurs cumulées de débits fluviaux sur des périodes de référence déterminées, et s'exprime comme suit :

$$V_{i,k} = \sum_{j=1}^{3k} Q_{ij}, \quad i=1, 2, \dots, j=1, 2, \dots, 12, \quad k=1, 2, 3, 4 \quad 4.11$$

Où $V_{i,k}$ représente le débit cumulé de l'année hydrologique i pour la période de référence k .

$K = 1$ pour octobre–décembre ; $K = 2$ pour octobre–mars ; $K = 3$ pour octobre–juin ; et $K = 4$ pour octobre–septembre.

À partir des débits cumulés ainsi calculés, le SDI pour chaque période de référence k est déterminé comme suit :

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{S_k}, \quad i=1, 2, \dots, K=1, 2, 3, 4 \quad 4.12$$

Où \bar{V}_k et S_k représentent respectivement la moyenne et l'écart-type des débits cumulés pour la période de référence k , calculés sur une longue période.

La classification du SDI suit une structure similaire à celle des indices météorologiques de sécheresse tels que le SPI, en définissant cinq niveaux de sévérité de la sécheresse hydrologique (voir Tableau). Cet indice est largement utilisé pour évaluer la disponibilité en eau à long terme, analyser la réponse des bassins versants à la sécheresse et soutenir les stratégies de gestion des ressources en eau.

Tableau 4.1 : Résumé des catégories humides et sèches issues de différents indices de sécheresse en fonction de la valeur de l'indice ([153]; [147]).

Catégories	Sécheresse météorologique et hydrologique SPI, RDI et SDI
Extrêmement sèche	≤ -2
Sévèrement sèche	$[-1.5 : -2]$
Modérément sèche	$[-1 : -1.5]$
Proche de la normale	$[-1 : 1]$
Modérément humide	$[1 : 1.5]$
Sévèrement humide	$[1.5 : 2]$
Extrêmement humide	$\geq +2$

IV.1.4. Regroupement des moyennes K (K-means) :

La méthode de regroupement K-Means a été appliquée afin de classifier les stations météorologiques en trois secteurs (Nord, Centre, Sud), sur la base d'une combinaison de variables : les valeurs moyennes de SPI et RDI (pondérées à 0,4 chacune) ainsi que les coordonnées géographiques (X, Y ; pondérées à 0,1 chacune), de manière à accorder une priorité plus élevée aux indices climatiques par rapport à la localisation spatiale.

Toutes les variables ont été standardisées (échelle z-score) afin d'assurer une contribution équitable. Le nombre optimal de groupes ($K=3$) a été validé à l'aide de la méthode du coude, où la courbe de la somme des carrés intra-groupes (WSS) présentait un coude net pour $K=3$. De plus, les scores de silhouette affichaient une moyenne de 0,65, indiquant une bonne séparation entre les groupes.

IV.3. Méthodes de détection des tendances

L'analyse de tendance joue ici un rôle fondamental, car elle permet d'identifier et de quantifier les évolutions à long terme de ces indices dans un contexte marqué par la variabilité et le changement climatique ([157]; [68]). Le test de Mann-Kendall (MK) ([51]; [52]), largement utilisé en hydrologie et recommandé par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM, 2016), permet de détecter la présence d'une tendance monotone croissante ou décroissante, sans hypothèse préalable sur la distribution des données. Cependant, la présence d'autocorrélation dans les séries temporelles peut biaiser ses résultats, ce qui a conduit au développement du test de Mann-Kendall modifié (MMK) [158], qui corrige la variance et améliore la robustesse de l'analyse. En parallèle, l'estimateur de pente de Theil-Sen ([159]; [160]) est largement utilisé pour mesurer l'intensité des tendances détectées, car il fournit une estimation robuste et peu sensible aux valeurs aberrantes.

Ainsi, la combinaison des indices de sécheresse (SPI, RDI, SDI) avec les méthodes statistiques de détection et de quantification des tendances (MK, MMK et Theil-Sen) offre un cadre méthodologique solide pour analyser l'évolution des sécheresses. Cette approche permet non seulement de déterminer la présence et la direction des tendances, mais aussi d'en mesurer l'ampleur, constituant une base scientifique essentielle pour l'élaboration de stratégies d'adaptation et la gestion durable des ressources en eau.

IV.3.1. Test de Mann-Kendall

Le test de Mann-Kendall (MK), développé par Mann (1945) puis perfectionné par Kendall (1975), est une méthode statistique non paramétrique largement utilisée pour la détection des tendances monotones dans les séries temporelles. Il a été largement appliqué dans les études hydrologiques et météorologiques à travers le monde ([161]; [162]; [163]; [164]; [165]; [166]).

La statistique du test de Mann-Kendall (S) est calculée à l'aide de la relation suivante :

$$S = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \text{sgn}(x_j - x_i) \quad 4.13$$

Et

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & \text{if}(x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{if}(x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{if}(x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad 4.14$$

Ainsi, $S > 0$ indique une tendance croissante, tandis que $S < 0$ traduit une tendance décroissante. De plus, pour obtenir un résultat et une évaluation plus précis, il est nécessaire de calculer la variance (VAR) [167]. Celle-ci est déterminée à l'aide de l'équation suivante:

$$\text{VAR}(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5)] \quad 4.15$$

Où

t_p représente le nombre de valeurs liées (ties) dans l'échantillon p , et g désigne le nombre de groupes présentant les mêmes valeurs de données. Si $\text{VAR}(S) > 0$, la tendance est positive ; si $\text{VAR}(S) < 0$, la tendance est négative [168].

La statistique Z de Mann-Kendall est ensuite déterminé comme suit :

$$\begin{aligned} Z &= \frac{S-1}{[VAR(S)]^{1/2}} & S > 0 \\ Z &= 0 & S = 0 \\ Z &= \frac{S+1}{[VAR(S)]^{1/2}} & S < 0 \end{aligned} \quad 4.16$$

Si $Z > 0$, cela indique une tendance croissante ; si $Z < 0$, cela traduit une tendance décroissante.

Le test de Kendall essaye de rejeter l'hypothèse nulle (H_0 : aucune tendance monotonique) et accepter l'hypothèse alternative (H_1 : présence d'une tendance monotonique).

IV.3.2. Test de Mann-Kendall Modifié (Wang, 2004)

L'autocorrélation dans les séries temporelles invalide le test de Mann-Kendall en violant son hypothèse d'indépendance des observations. Cela réduit la taille effective de l'échantillon et augmente le risque de tirer des conclusions erronées quant à la significativité des tendances.

IV.3.3. L'ajustement de Yue et Wang (2004)

Yue et Wang (2004) ont proposé une version améliorée du test de Mann-Kendall afin de corriger l'effet de l'autocorrélation dans les séries temporelles. Leur approche consiste à ajuster la variance du test pour refléter la taille effective de l'échantillon. La variance modifiée est donnée par :

$$Var^*(S) = (n/n^*)Var(S) \quad 4.17$$

Où n^* est la taille effective de l'échantillon. Elle est définie par :

$$(n/n^*) = 1 + \frac{2}{n} \sum_{k=1}^{n-1} (n-k)\rho(k) \quad 4.18$$

Et $\rho(k)$ désigne l'autocorrélation au retard k . Le test statistique révisée est :

$$Z^* = (S \pm 1)/[VAR(S)]^{1/2} \text{ (or } 0 \text{ if } S = 0) \quad 4.19$$

- Afin de prendre en compte les tests multiples réalisés sur l'ensemble des stations météorologiques, des échelles temporelles et des indices climatiques (soit un total de 120 tests), une correction du taux de fausses découvertes (False Discovery Rate, FDR) a été appliquée selon la procédure de [169], avec un seuil de signification fixé à $\alpha = 0,05$.

Contrairement à la méthode de Bonferroni, souvent jugée trop conservatrice car elle divise le seuil α par le nombre total de tests afin de contrôler le taux d'erreur global de type I (Family-Wise Error Rate), la méthode FDR vise à contrôler la proportion moyenne attendue de faux positifs parmi l'ensemble des hypothèses nulles rejetées [169].

Cette approche repose sur un seuil adaptatif, ajusté selon le rang croissant des valeurs de p , ce qui permet d'augmenter la puissance de détection des signaux réels tout en préservant la validité statistique des résultats [170]. Ce compromis entre rigueur et sensibilité rend la procédure de Benjamini-Hochberg particulièrement adaptée aux analyses exploratoires de tendances hydro climatiques, où la multiplicité

des tests et la variabilité spatio-temporelle des données peuvent accroître le risque d'erreurs de conclusion.

Ainsi, seules les valeurs de p inférieures à leur seuil FDR spécifique au rang ont été considérées comme statistiquement significatives, assurant une interprétation plus fiable et équilibrée des résultats.

IV.3.4. Estimateur de Theil-Sen

L'estimateur de Theil-Sen, introduit initialement par Theil (1950) puis affiné par Sen (1968), est une méthode non paramétrique utilisée pour estimer l'ampleur d'une tendance dans les séries chronologiques. Il est particulièrement efficace pour détecter les tendances linéaires tout en étant robuste face aux valeurs aberrantes.

La pente de Theil-Sen (Q) est calculée comme suit :

$$Q = \frac{x_j - x_i}{t_j - t_i} \quad 4.20$$

Où x_j et x_i représentent respectivement les valeurs de la variable aux instants t_j et t_i . La tendance globale est ensuite estimée comme la médiane de l'ensemble des pentes calculées.

$$\text{Sen's slope} = \text{median}(Q) \quad 4.21$$

Cette approche robuste garantit que l'estimation de la tendance n'est pas affectée par les valeurs extrêmes et fournit une évaluation fiable des changements directionnels dans les séries de données hydrométéorologiques.

IV.4. Matériel utilisé

IV.4.1. DrinC

Le logiciel DrinC (Drought Indices Calculator) est un outil informatique développé par Tsakiris et al. (2007) au sein du Laboratoire de Gestion des Ressources en Eau et de Re-aménagement de l'Université Technique Nationale d'Athènes. Il a été conçu pour faciliter le calcul de divers indices de sécheresse à partir de données climatiques ou hydrologiques.

- **Structure du logiciel, interface et gestion des données :**

DrinC a été programmé en Visual Basic 6. Lors de son développement, une attention particulière a été portée à la création d'une structure simple, claire et conviviale pour l'utilisateur. L'organigramme du fonctionnement du logiciel est présenté à la Figure 4.1.

DrinC dispose d'une interface graphique complète (GUI) et fonctionne sous les systèmes d'exploitation Microsoft Windows (Fig. 4.2). Toutes les fonctions principales sont accessibles via le menu principal du logiciel, tandis que certaines options supplémentaires sont disponibles pour des opérations spécifiques.

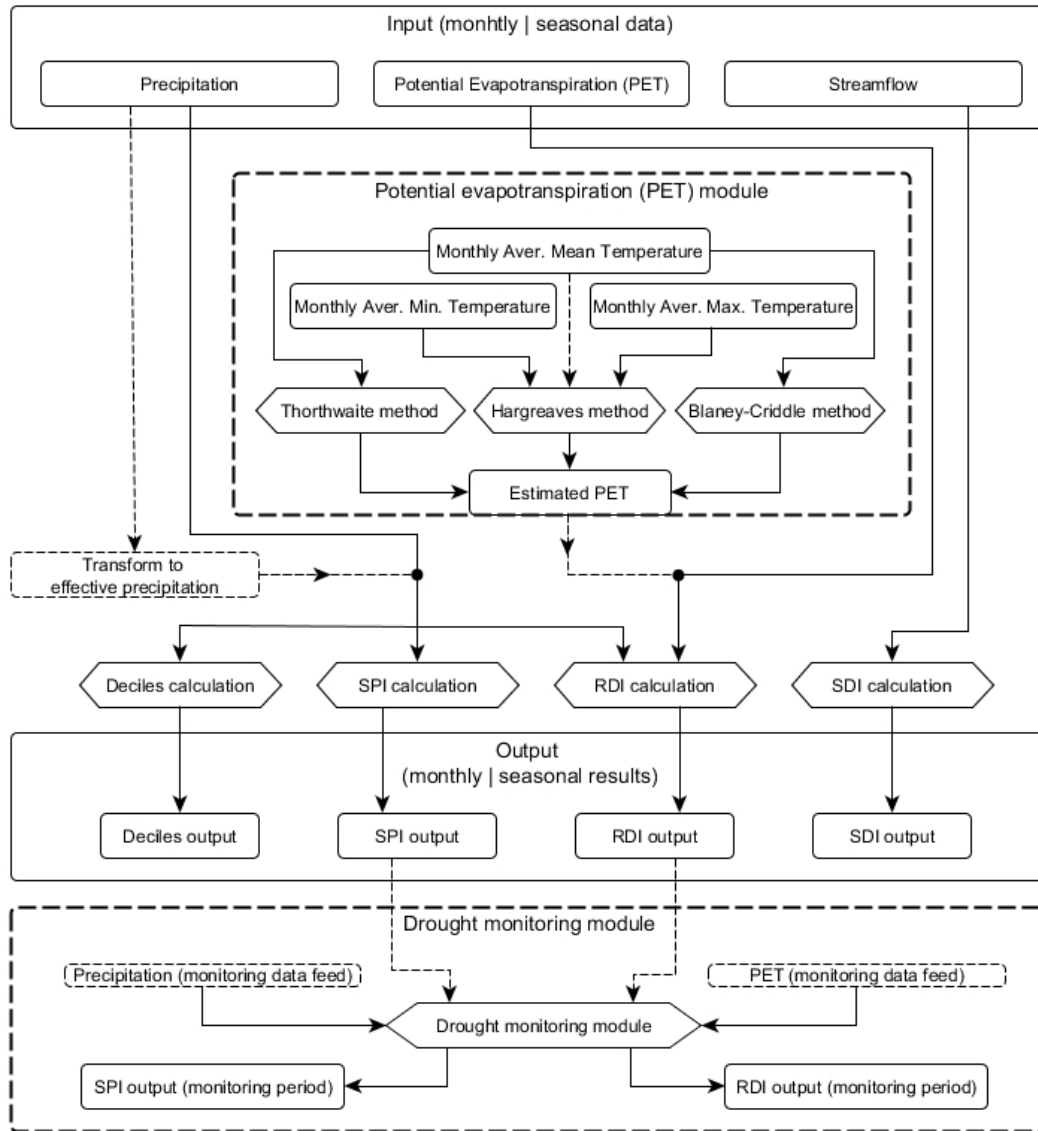


Figure 4.1. Organigramme du logiciel DrinC. (Tigkas D et all, 2015)

Le calcul de chaque indice nécessite des données d'entrée spécifiques, comme le montre le tableau 4.2. Les données peuvent être mensuelles, annuelles ou saisonnières, et il existe une option permettant d'utiliser soit des séries de données réelles (jusqu'à 150 ans), soit des séries de données synthétiques (jusqu'à 1500 ans).

Tableau 4.2. Données d'entrée requises pour chaque indice

Indices	Données nécessaires en entrée
Deciles	Précipitation
SPI	Précipitation
RDI	Précipitation, PET (or température)
SDI	Débit

Les données peuvent être importées directement depuis des fichiers Microsoft Excel (.xls). Pour les données mensuelles, le logiciel détecte automatiquement la structure du fichier et localise la position des données dans la feuille de calcul. En revanche, pour les données annuelles ou saisonnières, l'utilisateur doit spécifier manuellement les cellules à partir desquelles le chargement doit débuter.

Le logiciel offre également la possibilité de transformer les données de précipitations en précipitations effectives, en utilisant soit la méthode du Bureau of Reclamation des États-Unis, soit la méthode de la FAO [65].

Les données importées sont affichées sous forme de grille, ce qui permet à l'utilisateur de les consulter et de les vérifier facilement.

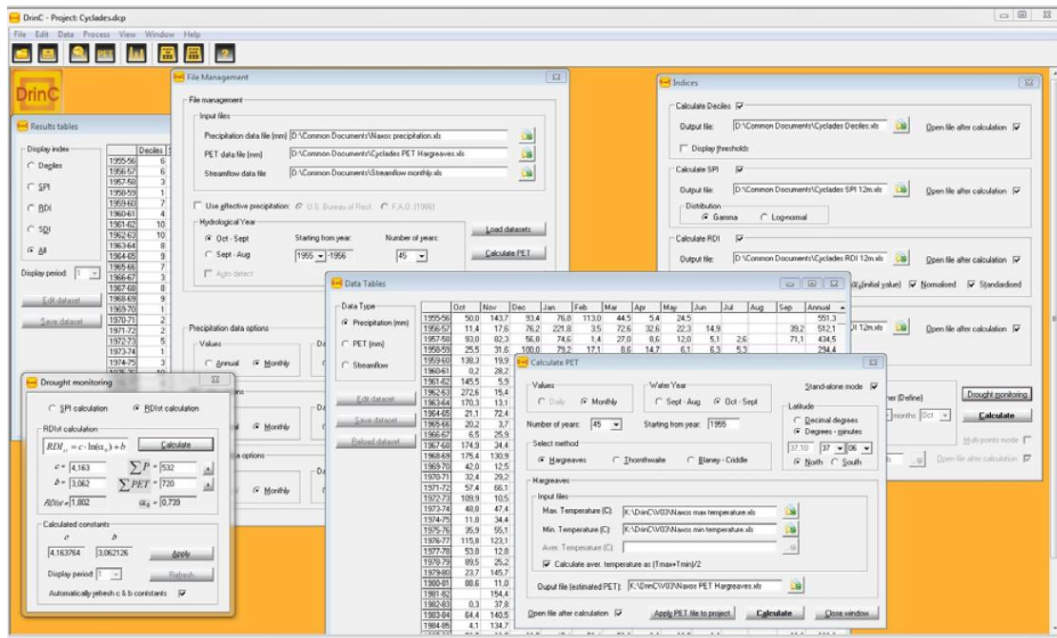


Figure 4.2. L'interface graphique utilisateur (GUI) du logiciel DrinC.

IV.4.2. Le logiciel R

Le logiciel R est un langage de programmation ainsi qu'un environnement statistique libre et open source, développé pour le traitement des données, les analyses statistiques et la création de visualisations graphiques. Initié dans les années 1990 par Ross Ihaka et Robert Gentleman à l'Université d'Auckland (Nouvelle-Zélande), R est rapidement devenu un outil incontournable dans les milieux académiques, scientifiques et professionnels.

Conçu initialement comme une alternative libre au langage S (développé par Bell Labs), R est aujourd'hui maintenu et développé par la R Foundation for Statistical Computing, avec le soutien d'une vaste communauté internationale.

- **Fonctionnalités principales**

R permet de réaliser une grande variété d'analyses et de traitements, notamment :

- ✓ Des statistiques descriptives (moyennes, écarts-types, corrélations, etc.) ;

- ✓ Des modélisations statistiques (régression linéaire et non linéaire, modèles ARIMA, ANOVA, etc.) ;
- ✓ Des analyses multivariées (ACP, CAH, régression logistique, etc.) ;
- ✓ Des analyses graphiques très puissantes avec des packages comme ggplot2 ;
- ✓ Des applications en machine learning via des bibliothèques telles que caret, randomForest ou xgboost ;
- ✓ La reproductibilité des analyses via R Markdown et knitr.

- **Interface et environnement**

R fonctionne sur la plupart des systèmes d'exploitation (Windows, macOS, Linux) et peut être utilisé via une console ou une interface de développement intégrée (IDE) comme RStudio, qui facilite grandement la rédaction, l'exécution et la documentation des analyses.

- **Domaines d'application**

R est utilisé dans de nombreux secteurs :

- ✓ Recherche scientifique
- ✓ Climatologie et environnement
- ✓ Santé publique et biostatistique
- ✓ Économie et finance
- ✓ Data science

IV.5. Résultats et discussions

IV.5.1. Classification géographique et climatique des secteurs des stations météorologiques à l'aide du regroupement des moyennes K (K-means) et de l'analyse des tendances de sécheresse

Les stations météorologiques ont été classées en trois secteurs Nord, Centre et Sud à l'aide de la méthode de classification la moyenne K (K-Means), basée sur la latitude (coordonnées Y). Cette classification repose sur l'hypothèse selon laquelle la proximité de la mer Méditerranée est associée à un climat méditerranéen plus humide, tandis qu'une plus grande distance vers l'intérieur des terres correspond à des conditions plus sèches et arides (Tab. 4.3). L'ensemble de données, composé de 10 stations, a ainsi été regroupé objectivement en trois clusters : Les stations ayant les coordonnées Y les plus élevées (secteur Nord, les plus proches de la Méditerranée), celles avec des coordonnées Y intermédiaires (secteur Centre, zone de transition semi-aride), et celles avec les coordonnées Y les plus faibles (secteur Sud, intérieur aride) (Fig. 4.3). La validité de cette classification a été confirmée par des analyses de tendances de type Mann-Kendall appliquées aux indices hydrométéorologiques.

Tableau 4.3. Classification des secteurs climatiques basée sur le regroupement des moyennes k.

Secteur Climatique	Stations	Y (Nord-Sud)
Nord	Annaba. El Kalla. Barrage Chaffia. Bekouche Lakhdar	$Y > 380$ km
Centre	Barrage Zerdaza. Medjes Amar. Souk Ahras	$300 \text{ km} < Y \leq 380$ km
Sud	Oum El Bouaghi. Khenchela. Tébessa	$Y \leq 300$ km

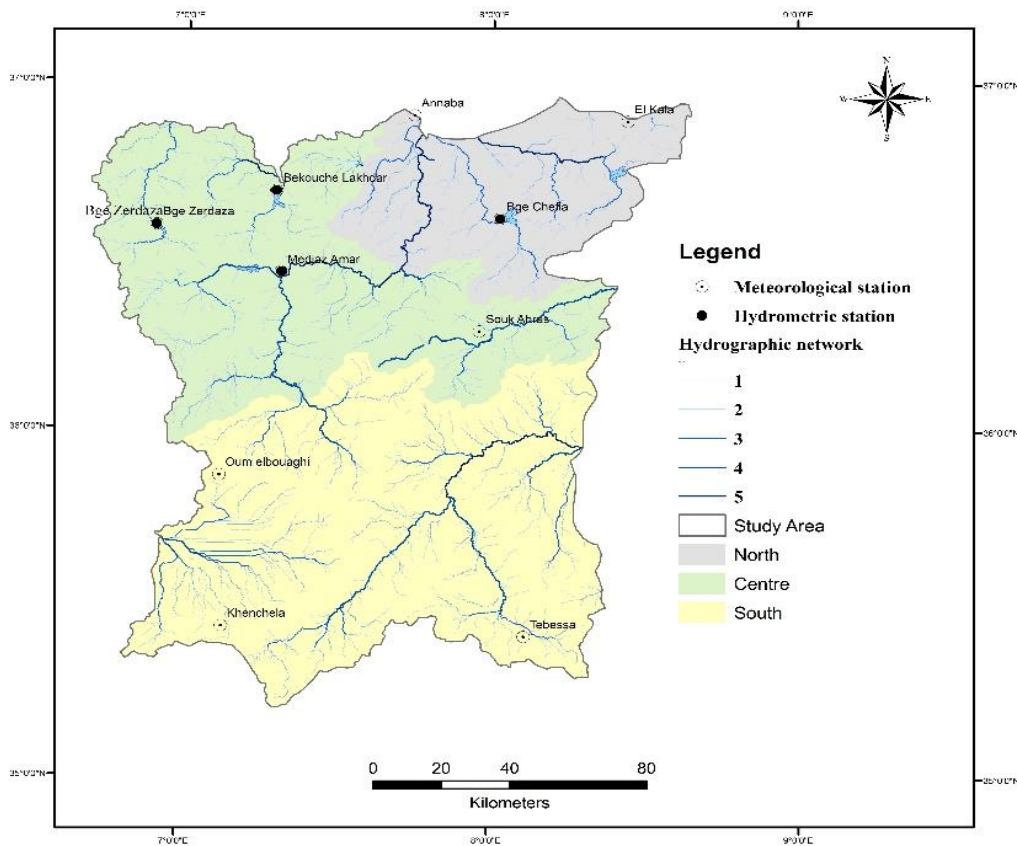


Figure 4.3. Classification des secteurs climatiques basée sur le regroupement K-Means.

IV.5.2. Validation statistique des tendances du SPI et du RDI

Le test de Mann-Kendall a confirmé que la classification géographique reflète correctement les régimes climatiques, en s'appuyant sur le SPI-12 et le RDI-12 pour l'analyse des tendances de sécheresse, avec une forte attention portée à la réduction de l'influence des coordonnées géographiques (X, Y) et à la mise en valeur du rôle des indices SPI et RDI. Les valeurs moyennes (Tab. 4.4) indiquent que le Nord est caractérisé par un climat humide (SPI-moyen = 0,00023 ; RDI-moyen = 0,003), le Centre constitue une zone de transition (SPI-moyen = 0,0007 ; RDI-moyen = 0,0008), tandis que le Sud se distingue par un climat plus sec (SPI-moyen = -0,0004 ; RDI-moyen = -0,0007).

Tableau 4.4. Résultats du test de Mann-Kendall pour les tendances SPI et RDI à travers les secteurs climatiques.

Station	X	Y	SPI-moyen	SPI-std	SPI-moyen-Secteur	RDI-mean	RDI-std	RDI-moyen-Secteur
Annaba	951.1	411.35	0.000301	1.011137		0.000527	1.011146	
El Kala	1012.31	415.04	-10^{-4}	1.011104	0.00023	0.000465	1.011136	0.003
Barrage Chefia	977.15	381.3	0.000482	1.011161		0.00741	1.012468	
Barrage Zerdaza	875.3	374.6	$-4.1 \cdot 10^{-5}$	1.011089		-0.00017	1.011088	
Bekkouch Lakhdar	899	386.2	0.001351	1.011278	0.0007	0.001469	1.01129	0.0008
Medjez Amar	907.23	360.44	0.00112	1.011214		0.001437	1.011243	
Souk Ahras	971.3	343.75	0.00031	1.01113		0.00035	1.011133	
Oum El Bouaghi	898.29	293.58	$-6.1 \cdot 10^{-5}$	1.011097		-0.00042	1.011052	
Khenchela	903.92	249.42	-0.00011	1.011102	-0.0004	-0.00069	1.011025	-0.0007
Tébessa	991.9	247.2	-0.00098	1.011003		-0.00108	1.010988	

Les tests de Kruskal-Wallis n’ont révélé aucune différence significative entre les secteurs, ce qui justifie leur regroupement en Nord, Centre et Sud (Tab. 4.5). Cela confirme que le SPI et le RDI constituent des indicateurs fiables des caractéristiques climatiques de ces secteurs.

Tableau 4.5. Résultats du test de Kruskal-Wallis pour les moyennes du SPI et du RDI selon les secteurs climatiques

Indices	Kruskal-Wallis Valeur H	Valeur P
SPI-moyen	5.50	0.064
RDI-moyen	5.98	0.050

La figure 4.4 présente les boîtes à moustaches du SPI-moyen et du RDI-moyen, mettant en évidence des valeurs positives dans le Nord humide, proches de zéro dans le Centre équilibré, et négatives dans le Sud sec et soumis au stress hydrique. Ces résultats confirment l’intérêt d’intégrer les indices climatiques, les tests statistiques et les représentations graphiques pour affiner la classification.

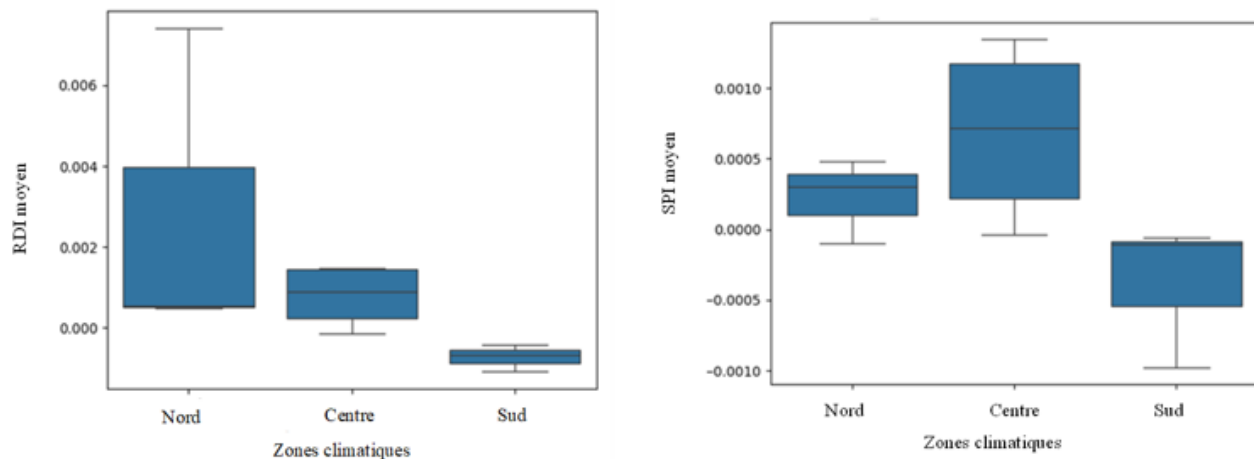


Figure 4.4. Distribution du SPI-moyen et du RDI-moyen à travers les zones climatiques (Nord, Centre et Sud)

IV.5.2.1. Distribution fréquentielle des résultats des indices SPI-RDI

- Secteur nord

Les analyses du SPI et du RDI pour le secteur nord de l'Algérie, en particulier le nord du bassin versant de la Seybouse (station d'Annaba Figure 4.5) et le Constantinois-Est (barrage de Chefia et stations d'El Kalla Figure 4.6), révèlent une tendance commune vers des conditions de type sécheresse. Cette tendance se manifeste à toutes les échelles temporelles (12, 6, 3 et 1 mois), avec des occurrences ponctuelles de conditions modérément sèches, suggérant une légère inclination vers l'aridité. Les épisodes de sécheresse sévère ou d'humidité extrême demeurent rares, tandis que des périodes modérément sèches et humides interrompent occasionnellement la stabilité climatique globale. Ce schéma met en évidence une variabilité limitée et une évolution progressive vers des conditions plus sèches, révélatrices d'une tendance émergente à la sécheresse. Dans l'ensemble, les résultats du SPI et du RDI soulignent une région connaissant une sécheresse subtile mais persistante, avec de rares déviations vers des conditions plus humides.

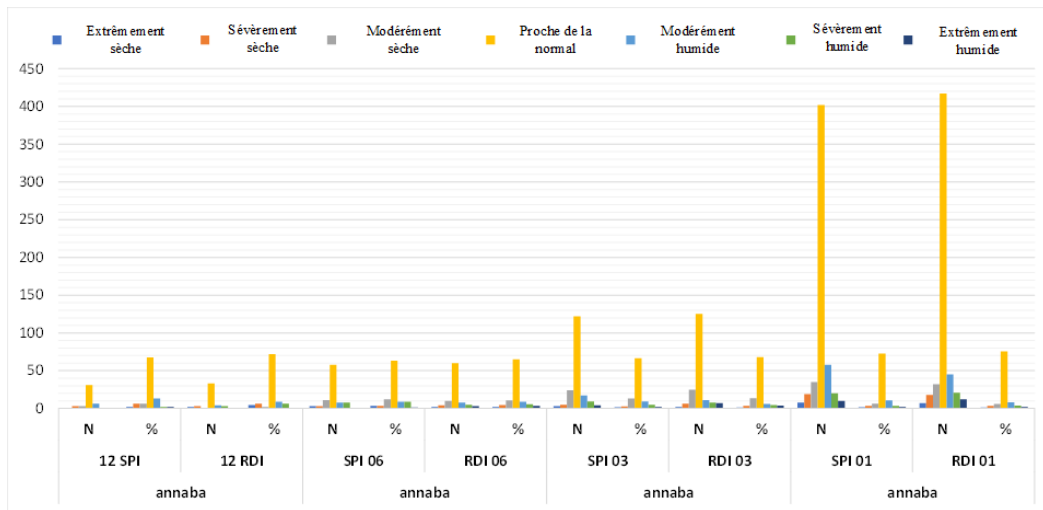


Figure 4.5. Analyse du SPI et du RDI pour la partie nord du bassin versant de la Seybouse à travers la station d'Annaba.

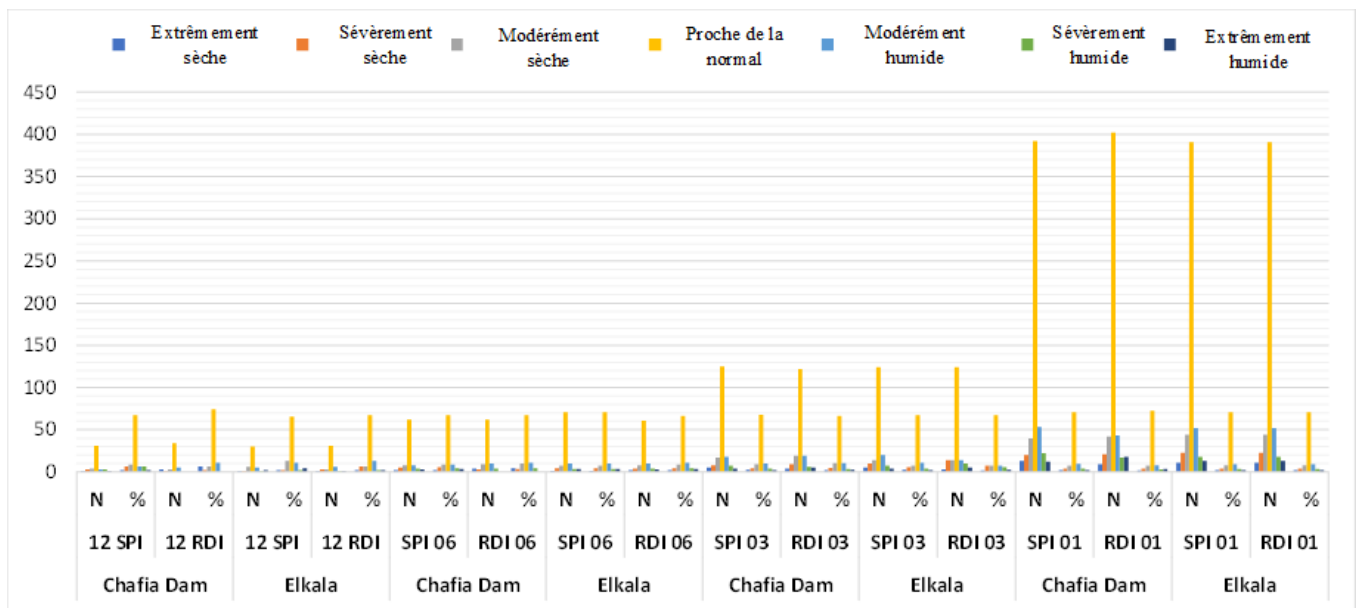


Figure 4.6. Analyse du SPI et du RDI pour le barrage de Chafia et les stations d'El Kalla dans le bassin versant du Constantinois-Est.

- **Secteur centre:**

Pour le bassin versant du Constantinois Centre (Ouest) (stations des barrages de Bekkouch Lakhdar et de Zerdaza Figure 4.7), ainsi que pour le bassin versant Nord Medjerda–Mellague et la partie centrale de la Seybouse (stations de Souk Ahras et de Medjez Amar Figure 4.8), les analyses du SPI et du RDI mettent en évidence un schéma cohérent de tendances vers des conditions de type sécheresse à travers le nord de l'Algérie.

Les deux indices indiquent majoritairement des conditions « proches de la normale » à toutes les échelles temporelles (12, 6, 3 et 1 mois pour le SPI, et RDI 01 et RDI 03 pour les indices à court terme), ce qui suggère un climat relativement stable avec des fluctuations périodiques. Cependant, des périodes modérément sèches ou humides apparaissent ponctuellement, traduisant une tendance subtile mais persistante vers une plus grande aridité.

Bien que les épisodes de sécheresse sévère et d'humidité extrême demeurent rares, la survenue sporadique de conditions modérément sèches ou humides suggère un équilibre climatique fragile, légèrement orienté vers l'aridité. Parmi ces bassins versants, la Medjerda–Mellague, située plus à l'est, présente une variabilité plus marquée des épisodes secs et humides par rapport au bassin du Constantinois Centre (Ouest), traduisant un régime hydrologique plus dynamique.

Ces résultats confirment l'évolution progressive mais perceptible vers des conditions plus sèches dans la région, soulignant la nécessité d'un suivi continu des tendances hydrologiques et de leurs impacts potentiels à long terme.

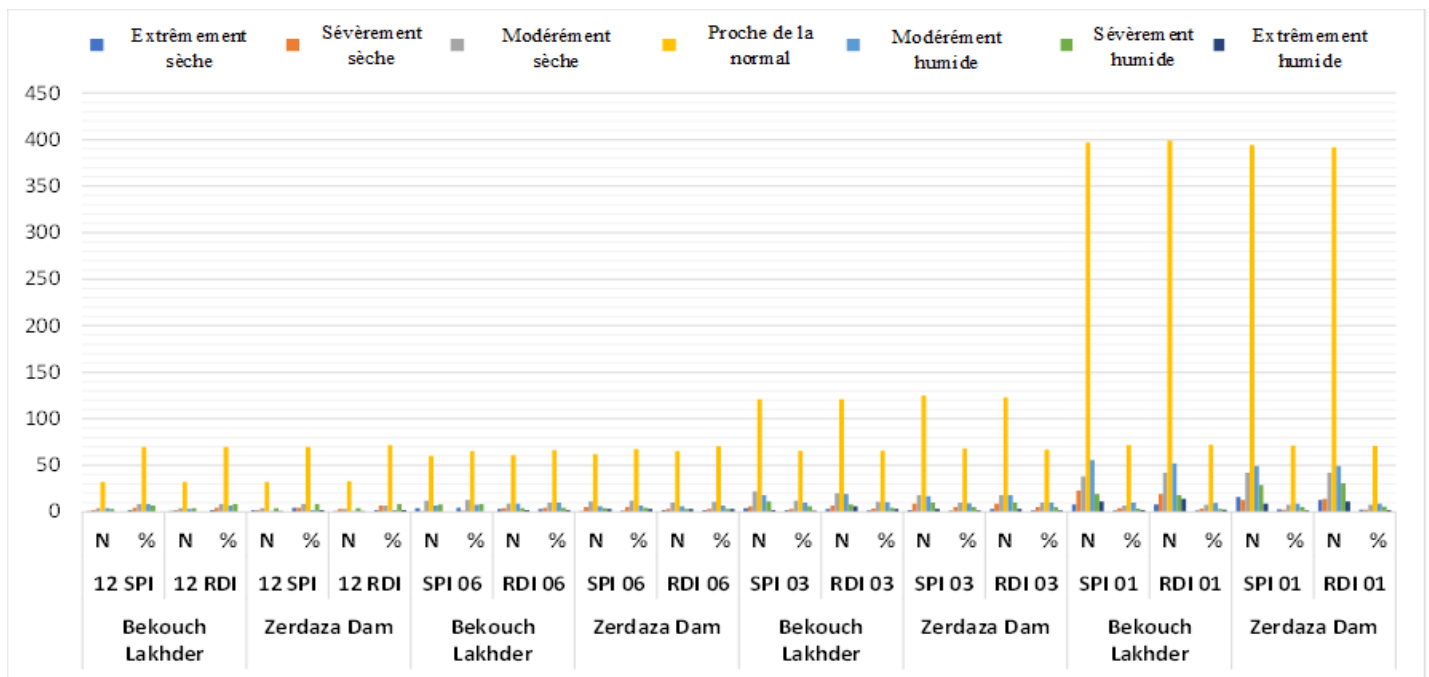


Figure 4.7. Analyse du SPI et du RDI pour les stations de Bekkouch Lakhder et du barrage de Zerdaza dans le bassin versant du Constantinois Centre (Ouest).

