



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

و البحث العلمي وزارة التعليم العالي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université MUSTAPHA Stambouli

Mascara



جامعة مصطفى اسطمبولي

معسكر

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Laboratoire des Sciences et Techniques de l'eau (L.S.T.E)

THESE de DOCTORAT en SCIENCES

Spécialité : Sciences de la Terre et de l'Univers

Intitulée

Impact des fluctuations pluviométriques sur les écoulements superficiels dans un contexte de variabilité climatique :

Cas des bassins versants de l'Ouest de l'Algérie.

Présentée par : M^{elle} OUIS Saliha.

Soutenue le : 27/01/2025 à la bibliothèque SNV

Devant le jury :

Président	Mr. BENSLIMANE Mohamed	Pr	Université de Mascara
Examineur	Mr. BEKKOUSSA Belkacem	Pr	Université de Mascara
Examineur	Mr. YLES Fouad	MCA	Université de Saïda
Examineur	Mr. BAAHMED Djelloul	MCA	Université de Sidi Bel-Abbès
Directeur de thèse	Mr. AZZAZ Habib	Pr	Université de Mascara

Année Universitaire : 2024 – 2025.

Remerciements

Je voudrais, dans un premier temps, remercier mon directeur de thèse M. Azzaz Habib, professeur de l'Hydraulique à l'université de Mascara.

Je suis particulièrement honoré par l'attention que m'ont accordée les membres du jury (M. Benslimane Mohamed, M. Yles Fouad, M. Bekkoussa Belkacem et M. Baahmed Djelloul) en acceptant d'évaluer mon travail et en m'apportant leurs observations enrichissantes.

Mes parents, pour leur soutien constant et leurs encouragements.

Je profite de cette occasion pour exprimer toute ma gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont aidée à achever ce travail.

Résumé

Cette étude, réalisée sur le bassin versant de la Tafna situé dans la région nord-ouest de l'Algérie, vise à comprendre l'évolution récente des précipitations annuelles et saisonnières et son impact sur les écoulements superficiels afin de mieux gérer les ressources en eau. Elle se base sur l'exploitation des données pluviométriques et hydrométriques. Cela se fait en appliquant la méthode des indices centrés réduits, des tests statistiques de tendance et de rupture.

Les tests de rupture montrent qu'il existe une rupture très significative dans les séries pluviométriques annuelles, qui s'est produite de façon remarquable en 1980. Cette rupture se traduit par une diminution de la pluviométrie annuelle estimée à 24,6 % en moyenne. En revanche, les résultats du test de Mann-Kendall et de Spearman enregistrent une tendance significative pour la majorité des stations à un seuil de signification de 0,05. Les ruptures affectent principalement les saisons de printemps et d'hiver, avec des événements marquants en 1975 et 1980, soulignant l'importance de ces saisons dans la dynamique des précipitations dans le bassin versant.

L'impact de ces longues périodes de sécheresse a été sévère sur les ressources de surface, avec une réduction des apports annuels atteignant jusqu'à 49,3 % au barrage de Bani Bahdel et une diminution du taux de remplissage passant de 80,8 % (50,9 Hm³) à 29,8 % (18,8 Hm³).

Par une réduction de 84,7 %, le barrage de Sidi-Abdelli est le plus touché par les longues périodes de sécheresse. Les apports annuels moyens sont diminués de 72 Hm³ à 11,0 Hm³, avec un taux de remplissage passant de 114,3 % à 17,4 %. Ces résultats montrent l'ampleur de l'impact de longues périodes de sécheresse sur les ressources de surface.

Mots clés : Tafna, variabilité pluviométrique, rupture, changement climatique, Mann-Kendall.

Abstract

This study, conducted in the Tafna watershed located in the northwest region of Algeria, aims to understand the recent evolution of annual and seasonal precipitation and its impact on surface runoff in order to better manage water resources. It is based on the exploitation of rainfall and hydrometric data. This is done by applying the method of centered reduced indices, statistical tests for trend and break.

The break tests show that there is a very significant break in the annual rainfall series, which occurred remarkably in 1980. This disruption translates to an average annual rainfall decrease estimated at 24,6 %. On the other hand, the results of the Mann-Kendall and Spearman tests show a significant trend for the majority of the stations at a significance level of 0,05. Breaks mainly affect the spring and winter seasons, with significant events in 1975 and 1980, highlighting the importance of these seasons in the dynamics of precipitation in the watershed.

The impact of these prolonged drought periods has been severe on surface resources, with annual inflows reduced by up to 49,3 % at the Bani Bahdel dam and a decrease in the filling rate from 80,8 % (50,9 Hm³) to 29,8 %. (18,8 Hm³).

With a reduction of 84,7 %, the Sidi-Abdelli dam is the most affected by long periods of drought. The average annual contributions have decreased from 72 Hm³ to 11,0 Hm³, with the filling rate dropping from 114,3 % to 17,4 %. These results show the extent of the impact of prolonged periods of drought on surface resources.

Keywords: Tafna, rainfall variability, rupture, climate change, Mann-Kendall.

ملخص :

تسعى هذه الدراسة، التي أجريت على حوض تافنة الواقع في المنطقة الشمالية الغربية من الجزائر، إلى فهم التطورات الأخيرة في كميات الأمطار السنوية والموسمية وتأثيرها على الجريان السطحي، وذلك من أجل إدارة أفضل للموارد المائية. هي تعتمد على استغلال بيانات الأمطار وبيانات قياس المياه. يتم ذلك من خلال تطبيق طريقة المؤشرات المركزية المنقوصة، واختبارات إحصائية للاتجاه والانكسار.

تظهر اختبارات الانقطاع أن هناك انقطاعاً ذا دلالة كبيرة في السلاسل الزمنية لهطول الأمطار السنوي، والذي حدث بشكل ملحوظ في عام 1980. تترجم هذه الفجوة إلى انخفاض في كمية الأمطار السنوية المقدرة بنسبة 24,6 % في المتوسط. من ناحية أخرى، تسجل نتائج اختبار مان-كيندال وسبيرمان اتجاهاً ملحوظاً لمعظم المحطات عند مستوى دلالة قدره 0.05. تؤثر الانقطاعات بشكل رئيسي على فصول الربيع والشتاء، مع أحداث بارزة في عامي 1975 و1980، مما يبرز أهمية هذه الفصول في ديناميكية الهطولات في حوض التصريف.

كان تأثير هذه الفترات الطويلة من الجفاف شديداً على الموارد السطحية، حيث بلغت نسبة انخفاض الإمدادات السنوية حتى 49,3 % في سد بني بحدل، وانخفض معدل التعبئة من 80,8 % (50,9 مليون متر مكعب) إلى 29,8 % (18,8 مليون متر مكعب).

من خلال انخفاض بنسبة 84,7 %، يعتبر سد سيدي عبدلي الأكثر تأثراً بفترات الجفاف الطويلة. حيث تقلصت المساهمات السنوية المتوسطة من 72 هكتومتر مكعب إلى 11,0 هكتومتر مكعب، مع انخفاض معدل الامتلاء من 114,3 % إلى 17,4 %. تظهر هذه النتائج مدى تأثير فترات الجفاف الطويلة على الموارد السطحية.

الكلمات المفتاحية: تافنا، التغيير في هطول الأمطار، الانقطاع، تغيير المناخ، مان-كيندال.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GENERALE	1
<u>CHAPITRE I :</u>	
CLIMAT, CHANGEMENTS CLIMATIQUES, DETECTION ET ATTRIBUTION	3
I.1 Introduction	4
1.2 Notion de climat	4
I.3 Le système climatique	4
I.4 Notion de forçage	5
I.4.1 Les différentes causes de forçages	5
I.4.1.1 La constante solaire (S)	5
I.4.1.2 L'effet de serre	8
I.4.1.2.1 Causes naturelles	8
I.4.1.2.2 Causes liées à l'intervention humaine	10
➤ (Dioxyde de carbone, méthane...)	10
➤ Ozone troposphérique	12
➤ Durée de vie longue des CFC	14
I.4.1.3 Albédo	14
I.4.1.3.1 Causes liées à l'émission du dioxyde de soufre	15
➤ Le SO_2 résultant de la combustion de carburants fossiles	15
➤ Le SO_2 d'origine volcanique	15
I.5 Les observations du climat et de ses changements (Les analyses de température de surface	16
I.5.1 Changements de température globale et hémisphérique (1880-1981)	17
➤ Tendances globale	17
➤ Changements dans l'hémisphère Nord	17
➤ Changements dans l'hémisphère Sud	17
➤ Record de température en 1981	17
I.5.2 Les Scénarios Climatiques de Hansen (1988)	19
I.6 Conclusion	20