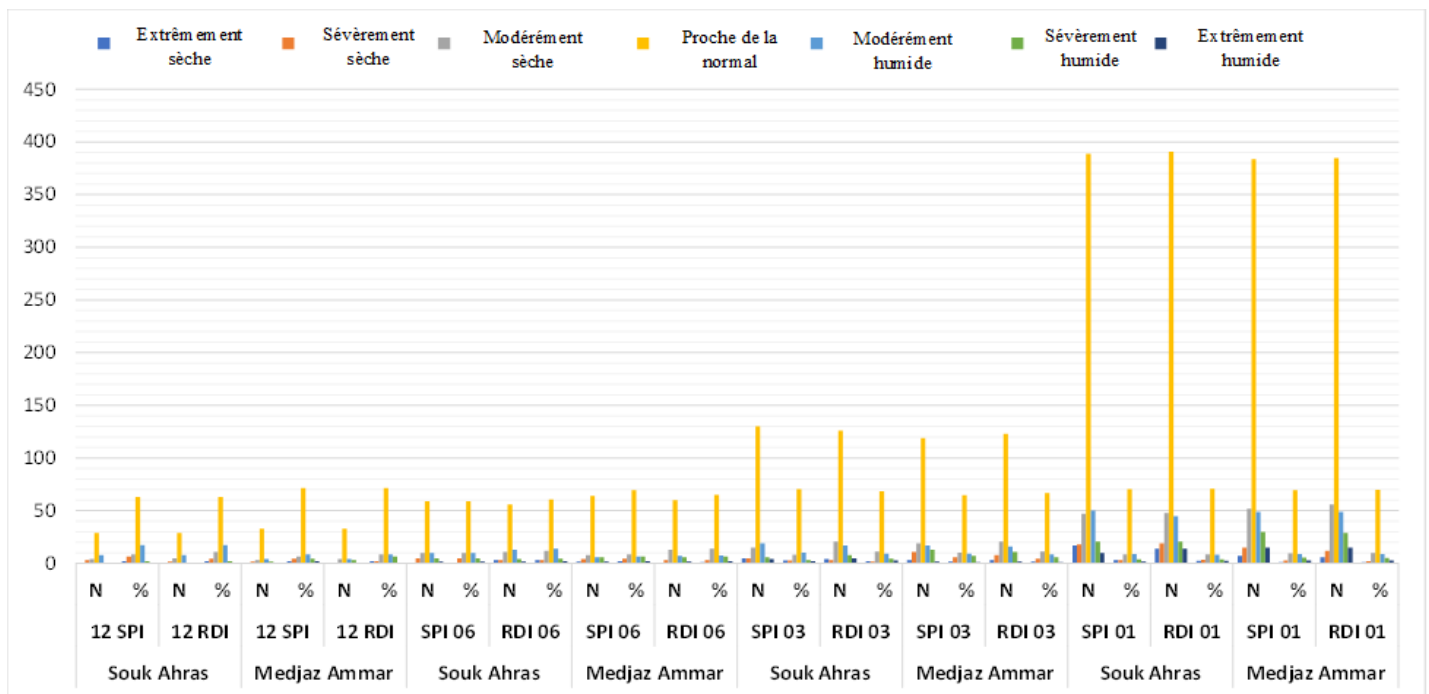


Figure 4.8. Analyse du SPI et du RDI pour les stations de Souk Ahras et de Medjaz Amar dans les bassins versants de la Medjerda–Mellague Nord et de la Seybouse Centrale.

• Secteur Sud

Les analyses du SPI et du RDI pour le bassin versant des Hautes Plaines du Constantinois Nord (stations de Khenchela et d'Oum El Bouaghi Figure 4.9) ainsi que pour le bassin versant de la Medjerda–Mellague Sud (station de Tébessa Figure 4.10) mettent en évidence un schéma de stabilité similaire à celui observé

dans d'autres bassins, tels que la Seybouse, le Constantinois-Est, la Medjerda-Mellague Nord et le Constantinois-Centre.

Les deux indices montrent une prédominance de conditions « proches de la normale » à toutes les échelles temporelles, avec toutefois des épisodes ponctuels « modérément humides » ou « modérément secs », notamment aux échelles courtes comme le SPI 01 mois, le SPI 03 mois ou le RDI 01. Les épisodes de sécheresse sévère et d'humidité extrême demeurent rares, tandis qu'une variabilité modérée suggère un climat légèrement sec mais globalement équilibré.

La sensibilité du SPI aux variations à court terme complète la représentation plus stable offerte par le RDI, soulignant leur convergence dans l'identification d'événements climatiques extrêmes limités.

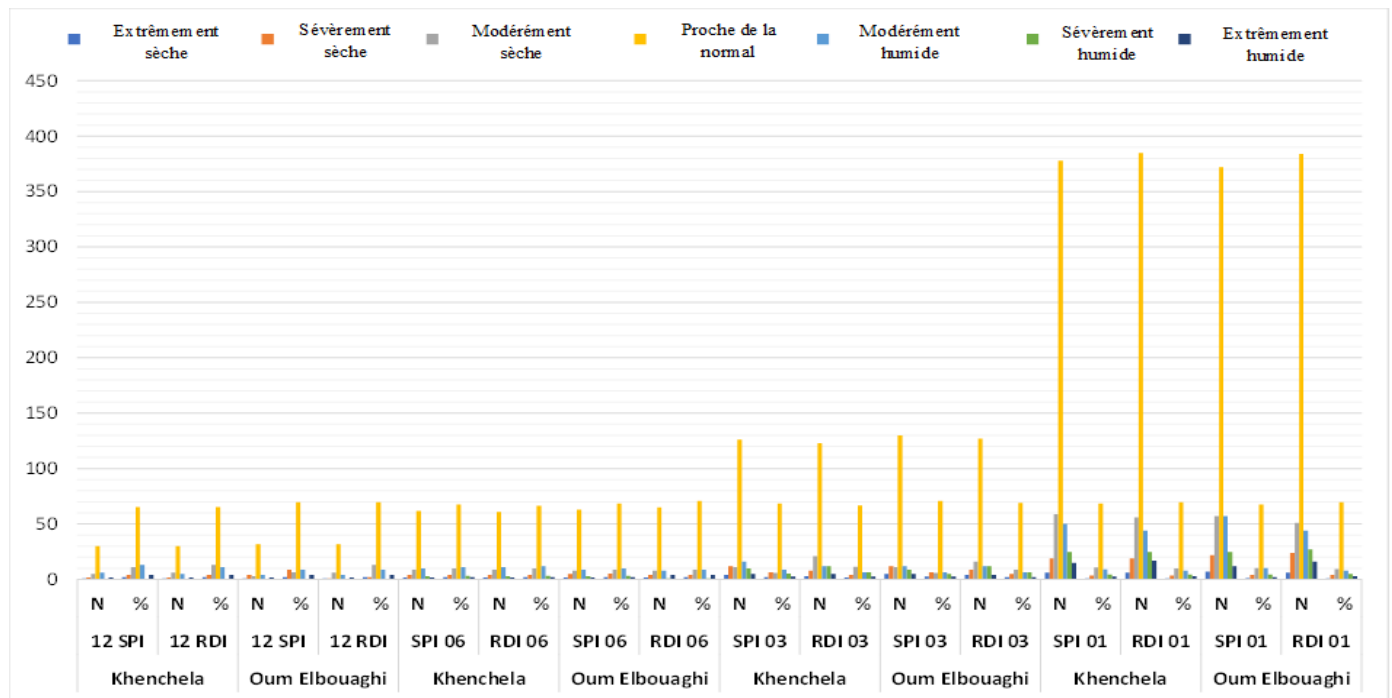


Figure 4.9. Analyse du SPI et du RDI pour les stations de Khenchela et d'Oum El Bouaghi dans le bassin versant des Hautes Plaines du Constantinois Nord.

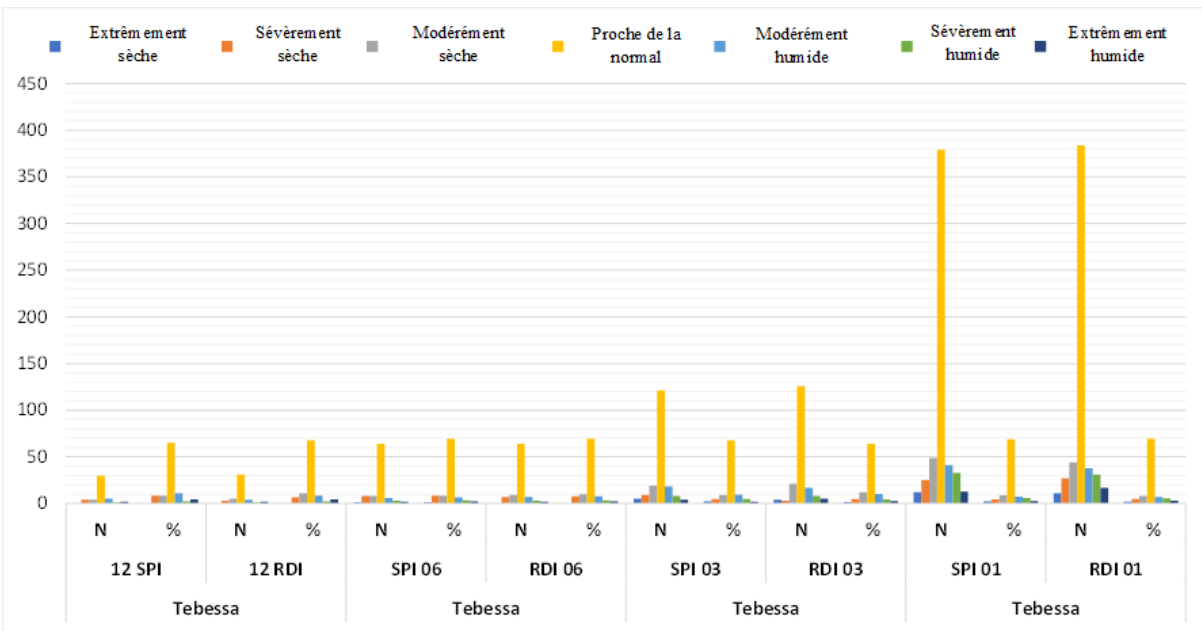


Figure 4.10. Analyse du SPI et du RDI pour le bassin versant de la Medjerda–Mellague (partie sud) à travers la station de Tebessa.

IV.5.2.2. Interprétation de la carte arborescente (treemap) des tendances de sécheresse (SPI-RDI)

- Secteur nord :

La visualisation multi-panneaux du SPI et du RDI pour le secteur nord de l’Algérie met en évidence une augmentation progressive de la sévérité des sécheresses. Les panneaux du SPI-12 et du RDI-12 montrent des tendances négatives persistantes, indiquant des conditions sèches prolongées. Aux échelles plus courtes (SPI-01, RDI-01, SPI-03, RDI-03), une variabilité apparaît, suggérant l’occurrence de périodes sèches ponctuelles ou, plus rarement, d’épisodes humides. Les stations d’Annaba, du barrage de Chefia et d’El Kalla confirment cette tendance régionale à l’assèchement, probablement accentuée par la transition du climat méditerranéen vers un climat semi-aride, soulignant ainsi la nécessité d’une gestion adaptative des ressources en eau (Fig. 4.11).

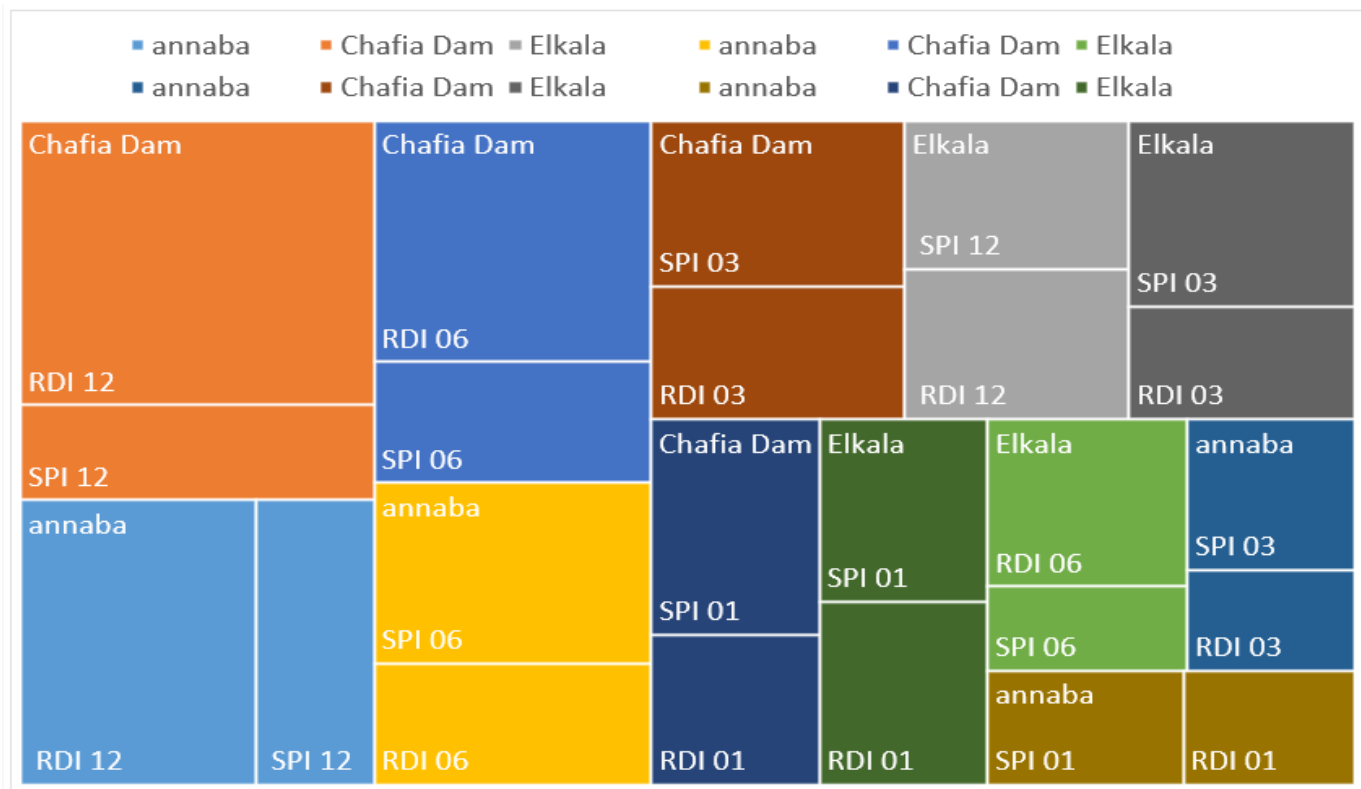


Figure 4.II. Analyse multi-échelles du SPI et du RDI des tendances de sécheresse dans le nord de l’Algérie (bassin versant de la Seybouse et Constantinois-Est).

• **Secteur centre :**

La carte arborescente (treemap) met en évidence une intensification de la sécheresse dans le secteur central, où les indices à 6 mois (SPI-06, RDI-06) et à 12 mois dominant, traduisant une aridité prolongée. À Souk Ahras, la variabilité se manifeste principalement à court terme (SPI-01, RDI-01). À Medjez Amar, l’éventail plus large d’indices mobilisés, incluant le SPI-03 et le RDI-03, reflète un climat fragile et instable. Les analyses SPI et RDI pour le Constantinois Centre (Ouest) ainsi que pour les bassins versants Medjerda–Mellague Nord et Seybouse Centrale indiquent une tendance croissante à la sécheresse dans le nord de l’Algérie, marquée par des conditions allant de « proches de la normale » à « modérément sèches », avec un assèchement lent mais persistant dans la région de la Medjerda–Mellague (Fig. 4.12).

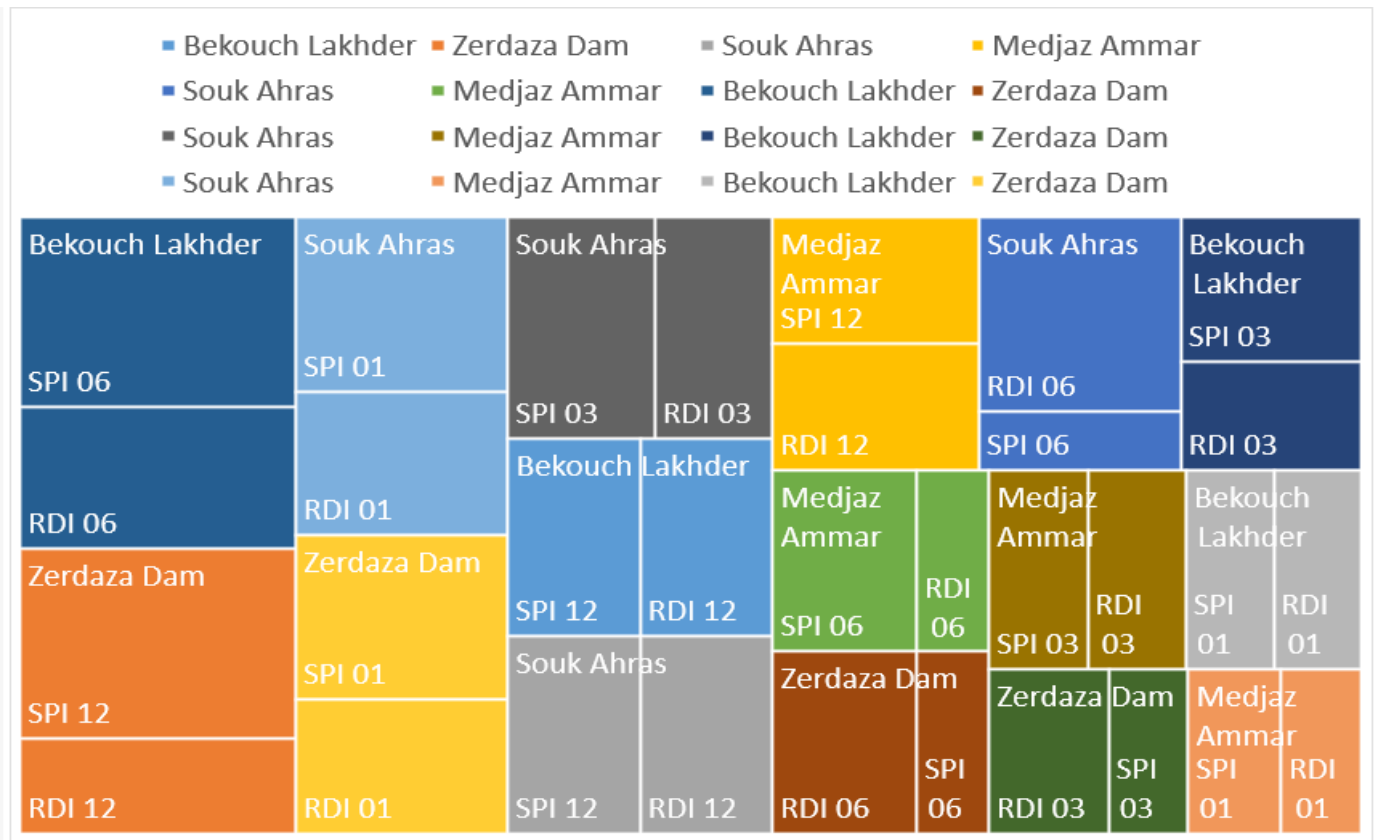


Figure 4.12. SPI et RDI dans le Constantinois Centre (Ouest), la Medjerda–Mellague Nord et la Seybouse Centrale (Nord-Est de l’Algérie).

• **Secteur sud :**

La carte arborescente (treemap) (Fig. 4.13) met en évidence une sécheresse persistante dans la partie sud de la zone d’étude, englobant les Hautes Plaines du Constantinois Nord et le bassin versant sud de la Medjerda–Mellague (via la station de Tébessa). Les stations de Khenchela, d’Oum El Bouaghi et de Tébessa présentent une prédominance des indices SPI-06, RDI-06 et SPI-12, révélant des conditions sèches prolongées. Les indices à court terme (SPI-01, RDI-01) apparaissent moins fréquemment, ce qui renforce la tendance à un stress hydrique durable. La rareté des épisodes d’humidité extrême reflète un climat stable mais de plus en plus aride dans cette zone méridionale.

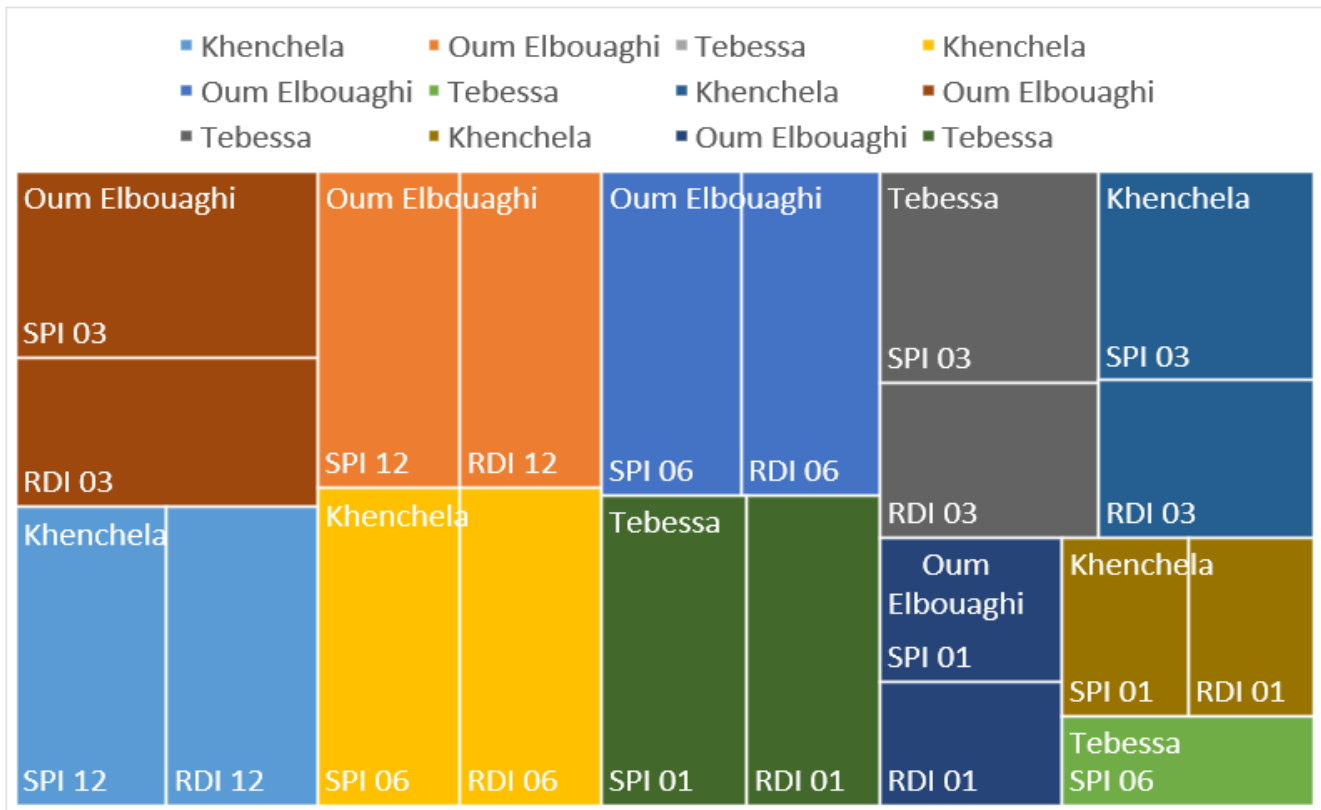


Figure 4.13. Schémas de sécheresse dans les bassins versants du Constantinois Sud et de la Medjerda–Mellague (région de Tébessa).

IV.5.3. Les statistiques du SDI

IV.5.3.1 Distribution fréquentielle des résultats des indices SDI

Le résultat du test de Dunn, montrant une homogénéité uniquement pour les groupes annuels (46 ans), indique que la série de données est statistiquement similaire d'une année à l'autre, mais non sur des périodes plus courtes (mois) ou plus longues (groupes de 5 ou 10 ans). Cela suggère que, pour la zone d'étude, l'évaluation des variations annuelles constitue l'approche la plus statistiquement cohérente et homogène. En revanche, la sécheresse peut se manifester différemment selon les saisons ou les mois ; une analyse annuelle peut donc ne pas détecter des périodes critiques de sécheresse qui apparaissent seulement sur quelques mois. Il reste ainsi pertinent de calculer les indices de sécheresse sur des périodes plus courtes afin de mieux saisir les variations intra-annuelles.

- **Secteur nord : bassins versants de la Seybouse et du Constantinois-Est**

L'analyse du SDI pour le barrage de Chefia, situé dans le bassin versant du Constantinois-Est (Fig. 4.14), met en évidence une prédominance de conditions « proches de la normale », mais avec des tendances notables de sécheresse à court terme (SDI-01 et SDI-03). Bien que les sécheresses sévères et extrêmes restent peu fréquentes, leur apparition souligne des vulnérabilités périodiques, cette station présentant des variations légèrement plus marquées que les autres.

L'analyse post-hoc confirme l'homogénéité de la distribution des données d'une année à l'autre, renforçant la fiabilité des tendances de sécheresse observées. Toutefois, les résultats indiquent une

variabilité plus importante, reflétant des dynamiques climatiques régionales distinctes qui contribuent aux fluctuations des conditions hydrologiques.

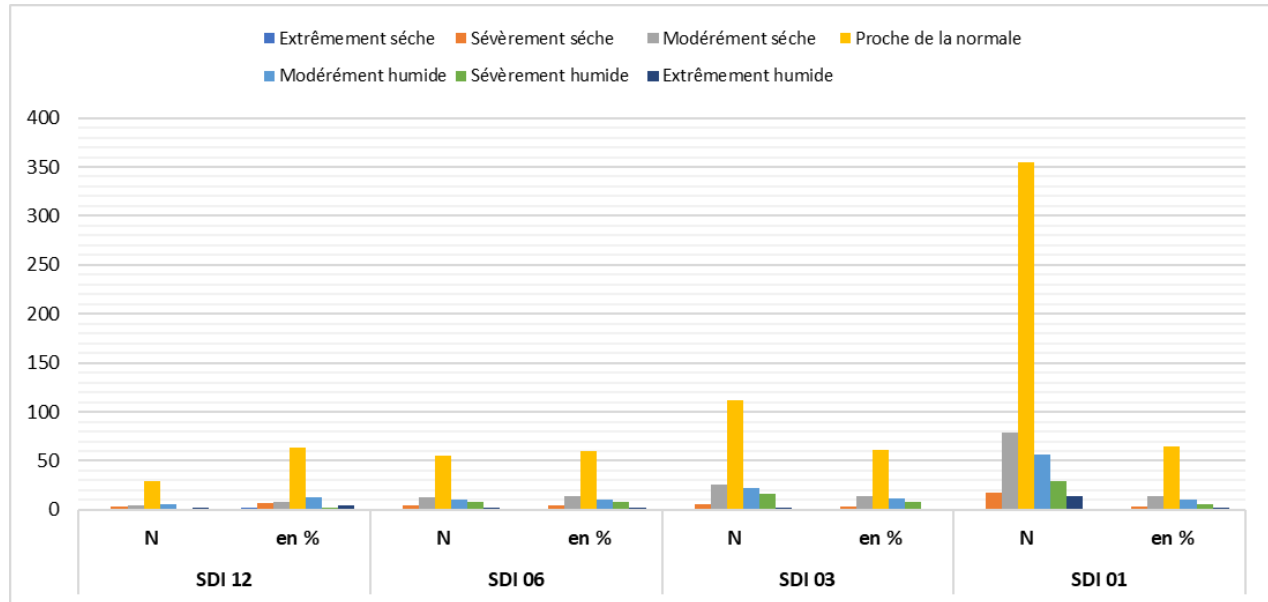


Figure 4.14. Analyse du SDI pour la station du barrage de Chefia dans le bassin versant du Constantinois-Est.

- **Secteur centre : bassin versant du Constantinois Centre (Ouest)**

L'analyse du SDI pour les stations de Medjez Amar, Bekkouch Lakhdar et du barrage de Zerdaza met en évidence une prédominance de conditions « proches de la normale » à toutes les échelles temporelles (SDI-12, SDI-06, SDI-03 et SDI-01). Toutefois, des tendances notables à la sécheresse apparaissent, en particulier dans les indices à court terme (SDI-01 et SDI-03). La station de Medjez Amar présente une fréquence plus élevée de conditions modérément sèches et sévèrement sèches, traduisant un stress hydrologique à court terme plus marqué (Fig. 4.15), tandis que Bekkouch Lakhdar et le barrage de Zerdaza montrent des tendances similaires mais d'intensité légèrement moindre (Fig. 4.16).

Les épisodes de sécheresse extrême demeurent rares dans l'ensemble des stations, mais leur apparition ponctuelle révèle des vulnérabilités potentielles. La variabilité observée dans les indices à court terme entre les stations souligne la sensibilité de la région aux périodes sèches fluctuantes.

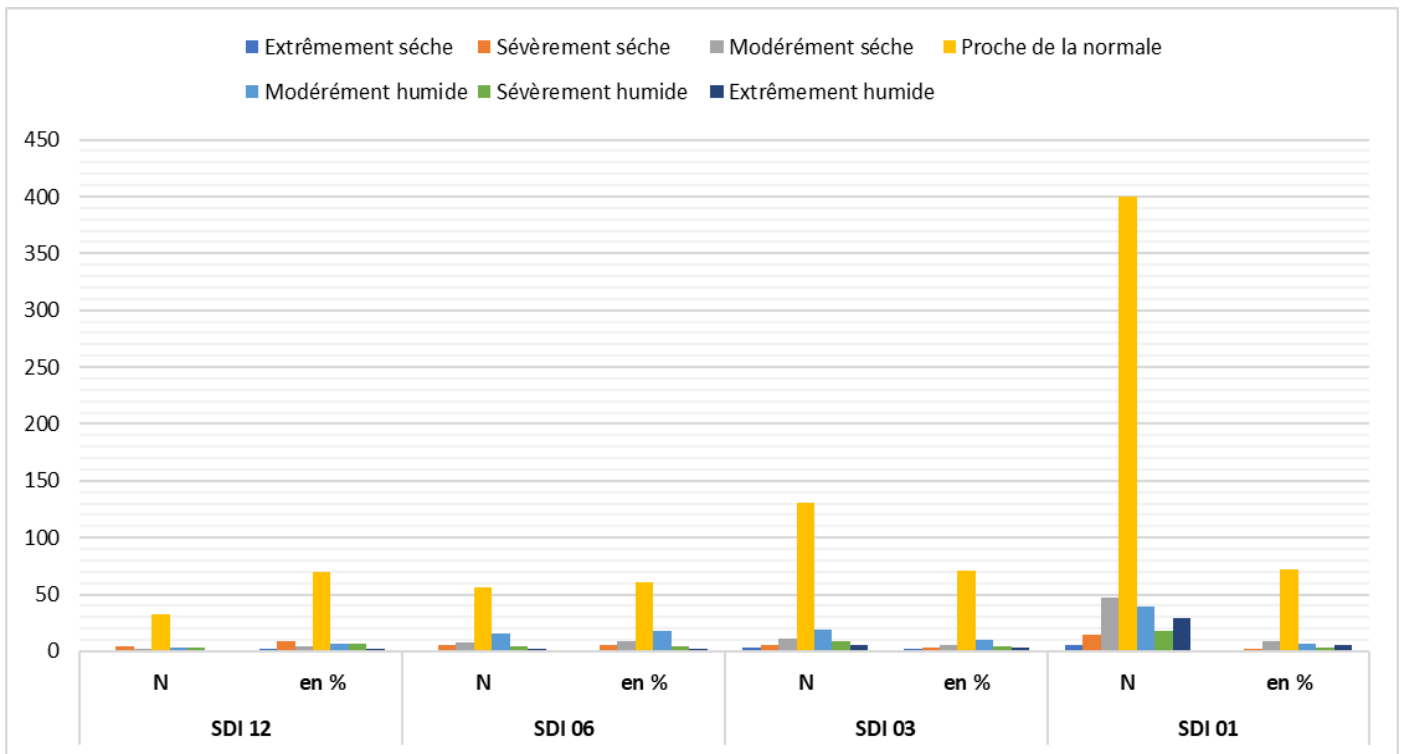


Figure 4.15. Analyse du SDI pour le bassin versant de la Seybous (partie nord) à travers la station de Medjez Amar

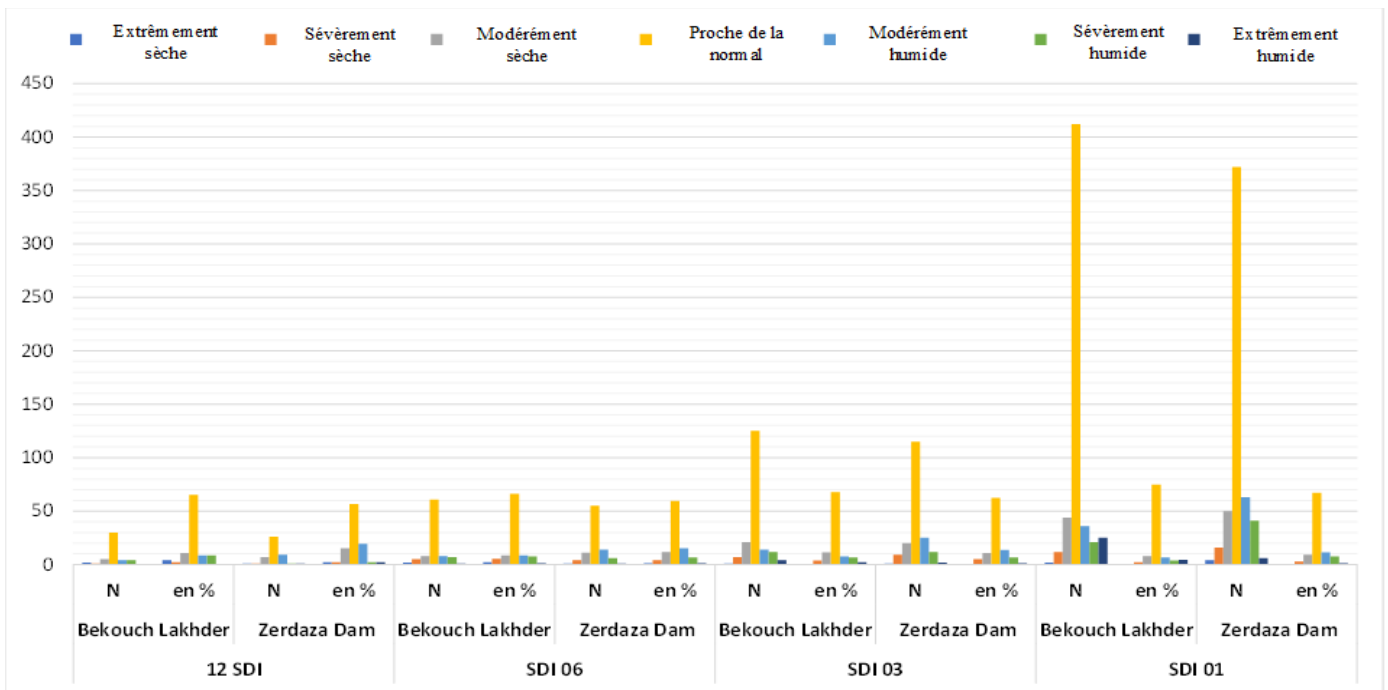


Figure 4.16. Analyse du SDI pour les stations de Bekkouch Lakhder et Zerdaza dans le bassin versant du Constantinois Centre (Ouest).

IV.5.3.2. Interprétation de la carte arborescente (treemap) des tendances de sécheresse SDI

Le test de Dunn a mis en évidence une homogénéité uniquement pour la série annuelle (46 ans), ce qui confirme la fiabilité des analyses effectuées à l'échelle interannuelle dans la zone d'étude (Dunn, 1964). En revanche, l'examen de périodes plus courtes demeure indispensable afin de saisir les variations saisonnières et intra-annuelles de la sécheresse.

La représentation multi-panneaux du SDI (Fig. 4.17) pour les stations situées dans le nord de l'Algérie (Bekkouch Lakhdar, barrage de Chafia et barrage de Zerdaza) met clairement en évidence une tendance régionale à l'assèchement à toutes les échelles temporelles considérées (SDI-12, SDI-06, SDI-03, SDI-01). Au niveau du barrage de Chafia (bassin versant du Constantinois Est), les conditions apparaissent globalement proches de la normale, ponctuées par des sécheresses de courte durée (SDI-01 et SDI-03) et de rares épisodes sévères, ce qui traduit une aridité périodique et des vulnérabilités localisées. L'homogénéité des données conforte la robustesse des résultats, mais la variabilité climatique reste un facteur déterminant dans les fluctuations des conditions hydrologiques.