<u>CHAPITRE II :</u>	22
COLLECTE ET TRAITEMENT DES SERIES TEMPORELLES	
II.1 Introduction	23
II.2 Zone d'étude	23
II.3 Les données disponibles	24
II.4 Le choix de la période d'étude	26
II.5 Critiques des données	28
II.5.1 Contrôle initial et reconstitution des données manquantes	28
II.5.1.1 Comblement des lacunes dans les séries pluviométriques	28
II.5.1.2 Le contrôle graphique des séries pluviométriques	29
II.5.1.2.1 La méthode de simple masse	29
II.5.1.2.2 La méthode du double cumul	30
II.5.1.2.3 La méthode des résidus (Bois, 1972)	30
II.6 Test de la normalité des séries pluviométriques annuelles	38
II.6.1 Ajustement graphique d'une loi normale : La droite de Henry	38
II.6.2 Test de normalité (Test de Kolmogorov-Smirnov)	42
II.7 Conclusion	45
<u>CHAPITRE III :</u>	
EVOLUTION TEMPORELLE ET SPATIALE DES SERIES PLUVIOMETRIQUES ANNUELLES ET SAISONNIERES	46
III.1 Introduction	47
III.2 Les méthodes utilisées	47
III.2.1 Indice Standardisé des Précipitations (SPI)	47
III.2.2 Indice centré réduit pondéré : Filtre passe-bas Hanning de 2e ordre	48
III.2.3 La méthode de la moyenne mobile	49
III.3 Caractérisation statistique des précipitations annuelles, mensuelles et saisonnières	50
III.4 Évolution temporelle des totaux pluviométriques annuels	54
III.4.1 La méthode des indices standardisés des précipitations (SPI)	54
III.5 Évolution temporelle des totaux pluviométriques saisonniers	56
III.5.1 La méthode des indices standardisés des précipitations (SPI)	56
III.6 Évolution temporelle des totaux pluviométriques annuels et saisonniers par la méthode de	56

III.7 Évolution spatiale de la pluviométrie moyenne annuelle	63
III.8 Conclusion	65

CHAPITRE IV :

ANALYSE DES TESTS DE RUPTURE DANS LES SERIES DE PLUIE ANNUELLE ET SAISONNIERE

IV.1 Introduction	67
IV.2 Généralités	67
IV.2.1 Les tests de d'hypothèses	67
IV.2.1.1 Principe des tests d'hypothèses classiques	67
IV.2.1.2 Démarche d'un test	68
IV.2.1.3 Probabilité critique ou P-valeur	69
IV.2.2 La stationnarité des séries chronologiques	69
IV.2.2.1 Tests de vérification du caractère aléatoire des séries	69
IV.2.2.1.1 Test de corrélation sur le rang (Kendall et Stuart, 1943 ; WMO,	69
IV.2.2.2 Test de tendance (tendance linéaire)	70
IV.2.2.2.1 Rho de Spearman (E. L Lehmann 1975; R. Sneyers, 1990)	70
IV.2.2.2.2 Calcul du coefficient t de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall,	71
IV.2.2.2.3 L'approche de Theil-Sen (Theil, 1950; Sen, 1968)	71
IV.2.2.3 Test de détection de rupture (tendance en saut)	72
IV.2.2.3.1 La procédure de segmentation d'Hubert (Hubert <i>et al.</i> , 1989)	72
IV.2.2.3.2 Le test de Pettitt (1979)	73
IV.2.2.3.3 Approche bayésienne de Lee & Heghinian (1977)	74
IV.2.2.3.4 Test paramétrique des écarts cumulés (Buishand, 1982,1984)	75
IV.3 Résultats et Discussions	76
IV.3.1 Analyse de stationnarité des séries pluviométriques annuelles	76
IV.3.1.1 La vérification du caractère aléatoire	76
IV.3.1.2 Détection de tendance au sein des séries pluviométriques annuelles	77
IV.3.1.3 Détection de rupture au sein des séries pluviométriques annuelles	79
IV.3.2 Analyse de stationnarité des séries pluviométriques saisonnières	84
IV.3.2.1 La vérification du caractère aléatoire	84
IV.3.2.2 Détection de tendance au sein des séries pluviométriques saisonnières	84

IV.3.2.3 Détection de rupture au sein des séries pluviométriques saisonnières	89
IV.4 Conclusion	91
<u>CHAPITRE V :</u>	
ÉVOLUTION DU REGIME HYDROLOGIQUE ET DETECTION DE RUPTURE	92
V.1 Introduction	93
V.2 Données hydrométriques, choix de période d'observation	93
V.3 Analyse des débits moyens annuels	96
V.3.1 Le module et variation des débits moyens annuels	96
V.3.2 Distribution statistique des débits moyens annuels	104
V.3.3 Calcul des caractéristiques de l'écoulement	110
V.3.3.1 Débit moyen annuel spécifique	110
V.3.3.2 Bilan moyen annuel	110
V.4 Analyse des débits moyens mensuels	113
V.4.1 Débits moyens mensuels	113
V.4.2 Coefficient mensuel des débits (CMD)	117
VI.4.3 Variabilités interannuelles des débits	121
V.5 Évolution temporelle des débits moyens annuels	125
V.5.1 Évolution annuelle des indices centrés et réduits	125
V.5.2 Analyse préliminaire des évolutions (détection de tendances)	127
V.6 Analyse de la stationnarité des séries temporelles	129
V.6.1 Détection de rupture au sein des séries des débits moyens annuels	129
V.7 Impact des longues périodes de sécheresse sur les eaux superficielles du Tafna	134
V.8 Conclusion	139
CONCLUSION GENERALE	141
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	143
LISTE DES FIGURES	149
LISTE DES TABLEAUX	152
Annexe A	154
Annexe B	162
Annexe C	198

INTRODUCTION GENERALE

La réduction des ressources en eau en Algérie est l'une des principales répercussions du changement climatique. Les sécheresses sont de plus en plus fréquentes et prolongées dans le pays, ce qui a un impact sur l'approvisionnement en eau potable et l'irrigation des cultures. Les réservoirs naturels tels que les barrages font face à une pression croissante, ce qui aggrave les difficultés liées à la gestion de l'eau.

L'Algérie, comme la plupart des pays, a été fortement affectée par le changement climatique qui a touché plusieurs régions du pays depuis plusieurs décennies, notamment dans les régions du nord, a entraîné une diminution notable des précipitations (Meddi, 2003 ; Meddi et Hubert, 2009 ; Meddi *et al.*, 2010; Talia A *et al.*, 2011).

En Algérie, les écoulements superficiels (rivières, oueds, et autres cours d'eau) sont principalement alimentés par les précipitations. Cependant, la variabilité pluviométrique, marquée par des périodes de sécheresse prolongées alternant avec des épisodes de pluies intenses et irrégulières, crée une situation critique pour la gestion des eaux de surface. Cette variabilité pose plusieurs questions et défis pour les décideurs et les gestionnaires de l'eau.

Cette étude vise à examiner l'évolution spatio-temporelle du régime pluviométrique dans le bassin versant de la Tafna et à analyser comment cette évolution se reflète sur les écoulements superficiels. Plusieurs méthodes statistiques sont utilisées pour illustrer le phénomène de sécheresse et évaluer l'ampleur de son impact sur les écoulements superficiels.