De manière analogue, les stations de Medjez Amar, Bekkouch Lakhdar et barrage de Zerdaza (bassin versant du Constantinois Centre – Ouest) présentent une prédominance de conditions proches de la normale. Toutefois, les indices de courte durée (SDI-01 et SDI-03) mettent en évidence des tendances émergentes de sécheresse. Cette évolution est particulièrement marquée à Medjez Amar, où l'on observe une occurrence plus fréquente de sécheresses modérées à sévères, avec parfois des épisodes extrêmes. Ce comportement traduit un stress hydrologique localisé et confirme la susceptibilité accrue de cette région à une dynamique d'assèchement progressive.

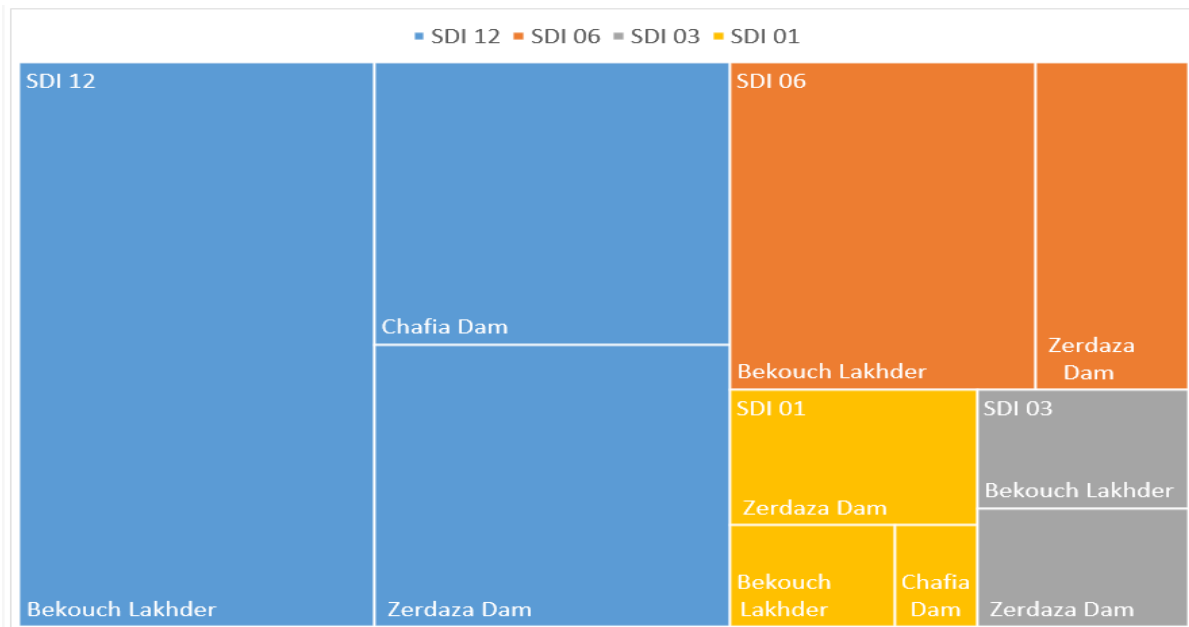


Figure 4.17. Analyse multi-échelles du SDI de la sévérité de la sécheresse en Algérie du Nord.

IV.5.4. Analyse spatiotemporelle des indices de sécheresse

L'analyse multi-indices de la sécheresse utilisant le SPI, le RDI et le SDI à l'échelle temporelle de 12 mois (figures 4.18 à 4.20) révèle des épisodes récurrents et spatialement hétérogènes de sécheresse à travers la zone d'étude entre 1975 et 2021.

Des sécheresses météorologiques et hydrologiques sévères sont systématiquement identifiées en 1987–1988, 1996–1997, 2001–2002 et 2015–2016, avec des valeurs de SPI et RDI descendant en dessous de $-2,0$ dans plusieurs stations, et des valeurs de SDI atteignant $-2,2$ à Bekouche Lakhdar en 1996–1997 et $-2,3$ au barrage de Chafia en 2001–2002, confirmant des déficits extrêmes de débit (Haied et al., 2023 ; Bedjema et al., 2019).

Les stations du nord (Annaba, El Kala, barrage de Chafia) présentent des minima marqués de SPI et RDI en 1996–1997 (SPI $< -2,0$ à Annaba et El Kala) et en 2001–2002 (RDI $< -2,4$ à Annaba), traduisant un stress intense lié aux précipitations et à l'évaporation (Ziari & Medjerab, 2024).

En revanche, les barrages centraux (barrage de Zerdaza, Bekouche Lakhdar) montrent que le SDI est l'indicateur le plus sensible, enregistrant $-2,2$ en 1996–1997 et $-1,6$ en 2015–2016, soulignant une sécheresse hydrologique prolongée malgré des signaux météorologiques modérés (Haied et al., 2023).

Les stations du sud (Khenchela, Oum El Bouaghi, Tébessa) affichent des déficits amplifiés du RDI en 2007–2008 (RDI $\approx -2,2$ à Khenchela et Oum El Bouaghi) et en 2015–2016, liés à une forte évapotranspiration sous des conditions de réchauffement, avec SPI et RDI convergeant vers $-1,5$ à $-2,0$, indiquant une aridification progressive (Khoualdia et al., 2023 ; Rabah & Mohamed, 2025).

Le SDI capture de manière unique la propagation en aval de la sécheresse, avec des réponses retardées et amplifiées dans les apports aux réservoirs (par exemple, 1987–1990, 2016–2017), soulignant son rôle critique dans l'évaluation des risques liés aux ressources en eau.

Ces résultats mettent en évidence la complémentarité du SPI, du RDI et du SDI pour révéler la dynamique régionale de la sécheresse ainsi que les vulnérabilités spécifiques à chaque secteur.

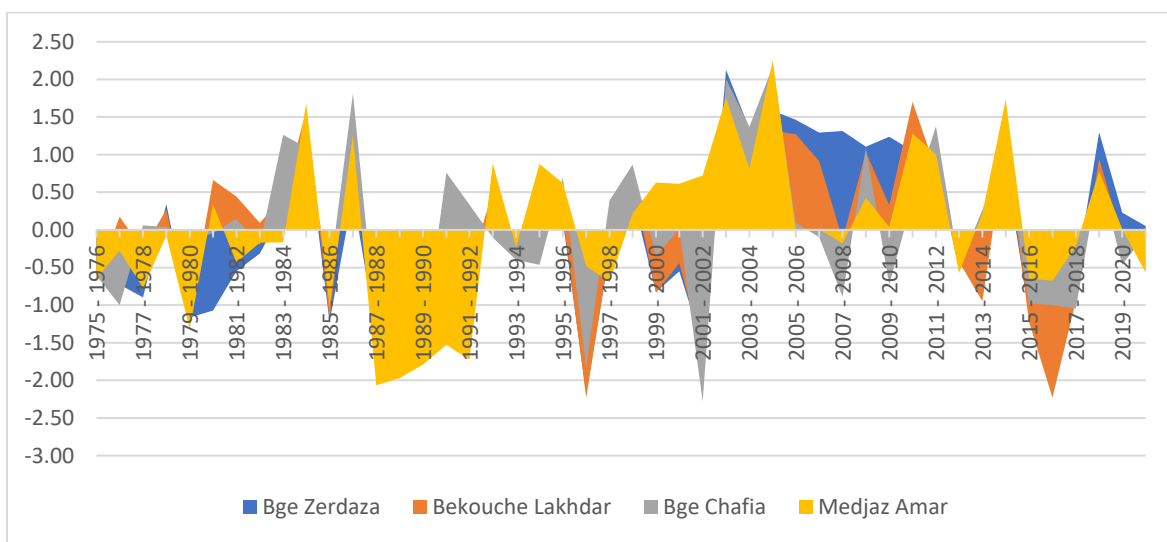


Figure 4.18. Variation du SDI (échelle de 12 mois) dans les principales stations de la zone d'étude

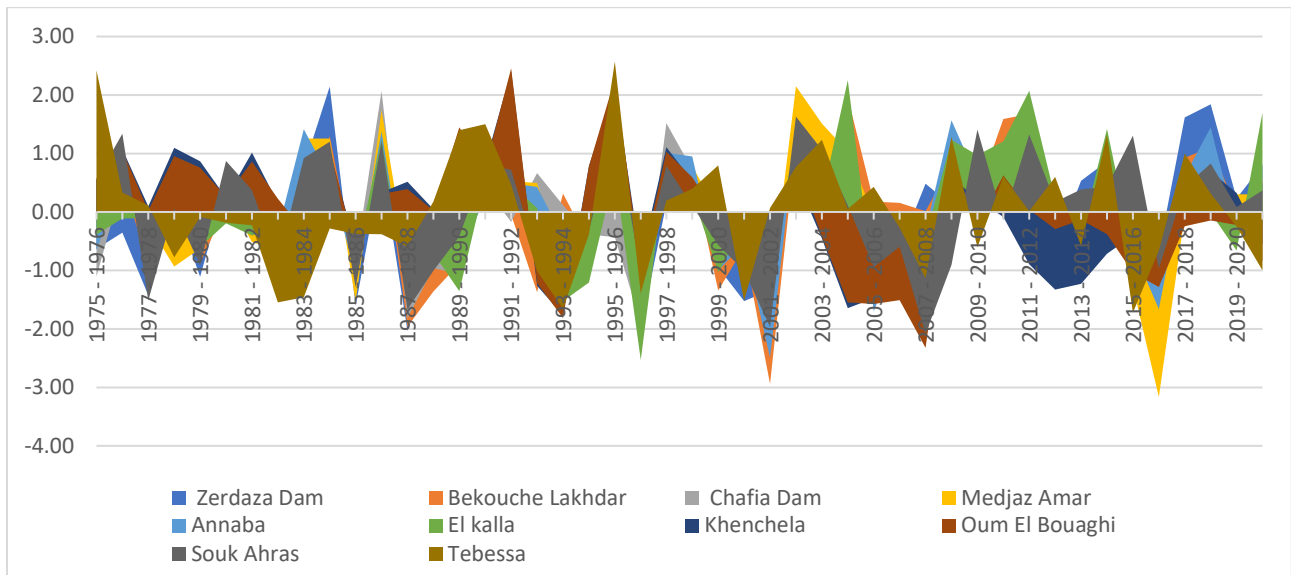


Figure 4.19 Variations temporelles du SPI (échelle de 12 mois) pour les stations de la zone d'étude

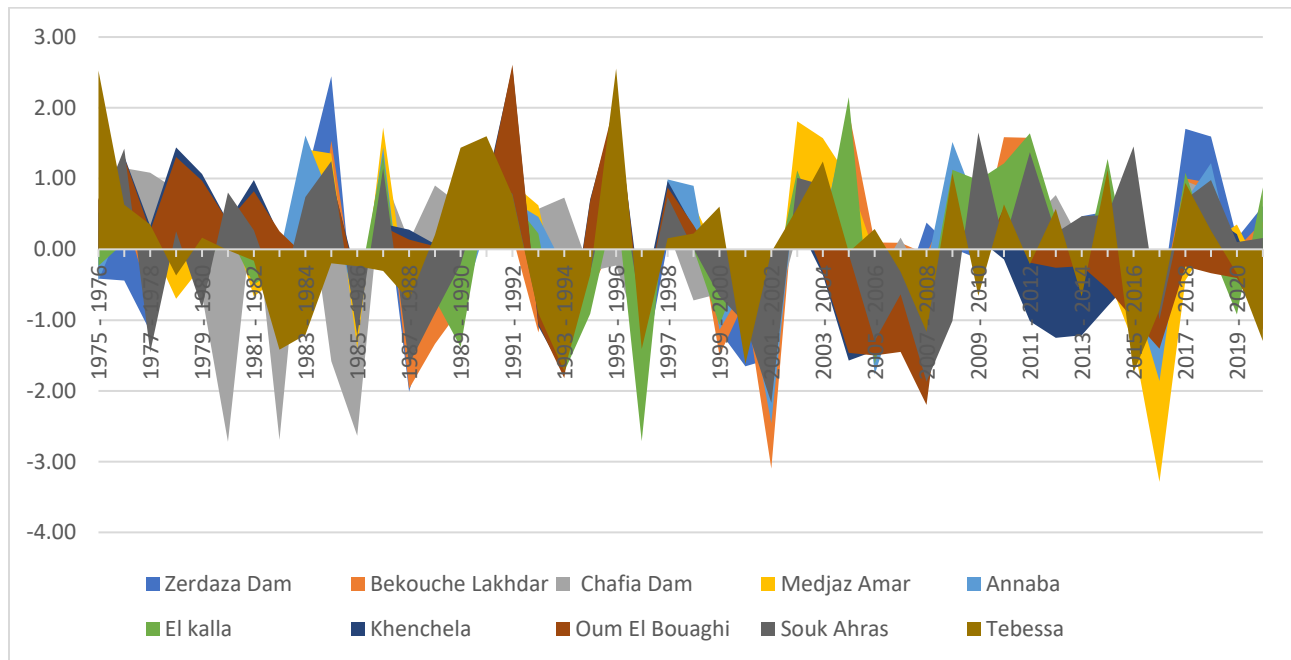


Figure 4.20. Tendances du RDI (échelle de 12 mois) à travers les bassins versants de la zone d'étude.

IV.5.5. Analyse des tendances

- **Secteur nord :**

Le test de Mann-Kendall modifié avec correction FDR ($\alpha = 0,05$; seuil critique $p \leq 0,0104$) révèle un assèchement généralisé dans la zone d'étude nord.

La sécheresse à court terme est manifeste avec des tendances significatives du SPI à 1 mois à Annaba ($p = 0,0018$) et El Kala ($p = 0,00$), du RDI à 1 mois à Annaba ($p = 0,0083$) et El Kala ($p = 0,00$), ainsi que du SDI à 1 mois au barrage de Chafia ($Z = -6,503$, $p = 0,00$), confirmant une sécheresse sévère à court terme.

Les indices à moyen terme (SPI 3, RDI 3, SPI 6) à Annaba et El Kala, ainsi que le SDI 3 au barrage de Chafia ($p = 0,00$), indiquent également un assèchement.

À long terme, le SPI 12 à El Kala ($p = 0,0001$) révèle un assèchement prononcé, tandis que le SPI 12 à Annaba ($p = 0,1015$) n'est pas significatif après correction FDR.

Ces tendances soulignent l'urgence d'une gestion adaptative de l'eau pour faire face à l'intensification des conditions de sécheresse.

Tableau 4.6. Résultats du test de Mann-Kendall modifié pour les indices SPI, RDI et SDI dans les bassins versants du secteur nord de la zone d'étude

Station	Indices	Original MK	Original MK Z	Modified MK Z (Wang)	P-value (Original)	P-value (Modified)	S (Test Statistic)	Sen's Slope	Significant after FDR (Modified, $\alpha = 0.05$)
Annaba	SPI 1	0.023	0.795	3.12	0.427	0.0018	3440	0.0002	Oui
	RDI 1	0.016	0.565	2.639	0.572	0.0083	2446	0.0001	Oui
	SPI 3	0.051	1.033	3.117	0.302	0.0018	864	0.0014	Oui
	RDI 3	0.039	0.779	2.647	0.436	0.0081	652	0.001	Oui
	SPI 6	0.034	0.476	1.454	0.634	0.146	142	0.002	Non
	RDI 6	0.002	0.024	0.074	0.981	0.9411	8	0.0002	Non
	SPI 12	0.038	0.36	1.638	0.719	0.1015	39	0.0029	Non
	RDI 12	-0.024	-0.227	-0.903	0.82	0.3667	-25	-0.0021	Non
Barrage Chafia	SPI 1	-0.028	-0.993	-2.956	0.321	0.0031	-4301	-0.0002	Oui
	RDI 1	-0.002	-0.064	-0.17	0.949	0.8649	-278	0	Non
	SDI 1	-0.114	-3.987	-6.503	0	0	-17260	-0.0011	Oui
	SPI 3	-0.001	-0.013	-0.06	0.989	0.9523	-12	0	Non
	RDI 3	0.027	0.547	1.373	0.584	0.1698	458	0.0008	Non
	SDI 3	-0.089	-1.786	-4.448	0.074	0	-1493	-0.0025	Oui
	SPI 6	0.003	0.037	0.163	0.97	0.8705	12	0.0004	Non
	RDI 6	0.023	0.32	0.578	0.749	0.5635	96	0.0014	Non
	SDI 6	0.004	0.051	0.127	0.96	0.8991	16	0.0003	Non
	SPI 12	0.036	0.341	1.395	0.733	0.1631	37	0.0047	Non
	RDI 12	-0.009	-0.076	-0.128	0.94	0.8982	-9	-0.0009	Non
	SDI 12	0.02	0.189	0.552	0.85	0.5808	21	0.0021	Non
El Kalla	SPI 1	0.051	1.793	4.328	0.073	0	7764	0.0004	Oui
	RDI 1	0.051	1.793	4.328	0.073	0	7764	0.0004	Oui
	SPI 3	0.089	1.786	4.43	0.074	0	1493	0.0026	Oui
	RDI 3	0.087	1.743	4.1	0.081	0	1457	0.0024	Oui
	SPI 6	0.108	1.514	3.532	0.13	0.0004	450	0.0058	Oui
	RDI 6	0.075	1.056	2.561	0.291	0.0104	314	0.0046	Oui
	SPI 12	0.152	1.477	4.038	0.14	0.0001	157	0.0195	Oui
	RDI 12	0.08	0.776	2.058	0.438	0.0396	83	0.0103	Non

• **Secteur centre :**

Le tableau 4.7 présente les résultats du test de Mann-Kendall modifié avec correction FDR ($\alpha = 0,05$; seuil critique $p \leq 0,0245$).

La station de Bekouche Lakhdar montre un assèchement significatif pour les indices SPI 1, 3, 6, 12, RDI 1, 3, 6, 12 et SDI 3. Le barrage de Zerdaza présente des tendances encore plus marquées pour les indices SPI 1, 3, 6, 12, RDI 3, 6, 12 et SDI 1, 3, 6, 12.

La station de Medjaz Amar révèle un assèchement significatif pour les indices SDI 1, 3, 6, 12, mais également une tendance à l'humidification pour les indices RDI 1, 6, 12. La station de Souk-Ahras demeure stable (toutes les valeurs de $p > 0,114$).

Les résultats indiquent que Bekouche Lakhdar et le barrage de Zerdaza présentent le risque de sécheresse le plus élevé, nécessitant une gestion ciblée et adaptée des ressources en eau.

Tableau 4.7 Résultats du test de Mann-Kendall modifié pour les indices SPI, RDI et SDI dans les stations du centre de la zone d'étude

Station	Indices	Original MK	Original MK Z	Modified MK Z (Wang)	P-value (Original)	P-value (Modified)	S (Test Statistic)	Sen's Slope	Significant after FDR (Modified, $\alpha=0.05$)
Bekkouch Lakhdar	SPI 1	0.071	2.492	4.141	0.013	0	10788	0.0006	Oui
	RDI 1	0.063	2.192	3.65	0.028	0.0003	9491	0.0005	Oui
	SDI 1	0.069	2.414	1.822	0.016	0.0685	10450	0.0006	Non
	SPI 3	0.136	2.745	5.534	0.006	0	2294	0.0037	Oui
	RDI 3	0.122	2.458	4.978	0.014	0	2054	0.0035	Oui
	SDI 3	0.088	1.773	2.25	0.076	0.0245	1482	0.0024	Oui
	SPI 6	0.151	2.128	3.935	0.033	0.0001	632	0.0087	Oui
	RDI 6	0.106	1.494	2.824	0.135	0.0047	444	0.0065	Oui
	SDI 6	0.053	0.745	1.389	0.456	0.1649	222	0.0036	Non
	SPI 12	0.206	2.007	4.499	0.045	0	213	0.0192	Oui
	RDI 12	0.15	1.458	3.576	0.145	0.0003	155	0.0145	Oui
	SDI 12	0.043	0.417	0.992	0.677	0.3213	45	0.0061	Non
Barrage Zerdaza	SPI 1	0.031	1.079	2.85	0.281	0.0044	4672	0.0003	Oui
	RDI 1	0.021	0.723	1.84	0.469	0.0657	3132	0.0002	Non
	SDI 1	0.187	6.577	4.103	0	0	28471	0.0017	Oui
	SPI 3	0.09	1.82	4.656	0.069	0	1521	0.0026	Oui
	RDI 3	0.068	1.377	3.681	0.169	0.0002	1151	0.002	Oui
	SDI 3	0.211	4.245	4.431	0	0	3547	0.006	Oui
	SPI 6	0.154	2.169	5.392	0.03	0	644	0.0087	Oui
	RDI 6	0.118	1.663	4.26	0.096	0	494	0.0063	Oui
	SDI 6	0.208	2.931	4.091	0.003	0	870	0.0111	Oui
	SPI 12	0.243	2.367	7.019	0.018	0	251	0.0243	Oui
	RDI 12	0.144	1.401	3.64	0.161	0.0003	149	0.0172	Oui
	SDI 12	0.186	1.818	3.304	0.069	0.001	193	0.0246	Oui
Souk-Ahras	SPI 1	0.006	0.222	0.764	0.824	0.4448	964	0.0001	Non
	RDI 1	-0.004	-0.155	-0.385	0.876	0.7	-674	0	Non
	SPI 3	0.02	0.408	1.193	0.683	0.2329	342	0.0006	Non
	RDI 3	0.011	0.219	0.494	0.827	0.621	184	0.0004	Non
	SPI 6	0.041	0.577	1.247	0.564	0.2124	172	0.0029	Non
	RDI 6	0.047	0.664	1.2	0.506	0.23	198	0.0031	Non

	SPI 12	0.057	0.549	1.581	0.583	0.114	59	0.0055	Non
	RDI 12	0.038	0.36	0.836	0.719	0.403	39	0.006	Non
Medjez Amar	SPI 1	-0.025	-0.868	-1.91	0.385	0.0562	-3759	-0.0002	Non
	RDI 1	-0.032	-1.137	-2.704	0.255	0.0068	-4924	-0.0003	Oui
	SDI 1	0.125	4.399	2.813	0	0.0049	19043	0.0009	Oui
	SPI 3	-0.013	-0.253	-0.654	0.801	0.5132	-212	-0.0004	Non
	RDI 3	-0.025	-0.496	-1.34	0.62	0.1804	-415	-0.0007	Non
	SDI 3	0.14	2.823	3.011	0.005	0.0026	2359	0.0029	Oui
	SPI 6	-0.019	-0.266	-0.728	0.79	0.4669	-80	-0.0009	Non
	RDI 6	-0.07	-0.981	-2.794	0.326	0.0052	-292	-0.004	Oui
	SDI 6	0.163	2.304	3.184	0.021	0.0015	684	0.009	Oui
	SPI 12	-0.007	-0.057	-0.128	0.955	0.8979	-7	-0.0005	Non
	RDI 12	-0.115	-1.117	-2.658	0.264	0.0079	-119	-0.0143	Oui
	SDI 12	0.185	1.799	3.274	0.072	0.0011	191	0.0201	Oui

• Secteur sud :

Le tableau 4.8 présente les résultats du test de Mann-Kendall modifié avec correction FDR ($\alpha = 0,05$; seuil critique $p \leq 0,0269$).

Les stations de Khenchela et Oum El Bouaghi montrent un assèchement significatif pour les indices RDI 1, SPI 3, RDI 3, SPI 6, RDI 6, SPI 12 et RDI 12 ($p \leq 0,0156$).

La station de Tébessa ne présente aucune tendance significative après application de la correction FDR (valeur de p la plus élevée = $0,0299 > 0,0288$).

Les résultats indiquent que Khenchela et Oum El Bouaghi présentent le plus haut risque de sécheresse, soulignant la nécessité d'une gestion ciblée et adaptée des ressources en eau.

Tableau 4.8. Résultats du test de Mann-Kendall modifié mettant en évidence les tendances de sécheresse à long et court terme aux stations de Khenchela et Oum El Bouaghi

Station	Indices	Original MK	Original MK Z	Modified MK Z (Wang)	P-value (Original)	P-value (Modified)	S (Test Statistic)	Sen's Slope	Significant after FDR (Modified, $\alpha=0.05$)
Khenchela	SPI 1	-0.022	-0.757	-1.636	0.449	0.1019	-3279	-0.0002	Non
	RDI 1	-0.032	-1.109	-2.58	0.267	0.0099	-4803	-0.0003	Oui
	SPI 3	-0.066	-1.334	-3.556	0.182	0.0004	-1115	-0.0019	Oui
	RDI 3	-0.08	-1.61	-4.931	0.107	0	-1346	-0.0024	Oui
	SPI 6	-0.102	-1.44	-3.812	0.15	0.0001	-428	-0.0056	Oui
	RDI 6	-0.139	-1.96	-5.266	0.05	0	-582	-0.0084	Oui
	SPI 12	-0.293	-2.859	-6.357	0.004	0	-303	-0.0294	Oui
	RDI 12	-0.357	-3.484	-8.233	0	0	-369	-0.0378	Oui
Oum Elbouaghi	SPI 1	-0.012	-0.432	-1.097	0.666	0.2728	-1871	-0.0001	Non
	RDI 1	-0.023	-0.822	-2.417	0.411	0.0156	-3561	-0.0002	Oui
	SPI 3	-0.068	-1.374	-4.276	0.169	0	-1149	-0.0019	Oui
	RDI 3	-0.084	-1.692	-6.145	0.091	0	-1414	-0.0023	Oui
	SPI 6	-0.12	-1.697	-5.909	0.09	0	-504	-0.0065	Oui
	RDI 6	-0.161	-2.277	-8.823	0.023	0	-676	-0.0084	Oui

	SPI 12	-0.298	-2.907	-8.62	0.004	0	-308	-0.0298	Oui
	RDI 12	-0.391	-3.825	-12.5	0	0	-405	-0.0371	Oui
Tebessa	SPI 1	0.02	0.715	1.533	0.474	0.1252	3098	0.0002	Non
	RDI 1	0.008	0.264	0.66	0.792	0.509	1144	0.0001	Non
	SPI 3	0.005	0.092	0.225	0.927	0.8218	78	0.0001	Non
	RDI 3	-0.003	-0.056	-0.16	0.955	0.8731	-48	-0.0001	Non
	SPI 6	0.008	0.111	0.32	0.911	0.7487	34	0.0007	Non
	RDI 6	-0.034	-0.482	-1.454	0.63	0.146	-144	-0.0022	Non
	SPI 12	0.007	0.057	0.18	0.955	0.8568	7	0.001	Non
	RDI 12	-0.069	-0.663	-2.171	0.507	0.0299	-71	-0.0085	Non

L'analyse du test de Mann-Kendall modifié avec correction FDR (procédure de Benjamini-Hochberg, $\alpha = 0,05$) a permis de contrôler le taux de fausses découvertes à travers les tests spécifiques à chaque secteur (Nord : 24 tests, seuil critique $p \leq 0,0104$; Centre : 20 tests, $p \leq 0,0245$; Sud : 18 tests, $p \leq 0,0269$), réduisant ainsi les erreurs de type I dans cet ensemble de données hétérogène.

Les résultats révèlent un gradient marqué d'intensification de la sécheresse du nord vers le sud, avec des tendances significatives à l'assèchement (p inférieures aux seuils sectoriels) largement observées dans le Nord (ex. : SPI-1 à Annaba : $p = 0,0018$; El Kala : $p < 0,001$; SDI-1 au barrage de Chafia : $p < 0,001$, $Z = -6,503$), concentrées dans le Centre (ex. : Bekouche Lakhdar : tendances significatives pour SPI-1/3/6/12, RDI-1/3/6/12, SDI-3 ; barrage de Zerdaza : SPI-1/3/6/12, RDI-3/6/12, SDI-1/3/6/12) et plus prononcées dans le Sud (ex. : Khenchela : SPI-12 $Z = -6,357$, pente = $-0,0294$, $p < 0,001$; RDI-12 $Z = -8,233$, pente = $-0,0378$, $p < 0,001$; Oum El Bouaghi : SPI-12 $Z = -8,620$, pente = $-0,0298$, $p < 0,001$; RDI-12 $Z = -12,500$, pente = $-0,0371$, $p < 0,001$; Tébesa : absence de tendances significatives, $p_{\max} = 0,0299 > 0,0269$).

Ces résultats traduisent une aridification persistante, liée à la baisse des précipitations et à l'augmentation de l'évapotranspiration, en cohérence avec les projections méditerranéennes annonçant une réduction de 10 à 30 % des précipitations d'ici 2050 (Giorgi & Lionello, 2008). Les stations du nord et du centre présentent davantage de signaux à court et moyen terme (ex. : SPI-3/6, SDI-3 ; 15 à 20 % sous les seuils critiques), avec des risques émergents sur les débits (valeurs moyennes du SDI $\approx -0,2$ à Medjaz Amar), dus à un effet tampon du climat méditerranéen.

Cette détection validée par la FDR de schémas cohérents d'assèchement renforce l'attribution des tendances aux forçages climatiques, bien que certaines limites subsistent (autocorrélations possibles, biais liés aux séries de données stationnelles).

Pour renforcer la résilience hydrique régionale, plusieurs mesures sont recommandées :

1. Sud : mise en place de systèmes de collecte d'eau de pluie et de micro-bassins versants afin d'augmenter la recharge des nappes (de 20 à 30 % ; Guebail et al., 2017 ; Loukas et al., 2020) et programmes de reboisement ;

2. Centre : adoption de cultures tolérantes à la sécheresse et d'une irrigation déficitaire permettant de réduire la consommation d'eau de 15 à 25 % sans compromettre les rendements (FAO, 2018 ; Haied et al., 2023) ;
3. Nord : renforcement des capacités des barrages, notamment celui de Zerdaza, par la prévision des débits via le SDI et une extension de capacité de 10 à 15 %.

Ces stratégies fondées sur les preuves, hiérarchisées selon la sévérité confirmée par la FDR, contribuent à renforcer la sécurité hydrique face aux pressions climatiques croissantes dans le nord-est de l'Algérie.

Conclusion

La sécheresse constitue une menace majeure pour l'agriculture, les ressources en eau, la sécurité alimentaire et la stabilité socio-économique dans le nord-est de l'Algérie, exacerbée par la variabilité climatique. Ce chapitre combine les indices SPI, RDI et SDI dans un cadre sectoriel défini par un regroupement K-means, distinguant trois zones : Nord (méditerranéenne), Centre (semi-aride) et Sud (aride). L'analyse du test de Mann-Kendall modifié avec correction FDR et la pente de Theil-Sen révèlent un gradient d'assèchement du Nord vers le Sud, avec des conditions proches de la normale au Nord et un stress hydrique marqué au Centre et au Sud. Les tendances les plus sévères sont observées à Oum El Bouaghi et Khenchela.

Les signaux à court et moyen terme dominant dans les zones Nord et Centre, suggérant un risque accru d'événements hydrologiques extrêmes, tandis que la persistance à long terme accentue la vulnérabilité du Sud. L'approche multi-indices confirme l'intérêt d'un suivi sectoriel spatio-temporel pour mieux comprendre la sécheresse et orienter les politiques d'adaptation.

Cependant, l'analyse du SDI est limitée par la faible disponibilité de données hydrométriques, avec seulement quatre stations de barrage, ce qui peut sous-estimer la sévérité des sécheresses dans certaines zones, notamment au Centre et au Sud. Pour pallier cette limite, il est recommandé d'élargir le réseau de mesures et d'intégrer des données satellitaires et des analyses spatio-temporelles fines afin d'améliorer la précision du suivi hydrologique et de renforcer la gestion de la sécheresse dans la région.

Chapitre V : Tendances FITA et ITA

Introduction

L'évaluation des tendances hydro climatiques est essentielle pour comprendre l'impact du changement climatique et anticiper ses effets sur les ressources en eau. Les méthodes statistiques classiques, telles que le test de Mann-Kendall ([51] ; [52]), sont largement utilisées pour détecter les tendances monotones dans les séries temporelles climatiques et hydrologiques. Toutefois, ces tests présentent certaines limites, notamment lorsqu'il existe une variabilité élevée, une non-linéarité des données, ou la présence de valeurs extrêmes susceptibles de masquer les évolutions réelles ([171]).

Pour dépasser ces contraintes, [53] a proposé l'Analyse innovante des tendances (Innovative Trend Analysis (ITA)). Cette approche repose sur une représentation graphique qui compare les sous-séries de données divisées en deux moitiés. Elle permet ainsi d'identifier des tendances croissantes, décroissantes ou stables, sans hypothèses statistiques préalables sur la distribution des données. L'ITA est particulièrement appréciée pour sa simplicité et sa capacité à révéler des tendances partielles souvent non détectées par les méthodes conventionnelles.

Plus récemment, la méthode a été améliorée avec l'Analyse innovante des tendances et des statistiques de fréquence (The Frequency Innovative Trends and Statistics Analysis (FITA)), développée pour intégrer la fréquence et la distribution des valeurs extrêmes [55]. Le FITA complète l'ITA en analysant la répartition des classes d'occurrences, ce qui permet une meilleure détection des sécheresses sévères et humides ([172]). Cette approche offre ainsi une vision plus détaillée et probabiliste des dynamiques hydroclimatiques.

Dans ce chapitre, les méthodes ITA et FITA seront appliquées aux indices de sécheresse SPI (McKee et al., 1993), RDI [32] et SDI [33] dans le nord-est de l'Algérie. L'objectif est d'identifier les tendances spatio-temporelles, de comparer les résultats obtenus avec ceux des méthodes classiques (Mann-Kendall et Theil-Sen), et d'améliorer la compréhension des dynamiques de sécheresse dans cette région vulnérable.

V.1. Analyse de tendance

L'analyse de tendance est une approche statistique et méthodologique qui consiste à examiner l'évolution d'une variable au cours du temps afin de déterminer l'existence, la direction et l'ampleur de changements systématiques. Elle permet de distinguer les variations aléatoires (bruit) des évolutions significatives dans les séries chronologiques, qu'elles soient climatiques, hydrologiques, environnementales ou socio-économiques.

Selon Hipel et McLeod (2005), une tendance correspond à une modification progressive et systématique de la valeur moyenne d'une variable, qui peut être croissante, décroissante ou nulle. De même, Hamed (2008) insiste sur la nécessité de distinguer les tendances réelles des fluctuations naturelles liées à la variabilité interannuelle. Plusieurs définitions mettent en avant le caractère systématique et persistant de ces évolutions : [157] considèrent ainsi une tendance comme une variation durable des caractéristiques statistiques d'une série temporelle (moyenne, variance, distribution), pouvant être monotone (croissante ou décroissante) ou non monotone (oscillatoire).

L'analyse de tendance repose sur différentes méthodes : les approches graphiques (diagrammes temporels, courbes lissées), les méthodes paramétriques (régression linéaire) et les méthodes non paramétriques comme le test de Mann-Kendall (MK) ou le Spearman Rho, qui ne nécessitent pas d'hypothèse sur la distribution des données ([121]). Plus récemment, des méthodes innovantes ont été développées, notamment l'Analyse innovante des tendances (ITA) proposée par [53], qui permet d'analyser graphiquement et sans conditions strictes les séries non stationnaires, et son extension, L'analyse innovante des tendances et des statistiques de fréquence (FITA), introduite par Şen (2017), qui offre une plus grande flexibilité dans la division des séries temporelles afin de détecter les tendances locales et d'affiner l'interprétation des évolutions à différentes échelles temporelles.

V.2. Analyse conceptuelle et visuelle

L'analyse conceptuelle des tendances constitue une étape essentielle dans l'étude des séries chronologiques. Elle vise à identifier et caractériser l'évolution d'une variable au cours du temps en distinguant les changements systématiques des simples fluctuations aléatoires. Selon [121], une tendance se définit comme une modification progressive et systématique de la valeur moyenne d'une variable, pouvant être croissante, décroissante ou nulle. De même, Hamed (2008) souligne l'importance de différencier les véritables tendances des variations naturelles liées à la variabilité interannuelle. D'un point de vue conceptuel, une tendance peut être monotone (croissante ou décroissante de façon régulière) ou non monotone (alternant entre phases de croissance et de décroissance), et elle peut concerner non seulement la moyenne, mais également la variance et la distribution des données [157].

Sur le plan pratique, l'analyse visuelle est largement utilisée comme approche exploratoire. Elle repose sur la représentation graphique des séries temporelles afin de mettre en évidence les évolutions générales avant l'application de tests statistiques plus robustes. Les courbes chronologiques brutes permettent une première lecture des fluctuations, tandis que l'application de techniques de lissage (par exemple, moyennes mobiles) facilite la détection d'une tendance sous-jacente. Les diagrammes de dispersion avec ajout de droites de régression peuvent également fournir une indication sur la direction et l'intensité des changements. Par ailleurs, des approches innovantes, telles que l'Analyse Innovante des Tendances (ITA) proposée par Şen (2012), offrent une visualisation alternative en comparant les sous-périodes d'une série : les points situés au-dessus de la diagonale indiquent une tendance positive, ceux en dessous une tendance négative, et ceux alignés sur la diagonale traduisent une absence de tendance. Cette méthode a été enrichie par l'analyse innovante des tendances et des statistiques de fréquence (FITA) (Şen, 2017), qui permet une évaluation plus souple en fonction des échelles temporelles étudiées.

Ainsi, l'analyse conceptuelle et visuelle des tendances joue un double rôle : elle fournit un cadre théorique permettant de définir et classer les tendances, et elle constitue un outil pratique facilitant la compréhension intuitive des évolutions temporelles. Elle prépare et complète l'application des méthodes statistiques classiques (tests de Mann-Kendall, Spearman Rho, régressions paramétriques) et innovantes (ITA, FITA), assurant une analyse plus complète et robuste des séries chronologiques ([121]).

V.3. L'Analyse innovante des tendances (Innovative Trend Analysis (ITA))

L'Analyse Innovante des Tendances (Innovative Trend Analysis, ITA), proposée par Şen en 2012, représente une méthode récente conçue pour pallier certaines limites des approches traditionnelles de détection des tendances, comme le test de Mann-Kendall ([121]; [158]) ou de Spearman Rho [52]. Son principe repose sur la division de la série temporelle étudiée en deux sous-séries égales, qui sont ensuite classées par ordre croissant. Ces deux sous-séries sont représentées l'une contre l'autre dans un graphique en coordonnées cartésiennes.