Cette thèse est composée de quatre chapitres, axés particulièrement sur les approches suivantes :

Dans le premier chapitre de la thèse, on essaie de réaliser une synthèse bibliographique sur le changement climatique qui nécessite d'examiner plusieurs aspects du phénomène, notamment ses origines et ses causes potentielles. L'étude de cette problématique se divise généralement en trois hypothèses principales : les facteurs naturels cycliques, l'influence du soleil, et l'impact des activités humaines, notamment depuis la révolution industrielle.

Dans le deuxième chapitre, nous procéderons à un inventaire des données disponibles et à leur traitement préliminaire. À l'aide d'outils statistiques, nous comblerons les lacunes éventuelles, détecterons les hétérogénéités présentes dans les données, et mènerons une analyse fréquentielle des données pluviométriques pour permettre l'ajustement à des lois statistiques les plus adéquates.

Le troisième chapitre vise à caractériser la variabilité spatio-temporelle du régime pluviométrique à l'échelle annuelle et saisonnière. Il s'agit également d'analyser l'évolution des régimes pluviométriques au fil du temps, en identifiant les tendances et les fluctuations qui pourraient affecter les patterns régionaux et saisonniers de précipitations.

Dans le quatrième chapitre, il sera question de mener une analyse approfondie de la variabilité de la pluviométrie, qui constitue l'une des caractéristiques majeures de la région étudiée. Cette analyse se fera à l'aide de tests statistiques plus puissants permettant d'évaluer les fluctuations climatiques et de détecter les éventuelles dates de rupture ou de changements significatifs dans les régimes de précipitations.

Le cinquième chapitre sera consacré à l'étude de l'impact des fluctuations des régimes pluviométriques sur les ressources en eau superficielle. L'objectif est de comprendre les liens entre la pluviométrie et la disponibilité des ressources en eau, en se concentrant particulièrement sur les implications des longues périodes de sécheresse. Cette analyse vise à examiner comment les épisodes prolongés de déficit de précipitations affectent les ressources en eau de surface, telles que les rivières, les lacs et les réservoirs.

Enfin, nous concluons la thèse par une discussion générale, reposant sur un bilan du travail effectué.

CHAPITRE I :

Climat, changements climatiques, détection et attribution

I.1 Introduction

Le système climatique est généralement défini comme la combinaison de cinq éléments principaux : l'atmosphère, l'océan, la cryosphère (neiges et glaces), l'hydrosphère et la biosphère, ainsi que leurs interactions multiples.

Le comportement de l'ensemble est affecté par un certain nombre de phénomènes physiques extérieurs, que l'on appelle forçages externes. Parmi ces forçages se trouvent des mécanismes naturels, comme l'activité volcanique, les variations de l'activité solaire, les variations de l'orbite terrestre, etc., et d'autres anthropiques liés aux activités humaines, comme les émissions de gaz à effet de serre, etc.

I.2 Notion de climat

Le climat désigne l'état moyen de nombreux paramètres, principalement physiques, tels que la température, l'humidité, la pression atmosphérique, les précipitations, et les vents, qui régissent l'atmosphère, l'océan et les surfaces continentales. Il s'agit d'un ensemble de conditions météorologiques observées sur une longue période, généralement plusieurs décennies. Le terme « climat » tire son origine du mot grec **κλίμα** (klíma), signifiant « inclinaison », en référence à l'angle d'incidence des rayons solaires sur la Terre, qui varie selon les latitudes. Cette inclinaison influence directement les caractéristiques climatiques des différentes régions, engendrant ainsi des zones climatiques semblables dans le monde.

I.3 Le système climatique

Le système climatique est composé de plusieurs éléments interconnectés : l'atmosphère, les océans, les glaces et les terres émergées. Son fonctionnement est principalement régi par les échanges d'énergie entre la Terre et le Soleil, ainsi que par les interactions entre ces différents composants. Lorsque la surface terrestre est éclairée et chauffée par le rayonnement solaire, une partie de ce rayonnement est réfléchi vers l'espace, tandis que l'autre partie est absorbée par la surface, qui, à son tour, émet un rayonnement infrarouge appelé « rayonnement tellurique ».