Cette méthode consiste à représenter un ensemble de sous-séries issues de la série temporelle originale dans un système de coordonnées cartésiennes. Dans ce cadre, une droite à 45° indique l'absence de tendance, tandis qu'une dispersion des points au-dessus (respectivement en dessous) de cette ligne traduit l'existence d'une tendance croissante (respectivement décroissante). La même méthodologie permet également d'estimer la magnitude de la tendance (pente).

De nombreuses séries temporelles présentent une dépendance sérielle, ce qui rend particulièrement utile le recours à une méthodologie qui ne soit pas affectée par une telle contrainte. Pour contourner cette hypothèse restrictive, ce chapitre adopte la méthodologie de l'Analyse Innovante des Tendances (Innovative Trend Analysis, ITA) développée par Şen (2012). Une version partielle de l'ITA est utilisée ici, permettant une analyse plus détaillée en classant les données en trois catégories — « faibles », « moyennes » et « élevées » — afin d'examiner les tendances propres à chaque groupe distinctement.

L'ITA divise une série chronologique $X = (x_1, x_2, \dots, x_{n/2})$ en deux sous-séries égales :

$$\mathbf{X}_1 = (x_1, x_2, \dots, x_{n/2}), \mathbf{X}_2 = (x_{(n/2)+1}, \dots, x_n)$$

Chaque sous-série est triée par ordre croissant, puis représentée l'une par rapport à l'autre sous forme de nuage de points (scatterplot).

$$x_i^{(1)} \text{ vs } x_i^{(2)} \text{ for } i = 1, \dots, n/2$$

Les points de dispersion représentés dans ce modèle proviennent de la partition de la série chronologique en deux moitiés, suivie du tri de chaque moitié par ordre croissant, puis de la mise en correspondance de la première partie (période initiale) avec la seconde partie (période finale). Comme expliqué dans le modèle ITA, trois zones principales permettent l'identification des tendances. De tels modèles, comme celui de l'ITA, offrent ainsi une interprétation qualitative préalable, essentielle avant toute analyse quantitative ([53]).

Dans la méthodologie ITA, Les trois zones d'interprétation se définissent comme suit (Figure 5.1): ([58]).

1. **Zone sans tendance (No trend area)** : Située autour de la diagonale 1:1 (45°), généralement délimitée par un intervalle de confiance ($\pm 5\%$). Les points qui s'y trouvent indiquent que les variations observées relèvent principalement de la variabilité naturelle et ne traduisent pas une évolution significative dans le temps.

2. **Zone de tendance croissante (Increasing trend area)** : Correspond à la zone située au-dessus de la ligne 1:1. Les points de dispersion présents dans cette région traduisent une augmentation systématique des valeurs au fil du temps, signalant une tendance positive.
3. **Zone de tendance décroissante (Decreasing trend area)** : Située en dessous de la diagonale 1:1. Les points qui s’y trouvent reflètent une diminution progressive des valeurs, révélant une tendance négative.

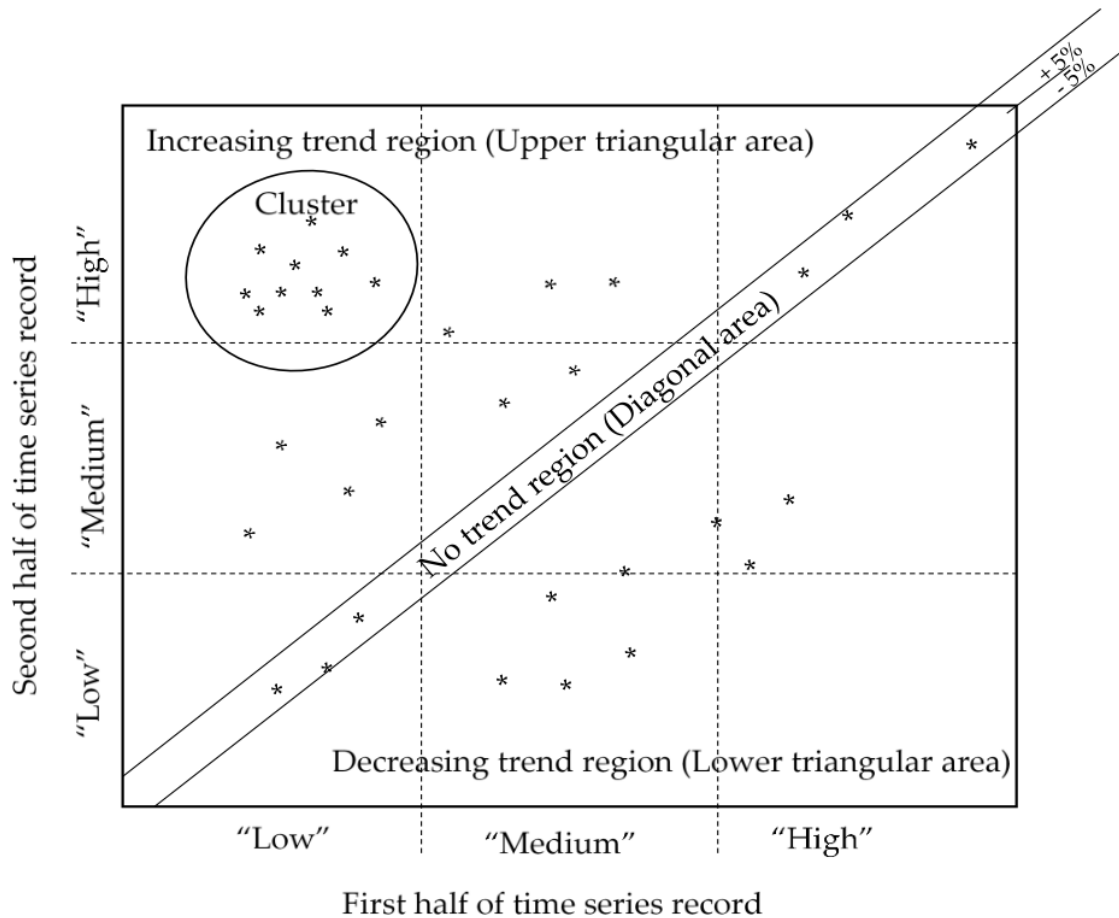


Figure 5.1. Modèle de l'Analyse Innovante des Tendances (ITA)

La pente de l'ITA peut être estimée au moyen d'une régression linéaire simple entre les sous-séries ordonnées :

$$Slope_{ITA} = \frac{\sum_{i=1}^{n/2} (x_i^{(2)} - \bar{x}^{(2)}) (x_i^{(1)} - \bar{x}^{(1)})}{\sum_{i=1}^{n/2} (x_i^{(1)} - \bar{x}^{(1)})^2} \quad 5.1$$

Où $\bar{x}^{(1)}$ et $\bar{x}^{(2)}$ représentent respectivement les moyennes de chaque sous-série (Fig.5.2).

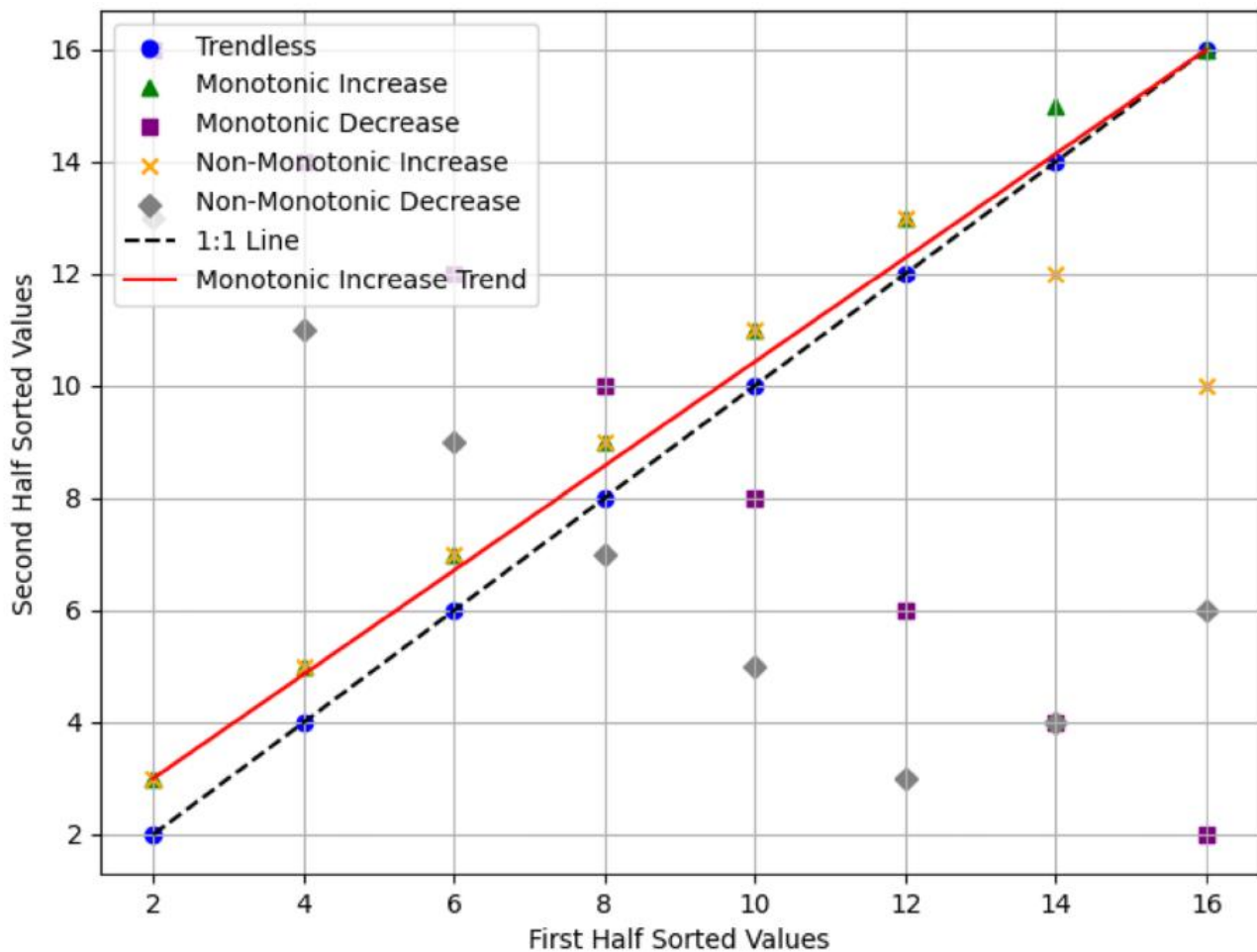


Figure 5.2. Représentation en nuage de points des types de tendances selon l'Analyse Innovante des Tendances (ITA) (Dabanlı et al., 2016).

Cette figure (Fig. 5.2) illustre les différents comportements de tendances identifiables grâce à la méthode Analyse Innovante des Tendances (ITA) proposée par Şen (2012, 2017).

- **Ligne 1:1** (noire en pointillés) Elle représente la situation de non-tendance (trendless). Si les points de dispersion se situent globalement sur cette diagonale, la série temporelle ne présente pas de tendance significative.
- **Augmentation monotone** (Monotonic Increase, triangles verts) Lorsque les valeurs de la deuxième moitié de la série sont systématiquement supérieures à celles de la première moitié, les points se situent au-dessus de la ligne 1:1. Cela traduit une tendance croissante continue.
- **Diminution monotone** (Monotonic Decrease, croix inversées rouges ou carrés selon les études) Lorsque les valeurs de la deuxième moitié sont systématiquement inférieures, les points se situent sous la ligne 1:1. Cela indique une tendance décroissante continue.
- **Augmentation non monotone** (Non-Monotonic Increase, croix jaunes) Dans ce cas, certaines parties de la série présentent une hausse tandis que d'autres ne suivent pas cette dynamique. Cela traduit une évolution irrégulière mais globalement croissante.

- **Diminution non monotone** (Non-Monotonic Decrease, losanges gris) À l'inverse, certaines sous-périodes montrent une baisse alors que d'autres ne suivent pas cette tendance. On observe une tendance globalement décroissante mais non uniforme.
- **Ligne rouge** (régression linéaire) Elle illustre la pente de la tendance calculée entre les sous-séries [53]. Une pente positive traduit une tendance croissante, tandis qu'une pente négative indique une tendance décroissante.

Ainsi, l'ITA ne se limite pas à la détection de la tendance, mais permet également de visualiser la dynamique des données en distinguant les comportements croissants, décroissants ou stables. Cette approche apporte une valeur ajoutée dans l'analyse des séries chronologiques environnementales et climatiques, où la détection précoce de tendances significatives est cruciale ([53]; [58]).

V.4. L'analyse innovante des tendances et des statistiques de fréquence (The Frequency Innovative Trends and Statistics Analysis, FITA)

L'analyse innovante des tendances et des statistiques de fréquence (FITA, Frequency Innovative Trend and Statistics Analysis) est une approche récente développée comme extension de l'Innovative Trend Analysis (ITA) proposée par Şen (2012). Alors que l'ITA permet de détecter et caractériser les tendances dans des séries temporelles hydrométéorologiques sans hypothèse de normalité ni de stationnarité, la FITA introduit un volet supplémentaire basé sur la fréquence des classes d'occurrence [56]

Concrètement, la FITA repose sur deux étapes principales :

1. Analyse des tendances (ITA) : la série temporelle est divisée en deux sous-périodes de taille égale ; chaque valeur de la première moitié est représentée sur l'axe des abscisses et la valeur correspondante de la seconde moitié sur l'axe des ordonnées. La position des points par rapport à la diagonale permet d'identifier la nature de la tendance (positive, négative ou neutre) ([53] ; [172]).
2. Analyse fréquentielle : la distribution des données est classée par catégories (par exemple : sécheresse extrême, modérée, normale, humide, etc.). La fréquence d'occurrence de chaque classe dans chaque sous-période est calculée, puis comparée. Cette étape permet de compléter l'évaluation des tendances par une approche statistique basée sur la probabilité d'occurrence des différentes classes, offrant ainsi une vision plus détaillée des changements [56].

L'analyse de fréquence (Eq.5.2) permet de quantifier l'occurrence, l'intensité et la persistance des classifications de sécheresse, ce qui constitue un élément essentiel dans l'évaluation des régimes et des sévérités de sécheresse. L'analyse innovante des tendances et des statistiques de fréquence (FITA) représente une approche novatrice conçue pour détecter les tendances dans les séries temporelles hydrométéorologiques, en mettant l'accent sur les schémas basés sur la fréquence au cours du temps [173].

La FITA s'inspire de méthodes telles que l'ITA de Şen, qui consiste à tracer des sous-séries temporelles afin de détecter visuellement les tendances sans recourir à des hypothèses statistiques strictes. L'orientation de FITA vers l'analyse fréquentielle suggère l'ajout d'une dimension spectrale, couramment utilisée dans les études climatiques pour identifier les cycles. Elle propose ainsi un

complément au graphique ITA, en représentant la fréquence de chaque classification de sécheresse. Ces classifications incluent généralement les catégories suivantes : normale, sécheresse modérée, sécheresse sévère et sécheresse extrême, comme présenté dans le Tableau 5.1.

$$Fréquence = \frac{\text{Nombre de mois dans chaque classification}}{\text{Nombre total de mois}} \times 100\% \quad 5.2$$

La FITA fait probablement appel à des techniques du domaine fréquentiel, telles que l'analyse spectrale ou les transformées en ondelettes [174], afin d'identifier les périodicités et les tendances dans les occurrences de sécheresse. Cela lui confère un avantage par rapport aux méthodes traditionnelles, comme le test de Mann–Kendall, puisqu'elle ne nécessite pas d'hypothèses restrictives telles que l'indépendance ou la normalité des données.

Tableau 5.1. Classification de la sécheresse selon McKee et al. [56]

Indice de sécheresse (DI)	Classification de la sécheresse	Probabilité (%)
$2.00 \leq DI$	Extrêmement humide (EW)	2.3%
$1.50 \leq DI < 2.00$	Sévèrement humide (SW)	4.4%
$1.00 \leq DI < 1.50$	Modérément humide (MW)	9.2%
$1.00 < DI < 1.00$	Normal (N)	68.2%
$1.50 \leq DI \leq -1.00$	Modérément sèche ((MD)	9.2%
$2.00 < DI \leq 1.50$	Sévèrement sèche (SD)	4.4%
$2.00 \geq DI$	Extrêmement sèche (ED)	2.3%

L'avantage principal de la FITA réside dans sa capacité à combiner une analyse visuelle et qualitative des tendances (ITA) avec une évaluation quantitative par fréquences relatives, ce qui la rend particulièrement adaptée à l'étude des phénomènes hydro climatiques extrêmes tels que les sécheresses ou les crues ([172]; [56]). Elle permet ainsi non seulement de détecter la direction des tendances, mais aussi de mesurer leur impact sur la répartition des événements hydrologiques ou climatiques.

V.5. Résultats

V.5.1. La FITA et la variabilité temporelle des indices de sécheresse

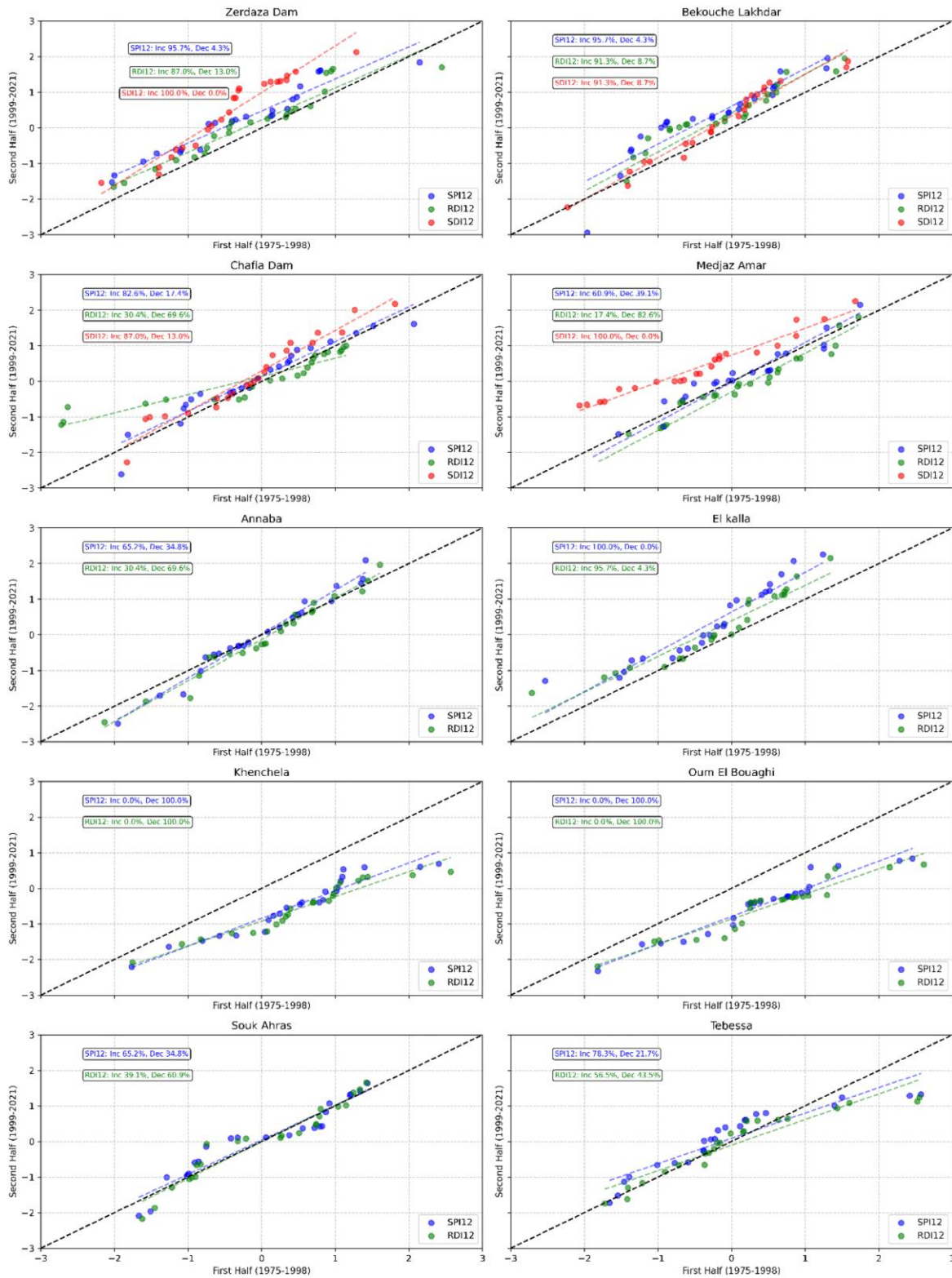


Figure 5.3 Analyse de fréquence et analyse innovante des tendances (FITA et ITA) des indices SPI12, RDI12 et SDI12 pour 10 stations du nord-est de l'Algérie (1975–2021)

L'analyse FITA appliquée aux indices SPI12, RDI12 et SDI12 pour la période 1975–2021 met en évidence des tendances de sécheresse variables à travers le nord-est de l'Algérie. La Figure 5.3 montre une tendance à la baisse des valeurs classées des indices de sécheresse entre 1975–1998 et 1999–2021, avec des points situés en dessous de la ligne 1:1. Les stations continentales telles que Khenchela et Oum El Bouaghi présentent une diminution de 100 % du SPI12, tandis que les stations côtières comme El Kalla indiquent une augmentation de 100 % du SPI12 et le barrage Zerdaza une augmentation de 95,65 %. La station de Medjez Amar révèle une augmentation de 100 % du SDI12 mais une diminution de 82,61 % du RDI12. Les boîtes à moustaches présentées dans la Figure 5.4 comparent les variations des précipitations, de la température et du débit fluvial au cours des trois périodes définies.

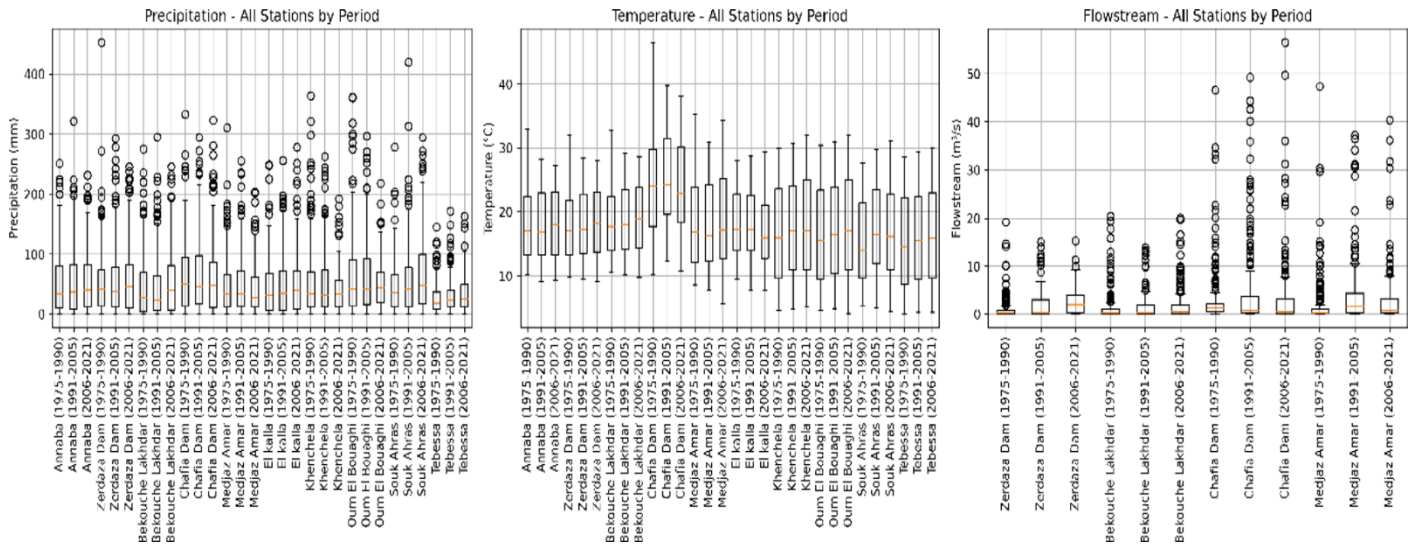


Figure 5.4 Variabilité temporelle des précipitations, de la température et du débit fluvial dans les stations du nord-est de l'Algérie (1975–2021)

Les boîtes à moustaches révèlent des schémas distincts. Les précipitations présentent une forte variabilité dans l'ensemble des stations (Annaba, barrage de Zerdaza, Khenchela), avec des médianes généralement en diminution entre 1975–1990 et 2006–2021. Cette tendance est particulièrement marquée dans des stations comme Souk Ahras et Oum El Bouaghi, où la période 2006–2021 se caractérise par un intervalle interquartile plus resserré et la présence plus fréquente de valeurs aberrantes basses, indiquant une réduction des précipitations et une possible intensification de la sécheresse.

Les boîtes à moustaches de la température montrent un déplacement régulier vers le haut des médianes dans l'ensemble des stations (barrage de Chafia, Medjez Amar). La période 2006–2021 présente des médianes plus élevées (par exemple, 20 °C à Annaba) par rapport à 1975–1990 (18 °C), accompagnées d'une variabilité accrue et de valeurs aberrantes élevées. Ces résultats reflètent une tendance au réchauffement susceptible d'aggraver les conditions de sécheresse.

Les données de débit indiquent une variabilité significative, en particulier au niveau du barrage Zerdaza et de Medjez Amar, où les médianes chutent fortement durant les périodes 1991–2005 et 2006–2021 par rapport à 1975–1990. La présence de nombreuses valeurs extrêmes faibles au cours de la dernière période suggère une réduction des débits et une sévérité accrue de la sécheresse.

V.5.2. Analyse d'homogénéité

Des tests d'homogénéité ont été réalisés afin d'évaluer la cohérence des données de précipitations, de température et de débit fluvial au cours des trois périodes (1975–1990, 1991–2005, 2006–2021) pour l'ensemble des stations du nord-est de l'Algérie, en utilisant un seuil de signification de $p \leq 0,05$, comme indiqué dans le Tableau 5.2.

Tableau 5.2: Résultats des tests d'homogénéité des précipitations, de la température et du débit dans les stations du nord-est de l'Algérie (1975-2021)

Variable	Station	Valeur p de Levene	Homogénéité	MW p value (1975–1990 vs 1991–2005)	MW p value (1991–2005 vs 2006–2021)
Précipitation	Annaba	0.7145	Homogène	–	–
Précipitation	Barrage Zerdaza	0.2520	Homogène	–	–
Précipitation	Bekkouch Lakhdar	0.3364	Homogène	–	–
Précipitation	Barrage Chefia	0.8922	Homogène	–	–
Précipitation	Medjez Amar	0.6600	Homogène	–	–
Précipitation	El Kalla	0.4139	Homogène	–	–
Précipitation	Khenchela	0.0005	Non Homogène	0.9408	0.4044
Précipitation	Oum El Bouaghi	0.0000	Non Homogène	0.9329	0.5827
Précipitation	Souk Ahras	0.0045	Non Homogène	0.3074	0.1429
Précipitation	Tébessa	0.1018	Homogène	–	–
Température	Annaba	0.3642	Homogène	–	–
Température	Barrage Zerdaza	0.5081	Homogène	–	–
Température	Bekkouch Lakhdar	0.5079	Homogène	–	–
Température	Barrage Chefia	0.0471	Non Homogène	0.2653	0.1651
Température	Medjez Amar	0.8382	Homogène	–	–
Température	El Kalla	0.5966	Homogène	–	–
Température	Khenchela	0.7394	Homogène	–	–
Température	Oum El Bouaghi	0.8502	Homogène	–	–
Température	Souk Ahras	0.6204	Homogène	–	–
Température	Tébessa	0.7416	Homogène	–	–
Débit	Barrage Zerdaza	0.0000	Non Homogène	0.0025	0.0007
Débit	Bekkouch Lakhdar	0.7456	Homogène	–	–
Débit	Barrage Chefia	0.1222	Homogène	–	–
Débit	Medjez Amar	0.0255	Non Homogène	0.0000	0.0259

Pour les précipitations, le test de Levene a révélé que la plupart des stations présentent une variance homogène (Annaba, $p = 0,7145$; Barrage de Zerdaza, $p = 0,252$), ce qui indique une stabilité des données au fil du temps. Cependant, Khenchela ($p = 0,0005$), Oum El Bouaghi ($p = 0,0$) et Souk Ahras ($p = 0,0045$) se sont révélées non homogènes, suggérant des variations significatives de la variance.

Des tests ultérieurs de Mann–Whitney U sur ces stations n’ont révélé aucune différence significative de distribution entre les périodes (Khenchela : $p = 0,9408$ pour 1975–1990 vs 1991–2005), indiquant que la non homogénéité est principalement due à des variations de la variance plutôt qu’à des changements dans la distribution globale.

Pour la température, le test de Levene a indiqué une homogénéité pour la plupart des stations (Annaba, $p = 0,3642$; Medjez Amar, $p = 0,8382$), à l’exception du barrage de Chefia ($p = 0,0471$), qui s’est révélé non homogène. Cependant, les tests de Mann–Whitney U pour le barrage de Chefia n’ont montré aucune différence significative de distribution ($p = 0,2653$ pour 1975–1990 vs 1991–2005 ; $p = 0,1651$ pour 1991–2005 vs 2006–2021), suggérant que la non homogénéité est également due à des variations de la variance plutôt qu’à des changements dans la distribution.

En revanche, les données de débit des cours d’eau ont montré une non homogénéité significative dans toutes les stations, comme le révèle le test de Kruskal–Wallis ($p \leq 0,0103$ pour le barrage de Zerdaza, Bekkouch Lakhdar, le barrage de Chefia et Medjez Amar), indiquant des différences de distribution importantes au fil du temps.

D’après le tableau 5.3, les tests post hoc de Dunn avec correction de Bonferroni ont révélé des changements spécifiques selon les périodes. Le barrage de Zerdaza et Medjez Amar ont montré des différences proches de la signification ou significatives pour toutes les paires de périodes (Zerdaza : $p = 0,0527$ pour 1975–1990 vs 1991–2005, $p = 0,05$ pour 1975–1990 vs 2006–2021 ; Medjez Amar : $p = 0,05$ pour 1975–1990 vs 1991–2005, $p = 0,0503$ pour 1975–1990 vs 2006–2021), ce qui indique des changements temporels cohérents dans les débits. Bekkouch Lakhdar et le barrage de Chefia ont montré des variations significatives principalement entre 1975–1990 et 2006–2021 (Bekkouch Lakhdar : $p = 0,05113$; Chefia : $p = 0,063$), avec des différences moins prononcées pour les autres périodes (Bekkouch Lakhdar : $p = 1,0$ pour 1975–1990 vs 1991–2005 ; Chefia : $p = 0,438$ pour 1991–2005 vs 2006–2021).

Tableau 5.3 : Résultats des tests Kruskal–Wallis et post-hoc de Dunn pour l’homogénéité des débits dans les stations du nord-est de l’Algérie (1975–2021)

Variable	Station	Valeur p de Kruskal–Wallis	Homogénéité	Post hoc (1975–1990 vs 1991–2005)	Post hoc (1975–1990 vs 2006–2021)	Post hoc (1991–2005 vs 2006–2021)
Débit	Barrage Zerdaza	0.0000	Non Homogène	0.0527	0.05000	0.0507
Débit	Bekkouch Lakhdar	0.0103	Non Homogène	1.0000	0.05113	0.0880
Débit	Barrage Cheffia	0.0088	Non Homogène	0.3304	0.063	0.4380
Débit	Medjez Amar	0.0000	Non Homogène	0.05000	0.0503	0.0817

La Figure 5.5 présente une carte thermique des valeurs p du test de Kruskal–Wallis et de test post hoc de Dunn pour les débits. Les valeurs p les plus faibles (nuances rouges) indiquent des différences significatives, notamment pour le barrage de Zerdaza et Medjaz Amar sur toutes les périodes, ainsi que

pour Bekouche Lakhdar et barrage Chaffia entre les périodes extrêmes. Ces résultats montrent que le débit des cours d'eau est le paramètre présentant la plus grande instabilité temporelle.

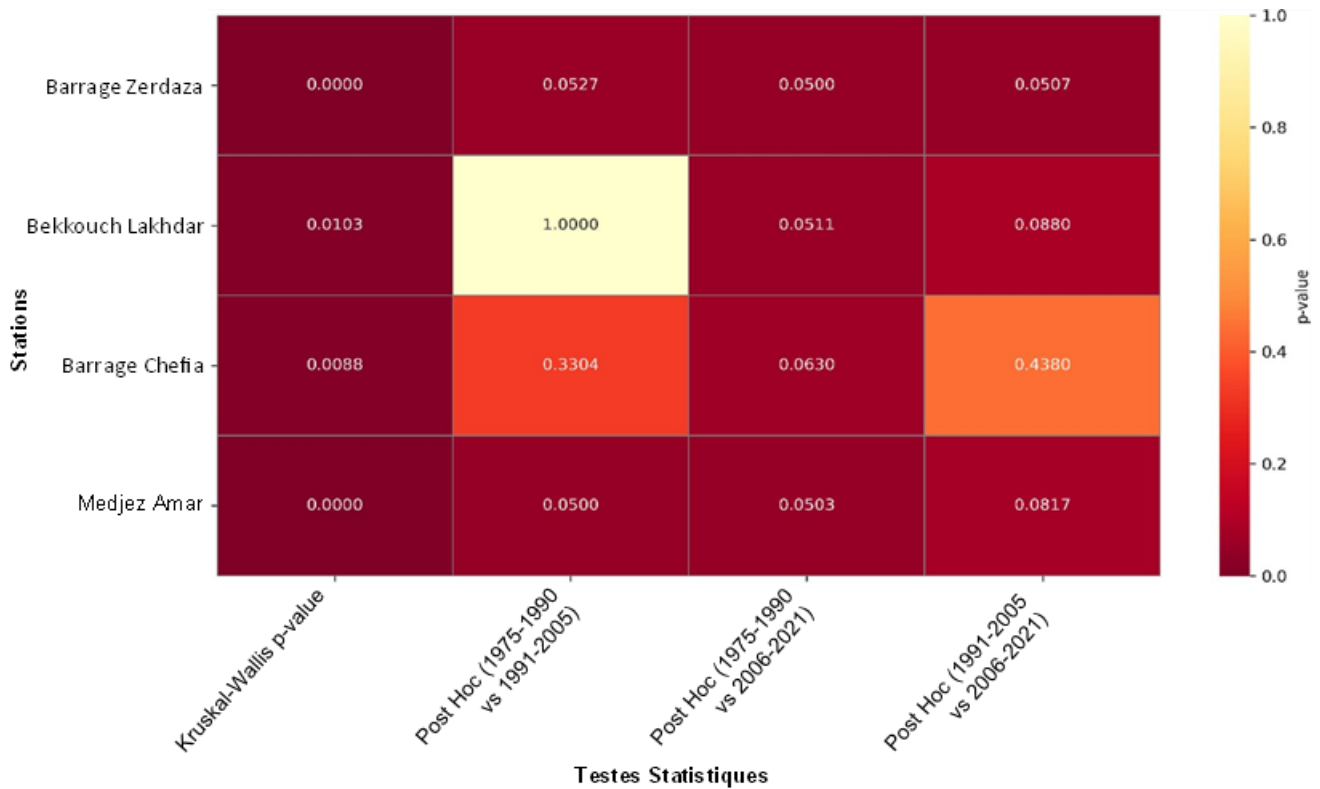


Figure 5.5 : Homogénéité des débits : valeurs p de Kruskal-Wallis et post-hoc de Dunn

V.5.3. Analyse fréquentielle et la pente d'ITA

Le tableau 5.4 présente les fréquences des tendances dérivées de FITA et les pentes ITA. À Khenchela, SPI12 et RDI12 sont tous deux à 100 % décroissants, avec des pentes ITA respectives de $-0,846$ et $-0,792$. À El Kalla, SPI12 est à 100 % croissant (pente ITA : $1,160$) et RDI12 à 95,65 % croissant. Medjez Amar affiche 100 % de SDI12 croissant (pente ITA : $0,797$) et 82,61 % de RDI12 décroissant (pente ITA : $-1,294$). Le barrage de Zerdaza présente 95,65 % de SPI12 croissant (pente ITA : $0,596$) et 86,96 % de RDI12 croissant.

Tableau 5.4 : Fréquences des tendances dérivées de FITA pour SPI12, RDI12 et SDI12 dans les stations du nord-est de l'Algérie (1975–2021)

Stations	Indices	Croissant (%)	Décroissant (%)	Pas de tendance (%)	Années
Barrage Zerdez	SPI12	95,65	4,35	0	1975–2021
Barrage Zerdez	RDI12	86,96	13,04	0	1975–2021
Bekkouch Lakhdar	SPI12	95,65	4,35	0	1975–2021
Bekkouch Lakhdar	RDI12	91,3	8,7	0	1975–2021
Bekkouch Lakhdar	SDI12	91,3	8,7	0	1975–2021
Barrage Chefia	SPI12	82,61	17,39	0	1975–2021
Barrage Chefia	RDI12	30,43	69,57	0	1975–2021
Barrage Chefia	SDI12	86,96	13,04	0	1975–2021
Medjez Amar	SPI12	60,87	39,13	0	1975–2021
Medjez Amar	RDI12	17,39	82,61	0	1975–2021
Medjez Amar	SDI12	100	0	0	1975–2021
Annaba	SPI12	65,22	34,78	0	1975–2021
Annaba	RDI12	30,43	69,57	0	1975–2021
El Kalla	SPI12	100	0	0	1975–2021
El Kalla	RDI12	95,65	4,35	0	1975–2021
Khenchela	SPI12	0	100	0	1975–2021
Khenchela	RDI12	0	100	0	1975–2021
Oum El Bouaghi	SPI12	0	100	0	1975–2021
Oum El Bouaghi	RDI12	0	100	0	1975–2021
Souk Ahras	SPI12	65,22	34,78	0	1975–2021
Souk Ahras	RDI12	39,13	60,87	0	1975–2021
Tébessa	SPI12	78,26	21,74	0	1975–2021
Tébessa	RDI12	56,52	43,48	0	1975–2021

V.6. Discussion

Les résultats de ce chapitre confirment les tendances observées de la sécheresse dans le nord-est de l'Algérie entre 1975 et 2021, telles qu'analysées à l'aide des méthodologies décrites. Les stations continentales, telles que Khenchela (100 % de SPI12 décroissant, pente ITA : $-0,846$) et Oum El Bouaghi (100 % de SPI12 décroissant, pente ITA : $-0,864$), présentent une sécheresse météorologique persistante, corroborée par la baisse des médianes de précipitations illustrée à la Figure 5.4.

À l'inverse, certaines stations, comme El Kalla (100 % de SPI12 croissant, pente ITA : $1,160$) et le barrage de Zerdaza (95,65 % de SPI12 croissant, pente ITA : $0,596$), montrent des conditions plus humides, probablement influencées par la proximité de la mer Méditerranée, qui pourrait atténuer la diminution des précipitations régionales.

À Medjez Amar, des tendances mixtes sont observées : SDI12 est à 100 % croissant (pente ITA : 0,797), tandis que RDI12 est à 82,61 % décroissant (pente ITA : -1,294). Cela traduit une reprise des débits des cours d'eau parallèlement à un aggravement de la sécheresse agricole. Ce phénomène illustre l'efficacité de la méthodologie ITA-FITA pour détecter la variabilité spatiale et sectorielle, comme montré à la Figure 5.3.

L'analyse de l'homogénéité (Tab. 5.2 et Tab. 5.3) confirme l'inhomogénéité significative des débits (Kruskal-Wallis, $p \leq 0,0103$), avec des variations particulièrement marquées au barrage de Zerdaza ($p = 0,05$ pour 1975–1990 vs 2006–2021) et à Medjez Amar. Ces fluctuations sont attribuables aux opérations des barrages et à une diminution documentée des précipitations de 16 à 43 % (Taibi et al., 2013).

Les données de précipitations et de température restent globalement homogènes, comme à Annaba ($p = 0,7145$), ce qui assure la fiabilité des tendances SPI12 et RDI12. Cependant, le changement de variance observé à Khenchela ($p = 0,0005$) correspond à ses conditions de sécheresse persistante, renforçant ainsi la validité de l'analyse.

Les changements hydrologiques, visualisés dans la carte thermique (Fig. 5), indiquent des impacts significatifs des activités anthropiques, en particulier les opérations des barrages de Zerdaza et de Chefia, qui régulent le débit pour l'irrigation et l'approvisionnement en eau.

Les facteurs climatiques, incluant une réduction des précipitations dans le nord de l'Algérie et une augmentation de l'évaporation due à la hausse des températures (Fig. 2 : médianes de 20 °C en 2006–2021 contre 18 °C en 1975–1990), contribuent également à diminuer le débit naturel des cours d'eau.

Les tendances positives du SPI12 à El Kalla et au barrage de Zerdaza suggèrent des conditions plus humides, probablement atténuées par l'influence méditerranéenne. À l'inverse, les tendances négatives du SPI12 à Khenchela et Oum El Bouaghi (pentes de -0,846 et -0,864) indiquent une sécheresse prolongée, modérée à sévère (SPI12 probablement inférieur à -1), cohérente avec une diminution des précipitations de 20 à 30 % au cours du XX^e siècle (Mrad et al., 2018). Les diagrammes en boîte de la Fig. 4, montrant la baisse des médianes de précipitations à Khenchela avec des valeurs extrêmes fréquentes proches de zéro, confirment ce schéma.

Les tendances du RDI12 mettent en évidence le rôle aggravant de la température. Au barrage de Chefia, le RDI12 diminue de 69,57 % (pente ITA : -0,708), alors que le SPI12 augmente de 82,61 % (pente ITA : 0,947). Cette situation montre que des températures élevées (médianes passant de 18 à 20 °C) stimulent l'évapotranspiration, renforçant la sécheresse agricole.

À Medjez Amar, le RDI12 diminue de 82,61 % (pente ITA : -1,294), tandis que le SDI12 augmente de 100 % (pente ITA : 0,797). Cela indique que l'amélioration des débits des cours d'eau n'absorbe pas les déficits en eau pour l'agriculture, soulignant le décalage entre conditions hydrologiques et besoins agricoles.

Les pentes ITA — négatives à Khenchela (-0,846 pour le SPI12, -0,792 pour le RDI12) et positives pour le SDI12 de Medjez Amar (0,797) — illustrent de manière précise les tendances divergentes observées entre le régime hydrologique et les conditions agricoles.

Ces schémas concordent avec la dynamique climatique régionale. [12] notent une intensification marquée de la sécheresse dans le sud de la Méditerranée, notamment en Afrique du Nord. Mrad et al. (2018) confirment un gradient nord–sud des précipitations en Algérie, ce qui accentue les préoccupations liées à l’aridité.

Les influences anthropiques, telles que les opérations des barrages et les changements d’usage des terres, modifient de manière significative le bilan hydrologique, comme l’ont montré Hassini et al. (2011), Meddi (2013), Balah et Amarchi (2016) et Kourat et Medjerab (2016).

Cependant, les tendances à la hausse observées à El Kalla et au barrage de Zerdaza suggèrent une résilience locale, probablement liée à des facteurs microclimatiques ou à une gestion efficace de l’eau, ce qui mérite des investigations complémentaires.

Les conséquences environnementales sont significatives. À Khenchela, la tendance à 100 % de SPI12 décroissant réduit la recharge des nappes phréatiques, menaçant la zone humide de Chott Melghir — un hotspot de biodiversité crucial (AMARD, 2014) — et augmentant les risques de désertification. [7] rapportent une perte de couverture végétale dans les steppes du sud algérien. [9] documentent une sévérité similaire de la sécheresse dans l’Algérie semi-aride, où le déclin des nappes phréatiques (par exemple, 41 % sur 17 ans dans la plaine de Haouz au Maroc) met en tension les écosystèmes.

Les conditions plus humides observées au barrage de Zerdaza, reflétées par l’augmentation du SPI12, peuvent entraîner une érosion des sols et une sédimentation, réduisant la capacité des réservoirs et perturbant les écosystèmes aquatiques, comme le montre le déclin des débits présenté à la Fig. 4. La hausse des températures accentue ces problèmes, en particulier à Medjez Amar, où la sécheresse agricole s’intensifie malgré l’augmentation des débits des cours d’eau.

Pour répondre à ces enjeux, il est recommandé de mettre en œuvre des stratégies de gestion intégrée, incluant notamment la récupération des eaux de pluie (Guebail et al., 2017), est fortement étayée par les résultats ITA-FITA concernant la variabilité spatiale. La mise en place de systèmes d’alerte précoce basés sur le SPI12 et SDI12 peut renforcer la résilience locale et contribuer à atténuer les effets de la sécheresse sur les ressources hydriques, les écosystèmes et l’occupation des sols dans cette région semi-aride..

La méthodologie ITA-FITA, validée par les tests d’homogénéité (Tab 5.2 et 5.3) et les données temporelles (Fig.5.4), fournit une base solide pour comprendre ces tendances et orienter les stratégies d’adaptation.

Conclusion

L’analyse ITA-FITA dans le nord-est de l’Algérie (1975–2021) révèle une forte variabilité spatiotemporelle de la sécheresse et des débits. Les stations continentales, comme Khenchela et Oum El Bouaghi, présentent une sécheresse persistante, tandis que les stations proches de la Méditerranée, telles qu’El Kalla et Zerdaza, montrent des conditions plus humides.

Les opérations des barrages combinées aux changements climatiques, notamment la diminution des précipitations et l’augmentation des températures, expliquent la variabilité spatiale et temporelle des débits. Ces facteurs engendrent des impacts environnementaux majeurs, tels que la diminution des nappes

phréatiques, la menace pesant sur les zones humides, la progression de la désertification et la perturbation des écosystèmes.

Les résultats mettent en évidence la nécessité de mettre en place des stratégies de gestion intégrée ainsi que des systèmes d'alerte précoce afin de renforcer la résilience des ressources hydriques, de l'agriculture et des écosystèmes. La méthodologie ITA-FITA s'avère être un outil fiable pour analyser ces tendances et guider les mesures d'adaptation dans cette région semi-aride.

Chapitre VI : Le modèle de ARIMA

Introduction

L'analyse des séries temporelles constitue un outil fondamental pour appréhender l'évolution et anticiper le comportement futur de divers phénomènes d'origine naturelle ou humaine. En hydrologie et climatologie, cette démarche facilite la prévision des variations de précipitations, des débits fluviaux ainsi que des indices de sécheresse, apportant des informations clés pour une gestion durable et éclairée des ressources en eau.

Parmi les approches les plus reconnues, le modèle ARIMA (processus autorégressif moyenne mobile intégré), introduit par Box et Jenkins (1976), s'impose comme une méthode robuste et flexible. Ce modèle repose sur la combinaison de trois composantes : la partie autorégressive (AR), la différenciation intégrée (I) pour stationnaires la série, et la moyenne mobile (MA) qui tient compte des erreurs passées.

Grâce à cette structure, le modèle ARIMA a été largement appliqué dans divers domaines scientifiques, et il s'avère particulièrement pertinent pour la prévision hydrologique et climatique [175] [176]

VI.1. Processus aléatoire stationnaires

VI.1.1. Processus ARMA (p, q) : Modèle autorégressif - Moyenne mobile

Les modèles ARMA constituent une extension des modèles autorégressifs (AR) et à moyennes mobiles (MA), en combinant leurs caractéristiques. Ils occupent une place centrale dans la modélisation des processus stationnaires, bien que leur traitement soit plus complexe que celui des modèles séparés. Il est démontré que les fonctions d'autocorrélation (ACF) et d'autocorrélation partielle (PACF) des processus ARMA présentent un comportement amorti, tendant vers zéro en valeur absolue avec une décroissance de type exponentielle. Cette propriété permet d'établir un tableau comparatif des corrélogrammes et des corrélogrammes partiels selon le type de processus étudié (AR, MA ou ARMA) [177].

Un processus stationnaire X_t suit un ARMA (p,q) s'il vérifie la relation suivante :

$$\begin{cases} X_t = \phi_0 + \phi_1 X_{t-1} + \dots + \phi_p X_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \\ \phi_p \neq 0, \theta_q \neq 0 \\ \varepsilon_t \sim BB(0, \sigma_\varepsilon^2) \end{cases}$$

Où les ϕ_i et θ_i sont les paramètres du modèle et les ε_i les termes d'erreur.

VI.1.1.1. Principales caractéristiques d'un modèle ARMA(p,q)

- **La fonction d'autocorrélation ACF :**

La covariance vaut :

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= E(X_t X_{t+h}) = E \left[\left(\sum_{i=1}^p \phi_i X_{t-i} + \varepsilon_t - \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j} \right) X_{t+h} \right] \\ &= \sum_{i=1}^p \phi_i E(X_{t-i} X_{t+h}) - \sum_{j=1}^q \theta_j E(\varepsilon_{t-j} X_{t+h}) + E(\varepsilon_t X_{t+h}) \end{aligned}$$

Si on note :

$$\gamma_{X_\varepsilon}(h) = E(\varepsilon_t X_{t+h})$$

La covariance croisée entre ε_t et X_{t+h} On a :

$$\gamma(h) = \sum_{i=1}^p \phi_i \gamma(h-i) - \sum_{j=1}^q \theta_j \gamma_{X_\varepsilon}(h-j) + \gamma_{X_\varepsilon}(h)$$

Or :

$$E(X_t \varepsilon_t) = E \left[\left(\sum_{i=1}^p \phi_i X_{t-i} + \varepsilon_t - \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j} \right) \varepsilon_t \right] = E(\varepsilon_t^2) = \sigma^2$$

Et ε_t n'est pas corrélé avec le passé :

$$\gamma_{X_\varepsilon}(h) = \begin{cases} \sigma^2 & \text{si } h = 0 \\ 0 & \text{si } h > 0 \end{cases} \text{ et } \gamma_{X_\varepsilon}(h) \neq 0 \text{ si } h < 0$$

Si $h > q$, tous les types $\gamma_{X_\varepsilon}(h) = 0$ et on a :

$$\begin{cases} \gamma(h) = \sum_{i=1}^p \phi_i \gamma(h-i) \\ \rho(h) = \sum_{i=1}^p \phi_i \rho(h-i) \end{cases}$$

Ce type du modèle conduit à un système d'équations de type Yule-Walker. La composante MA n'intervient que jusqu'au retard q , au-delà duquel elle s'annule. Il est donc naturel de retrouver des équations analogues à celles des modèles AR(p) pour $h > q$. Ainsi, la structure de l'autocorrélation d'un processus ARMA ne suit pas de schéma déterminé pour les premiers retards ($h \leq q$), mais au-delà, son comportement devient similaire à celui d'un processus AR(p). Par conséquent, on obtient une infinité de valeurs $\gamma(h)$ non nulles ; toutefois, pour $h > q$, la fonction d'autocorrélation présente la même décroissance que celle d'un modèle autorégressif. (Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. John Wiley & Sons.)

- **La fonction d'autocorrélation partielle :**

Pour $h \leq p$, il n'existe pas de schéma bien défini.

Pour $h > p$, le comportement devient similaire à celui d'un modèle MA(q).

Le tableau ci-dessous illustre les propriétés caractéristiques des fonctions d'autocorrélation simple (ACF) et partielle (PACF) pour les modèles de type ARMA :

Tableau 6.1 : les propriétés des fonctions d'autocorrélation simple et partielle du modèle ARMA

Type de modèle	Configuration typique d'une ACF	Configuration typique d'une PACF
ARMA (1,1)	Décroissance géométrique à partir du premier retard, le signe est déterminé par $\theta_1 - \phi_1$	Décroissance exponentielle $\phi_1 > 0$ ou sinusoïdale amortie $\phi_1 < 0$
ARMA(p,q)	Décroissance exponentielle ou sinusoïdale amortie tronquée après (q - p) retards.	Décroissance exponentielle ou sinusoïdale amortie tronquée après (q - p) retards.

VI.2. Modèles linéaires non-stationnaires

VI.2.1. Modèle ARIMA (processus autorégressif moyenne mobile intégré)

La classe des modèles non stationnaires est particulièrement utile en économétrie et en mathématiques financières. Ces modèles permettent de représenter des processus présentant une forme de non-stationnarité qui peut être corrigée par une différenciation d'ordre d. Ainsi, les modèles ARIMA(p,d,q) constituent une extension naturelle des modèles ARMA, adaptée à l'analyse des séries non stationnaires. [177]

On dit qu'un processus X_t est un ARIMA d'ordre (p,d,q) si $\nabla^d X_t$ est un processus ARMA (p, q)

On modélise alors le processus X_t sous la forme :

$$\Phi(B)(1 - B)^d X_t = \Theta(B) \epsilon_t$$

Où le polynôme $\Phi(B)$ est de degré p et le polynôme $\Theta(B)$ est de degré q.

On écrit que la série X_t suit un processus ARIMA (p,d,q).

VI.3. Test de stationnarité (tests de racine unitaire)

On obtient généralement une racine unitaire (unit root) au niveau des coefficients AR ou MA. Pour formaliser le problème du test de la présence d'une racine unitaire, il est courant de décomposer une série temporelle en deux composantes :

- Une composante déterministe (TD_t) ;
- Une composante stochastique (U_t).

L'objectif des tests de racine unitaire est de déterminer si la partie autorégressive de la composante stochastique (U_t) du processus Y_t contient une racine unitaire [178]. C'est donc dans la partie stochastique que la racine unitaire peut se manifester. Celle-ci est généralement modélisée au moyen d'un processus ARMA.

Plusieurs tests existent pour évaluer la présence d'une racine unitaire :

- Le test de Dickey-Fuller simple (DF),
- Le test de Dickey-Fuller augmenté (ADF),
- Le test de Phillips et Perron (PP),
- Le test de Kwiatkowski, Phillips, Schmidt et Shin (KPSS).

Dans le cadre de cette étude, nous ne retiendrons que les tests de Dickey-Fuller simple. [179]

VI.3.1. Le test de Dickey-Fuller simple (DF)

En 1979, Dickey et Fuller ont proposé un test de la non-stationnarité (ou de racine unitaire), appelé test de Dickey-Fuller simple (DF), qui est aujourd'hui l'un des plus utilisés en économétrie. Ce test repose sur l'estimation de trois modèles autorégressifs d'ordre 1, chacun se distinguant par la spécification de la tendance déterministe [180]:

1. **Sans constante ni tendance :**

$$\Delta Y_t = \phi Y_{t-1} + \mu_t$$

2. **Avec constante :**

$$\Delta Y_t = \phi Y_{t-1} + c + \mu_t$$

3. **Avec constante et tendance linéaire :**

$$\Delta Y_t = \phi Y_{t-1} + c + \beta t + \mu_t$$

Le test adopte comme hypothèse nulle (H_0) la présence d'une racine unitaire, c'est-à-dire la non-stationnarité stochastique de la série. L'hypothèse alternative (H_1) correspond à l'absence de racine unitaire, donc à la stationnarité du processus.

Le principe général de la stratégie de ce test est le suivant :

Première étape : On commence par tester la présence d'une racine unitaire à partir du modèle le plus général, c'est-à-dire le troisième modèle, qui inclut une constante et une tendance linéaire.

Le test consiste à vérifier la nullité du paramètre ϕ de la variable endogène retardée (y_{t-1}) à l'aide d'une statistique de Student. La valeur obtenue est ensuite comparée aux valeurs critiques tabulées par Dickey & Fuller (1979) ou par MacKinnon (1991).

Étant donné que les valeurs critiques sont négatives, la règle de décision est la suivante :

- Si la valeur calculée de la statistique de Student t_ϕ associée à ϕ est supérieure à la valeur critique $VC^3 \rightarrow$ on accepte l'hypothèse nulle (H_0) de racine unitaire (non-stationnarité) et on rejette l'hypothèse alternative.
- Si la valeur calculée de la statistique de Student t_ϕ associée à ϕ est inférieure à la valeur critique $VC^3 \rightarrow$ on rejette l'hypothèse nulle et on accepte l'hypothèse alternative (H_1), à savoir la stationnarité.

Deuxième étape : Dans la deuxième étape, on évalue la présence d'une racine unitaire (non stationnaire) à partir du modèle (2), qui inclut uniquement une constante.

L'hypothèse nulle et l'hypothèse alternative sont définies ainsi :

- $H_0: \phi = 0 \rightarrow$ présence d'une racine unitaire (non-stationnarité),
- $H_1: \phi < 0 \rightarrow$ absence de racine unitaire (stationnarité).

Le test repose sur l'estimation du paramètre ϕ et la comparaison de la statistique de Student calculée avec les valeurs critiques tabulées par Dickey et Fuller (1979), puis étendues par MacKinnon (1991). [180]

Règle de décision :

- Si la valeur calculée t-statistique associée à ϕ est supérieure à la valeur critique $VC^2 \rightarrow$ on accepte H_0 (non-stationnaire) et on rejette H_1 .
- Si la valeur calculée de t-statistique associée à ϕ est inférieure à la valeur critique $VC^2 \rightarrow$ on rejette H_0 et on accepte H_1 (stationnaire).

Troisième étape : Dans la troisième étape, on teste la présence d'une racine unitaire (non-stationnaire) à partir du modèle (1), qui ne contient ni constante ni tendance.

Le test consiste à estimer le paramètre ϕ et à comparer la statistique de Student obtenue t_ϕ avec les valeurs critiques VC^1 tabulées par Dickey & Fuller (1979) ou par MacKinnon (1991).

Règle de décision :

- Si la valeur calculée de la t-statistique associée à ϕ c-à-d. t_ϕ est supérieur à la valeur critique VC^1 on accepte l'hypothèse nulle H_0 de non stationnarité. Dans ce cas le processus est non stationnaire de type DS, la série est intégrée d'ordre 1 $Y_t \rightarrow I(1)$ qui correspond à une pure marche aléatoire $Y_t = Y_{t-1} + \mu_t$.
- Si la valeur calculée de la t-statistique associée à ϕ c-à-d. t_ϕ est inférieure à la valeur critique VC^1 on rejette l'hypothèse nulle H_0 . Dans ce cas le processus est stationnaire, la série est intégrée d'ordre 0, $Y_t \rightarrow I(0)$, $Y_t = \rho Y_{t-1} + \mu_t$ avec $|\rho| < 1$

Le déroulement de la stratégie du test est reporté sur la figure suivante :

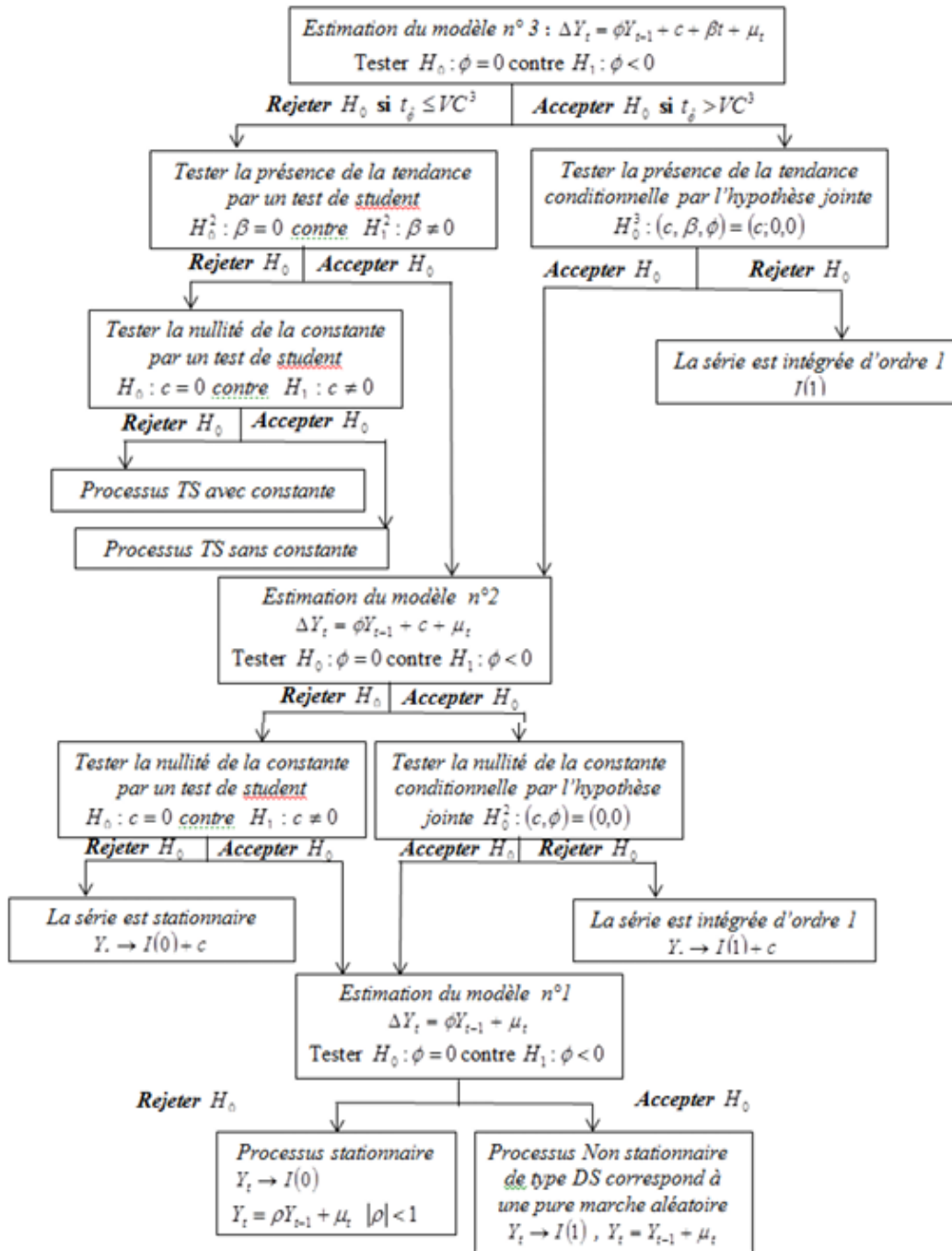


Figure 6.1 : Stratégie du test DF (Rakotoarimanana, 2010)

VI.4. Méthode de Box-Jenkins

La méthodologie de Box-Jenkins appliquée aux séries chronologiques repose sur une succession d'étapes rigoureuses. Avant d'entamer le processus de modélisation, il est indispensable de vérifier la stationnarité de la série, en appliquant si nécessaire des transformations (logarithme, racine carrée, etc.) ou des différenciations successives afin de stabiliser la variance et éliminer les tendances. Une fois la stationnarité assurée, la première étape consiste en l'identification, qui s'appuie sur l'analyse des fonctions d'autocorrélation (ACF) et d'autocorrélation partielle (PACF) pour proposer un modèle

ARIMA candidat. La deuxième étape est l'estimation, où les paramètres du modèle retenu sont évalués, le plus souvent par la méthode du maximum de vraisemblance ou les moindres carrés, afin d'obtenir des coefficients significatifs et robustes. Enfin, la troisième étape est celle de la validation, qui vise à contrôler la qualité du modèle à travers des tests de diagnostic appliqués aux résidus (absence d'autocorrélation, normalité, homoscedasticité). Ce n'est qu'après ces vérifications que le modèle peut être utilisé pour la prévision [177] [180].

VI.4.1. L'identification

Constitue une étape cruciale de la méthodologie de Box-Jenkins, elle consiste à déterminer les ordres p et q du modèle ARMA en analysant la fonction d'autocorrélation (ACF) et la fonction d'autocorrélation partielle (PACF). En effet, la PACF d'un processus autorégressif AR(p) s'annule à partir de l'ordre $p+1$, tandis que l'ACF d'un processus à moyenne mobile MA(q) s'annule à partir de l'ordre $q+1$. Par ailleurs, pour un AR(p), l'ACF présente une décroissance exponentielle, alors que pour un MA(q), c'est la PACF qui décroît de façon exponentielle. Enfin, dans le cas d'un processus mixte ARMA(p,q), lorsque les deux ordres sont non nuls, l'ACF et la PACF présentent toutes deux une décroissance exponentielle sans s'annuler strictement. [177]

La détermination des ordres p et q d'un modèle ARMA peut se faire par différentes méthodes, dont la méthode du coin [181] ou l'analyse des corrélogrammes. L'ordre q est identifié par l'autocorrélation significative la plus élevée, tandis que l'ordre p est déterminé à partir de l'autocorrélation partielle significative maximale [177].

VI.4.2. L'Estimation

L'estimation des paramètres d'un modèle ARMA (p, q), une fois les ordres p et q déterminés, peut être réalisée par plusieurs méthodes dans le domaine temporel. Parmi celles-ci, la plus courante est l'estimation par le maximum de vraisemblance, qui permet d'obtenir des estimateurs efficaces et asymptotiquement normaux. [177] [182]

L'étape d'identification, préalable à l'estimation, repose également sur l'interprétation des graphiques d'autocorrélation. En effet, pour un processus MA (q), les autocorrélations deviennent nulles à partir de l'ordre $q+1$. Ainsi, si le graphe de l'ACF chute brusquement après le retard q , on peut conclure à la présence d'une composante MA(q). À l'inverse, pour un processus AR (p), les autocorrélations décroissent lentement, rendant difficile la détermination directe de p à partir du simple corrélogramme. C'est pourquoi l'examen des autocorrélations partielles (PACF) est nécessaire, celles-ci s'annulant au-delà de l'ordre $p+1$ pour un processus AR(p).

IV.4.3. Validation du processus ARMA

Une fois les ordres p et q déterminés à l'aide des corrélogrammes simples et partiels, il est fréquent que plusieurs spécifications de modèles ARMA(p,q) soient envisageables. Après estimation, il est donc nécessaire de procéder à une validation rigoureuse des modèles afin de retenir celui qui est le plus pertinent. Cette étape consiste à examiner à la fois la significativité des coefficients estimés et les propriétés des résidus.

D'une part, les coefficients du modèle doivent être significativement différents de zéro. Leur test de significativité est généralement effectué à l'aide du test de Student. Si certains coefficients ne sont pas significatifs, il convient alors de modifier la spécification du modèle en éliminant l'ordre AR ou MA concerné [183].

D'autre part, l'analyse des résidus constitue un critère essentiel de validation. Les résidus, définis comme l'écart entre les valeurs observées et les valeurs prévues, doivent présenter une moyenne nulle et se comporter comme un bruit blanc. Si tel n'est pas le cas, cela signifie que le modèle est mal spécifié et qu'il manque probablement un terme autorégressif ou de moyenne mobile. Dans ce cas, un retour à la phase d'identification s'impose (Box & Jenkins, 1976) [176].

La validation des modèles ARMA est donc une étape fondamentale, permettant non seulement de vérifier la pertinence du modèle retenu, mais également de comparer les performances des différentes spécifications estimées.

- **Test de Ljung-Box**

La statistique de **Ljung-Box** constitue une version modifiée et améliorée du test du khi-deux de **Box-Pierce**, proposé initialement pour vérifier la présence d'autocorrélation dans les résidus d'un modèle [184].

Ce test, noté Q, permet de déterminer si une série temporelle est aléatoire et indépendante. En effet, si les observations successives ne sont pas indépendantes, une valeur peut être corrélée avec une autre décalée de k périodes, générant une **autocorrélation**. Or, la présence d'autocorrélations résiduelles remet en cause l'adéquation du modèle et peut affecter l'exactitude des prévisions. [185]

La statistique de Ljung-Box est préférée à celle de Box-Pierce, car elle offre de meilleures propriétés pour les petits échantillons. Elle s'écrit sous la forme :

$$Q = n(n + 2) \sum_{k=1}^h \frac{\hat{\rho}_k^2}{n - k}$$

Où :

- n : taille de l'échantillon,
- $\hat{\rho}_k$: autocorrélation empirique au retard k,
- h : nombre de retards testés.

Sous l'hypothèse nulle H_0 les résidus sont indépendants et suivent un bruit blanc. La statistique Q suit alors approximativement une loi du khi-deux à $h-p-q$ degrés de liberté, où p et q représentent les ordres du modèle ARMA tester. [183]

Si la probabilité associée (p-value) $> 0,05$, on ne rejette pas $H_0 \rightarrow$ les résidus sont du bruit blanc \rightarrow le modèle est correctement spécifié.

Si la p-value $\leq 0,05$, on rejette $H_0 \rightarrow$ les résidus présentent une autocorrélation \rightarrow le modèle est mal spécifié. [183]

VI.5. Le code de calcul utilisé (Eviews 13)

L'objectif principal de cette étude est d'appliquer la méthodologie de **Box-Jenkins** pour modéliser et prévoir l'évolution des indices de sécheresse **SPI**, **RDI** et **SDI**, calculés sur une échelle annuelle (12 mois). Cette approche, fondée sur les modèles ARIMA, constitue une technique d'extrapolation qui permet de prendre en compte les propriétés stochastiques des séries chronologiques et d'évaluer leur dynamique à court terme. La méthodologie de Box-Jenkins repose sur un processus rigoureux et itératif d'identification, d'estimation, de validation et de prévision à court terme., où chaque modèle est remis en cause jusqu'à obtenir une spécification acceptable (Mélard, 1984). [177]

Dans le cadre de ce travail, le logiciel **EViews 13** est mobilisé pour la mise en œuvre de cette démarche. EViews est un outil statistique et économétrique puissant, largement utilisé pour l'analyse et la modélisation des séries temporelles. Il offre une interface conviviale et intuitive, tout en intégrant des fonctionnalités avancées pour l'estimation des modèles ARIMA, la réalisation de tests de stationnarité (ADF, PP, KPSS), l'analyse des autocorrélations (ACF et PACF), ainsi que la validation des modèles à travers des tests de diagnostic comme le **Ljung-Box**. Grâce à ses modules graphiques et ses capacités de traitement des données, EViews 13 permet non seulement d'automatiser une partie de la méthodologie de Box-Jenkins, mais aussi de comparer rapidement plusieurs spécifications de modèles afin de retenir la plus adéquate.

VI.6. Résultats et discussion

VI.6.1. Étude de la stationnarité

Le tableau ci-dessous présente les résultats des tests de racine unitaire (Dickey-Fuller) appliqués aux séries temporelles SPI 12, RDI 12 et SDI 12 pour l'ensemble des stations étudiées. Deux modèles ont été testés :

- **Modèle [2]** : avec constante uniquement,
- **Modèle [3]** : avec constante et tendance linéaire.

Pour chaque station, les valeurs de la t-statistique et de la valeur p sont reportées dans le tableau

Tableau 6.2 : Les valeurs de t-statistique et de p pour la vérification de la stationnarité des stations

Station	Indice	Modèle[2]		Modèle[3]		Observation
		t-statistique	Valeur P	t-statistique	Valeur P	
Annaba	SPI12	-7.909316	0.0000	-8.258980	0.0000	Stationnaire
	RDI12	-7.888422	0.0000	-8.022901	0.0000	Stationnaire
El Kala	SPI12	-7.212045	0.0000	-7.640955	0.0000	Stationnaire
	RDI12	-7.784342	0.0000	-7.924663	0.0000	Stationnaire
Barrage Chaffia	SPI12	-6.472283	0.0000	-7.498149	0.0000	Stationnaire
	RDI12	-6.551810	0.0000	-6.692248	0.0000	Stationnaire
	SDI12	-6.457548	0.0000	-6.822669	0.0000	Stationnaire
Barrage Zerdaza	SPI12	-6.538397	0.0000	-7.680473	0.0000	Stationnaire
	RDI12	-7.053169	0.0000	-7.053169	0.0000	Stationnaire

	SDI12	-5.126681	0.0000	-4.592608	0.0000	Stationnaire
Bekouche Lakhdar	SPI12	-6.840434	0.0000	-7.600323	0.0000	Stationnaire
	RDI12	-7.433847	0.0000	-7.824158	0.0000	Stationnaire
	SDI12	-6.196863	0.0000	-6.540889	0.0000	Stationnaire
Medjaz Amar	SPI12	-6.763690	0.0000	-6.794568	0.0000	Stationnaire
	RDI12	-6.195593	0.0000	-6.521469	0.0000	Stationnaire
	SDI12	-4.788859	0.0000	-5.449997	0.0000	Stationnaire
Souk Ahras	SPI12	-6.742056	0.0000	-7.120575	0.0000	Stationnaire
	RDI12	-6.648684	0.0000	-6.910417	0.0000	Stationnaire
Oum El Bouaghi	SPI12	-5.181494	0.0000	-6.319806	0.0000	Stationnaire
	RDI12	-4.718243	0.0000	-6.346570	0.0000	Stationnaire
Khenchela	SPI12	-4.781551	0.0000	-5.782364	0.0000	Stationnaire
	RDI12	-4.378422	0.0001	-5.800109	0.0000	Stationnaire
Tébessa	SPI12	-3.820014	0.0004	-5.197879	0.0000	Stationnaire
	RDI12	-6.889111	0.0000	6,806432	0,0000	Stationnaire

Le tableau VI.2 présente les résultats des tests de stationnarité appliqués aux indices climatiques SPI12, RDI12 et SDI12 pour différentes stations et barrages du nord-est de l'Algérie. Les tests ont été effectués selon deux modèles distincts, dont les t-statistiques et les valeurs p (probabilité) sont indiquées.

On constate que, pour l'ensemble des indices et stations, les valeurs p sont toutes très faibles (inférieures à 0,05), ce qui permet de rejeter l'hypothèse nulle de non-stationnarité. Les t-statistiques négatives et significatives confirment la stationnarité des séries temporelles étudiées. Cette stationnarité suggère que les indices SPI12, RDI12 et SDI12 ne manifestent pas de tendance significative au cours de la période étudiée, ce qui permet leur utilisation fiable dans l'analyse de la variabilité climatique et des épisodes de sécheresse. En somme, cette stabilité des indices assure la solidité des analyses statistiques ultérieures ainsi que la pertinence de l'interprétation des tendances de sécheresse à l'échelle annuelle.

VI.6.2. Modélisation arma par la méthode de Box-Jenkins

a. L'identification de modèle :

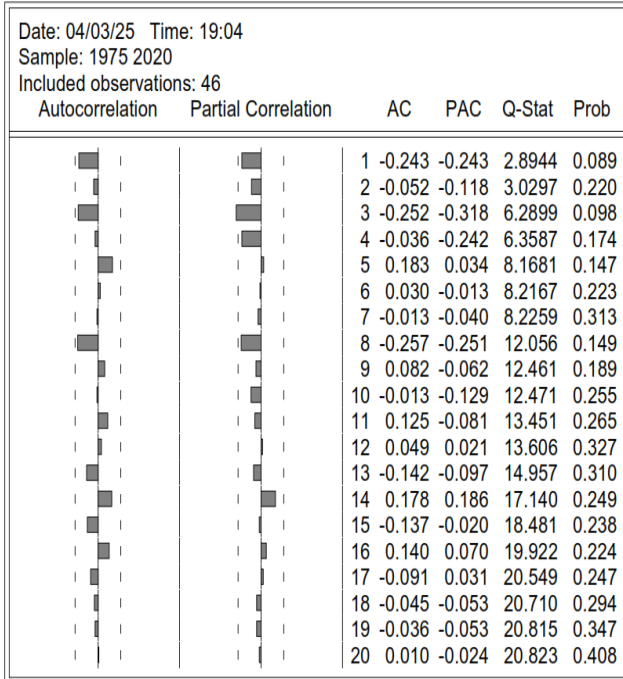
Cette phase, à la fois cruciale et délicate, vise à identifier le modèle ARMA le plus adapté parmi la famille des modèles disponibles. Elle s'appuie principalement sur l'analyse des corrélogrammes simple et partiel. Concrètement, cela consiste à déterminer les ordres p et q du processus ARMA en examinant les fonctions d'autocorrélation simple (ACF) et partielle (PACF). [186]

Corrélogramme des séries stationnaires :

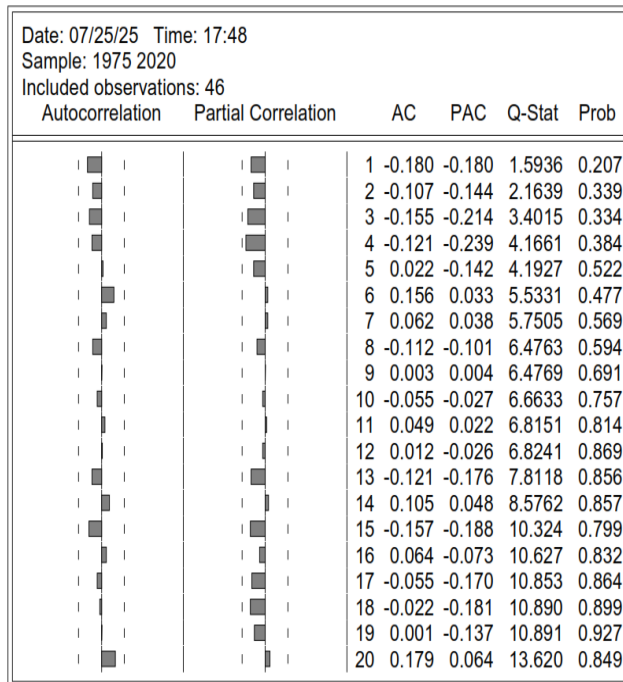
Pour identifier le modèle des séries temporelles, il faut d'abord construire le corrélogramme de la série. À partir de ce dernier, lorsque la série est stationnaire, on peut déterminer les ordres p et q du modèle ARMA en analysant les retards significatifs.

- Corrélogrammes de SPI12

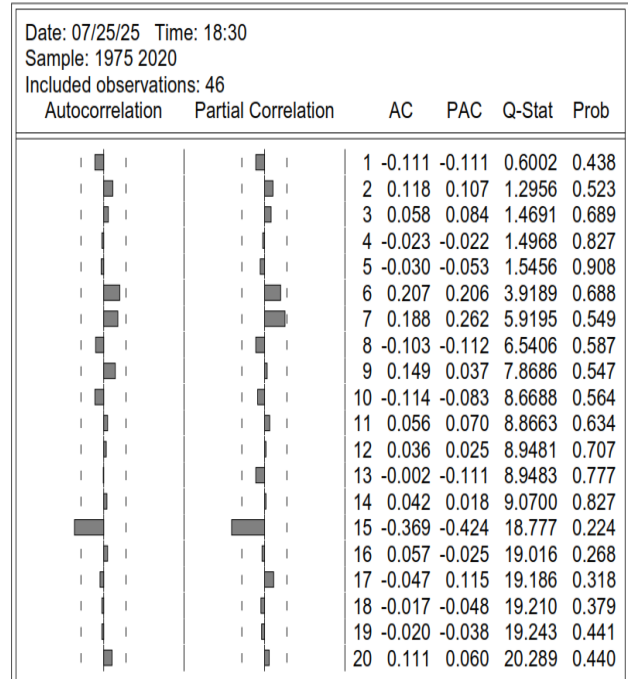
Correlogram of ANNABA



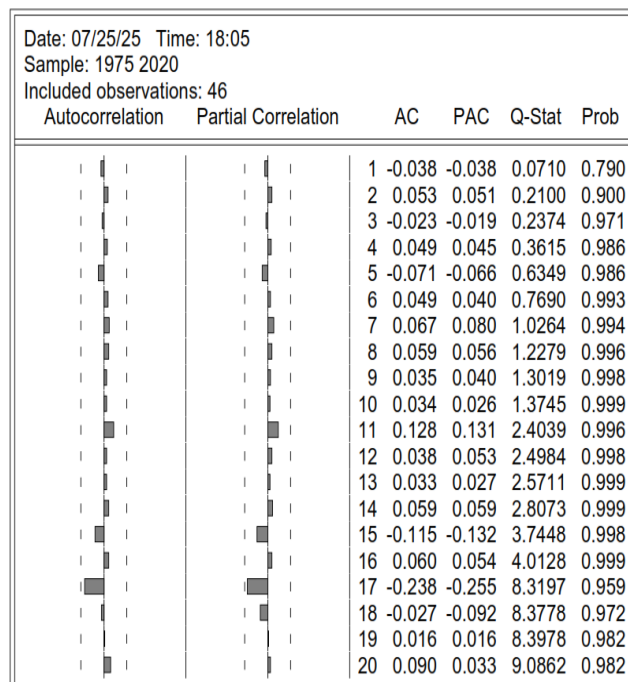
Correlogram of BGE_CHAFIA



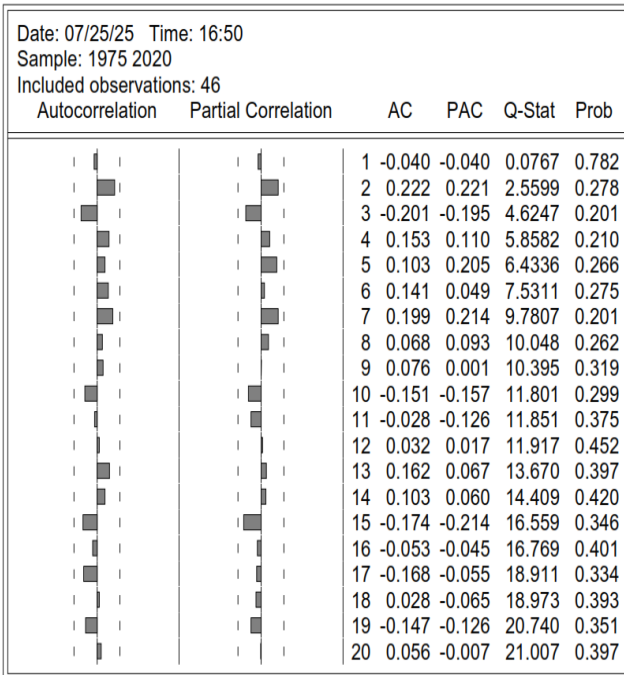
Correlogram of EL_KALLA



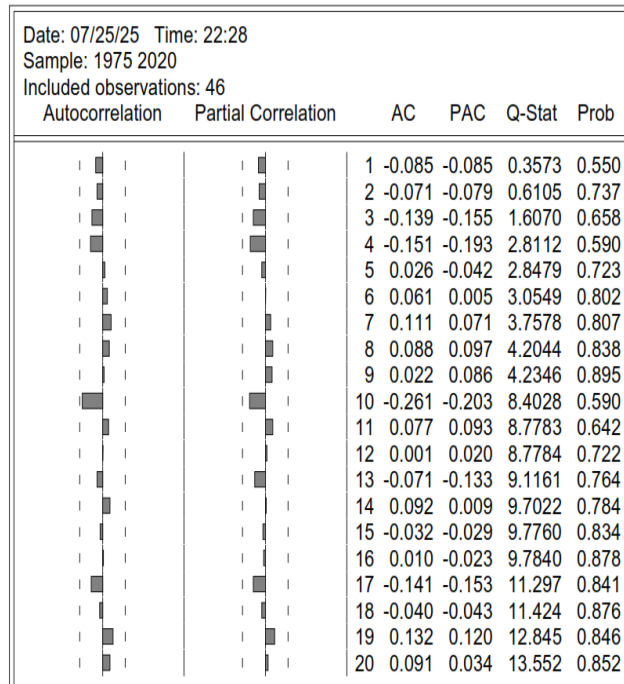
Correlogram of BGE_ZERDAZA



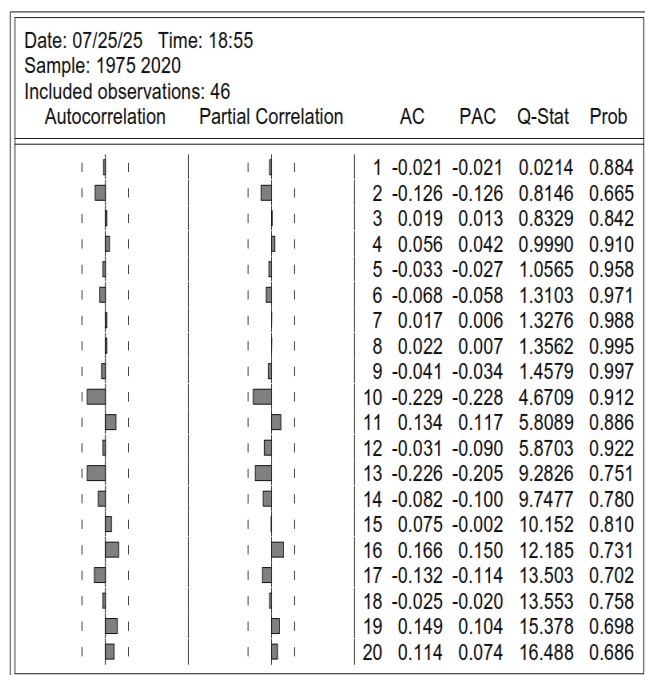
Correlogram of BEKOUCHE_LAKHDAR



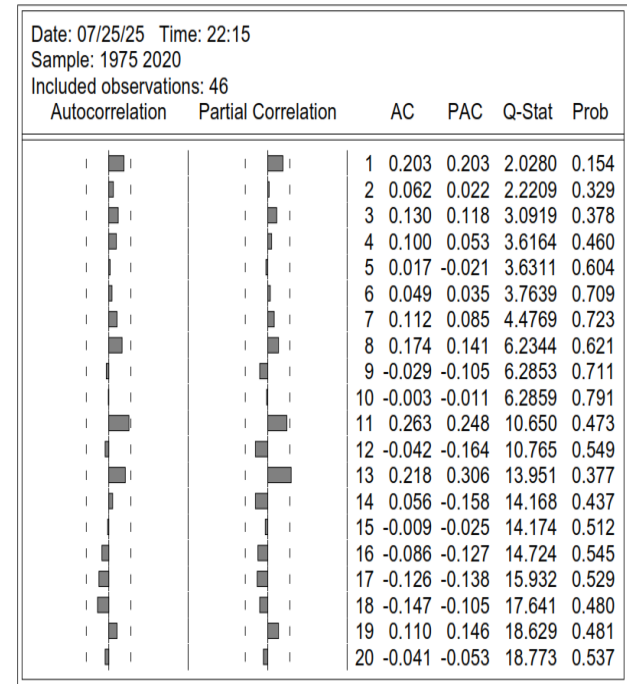
Correlogram of SOUK_AHRAS



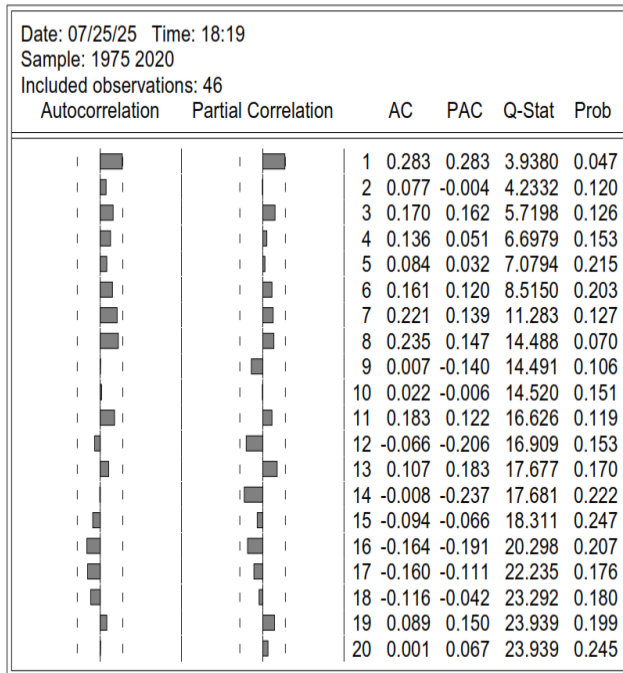
Correlogram of MEDJAZ_AMAR



Correlogram of OUM_EL_BOUGHAI



Correlogram of KHENCHELA



Correlogram of TEBESSA

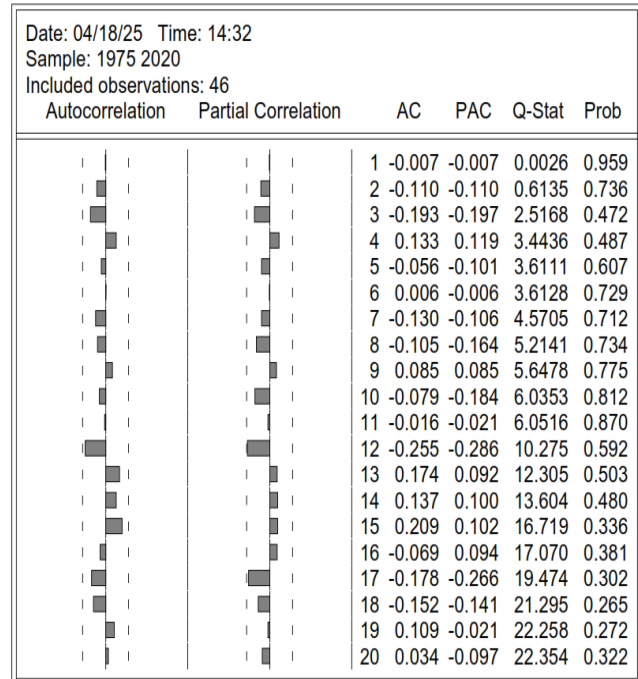
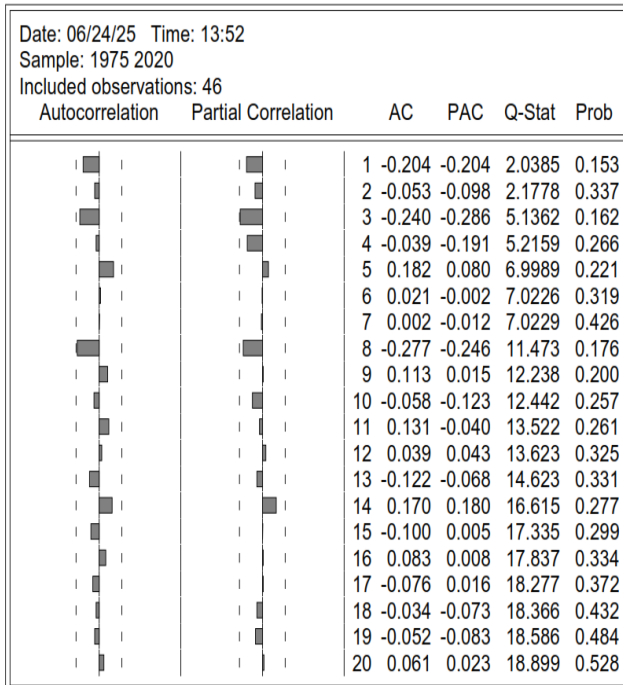


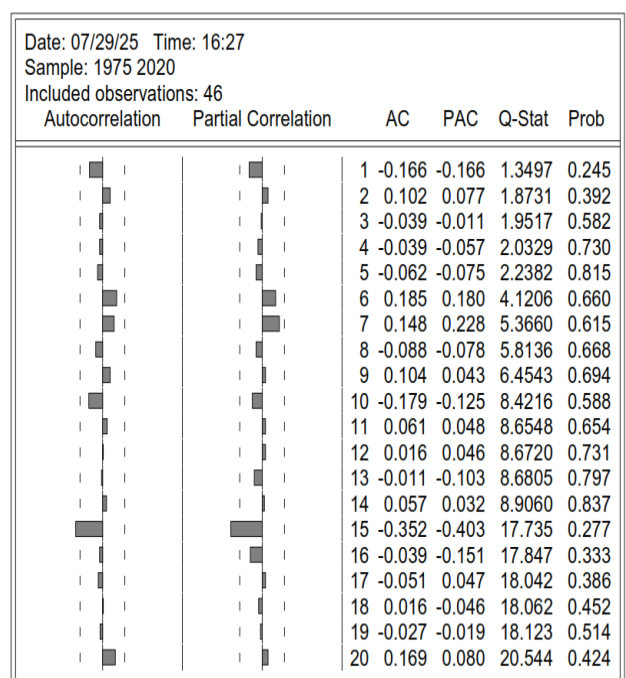
Figure 6.2 : corrélogrammes pour les séries de SPI 12

• Corrélogrammes de RDI12

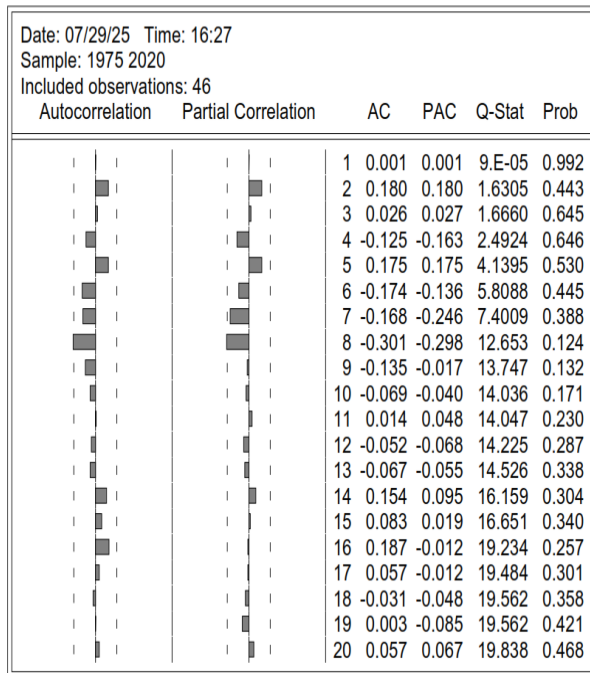
Correlogram of ANNABA



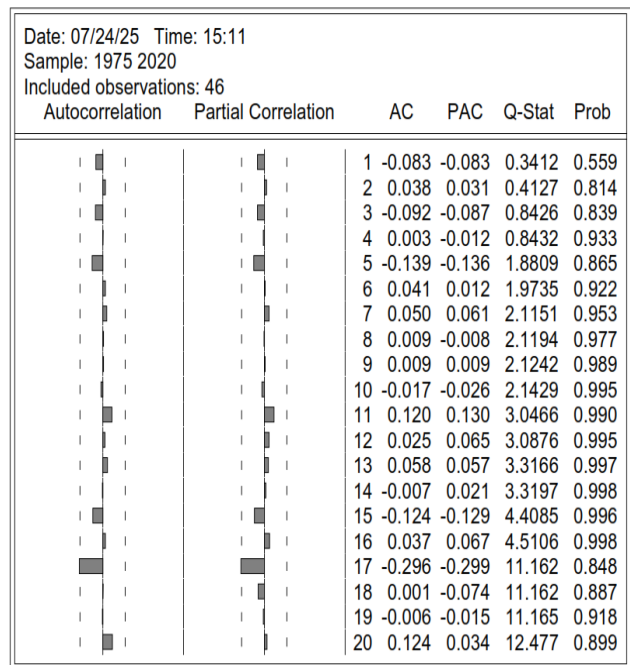
Correlogram of EL_KALLA



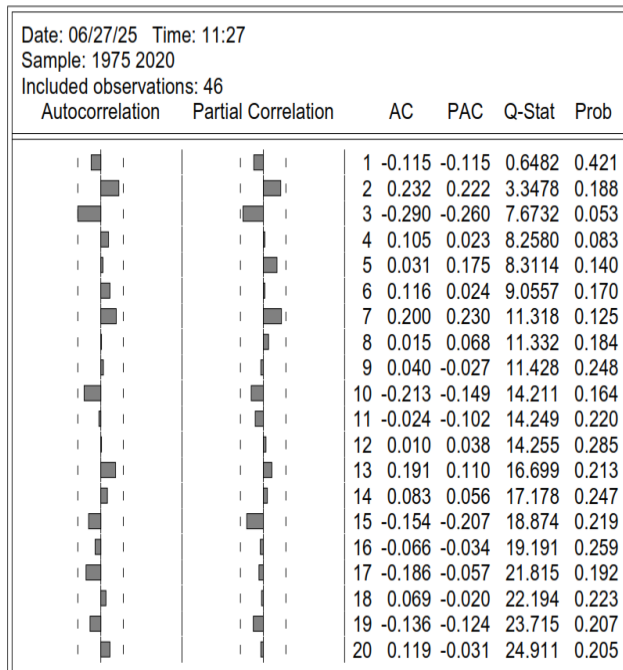
Correlogram of BGE_CHAFIA



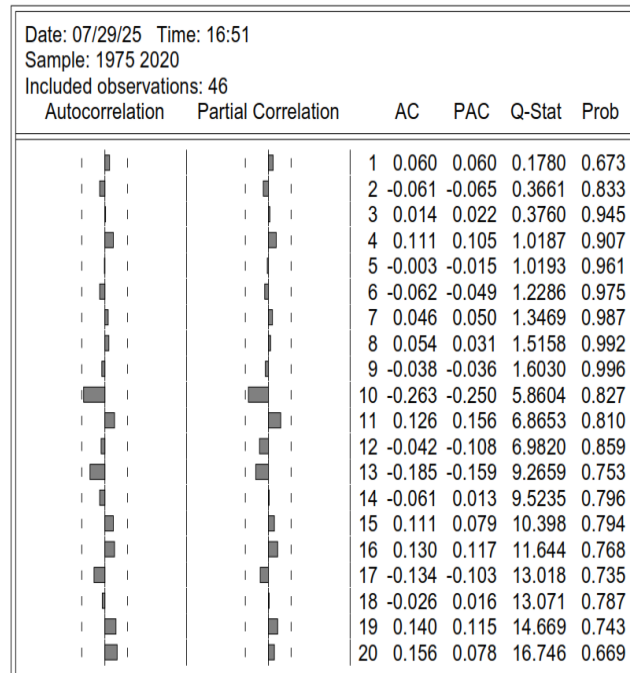
Correlogram of ZERDAZA



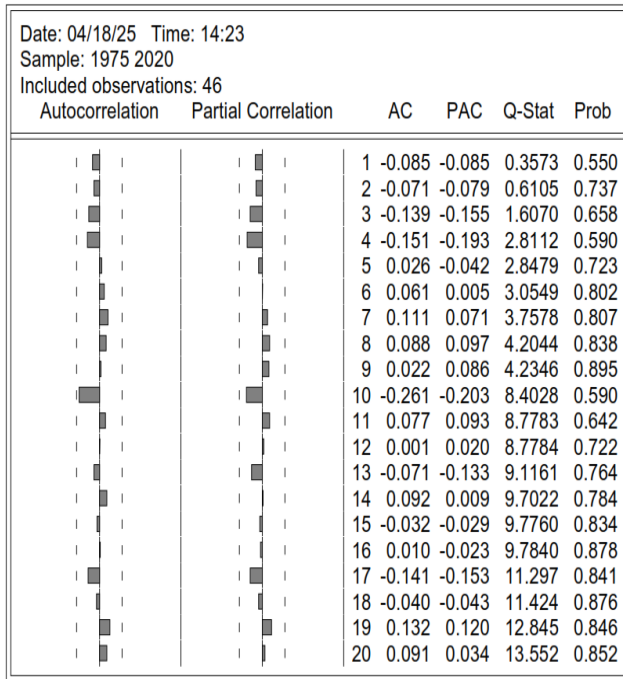
Correlogram of BEKOUCHE_LAKHDAR



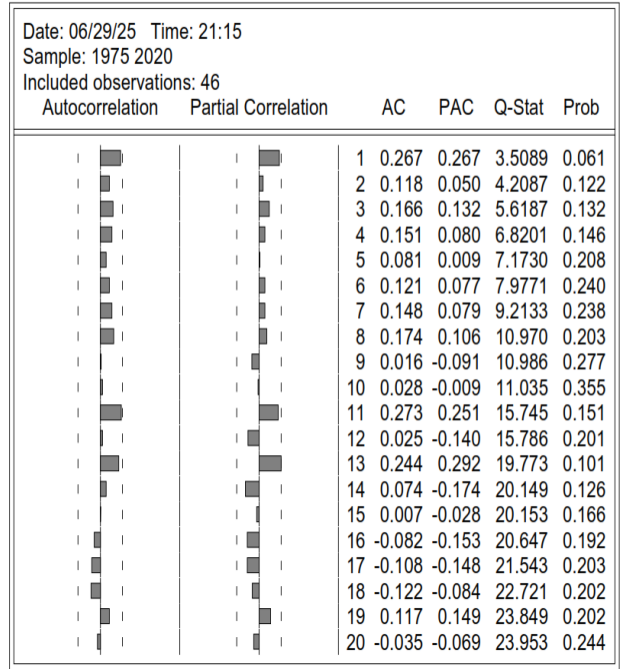
Correlogram of MEDJAZ_AMAR



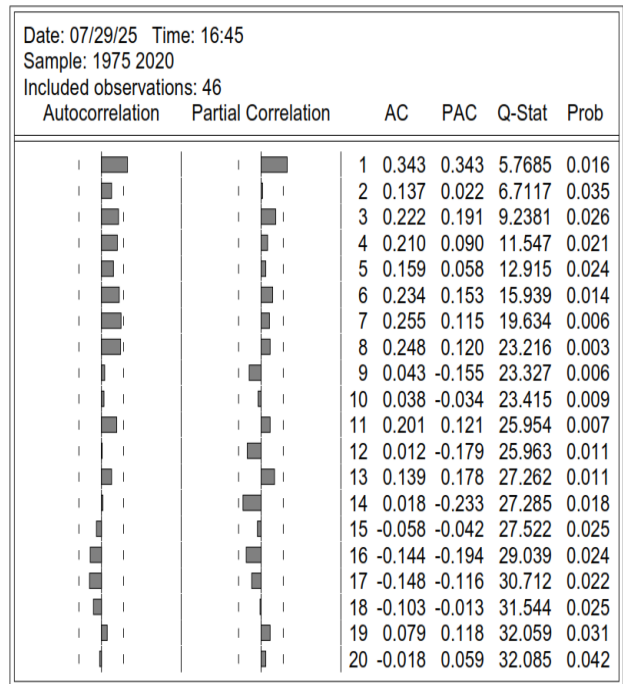
Correlogram of SOUK_AHRAS



Correlogram of OUM_EL_BOUAGHI



Correlogram of KHENCHELA



Correlogram of TEBESSA

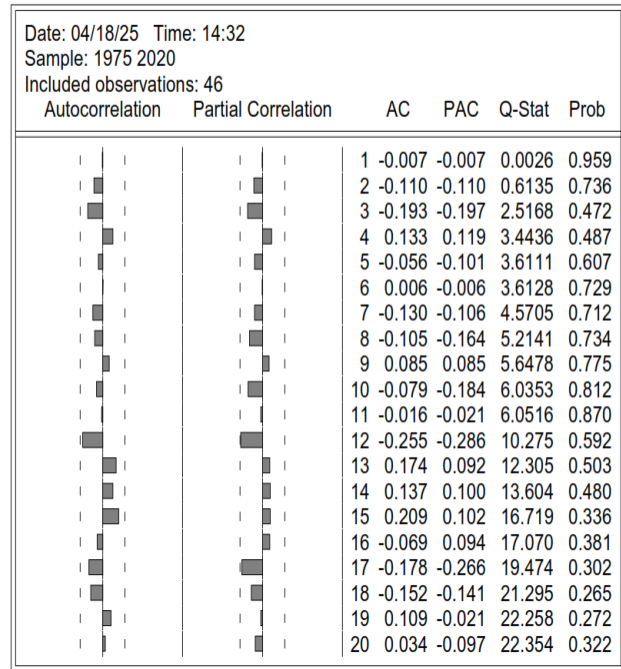


Figure 6.3 : corrélogrammes pour les séries de RDI 12

• Corrélogrammes de SDI12

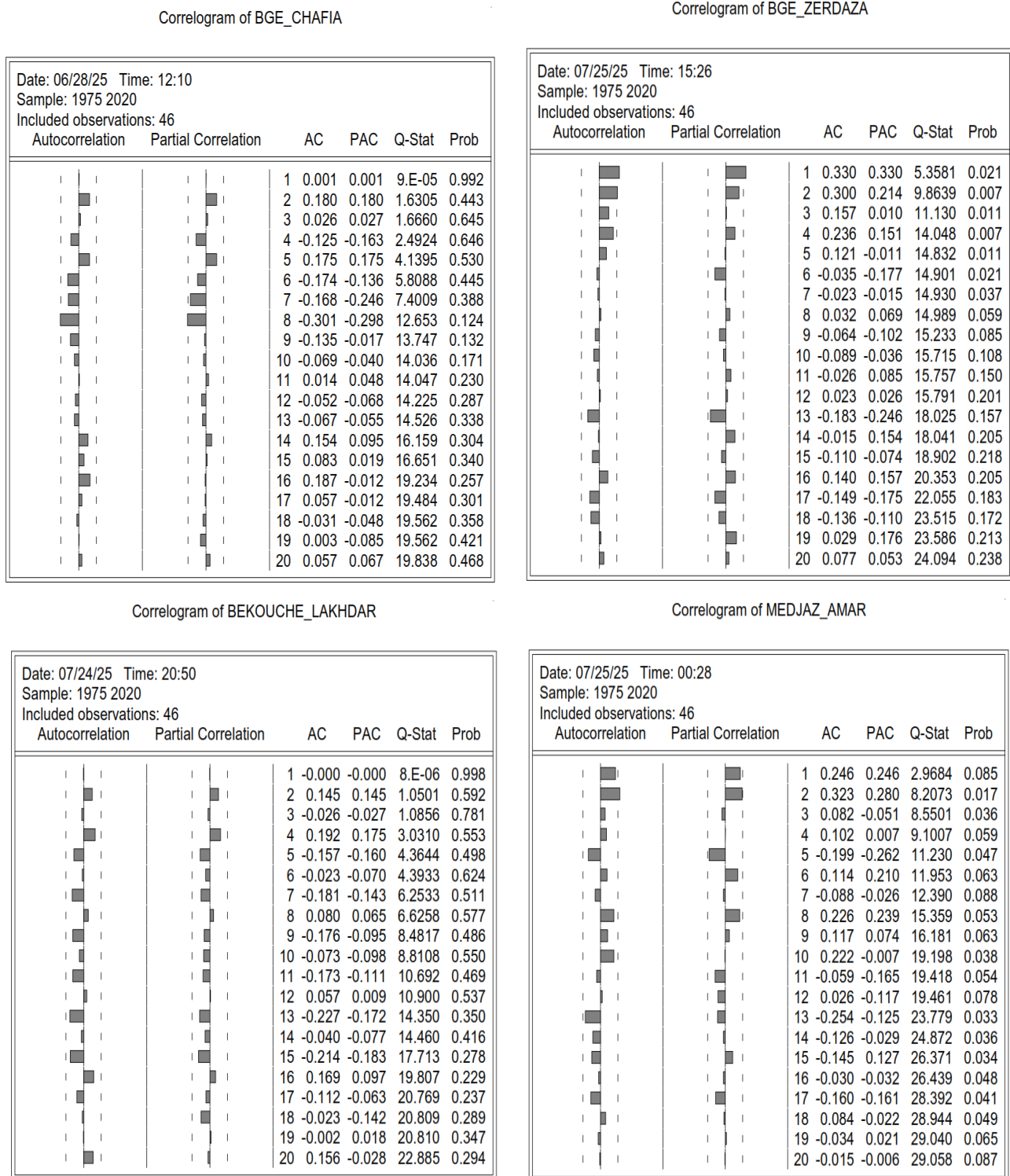


Figure 6.4 : corrélogrammes pour les séries de SDI 12

L'analyse des corrélogrammes des séries stationnaires permet d'identifier les ordres des termes AR et MA de modèle ARMA pour SPI12, RDI12 et SDI12 de chaque station. Par exemple, à partir de la fonction d'autocorrélation simple (ACF) de SPI12 de Annaba (tab.VI.3), on peut repérer un pic significatif pour le terme MA (8), tandis que la fonction d'autocorrélation partielle (PACF) montre un pic

important pour le terme AR (3). La combinaison des deux analyses suggère alors plusieurs modèles possibles : ARMA (1,1), ARMA (1,2), ARMA (1,3), ARMA (2,1)ARMA (3,8).

Tableau 6.3. : Les combinaisons de AR et MA des indices SPI, RDI et SDI pour chaque station

Station	Indice	AR (PACF)	MA (ACF)
Annaba	SPI12	3	8
	RDI12	3	8
El Kala	SPI12	15	15
	RDI12	15	15
Barrage Chaffia	SPI12	4	1
	RDI12	8	8
	SDI12	15	15
Barrage Zerdaza	SPI12	17	17
	RDI12	17	17
	SDI12	1	2
Bekouche Lakhdar	SPI12	2	2
	RDI12	3	3
	SDI12	15	13
Medjaz Amar	SPI12	10	10
	RDI12	10	10
	SDI12	2	2
Souk Ahras	SPI12	10	10
	RDI12	10	10
Oum El Bouaghi	SPI12	13	11
	RDI12	13	11
Khenchela	SPI12	1	1
	RDI12	1	112
Tébessa	SPI12	12	12
	RDI12	12	12

b. Estimation des paramètres du modèle :

Pour sélectionner le modèle le plus approprié pour notre analyse, nous avons recours aux critères d'information et au coefficient de détermination, qui permettent d'évaluer la qualité et l'adéquation des modèles. En particulier, nous avons utilisé le critère de Schwarz (SBC). Les ordres p et q des termes AR et MA du modèle ARMA retenu sont ceux qui minimisent la valeur du critère de Schwarz, garantissant ainsi le meilleur compromis entre précision du modèle et parcimonie des paramètres. (Tab.VI.4)

Tableau 6.4. : les valeurs du critère de Schwarz et la combinaison (AR , MA) des indices SPI, RDI et SDI pour chaque station

Station	Indice	Critère de Schwarz	Le modèle ARMA
Annaba	SPI12	2,7868	(3,1)
	RDI12	2,859	(3,1)
El Kala	SPI12	2,707	(7,15)
	RDI12	2,715	(1,15)
Barrage Chaffia	SPI12	2,830	(1,1)
	RDI12	2,877	(6,6)
	SDI12	2,839	(3,15)
Barrage Zerdaza	SPI12	2,981	(7,11)
	RDI12	2,908	(5,17)
	SDI12	2,848	(1,1)
Bekouche Lakhdar	SPI12	2,939	(2,2)
	RDI12	2,865	(2,3)
	SDI12	2,897	(6,9)
Medjaz Amar	SPI12	2,927	(10,2)
	RDI12	2,917	(11,1)
	SDI12	2,864	(2,1)
Souk Ahras	SPI12	2,910	(10,3)
	RDI12	2,888	(10,3)
Oum El Bouaghi	SPI12	2,880	(11,1)
	RDI12	2,847	(11,1)
Khenchela	SPI12	2,907	(1,1)
	RDI12	2,842	(1,1)
Tébessa	SPI12	2,918	(12,4)
	RDI12	2,889	(12,3)

c. Validation du modèle à l'aide du test de Ljung-Box :

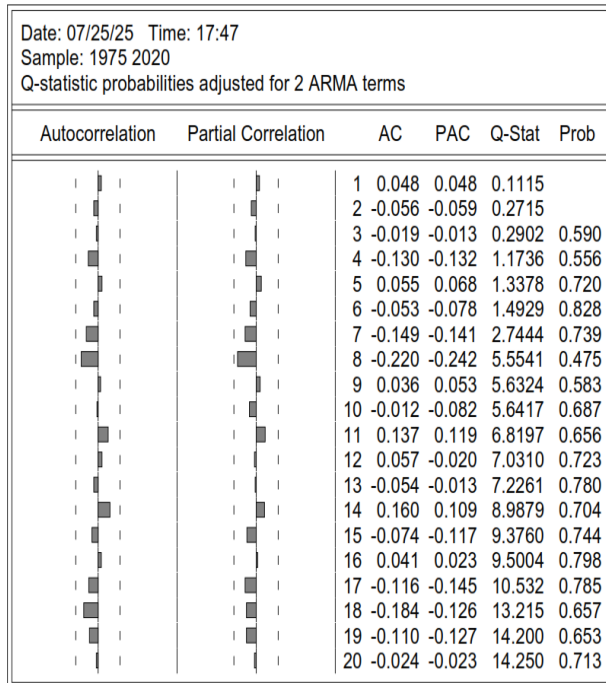
L'examen des corrélogrammes des résidus (Figs.VI.5, VI.6 et VI.7) obtenus pour l'ensemble des stations (Annaba, El Kala, Barrage Chaffia, Barrage Zerdaza, Bekouche Lakhdar, Medjaz Amar, Souk Ahras, Oum El Bouaghi, Khenchela et Tébessa) et pour les différents indices (SPI12, RDI12 et SDI12) révèle que toutes les probabilités associées au test de Ljung-Box sont supérieures au seuil de 5 %.

Ainsi, l'hypothèse nulle H_0 , qui stipule l'absence d'autocorrélation sérielle des résidus, ne peut pas être rejetée. En conséquence, aucune dépendance significative n'apparaît dans les résidus, lesquels peuvent être assimilés à un bruit blanc. Cette propriété valide la bonne spécification des modèles ARMA retenus pour les séries temporelles étudiées et confirme leur capacité à représenter fidèlement la dynamique hydrologique et climatique des différentes stations.

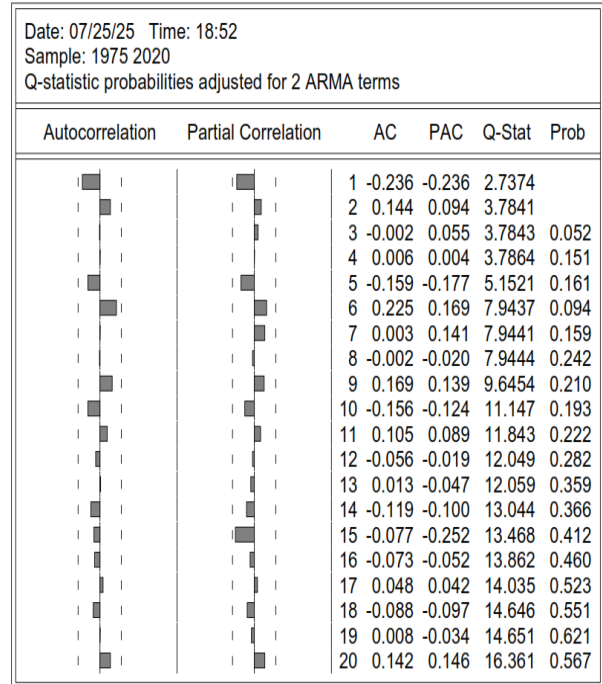
Conformément aux travaux de Ljung et Box (1978), la validation par le test de Ljung-Box constitue une étape essentielle dans l'évaluation des modèles de séries temporelles, puisqu'elle garantit que les résidus ne contiennent plus d'information exploitable. Cela confirme que les modèles ajustés sont robustes et adaptés aux analyses et prévisions envisagées.

• Des corrélogrammes des résidus pour les séries de SPI12 :

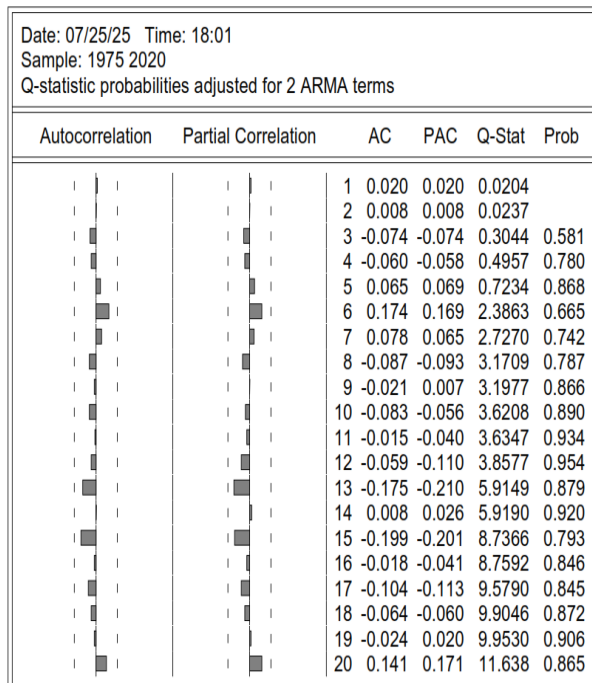
Annaba
Correlogram of Residuals



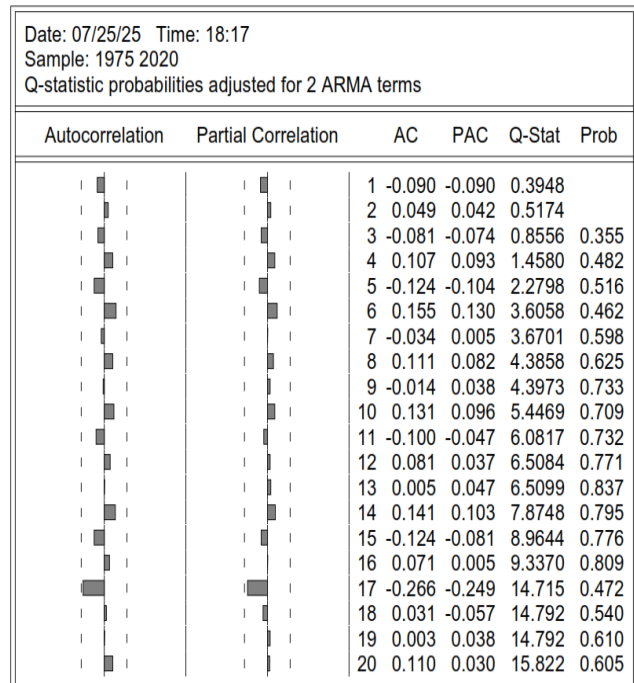
El Kalla
Correlogram of Residuals



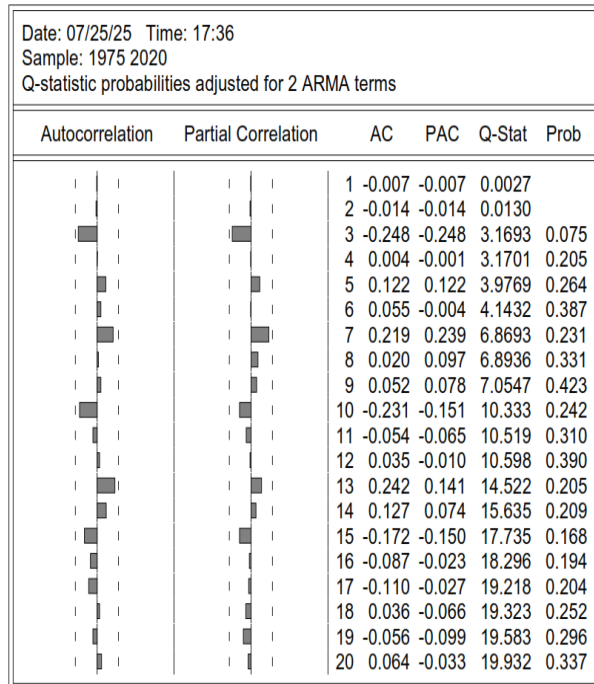
Barrage Chefia
Correlogram of Residuals



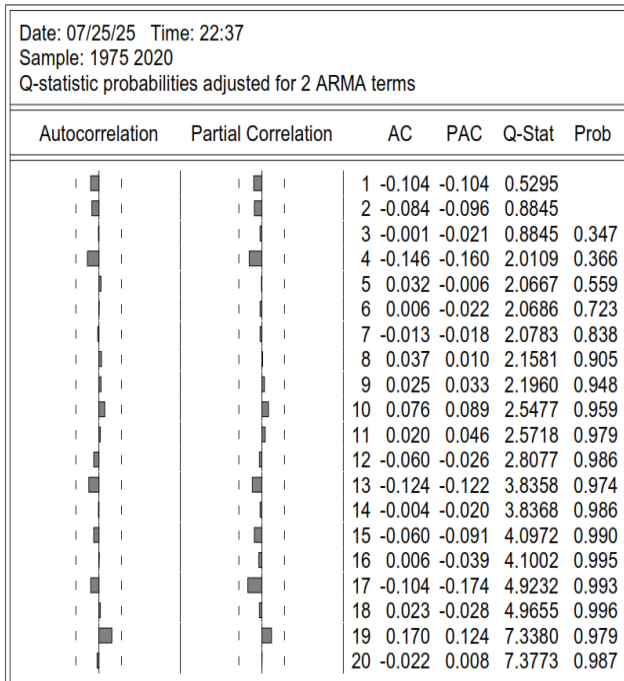
Barrage Zerdaza
Correlogram of Residuals



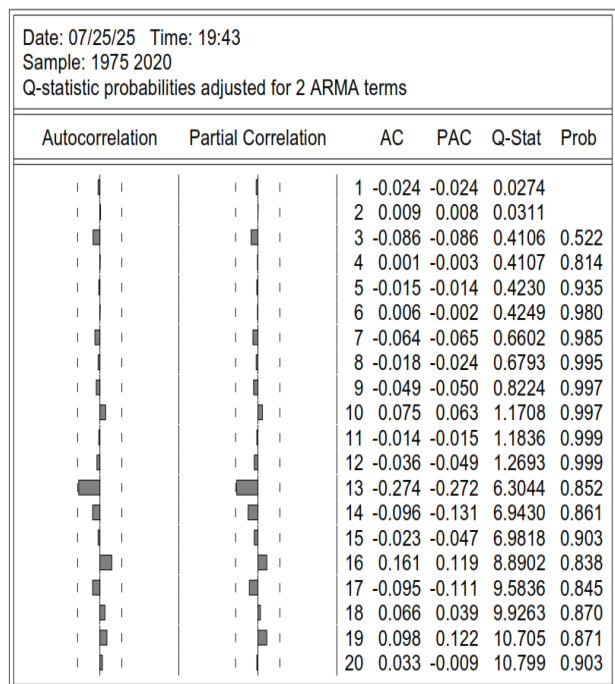
Bekkouch Lakhdar
Correlogram of Residuals



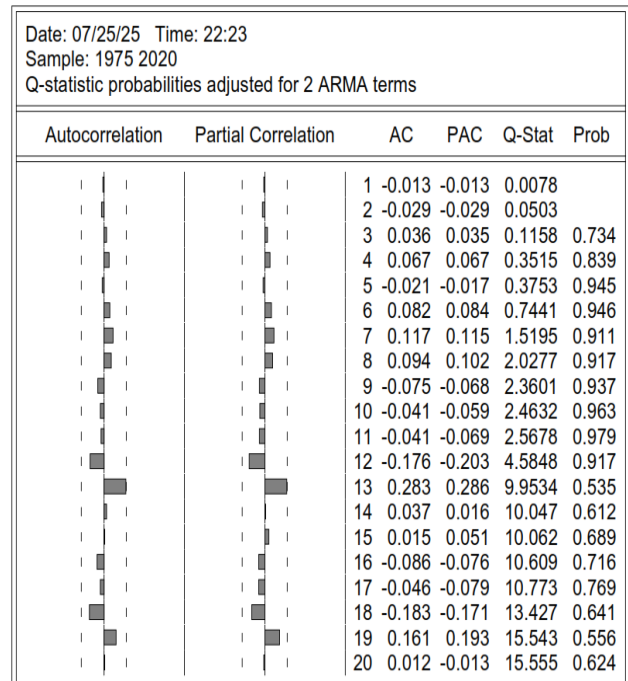
Souk Ahras
Correlogram of Residuals



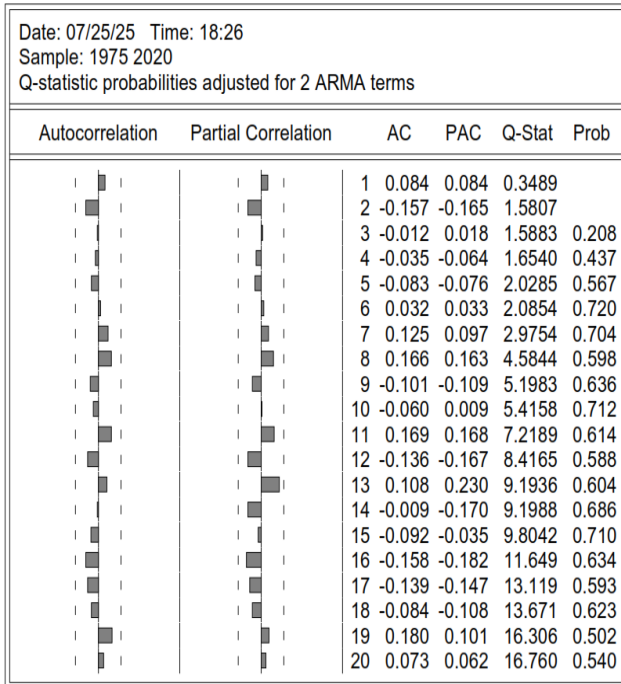
Medjez Amar
Correlogram of Residuals



Oum El Bouaghi
Correlogram of Residuals



Khenchela
Correlogram of Residuals



Tébessa
Correlogram of Residuals

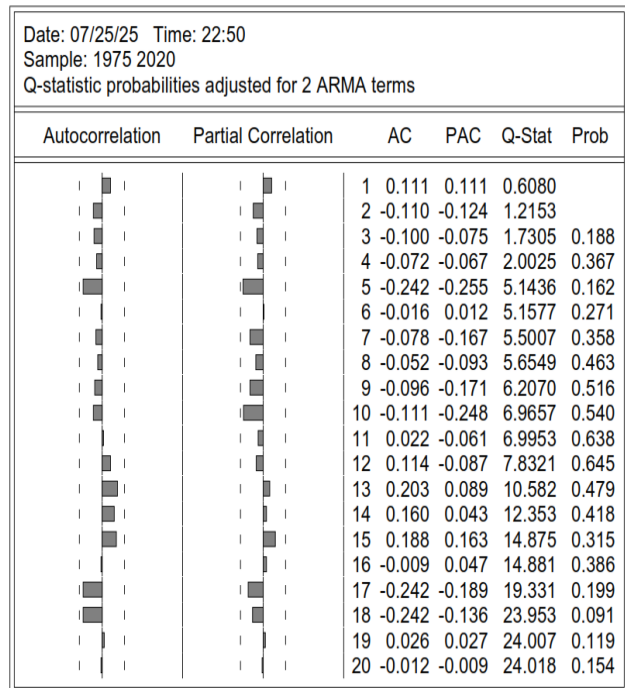
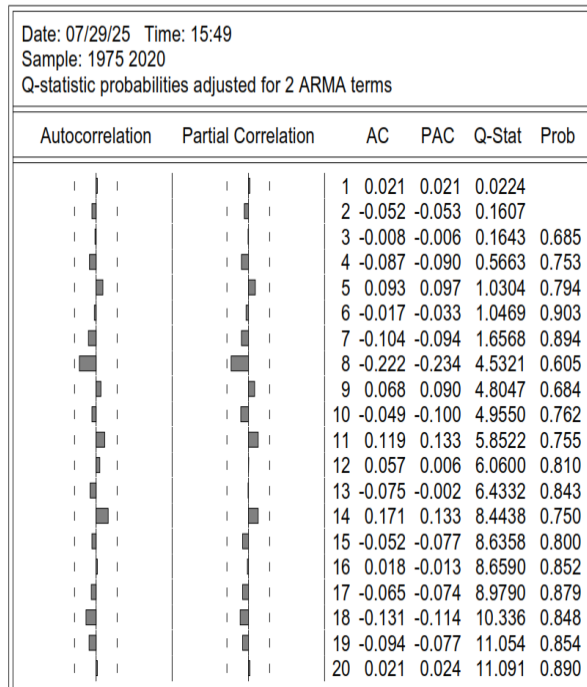


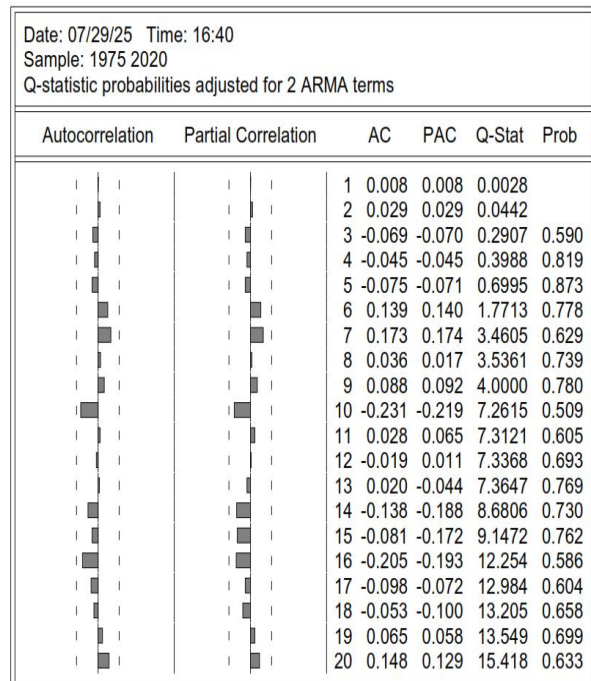
Figure 6.5. : Les corrélogrammes des résidus pour les séries de SPI12

• Des corrélogrammes des résidus pour les séries de RDI12 :

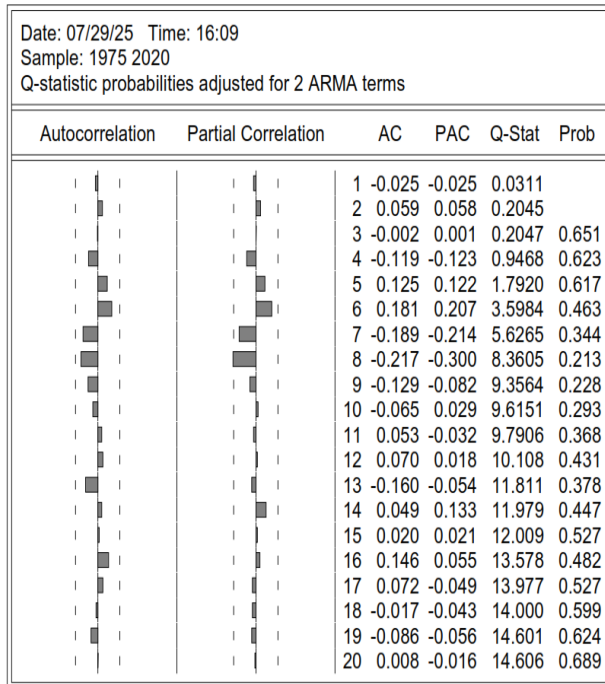
Annaba
Correlogram of Residuals



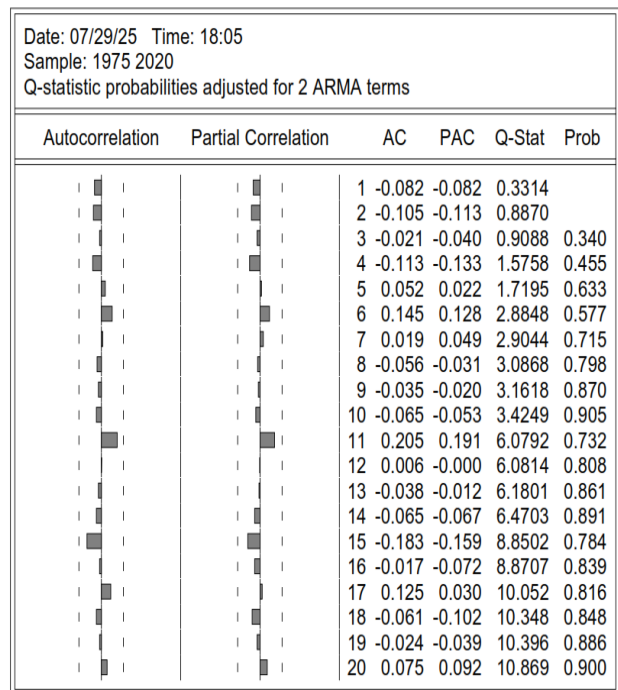
El Kalla
Correlogram of Residuals



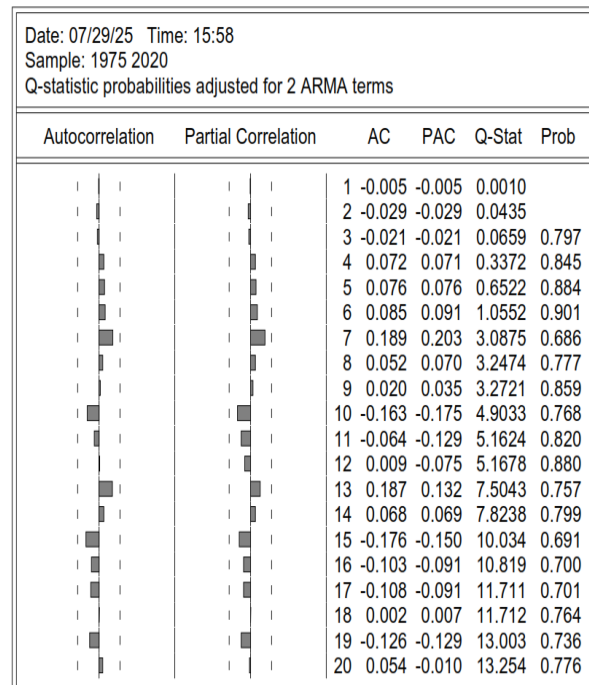
Barrage Chefia
Correlogram of Residuals



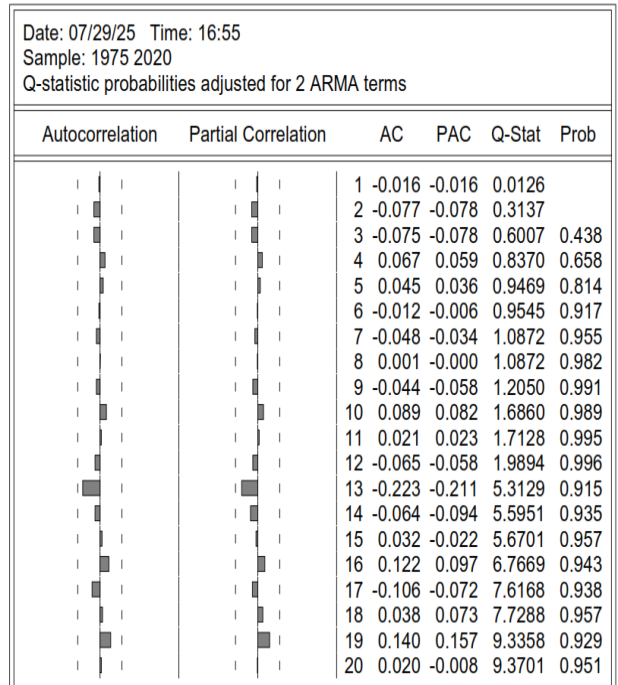
Barrage Zerdaza
Correlogram of Residuals



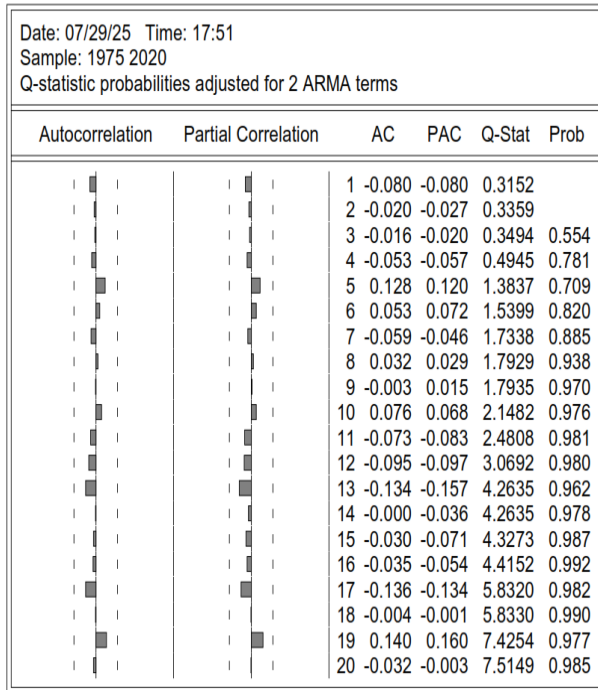
Bekkouch Lakhdar
Correlogram of Residuals



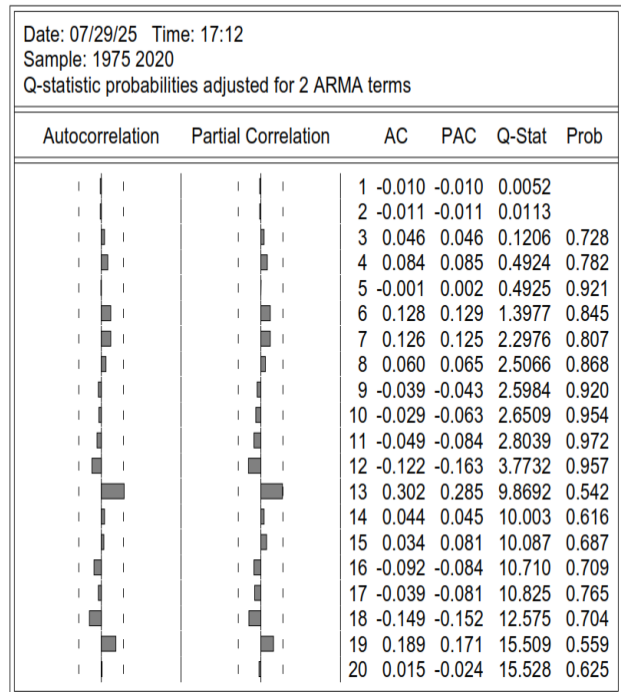
Medjez Amar
Correlogram of Residuals



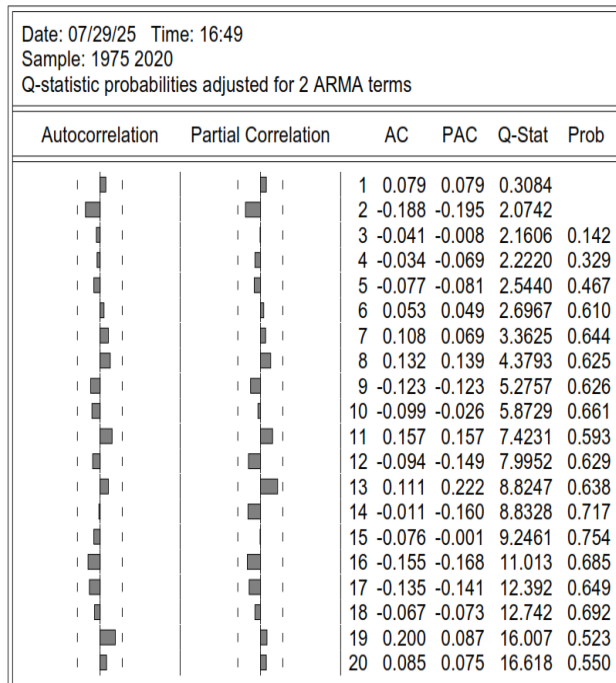
Souk Ahras
Correlogram of Residuals



Oum El Bouaghi
Correlogram of Residuals



Khenchela
Correlogram of Residuals



Tébessa
Correlogram of Residuals

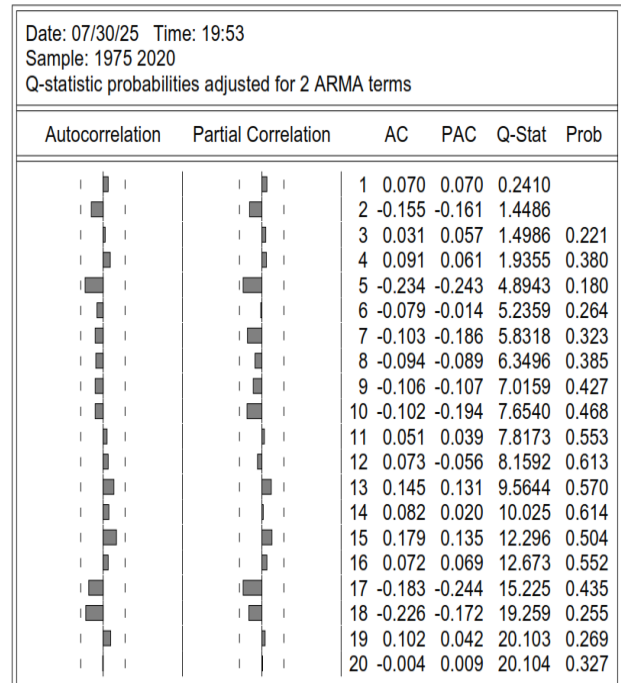
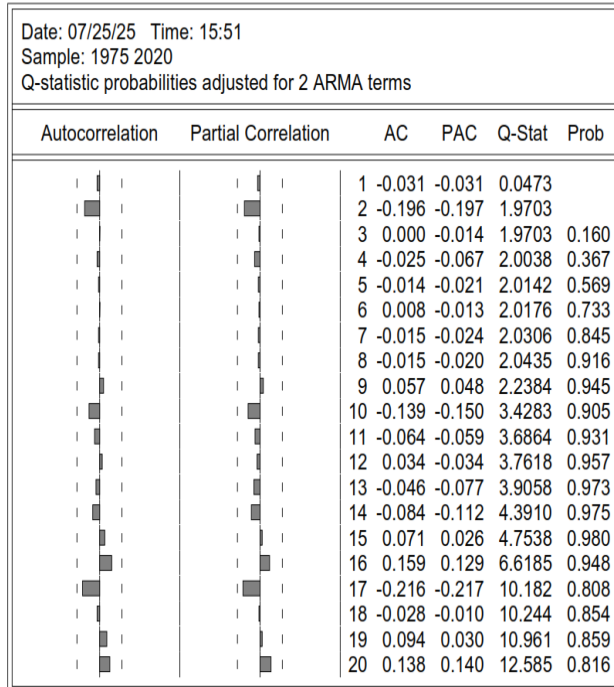


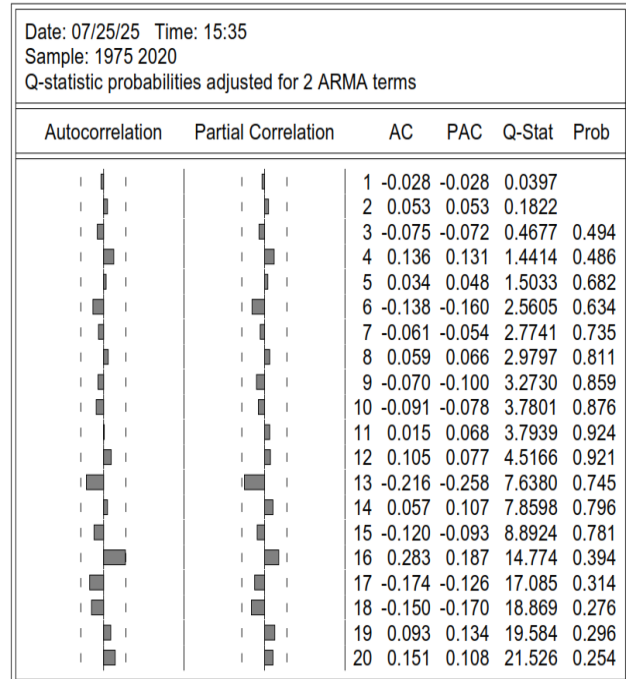
Figure 6.6. : Les correlogrammes des résidus pour les séries de RDII2

• Des corrélogrammes des résidus pour les séries de SDI12 :

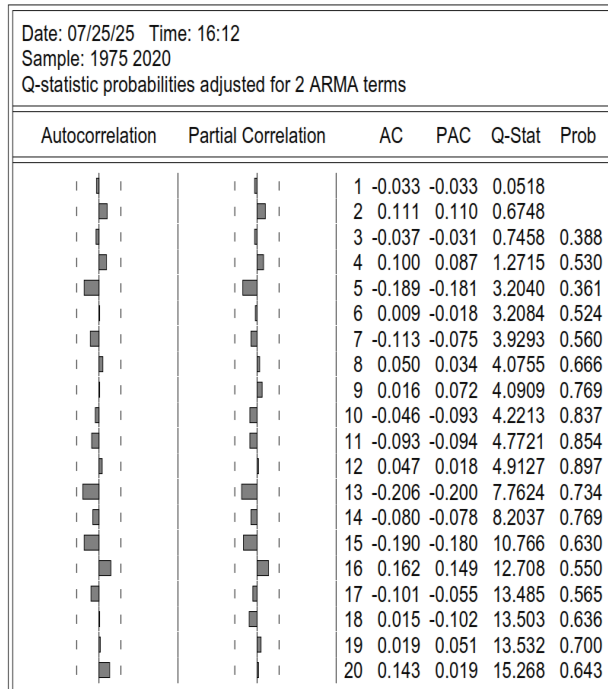
Barrage Chefia
Correlogram of Residuals



Barrage Zerdaza
Correlogram of Residuals



Bekkouch Lakhdar
Correlogram of Residuals



Medjez Amar
Correlogram of Residuals

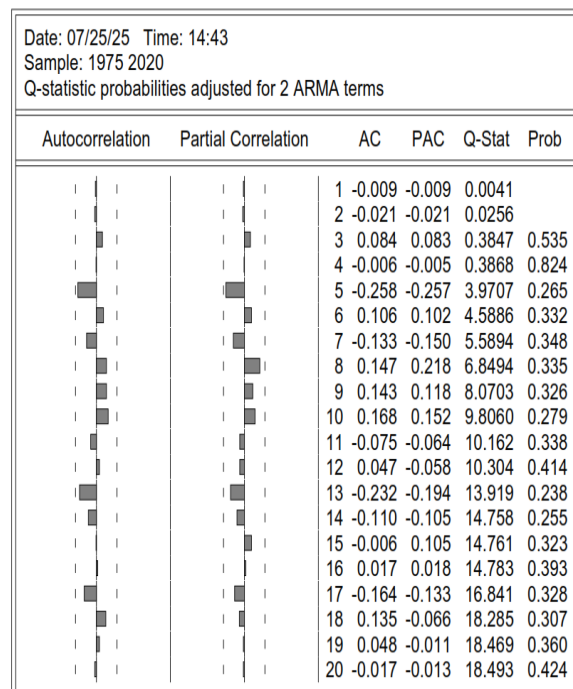


Figure 6.7. : Des corrélogrammes des résidus pour les séries de SDI12

Conclusion

L'application des tests de racine unitaire (ADF) a montré que l'ensemble des séries étudiées (SPI12, RDI12 et SDI12) dans les différentes stations sont stationnaires, condition préalable indispensable à la modélisation par la famille des modèles ARMA. Cette étape a permis de confirmer que les données ne présentent pas de tendance stochastique persistante et qu'elles sont adaptées à une modélisation en temps discret.

Sur cette base, la méthodologie de Box-Jenkins a été mise en œuvre pour identifier, estimer et valider les modèles appropriés. L'analyse des corrélogrammes (ACF et PACF) a guidé le choix des ordres p et q des composantes autorégressives et de moyenne mobile. Les modèles candidats ont ensuite été évalués selon des critères d'information (notamment le critère de Schwarz) et la significativité de leurs paramètres. Enfin, le diagnostic des résidus, confirmé par le test de Ljung-Box, a montré que ceux-ci se comportent comme un bruit blanc, garantissant la bonne spécification des modèles retenus.

Ainsi, la combinaison du test de stationnarité et de la méthode de Box-Jenkins a permis de sélectionner des modèles ARMA robustes et adaptés, capables de reproduire la dynamique temporelle des séries climatiques et hydrologiques étudiées. Ces modèles constituent une base fiable pour les analyses ultérieures et les prévisions dans le cadre de l'évaluation de la variabilité climatique et de ses impacts sur les ressources en eau.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La sécheresse exerce une influence notable sur l'agriculture, les ressources hydriques, la sécurité alimentaire ainsi que sur la stabilité socio-économique dans le nord-est de l'Algérie. Cette étude a analysé la dynamique de la sécheresse dans cette région en mobilisant l'Indice de Précipitations Standardisé (SPI), l'Indice de Reconnaissance de la Sécheresse (RDI) et l'Indice de Sécheresse des Débits (SDI), en adoptant une approche sectorielle visant à réduire l'impact des coordonnées géographiques (X, Y) tout en renforçant le rôle des indices SPI et RDI.

Les tests non paramétriques ont mis en évidence que les distributions des données ne suivent pas une loi normale. Le test de Kruskal-Wallis a indiqué une homogénéité météorologique entre les stations, mais l'hétérogénéité des débits a nécessité une segmentation, identifiant Medjaz Amar, le barrage de Zerdaza et Bekouche Lakhdar comme homogènes (test de Dunn).

Cette étude intègre les indices SPI, RDI et SDI dans un cadre sectoriel établi par regroupement K-means, privilégiant les indices climatiques par rapport à la géographie afin de délimiter trois zones : Nord (méditerranéenne), Centre (semi-aride) et Sud (aride).

Le test de Mann-Kendall modifié corrigé selon la méthode FDR et la pente de Theil-Sen mettent en évidence un gradient d'assèchement allant du Nord vers le Sud : des conditions proches de la normale au Nord (SPI_moy = 0,00023 ; RDI_moy = 0,003) contrastent avec un stress hydrique marqué au Centre et une aridité accentuée au Sud (SPI_moy = -0,0004 ; RDI_moy = -0,0007), avec des tendances sévères particulièrement à Oum El Bouaghi (SPI-12 : $Z = -8,620$, $p < 0,0001$; RDI-12 : $Z = -12,500$, $p < 0,0001$) et Khenchela (SPI-12 : $Z = -6,357$, $p < 0,0001$; RDI-12 : $Z = -8,233$, $p < 0,0001$). Les signaux à court et moyen terme (SPI 1-3, SDI 3) prédominent dans les zones Nord et Centre, révélant un risque accru, tandis que la persistance à long terme amplifie la vulnérabilité dans le Sud. Cette approche multi-indices confirme la pertinence d'un suivi sectoriel spatio-temporel, fournissant des bases solides pour renforcer la résilience régionale.

Les mesures prioritaires recommandées incluent : la collecte des eaux de pluie et le reboisement dans le Sud pour augmenter la recharge de 20 à 30 % ; l'introduction de cultures tolérantes à la sécheresse et la mise en place d'irrigation déficitaire au Centre pour économiser entre 15 et 25 % d'eau ; ainsi que l'extension du barrage de Zerdaza au Nord (augmentation de 10 à 15 %), soutenue par des prévisions fondées sur le SDI. Ces stratégies visent à réduire les risques liés à la sécheresse et à garantir la sécurité hydrique.

Cependant, malgré la robustesse de cette approche multi-indices, certaines limites méthodologiques doivent être soulignées. L'analyse du SDI, fondée uniquement sur quatre stations de barrage (Zerdaza, Bekouche Lakhdar, Chafia et Medjaz Amar), est limitée par la disponibilité restreinte des données hydrométriques. Cette contrainte pourrait conduire à une sous-estimation des tendances hydrologiques, en particulier dans les zones centrales non jaugées, où la sévérité des sécheresses pourrait être plus élevée, et plus encore dans le Sud en l'absence totale de données. Ainsi, les tendances non significatives du SDI dans le Centre pourraient masquer des risques réels, mettant en évidence le besoin d'élargir le réseau de

jaugeage. L'intégration future de données satellitaires de débits apparaît comme une piste prometteuse pour pallier ces insuffisances.

En résumé, cette enquête souligne l'importance d'évaluer les tendances de la sécheresse dans le nord-est de l'Algérie (1975–2021) à travers les approches d'Analyse des Tendances Innovantes et Statistiques en Fréquence (FITA) et d'Analyse des Tendances Innovantes (ITA), mises en œuvre sur dix stations en utilisant les indices SPI12, RDI12 et SDI12, mettant en évidence des conséquences écologiques significatives.

Ces techniques combinent des évaluations de fréquence des intensités de sécheresse au sein des séries temporelles, facilitant un examen détaillé de l'évolution des comportements de la sécheresse au fil du temps et offrant une vue d'ensemble des diverses magnitudes de la sécheresse.

Les principaux résultats sont les suivants :

- L'intégration de la fréquence et de la catégorisation de la sécheresse améliore l'analyse des tendances de la sécheresse au-delà des simples hausses ou baisses, permettant une étude précise des variations de la sécheresse météorologique, agricole et hydrologique.
- L'approche FITA identifie avec succès les tendances stables et fluctuantes de la fréquence de la sécheresse tout au long de la période d'étude.
- La classification des sécheresses a été enrichie avec des catégories extrêmes de sécheresse humide et sèche, élargissant les modèles existants, afin de refléter plus efficacement l'éventail des occurrences de sécheresse et d'humidité.
- À Khenchela, les résultats de FITA ont montré une tendance de diminution du SPI12 à 100 % (pente de l'ITA : -0.846), signalant une sécheresse météorologique en cours, tandis qu'El Kalla affichait une tendance d'augmentation du SPI12 à 100 % (pente de l'ITA : 1.160), suggérant des conditions plus humides.
- À Medjaz Amar, FITA a mis en évidence des motifs mixtes avec une augmentation de 100 % du SDI12 (pente de l'ITA : 0.797) et une diminution de 82,61 % du RDI12 (pente de l'ITA : -1.294), indiquant une amélioration des débits accompagnée d'une aggravation de la sécheresse agricole, causée par des températures élevées (médianes : 20 °C de 2006 à 2021 contre 18 °C de 1975 à 1990).
- L'évaluation de l'homogénéité a révélé une incohérence notable des débits à Zerdaza Dam ($p \leq 0.0103$) et à Medjaz Amar ($p = 0.0500$ pour la période 1975–1990 contre 2006–2021), probablement due aux activités du barrage et à la diminution des précipitations, tandis que les précipitations et la température sont restées largement cohérentes (par exemple, Annaba : $p = 0.7145$), bien que Khenchela ait montré des variations ($p = 0.0005$).

Ces tendances mettent en lumière des effets écologiques critiques, notamment la diminution du renouvellement des nappes phréatiques à Khenchela menaçant des zones humides telles que le Chott Melghir (AMARD 2014), les risques accrus de désertification avec la dégradation de la végétation dans les steppes méridionales (Denidina et al. 2020), et la possible sédimentation au barrage de Zerdaza

affectant les habitats aquatiques. Les résultats plaident en faveur de stratégies de gestion holistiques, telles que la collecte des eaux de pluie (Guebail et al. 2017), et l'utilisation de ces résultats dans les systèmes d'alerte précoce pour renforcer l'adaptabilité environnementale face aux problèmes croissants de sécheresse dans la région méditerranéenne

En définitive, l'analyse économétrique conduite sur les indices SPI12, RDI12 et SDI12 met en évidence la pertinence et la robustesse de l'approche méthodologique adoptée. Les tests de racine unitaire ont confirmé la stationnarité des séries, condition essentielle garantissant la validité de la modélisation ARMA. L'application systématique de la méthodologie de Box-Jenkins, combinant l'identification, l'estimation et la validation des modèles, a permis de sélectionner des structures ARMA statistiquement significatives et correctement spécifiées, comme l'atteste le comportement en bruit blanc des résidus.

Les résultats obtenus démontrent la capacité des modèles retenus à représenter fidèlement la dynamique temporelle des variables climatiques et hydrologiques étudiées. Par conséquent, ces modèles constituent un outil analytique fiable pour la compréhension de la variabilité climatique et hydrologique, ainsi qu'une base solide pour les exercices de prévision et l'évaluation des impacts potentiels sur les ressources en eau. Ils offrent également des perspectives intéressantes pour l'appui à la prise de décision en matière de gestion durable des ressources hydriques dans un contexte de variabilité et de changement climatique.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] V. Clement, K. Rigaud, A. De Sherbinin, B. Jones, S. Adamo, J. Schewe et E. Shabahat, Groundswell Part 2: Acting on Internal Climate Migration, World Bank, Washington, D.C. Accessed July 9, 2025, <http://hdl.handle.net/10986/36248>., 2021.
- [2] D. Wilhite et R. Pulwarty, Drought as hazard: understanding the natural and social context. In: Wilhite, D.A., Pulwarty, R.S. (eds) *Drought and water crises: integrating science, management, and policy*, 2nd edn. CRC Press, Boca Raton, pp 3–20., <https://doi.org/10.1201/b22009>, 2017.
- [3] S. Vicente-Serrano, S. Beguerra et J. Lopez-Moreno, A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *J Clim* 23:1696–1718., <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>, 2010.
- [4] M. Hassanein, A. Essa et Y. Khalil, Assessment of drought impact in Africa using standard precipitation evapotranspiration index. *Nat Sci* 11:75–81., <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>, 2013.
- [5] K. Mostafa-Kara, *Etat des lieux, bilan et perspectives du déi du changement climatique en Algérie*. Editions Dahlab, Algerie, 2013.
- [6] W. Khoualdia, Y. Djebbar et Y. Hammar, Characterization of cli- mate variability: the case of watershed Medjerda (Northeast of Algeria). *Rev Sci Technol Synth* 29:6–23, 2014.
- [7] B. Denidina, A. Medjerab et N. Mega, Characterization of drought events in south Oran and south Algiers steppes in Algeria. *Int J Ecol Dev* 35(1), 2020.
- [8] A. Elouissi, B. Benzater, I. Dabanli, M. Habi, A. Harizia et A. Hamimed, Drought investigation and trend assessment in Macta watershed (Algeria) by SPI and ITA methodology. *Arab J Geosci* 14:1329, 2021.
- [9] N. Haied, A. Foufou, S. Khadri, A. Boussaid, M. Azlaoui et N. Bougherira, Spatial and temporal assessment of drought hazard, vulnerability and risk in three diferent climatic zones in Algeria using two commonly used meteorological indices. *Sustainability* 15:7803., <https://doi.org/10.3390/su15107803>, 2023.
- [10] IPCC, *Impacts of 1.5 °C of global warming on natural and human systems.*, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15_Chapter3_Low_Res.pdf, 2019.
- [11] T. Mohammed et A. Al-Amin, Climate change and water resources in Algeria: vulnerability, impact and adaptation strategy. *Econ Environ Stud* 18(1):411–429, 2018.
- [12] Y. Essa, M. Hirschi, W. Thiery et al., Drought characteristics in Mediterranean under future climate change. *NPJ Clim Atmos Sci* 6:133. <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00458-4>, 2023.
- [13] A. Cancelliere, G. Mauro, B. Bonaccorso et G. Rossi, Drought forecasting using the standardized precipitation index. *Water Resour Manage* 21:801–819., <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9062-y>, 2007.
- [14] S. Morid, V. Smakhtin et K. Bagherzadeh, Drought forecasting using artiicial neural networks and time series of drought indices. *Int J Climatol* 27:2103–2111., <https://doi.org/10.1002/joc.1498>, 2007.

- [15] T. Kim et J. Valdes, Nonlinear model for drought forecasting based on a conjunction of wavelet transforms and neural networks. *J Hydrol Eng ASCE* 8(6):319–328., [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2003\)8:6\(319\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2003)8:6(319)), 2003.
- [16] A. Mishra et V. Singh, Drought modelling—a review. *J Hydrol* 403:157–175., <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.049>, 2011.
- [17] B. Yisehak et A. Zenebe, Modeling multivariate standardized drought index based on the drought information from precipitation and runoff: a case study of Hare watershed of Southern Ethiopian Rift Valley Basin. *Model Earth Syst Environ* 7:1005–1017., 2021.
- [18] H. Alkubaisi, A. Danandeh Mehr, M. Khan et al., Drought modelling and forecasting using shallow and deep machine learning techniques. *Model Earth Syst Environ* 11:41., 2025.
- [19] O. Hakam, A. Baali et A. Belhaj Ali, Modeling drought-related yield losses using new geospatial technologies and machine learning approaches: case of the Gharb plain, North-West Morocco. *Model Earth Syst Environ* 9:647–667., <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01523-2>, 2023.
- [20] M. Pham, K. Nguyen, G. Vu et al., Drought risk index for agricultural land based on a multi-criteria evaluation. *Model Earth Syst Environ* 8:5535–5546., <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01376-9>, 2022.
- [21] C. Ihinegbu et T. Ogunwumi, Multi-criteria modelling of drought: a study of Brandenburg Federal State, Germany. *Model Earth Syst Environ* 8:2035–2049., <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01197-2>, 2022.
- [22] B. Habibi, M. Meddi et M. Abdelkader, The frequency distribution and stochastic analysis of the hydrological drought in Northern Algeria. *Ital J Agrometeorol.*, <https://doi.org/10.36253/ijam-1730>, 2024.
- [23] E. Kesgin, S. Yaldız et Y. Güçlü, Spatiotemporal variability and trends of droughts in the Mediterranean coastal region of Türkiye. *Int J Climatol.*, <https://doi.org/10.1002/joc.8370>, 2024.
- [24] A. Guebail, L. Zeghadnia, Y. Djebbar et S. Bouranene, Rainwater harvesting in Algeria: Utilization and assessment of the physico-chemical quality case study of Souk-Ahras region, *Courrier du Savoir*, 23, 85–94., 2017.
- [25] F. Hallouz, M. Meddi, S. Ali Rahmani et I. Abdi, Innovative versus traditional statistical methods in hydropluviometric: A detailed analysis of trends in the Wadi Mina Basin (Northwest of Algeria), *Theoretical and Applied Climatology*, 155, 8263–8286, 2024.
- [26] A. Merabti, M. Meddi, D. Martins et L. Pereira, Comparing SPI and RDI applied at local scale as influenced by climate, *Water Resources Management*, 32, 1071–1085., 2018.
- [27] F. Giorgi et P. Lionello, Climate change projections for the Mediterranean region, *Global and Planetary Change*, 63, 90–104., 2008.

- [28] T. Derradji, Régionalisation et cartographie des précipitations et des indices de sécheresse dans les bassins versants du Nord-Est algérien (Constantinois-Seybouse-Mellègue)., Université de Ouargla: Thèse doctorat, département des sciences de la terre et de l'univers, 2023.
- [29] M. Hayes, Revisiting the SPI: Clarifying the process, *Drought Network News*, 12, 13–14., 2000.
- [30] T. McKee, N. Doesken et J. Kleist, The relationship of drought frequency and duration to time scales, In: *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, Anaheim, CA, pp. 179–183., 1993.
- [31] T. McKee, N. Doesken et J. Kleist, Drought monitoring with multiple time scales, In: *Proceedings of the Ninth Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, Dallas, TX, pp. 233–236., 1995.
- [32] G. Tsakiris et H. Vangelis, Establishing a drought index incorporating evapotranspiration, *European Water*, 9/10, 3–11., 2005.
- [33] I. Nalbantis et G. Tsakiris, Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resour Manag* 23:881–897., <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9305-1>, 2009.
- [34] S. Quiring, Monitoring drought: an evaluation of meteorological drought indices. *Geogr Compass* 3(1):64–88, 2009.
- [35] D. Djebou, Bridging drought and climate aridity. *J Arid Environ* 144:170–180., <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.05.002>, 2017.
- [36] M. Jahangir, A. Zarfeshani et S. Danehkar, Numerical comparison of streamlow drought index (SDI) and standardized streamlow index (SSI) for evaluation of Isfahan drought status. *Geol Ecol Landsc.*, <https://doi.org/10.1080/24749508.2024.2359775>, 2024.
- [37] M. Hayes, M. Svoboda, N. Wall et M. Widhalm, The Lincoln declaration on drought indices: universal meteorological drought index recommended. *Bull Am Meteorol Soc* 92:485–488, 2011.
- [38] E. Turhan et S. Değerli Şimşek, Supplementing missing data using the drainage-area ratio method and evaluating the streamlow drought index with the corrected data set. *Water* 15(3):425., <https://doi.org/10.3390/w15030425>, 2023.
- [39] W. Palmer, *Meteorological drought*. US Department of Commerce Weather Bureau, Washington, 1965.
- [40] B. Shafer et L. Dezman, Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas (Colorado). In: *Proceedings: eastern snow conference, 39th annual meeting*, pp. 164–175, 1982.
- [41] J. Almedeij, Drought analysis for Kuwait using standardized precipitation index, *The Scientific World Journal*, 2014, 451841., 2014.
- [42] G. Buttafuoco, T. Caloiero et R. Coscarelli, Analyses of drought events in Calabria (Southern Italy) using standardized precipitation index, *Water Resources Management*, 29, 557–573., 2015.

- [43] H. Ouatiki, A. Boudhar, A. Ouhinou, A. Arioua, M. Hssaisoune, H. Bouamri et T. Benabdelouahab, Trend analysis of rainfall and drought over the Oum Er-Rbia River Basin in Morocco during 1970–2010, *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 1., 2019.
- [44] O. Simsek, A. Sankaran et H. Şenol, Multiscale investigations on RDI-SPI teleconnections of Çoruh and Aras Basins, Türkiye using time dependent intrinsic correlation, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 136, 103787., 2024.
- [45] A. Amarchi, L. Zeghadnia, M. Chabi, H. Amarchi et F. Laouacheria, Enhancing drought trend analysis in northeastern Algeria with integrated classification frequencies for deeper insights, *Modeling Earth Systems and Environment*, 11, 328., 2025.
- [46] L. Bendjema, K. Baba Hamed et A. Bouanani, Characterization of the climatic drought indices application to the Mellah catchment, North-East of Algeria. *J Water Land Dev* 43:28–40., <https://doi.org/10.2478/jwld-2019-0060>, 2019.
- [47] H. Bouguerra, O. Derdous, S. Tachi, M. Hatzaki et H. Abida, Spatiotemporal investigation of meteorological drought variability over northern Algeria and its relationship with different atmospheric circulation patterns, *Theoretical and Applied Climatology*, 155, 1507–1518., 2024.
- [48] I. Choutri et A. Hussien, Exploratory analysis of Algeria meteorological drought using SPI and SPEI. *Open Access Libr J* 11:1–25., <https://doi.org/10.4236/oalib.1111897>, 2024.
- [49] T. Derradji, M. Belksier, I. Bouznad, R. Zebza, D. Bengusmia et E. Gastaldi, Spatio-temporal drought monitoring and detection of the areas most vulnerable to drought risk in Mediterranean region, based on remote sensing data (Northeastern Algeria), *Arabian Journal of Geosciences*, 16, 1., 2023.
- [50] M. Lazri, S. Ameer, J. Brucker, M. Lahdir et M. Sehad, Analysis of drought areas in northern Algeria using Markov chains, *Journal of Earth System Science*, 124, 61–70., 2015.
- [51] H. Mann, Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 245–259, 1945.
- [52] M. Kendall, *Rank Correlation Methods*, Fourth Edition, Charles Griffin, London., 1975.
- [53] Z. Şen, Innovative trend analysis methodology. *J Hydrol Eng* 17:1042–1046, 2012.
- [54] P. Kenabatho, Innovative trend analysis of long-term spatialtemporal rainfall patterns over Botswana: implications for water resources management. *J Hydrol Reg Stud* 58:102217., <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102217>, 2025.
- [55] Z. Şen, E. Şişman et I. Dabanli, Wet and dry spell feature charts for practical uses. *Nat Hazards* 104(3):1975–1986., <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04257-5>, 2020.
- [56] A. A. S. Ş. E. Abu Arra, Advancing innovative trend analysis for drought trends: incorporating drought classification frequencies for comprehensive insights., *Nat Hazards*., 2025.
- [57] S. Taibi, M. Meddi, D. Souag et G. Mahé, Evolution et régionalisation des précipitations au nord de l'Algérie (1936–2009). *IAHS Publ* 359:191–197, 2013.

- [58] B. Boudiaf, Z. Şen et H. Boutaghane, Climate change impact on rainfall in north-eastern Algeria using innovative trend analyses (ITA). *Arab J Geosci* 14:511., <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06644-z>, 2021.
- [59] T. Boulmaiz et H. Boutaghane, Innovative trend analysis of daily and extremes of rainfall in North-Eastern Algeria. *Int J Hydrol Sci Technol* 14(2):140–153, 2022.
- [60] S. Berhail et O. Katipoğlu, Exploring hydrological and meteorological drought trends in Northeast Algeria: implications for water resource management. *Theor Appl Climatol* 155:9689– 9712., <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05207-y>, 2024 .
- [61] H. Bougara, K. Baba Hamed, C. Borgemeister, B. Tischbein et N. Kumar, A comparative assessment of meteorological drought in the Tafna basin, Northwestern Algeria. *J Water Land Dev* 51:78–93, 2021.
- [62] H. Bessaklia, A. Ghenim, A. Megnounif et J. Marin Vide, Spatial variability of concentration and aggressiveness of precipitation in North-East of Algeria. *J Water Land Dev* 36:3–15, 2018.
- [63] A. Ziari et A. Medjerab, Evaluating drought severity and trends in Northeast Algeria: a comprehensive analysis using the standardized precipitation drought index (ISSP). In: Guerri O, Arab AH, Imessad K (eds) *Technological and innovative progress in renewable energy systems*, 2025.
- [64] UN-Water, *Water and Climate Change Report 2022.*, <https://www.unwater.org/publications/un-water-report-on-water-and-climate-change-2022/>, 2022.
- [65] FAO, *The State of the World’s Land and Water Resources for Food and Agriculture (SOLAW) – Systems at breaking point.*, 2020.
- [66] UNESCO, *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2021 : La place de l’eau dans le développement durable.* Paris, UNESCO., 2021.
- [67] World-Bank, *Water Scarcity and Stress.*, 2022.
- [68] IPCC, *Sixth Assessment Report (AR6) - Climate Change 2023: Impacts, Adaptation, and Vulnerability.* <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>, 2023.
- [69] UNEP, *Global Environment Outlook – GEO-6: Healthy Planet, Healthy People.*, 2021.
- [70] WWF, *Living Planet Report 2021.* <https://livingplanet.panda.org/en-gb/>, 2021.
- [71] RCS, (Ramsar Convention Secretariat), *The Ramsar Convention on Wetlands – Strategic Plan 2016–2024.* <https://www.ramsar.org/about/the-ramsar-convention>, 2020.
- [72] WHO, *Drinking Water.* World Health Organization factsheet., 2019.
- [73] P. Gleick, *Water, Drought, Climate Change, and Conflict in Syria.* *Weather, Climate, and Society.*, 2014.
- [74] UNICEF, *Water, Sanitation and Hygiene (WASH).*, 2021.
- [75] S. L. Dingman, *Physical Hydrology (3rd ed.).* Waveland Press., 2015.

- [76] A. D. Ward et S. W. Trimble, *Environmental Hydrology* (2nd ed.). CRC Press., 2003.
- [77] J. Bear, *Hydraulics of Groundwater*. McGraw-Hill., 1979.
- [78] S. C. Chapra, *Surface Water-Quality Modeling*. Waveland Press., 2008.
- [79] Z. W. Kundzewicz et R. D. Robarts, *Changes in Flood Risk in the Context of Climate Change*. *Hydrological Sciences Journal.*, 2010.
- [80] V. T. Chow, D. R. Maidment et L. W. Mays, *Applied Hydrology*. McGraw-Hill., 1988.
- [81] C. W. Fetter, *Applied Hydrogeology*. Prentice Hall., 2001.
- [82] V. Novotny et P. Brown, *Cities of the Future: Towards Integrated Sustainable Water and Landscape Management*. IWA Publishing., 2007.
- [83] M. Sivapalan, *Prediction in Ungauged Basins: A Grand Challenge for Theoretical Hydrology*. *Hydrological Processes.*, 2003.
- [84] EEA, (European Environment Agency) *Hydrological cycle. (définition du cycle fermé)*, 2025.
- [85] A. Jayawardena, *Fluid Mechanics, Hydraulics, Hydrology and Water Resources for Civil Engineers*, CRC Press, 2021.
- [86] V. Ferronsky et V. Polyakov, *Isotopes of the Earth's Hydrosphere*. Springer., 2012.
- [87] D. R. Maidment, *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill., 1993.
- [88] N. Chahinian et al., *Concepts and Models of Hydrological Processes*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9(3), 317-331., 2005.
- [89] R. Allen, L. Pereira, D. Raes et M. Smith, *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*. FAO, Rome., 1998.
- [90] W. Brutsaert, *Hydrology: An Introduction*. Cambridge University Press., 2005.
- [91] B. R. Scanlon, R. C. Reedy, D. A. Stonestrom, D. E. Prudic et K. F. Dennehy, *Impact of land use and land cover change on groundwater recharge and quality in the southwestern US*. *Water Resources Research*, 38(9), 1176., 2002.
- [92] H. Bouwer, *Introduction to groundwater*. Oxford University Press., 2002.
- [93] F. A. Daudet et al., *Titre de l'article ou du livre. Nom de la revue ou de l'éditeur, volume(issue), pages.*, 1978.
- [94] N. Katerji et al., *Titre de l'article ou du livre. Nom de la revue ou de l'éditeur, volume(issue), pages.*, 1984.
- [95] D. Hillel, *Environmental Soil Physics*. Academic Press., 1998.
- [96] R. Freeze et J. Cherry, *Groundwater*. Prentice Hall., 1979.

- [97] I. Mekki, Étude de la gestion des ressources en eau dans un bassin versant en Tunisie., 2003.
- [98] D. A. Wilhite et M. H. Glantz, Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, 10(3), 111-120., 1985.
- [99] A. F. Van Loon, Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(4), 359-392., 2015.
- [100] A. Zargar, R. Sadiq, B. Naser et F. I. Khan, A review of drought indices. *Environmental Reviews*, 19, 333-349., 2011.
- [101] K. E. Trenberth, A. Dai, G. van der Schrier, P. D. Jones, J. Barichivich, K. R. Briffa et J. Sheffield, Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 4, 17-22., 2014.
- [102] A. Dai, Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 3(1), 52-58., 2013.
- [103] WMO, Drought in Numbers. World Meteorological Organization., 2021.
- [104] S. Bachmair, A. F. van Loon et A. J. Teuling, Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics. *Journal of Hydrology*, 561, 1004-1015., 2018.
- [105] GIEC, Rapport d'évaluation sur le changement climatique., 2023.
- [106] J. Overpeck et B. Udall, L'impact du changement climatique sur les ressources hydriques., 2020.
- [107] B. Bonsal et coll., Études sur la sécheresse au Canada : impacts et tendances régionales., 2019.
- [108] J. P. Walker et A. F. Van Loon, Evaporation et consommation d'eau sous le changement climatique., 2023.
- [109] ONU, (Organisation des Nations Unies Changements). climatiques et impacts sur les précipitations..
- [110] X. Zhang et coll., Changements dans les régimes de précipitations et effets sur les glaciers., 2019.
- [111] B. I. Cook et coll., Projections des sécheresses sous différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. *Journal of Climate*., 2020.
- [112] F. Chiang et coll., Analyse des effets du changement climatique sur la fréquence des sécheresses mondiales., 2023.
- [113] X. Yuan et coll., Sécheresses éclair et défis de la prévision climatique., 2023.
- [114] UNCCD, Global Land Outlook. United Nations Convention to Combat Desertification., 2017.
- [115] H. Abdeddaim, Contribution a l'étude de l'influence de la structure du reseau hydrographique sur le risque hydrologique « cas des bassins de l'est de l'Algérie ».Thèse de doctorat univ Biskra.260p., 2018.

- [116] A. Bouaziz et al., La complexité géologique du Nord-Est algérien, marquée par des unités allochtones et autochtones imbriquées, explique en partie la grande hétérogénéité des sols et leur sensibilité à l'érosion., 2002.
- [117] H. Meddi et al., La région du Nord-Est de l'Algérie connaît une forte variabilité climatique interannuelle, avec des tendances à la baisse des précipitations depuis les années 1970, accentuant les risques de sécheresse., 2003.
- [118] D. C. Montgomery et G. C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*. Wiley., 2014.
- [119] D. S. Wilks, *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press., 2011.
- [120] M. Tsakiris, M. Hesse, C. Boy, P. Haggard et G. Fink, Neural signatures of body ownership: a sensory network for bodily self-consciousness. *Cereb Cortex*. 2007 Oct;17(10):2235-44., 2007.
- [121] D. R. Helsel et R. M. Hirsch, *Statistical Methods in Water Resources*. U.S. Geological Survey., 2002.
- [122] S. Yue, P. Pilon, B. Phinney et G. Cavadias, The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes*, 16(9), 1807–1829., 2002.
- [123] N. Smirnov, Table for estimating the goodness of fit of empirical distributions. *Annals of Mathematical Statistics*, 19(2), 279–281., 1948.
- [124] S. S. Shapiro et M. B. Wilk, An analysis of variance test for normality. *Biometrika*, 52(3–4), 591–611., 1965.
- [125] W. Kruskal et W. Wallis, Use of ranks in one-criterion variance analysis. *J Am Stat Assoc* 47:583–621., <https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441>, 1952.
- [126] O. Dunn, Multiple comparisons using rank sums. *Technometrics* 6:241–252., <https://doi.org/10.1080/00401706.1964.10490181>, 1964.
- [127] H. Levene, Robust tests for equality of variances. In: Olkin I, Hotelling H et al (eds) *Contributions to probability and statistics: essays in honor of Harold Hotelling*. Stanford University Press, Stanford, pp 278–292, 1960.
- [128] H. B. Mann et D. R. Whitney, On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *Annals of Mathematical Statistics*, 18(1), 50–60., 1947.
- [129] D. Nestel, J. Hui, K. Kunkler, M. Scerbo et A. Calhoun, Developing expertise in healthcare simulation research, In: *Healthcare Simulation Research: A Practical Guide*, Springer, Cham, pp. 3–7., 2019.
- [130] A. H. M. Keya Rani Das et I. Rahmatullah, A Brief Review of Tests for Normality, *American Journal of Theoretical and Applied Statistics* 5(1):5, DOI:10.11648/j.ajtas.20160501.12, 2016.
- [131] W. Shapiro, «Le test de Shapiro-Wilk,» 11 May 2013. [En ligne]. Available: <https://lemakistatheux.wordpress.com/2013/05/11/le-test-de-shapiro-wilk/>.

- [132] A. Hart, Mann-Whitney test is not just a test of medians: differences in spread can be important. *BMJ* 323(7309):391–393, 2001.
- [133] D. Sheskin, *Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures*, 4th edn. Chapman & Hall, London, 2007.
- [134] Web, «Apprenez facilement les statistiques,» 31 May 2023. [En ligne]. Available: <https://fr.statisticseasily.com/Mann-Whitney-tu-testes/>.
- [135] W. Kruskal, «Test de Kruskal-Wallis,» 28 May 2013. [En ligne]. Available: <https://lemakistatheux.wordpress.com/2013/05/28/test-de-kruskal-wallis/>.
- [136] C. Agbangba, E. Aide, H. Honfo et R. Kakai, On the use of post-hoc tests in environmental and biological sciences: A critical review, *Heliyon*, 10, e25131., 2024.
- [137] W. Conover et R. Iman, *Multiple-comparisons procedures*, Rep. No. LA-7677-MS, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM., 1979.
- [138] P. DULCE G, A. ANABELA et M. M. FATIMA, Overview of Friedman’s Test and Post-hoc Analysis, *Communications in Statistics—Simulation and Computation*, DOI: 10.1080/03610918.2014.931971, 2015.
- [139] S. James A, G. C. Alastair, A. L. Graham, C.-D. H. Post, J. B. Philip et D. P. Ross, The marine geological imprint of Antarctic ice shelves, *Nature Communications*, 2019.
- [140] A. Dinno, Nonparametric pairwise multiple comparisons in independent groups using Dunn’s test, *The Stata Journal*, 15, 292–300., 2015.
- [141] O. Dunn, Multiple comparisons among means, *Journal of the American Statistical Association*, 56, 52–64., 1961.
- [142] S. Glantz, *Primer of Biostatistics*, Seventh Edition, McGraw Hill, New York., 2012.
- [143] S. Siegel et N. J. J. Castellan, *Nonparametric statistics for the behavioral sciences* (2nd ed.). Mcgraw-Hill Book Company, 1988.
- [144] A. Malik, Y. Tikhmarine, S. Sammen, S. Abba et S. Shahid, Prediction of meteorological drought by using hybrid support vector regression optimized with HHO versus PSO algorithms. *Environ Sci Pollut Res* 28:39139–39158., <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13445-0>, 2021.
- [145] M. Karbasi, M. Jamei, A. Malik, O. Kisi et Z. Yaseen, Multi-steps drought forecasting in arid and humid climate environments: Development of integrative machine learning model, *Agricultural Water Management*, 281, 108210., 2023.
- [146] D. Edwards et T. McKee, Characteristics of 20th Century Drought in the United States at Multiple Times Scales. *Atmospheric Science Paper*, 634, 1-30., 1997.

- [147] D. Tigkas, H. Vangelis et G. Tsakiris, DrinC: a software for drought analysis based on drought indices. *Earth Sci Inform* 8:697–709., <https://doi.org/10.1007/s12145-014-0178-y>, 2015.
- [148] B. Lloyd-Hughes et M. Saunders, A Drought Climatology for Europe. *International Journal of Climatology*, 22, 1571-1592. <https://doi.org/10.1002/joc.846>, 2002.
- [149] A. Mishra et V. Desai, Drought Forecasting Using Stochastic Models. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 19, 326-339., 2005.
- [150] E. Yacoub et G. Tayfur, Trend analysis of temperature and precipitation in Trarza region of Mauritania. *Journal of Water and Climate Change*; 10 (3): 484–493. doi: <https://doi.org/10.2166/wcc.2018.007>, 2019.
- [151] M. Abramowitz et I. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. Dover Publications Inc., New York, 1046 p., 1965.
- [152] A. M. Hayes, J.-P. Laurenceau, G. Feldman, J. L. Strauss et L. Cardaciottov, Change is Not Always Linear: The Study of Nonlinear and Discontinuous Patterns of Change in Psychotherapy, *Clinical Psychology Review*, 2007.
- [153] A. Gulmez, D. Mersin, B. Vaheddoost et M. Safari, Evaluation of streamflow drought index in Aegean region, Turkey, In: *International Conference on Natural Resources and Sustainable Environmental Management*, Springer, Cham, pp. 208–213., 2021.
- [154] G. Buttafuoco, T. Caloiero, I. Guagliardi et N. Ricca, Drought assessment using the reconnaissance drought index (RDI) in a southern Italy region. In: *Proceedings of the 6th IMEKO TC19 symposium on environmental instrumentation and measurements*, Reggio Calabria, Italy, pp 24–25, 2016.
- [155] D. Tigkas, Drought characterisation and monitoring in regions of Greece, *European Water*, 2008.
- [156] G. Tsakiris, Uni-dimensional Analysis of Droughts for Management Decisions, *European Water*, 2008.
- [157] T. Salmi, A. Määttä, P. Anttila, T. Ruoho-Airola et T. Amnell, Detecting Trends of Annual Values of Atmospheric Pollutants by the Mann-Kendall Test and Sen's Solpe Estimates the Excel Template Application MAKESENS, 2002.
- [158] K. H. Hamed et R. A. Rao, A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data, *Journal of Hydrology*,, 1998.
- [159] H. Theil, A Rank-Invariant Method of Linear and Polynomial Regression Analysis, Part I; Confidence Regions for the Parameters of Polynomial Regression Equations. *Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Sciences*, 53, 386-392., 1950.
- [160] P. K. Sen, Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63, 1379–1389., <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>, 1968.
- [161] I. Ahmad, S. M. Ahmed Basra et A. Wahid, Exogenous Application of Ascorbic acid, Salicylic acid and Hydrogen peroxide Improves the Productivity of Hybrid Maize at Low Temperature Stress, 2014.

- [162] M. Bayazit, I. Işık, A. Issi et E. Genç, Archaeometric investigation of the Late Chalcolithic-Early Bronze Age I and the 1st–2nd millennium BCE potteries from Kuriki-Turkey, *Applied Clay Science*, 2019.
- [163] P. Bhuyan, P. Deka, A. Prakash, S. Balachandran et R. R. Hoque, Chemical characterization and source apportionment of aerosol over mid Brahmaputra Valley, India, 2018.
- [164] A. Cardoso, R. Cruz, P. Queirós, L. Santiago, C. Ribeiro et al., Assessment of Health-Related Quality of Life Using the EQ-5D-3L in Individuals with Type 2 Diabetes Mellitus. <https://doi.org/10.15406/jdmdc.2016.03.00064>, 2016.
- [165] K. Djaman, K. Koudahe et K. K. Ganyo, Trend Analysis in Annual and Monthly Pan , *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2017.
- [166] N. Tuan et T. Canh, Analysis of trends in drought with the non-parametric approach in Vietnam: A case study in Ninh Thuan Province, *American Journal of Climate Change*, 10, 51–84., 2021.
- [167] D. Helsel et R. Hirsch, *Statistical Methods in Water Resources*, USGS, Reston, VA. Accessed July 9, 2025, <https://doi.org/10.3133/tm4A3.>, 1992.
- [168] S. Azad, A. Estim et A. Rathi, Effects of Cage Culture on Dissolved Inorganic Nutrient and Surface Sediment Composition in Sulaman Bay Lagoon, Sabah, Malaysia. *Journal of Environmental Science, Computer Science and Engineering Technology*, 3, 818-827., 2014.
- [169] Y. Benjamini et Y. Hochberg, Controlling the false discovery rate: A practical and powerful approach to multiple testing. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 57(1), 289–302, 1995 .
- [170] M. E. Glickman, S. R. Rao et M. R. Schultz, False discovery rate control is a recommended alternative to Bonferroni-type adjustments in health studies, 2014.
- [171] S. Yue et C. Wang, The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in autocorrelated data, *Water Resources Management*, 18, 201–218., 2004.
- [172] İ. Dabanlı, Z. Şen, M. Yeleğen, E. Şişman, B. Selek et Y. Güçlü, Trend assessment by the innovative-Şen method. *Water Resour Manage* 30:5193–5203, 2016.
- [173] A. Abu Arra, S. Alashan et E. Şişman, Trends of meteorological and hydrological droughts and associated parameters using innovative approaches., *J Hydrol* 640:131661., 2024.
- [174] R. Rezaei et A. Shabri, Integrating wavelet transform and support vector machine for improved drought forecasting based on standardized precipitation index. *J Hydroinform* 27(2):320–337, 2025.
- [175] K. Hipel et I. McLeod A, “Time Series Modelling of Water Resources and Environmental Systems”, Amsterdam, Elsevier, 1994.
- [176] C. Chatfield, « Time Series Forecasting », Chapman&Hall., London, 2001.
- [177] G. Box et G. Jenkins, *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Holden-D., San Francisco, 1970.

- [178] M. Nerlove, D. Grether et J. Carvalho, "Analysis of Economic Time Series "Academic Press., 1995.
- [179] R. I. Levin et D. Rubin, Statistics for Management, Prentice Hall, Upper Saddle River (NJ) (7e éd.), 1998.
- [180] R. Bourbonnais, "PREVISION DES VENTES", Polycopié du produit multimédia ,Université de Paris-Dauphine, 2018.
- [181] J. Beguin, C. Gourieroux et A. Monfort, Identification of a mixed autoregressive-moving average process : the corner method. In time series, 1980.
- [182] S. Bisgaard et M. Kulachi, Times series analysis and forecasting by example. John Wiley & sons, 2011.
- [183] G. Ljung et G. Box, « On a Measure of the Lack of Fit in Time Series Models », Biometrika, vol. 65, pp. 297-303., 2011.
- [184] L. Gasmi, "Times séries forecasting using neural networks and genetic algorithms, Faculté de Sciences exactes Sidi Bel Abbaes, 2019.
- [185] K. Kadiyala, Testing for the Independence of Regression Disturbances, Econometrica 38, 97-117, 1970.
- [186] F. Ben Abbas, Méthodes heuristiques pour la prédiction des séries temporelles, Faculté des sciences de l'ingénieur, département d'informatiques, Université Badji Mokhtar Annaba, Alger, 2012.
- [187] ICRC, Water and Armed Conflict. International Committee of the Red Cross., 2015.
- [188] OECD, Water Resources Allocation: Sharing Risks and Opportunities., 2017.
- [189] WWAP, The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind., 2019.
- [190] M. Zeitoun et J. Warner, Hydro-hegemony – A Framework for Analysis of Transboundary Water Conflicts. Water Policy., 2006.

**PRODUCTIONS
SCIENTIFIQUES**

❖ Publication :

Amarchi, A., Zeghadnia, L., Chabi, M., Amarchi, H. and Laouacheria, F. (2025), Enhancing drought trend analysis in northeastern Algeria with integrated classification frequencies for deeper insights, *Modeling Earth Systems and Environment*, 11, 328. <https://doi.org/10.1007/s40808-024-02040-9>

Amarchi, A., Zeghadnia, L., Chabi, M. and Amarchi, H. (2025), Multi-Index Assessment of Hydrometeorological Droughts in Northeast Algeria: Sectoral K-means Analysis of Trends and Water Resource Impacts. (Under review).

❖ Proceedings:

Amarchi, A., Amarchi, H., Chabi, M., Zeghadnia, L. and Laouacheria, F. (2023), Évaluation de la sécheresse à l'aide d'indices météorologiques cas de l'extrême Est de l'Algérie. 4th International symposium on resources and environment impact assessment in north Africa (WREIANA 2023), Sousse, Tunisia 26-28 April.

Amarchi, A., Zeghadnia, L., Chabi, M. (2024) Assessment of Drought Using Meteorological Indices in a Semi-Arid Region: The Case of the Extreme East of Algeria, *Proceedings of International Conference on Studies in Education and Social Sciences*, 214-224, November 7-10, 2024, Istanbul, Türkiye.

❖ Communications:**–Internationals:**

Amarchi, A., Amarchi, H., Chabi, M. and Boukhari G (2021), Study of the influence of the implantation of a large dam on local climate change: case of the Ain Dalia dam North-East Algeria, Oral communication, The Third International Symposium (WREIANA 2021) Water Resources and Environmental Impact Assessment in North Africa, October 1-3, 2021, Tunisia.

Amarchi, A., Amarchi, H. and Chabi, M. (2021), Impact d'un barrage sur variabilité climatique locale cas d'Ain Dalia Nord-Est Algeria, Oral communication, The first International virtual conference on climate change, georesources and sustainable Development «1st I2CGSD 2022», Khenchela May 23th, 2022.

Amarchi, A., Amarchi, H., Chabi, M., Zeghadnia, L. and Laouacheria, F. (2023), Évaluation de la sécheresse à l'aide d'indices météorologiques cas de l'extrême Est de l'Algérie. 4th International symposium on resources and environment impact assessment in north Africa (WREIANA 2023), Sousse, Tunisia 26-28 April.

Amarchi, A., Zeghadnia, L., Chabi, M. (2024) Assessment of Drought Using Meteorological Indices in a Semi-Arid Region: The Case of the Extreme East of Algeria, *International Conference on Studies in Education and Social Sciences*, November 7-10, 2024, Istanbul, Türkiye.

–Nationals:

Amarchi, A., Amarchi, H., Chabi, M. and Boukhari G (2021), Impact of large hydraulic structures on climate change in a case region of the Ain Dalia Souk-Ahras dam, the fourth Algerian Geoscience and Remote Sensing Spring School (4th AGR3S 2021) Constantine, Algeria: 10-14 July 2021

Amarchi, A., Zeghadnia, L, Amarchi, H., Chabi, M., Laouacheria, F. and Boukhari G (2023) Evaluation des indices de secheresse bases sur la variabilite climatique pour la region semi-aride cas de bassin versant gareat el tarf (n.e de l'algerie) ,1er Séminaire National : Eau, Changement Climatique, Environnement et Agriculture (SNECCEA), Souk Ahras, 20 - 21 septembre 2023