Ce rayonnement tellurique est partiellement renvoyé dans l'espace, mais une portion est absorbée par certains gaz présents dans l'atmosphère, comme le dioxyde de carbone (CO₂), la vapeur d'eau (H₂O) et le méthane (CH₄). Ces gaz à effet de serre contribuent à réchauffer l'atmosphère en renvoyant une partie de l'énergie vers la surface terrestre, un processus essentiel dans la régulation de la température globale.

I.4 Notion de forçage

Le terme « forçage » désigne une perturbation par rapport à un état d'équilibre climatique. Lorsqu'il est appliqué au bilan radiatif net de la Terre, qui est nul à l'état d'équilibre (c'est-à-dire que l'énergie reçue par la Terre est égale à l'énergie qu'elle émet), un forçage survient lorsqu'il y a une modification de l'une des composantes de ce bilan. Trois paramètres essentiels contribuent à ces variations : la constante solaire, l'albédo, et le paramètre effet de serre normalisé.

I.4.1 Les différentes causes de forçages

Les éléments qui perturbent l'équilibre énergétique de l'atmosphère peuvent être dues à des facteurs naturels ou à des activités humaines (forçages d'origine dit « anthropique »). Dans ces deux cas le forçage peut affecter l'effet serre ou l'effet parasol, ou encore les deux à la fois dans la mesure où l'un va devenir la source de perturbation de l'autre.

I.4.1.1 La constante solaire (S)

Il s'agit de l'intensité du rayonnement solaire que la Terre reçoit. Une variation de cette constante, due à des fluctuations dans l'activité solaire, peut provoquer un forçage radiatif en augmentant ou en diminuant l'énergie reçue par la planète. Ces causes sont uniquement naturelles et externes.

C'est en 1837 que le Français François Pouillet a été le premier à mesurer la constante solaire, qui représente le flux d'énergie solaire reçu par la Terre. Les premières mesures systématiques de cette constante ont cependant commencé en 1902, sous la conduite de l'Américain Charles Abbot.

Le flux de rayonnement par lequel la constante solaire est définie provient de la photosphère, la couche la plus externe du Soleil. Cette photosphère, à l'origine de la lumière visible, est affectée par plusieurs types d'activités dynamiques qui influencent la constance du rayonnement solaire.

La constante solaire n'est pas totalement stable ; elle fluctue légèrement en fonction des activités éruptives présentes dans la photosphère. Parmi ces activités, on distingue les facules, des zones particulièrement brillantes, avec une luminosité supérieure de 10 % à celle du reste de la surface solaire. Ces facules sont liées aux mouvements convectifs et acoustiques qui se produisent dans la photosphère.

D'autre part, les éruptions solaires et les taches solaires sont d'origine magnétique. Les taches solaires, qui apparaissent comme des régions sombres à la surface du Soleil, sont associées à des champs magnétiques intenses. Bien que les taches solaires soient plus sombres que la surface environnante, leur apparition est souvent accompagnée par des facules environnantes, ce qui fait que leur présence peut parfois augmenter légèrement le flux global de l'énergie solaire. Ainsi, bien que la constante solaire S soit relativement stable, elle connaît de petites variations liées aux activités solaires qui influencent l'équilibre radiatif terrestre.

Les taches solaires (*figure I.1*), observées pour la première fois par les Chinois autour de l'an 1000, ont été étudiées plus en détail par des scientifiques européens tels que Galilée et Fabricius à partir de 1611. Ces taches sombres sur la surface du Soleil varient en taille, avec des diamètres allant de 2 000 à 100 000 km.

Elles se forment dans des zones où l'activité magnétique est intense, ce qui diminue temporairement la température de la surface solaire à environ 4 000 K, bien en dessous des 5 500 K habituels de la photosphère. Leur durée de vie varie considérablement, certaines ne durant que quelques jours, tandis que d'autres persistent pendant plusieurs mois.

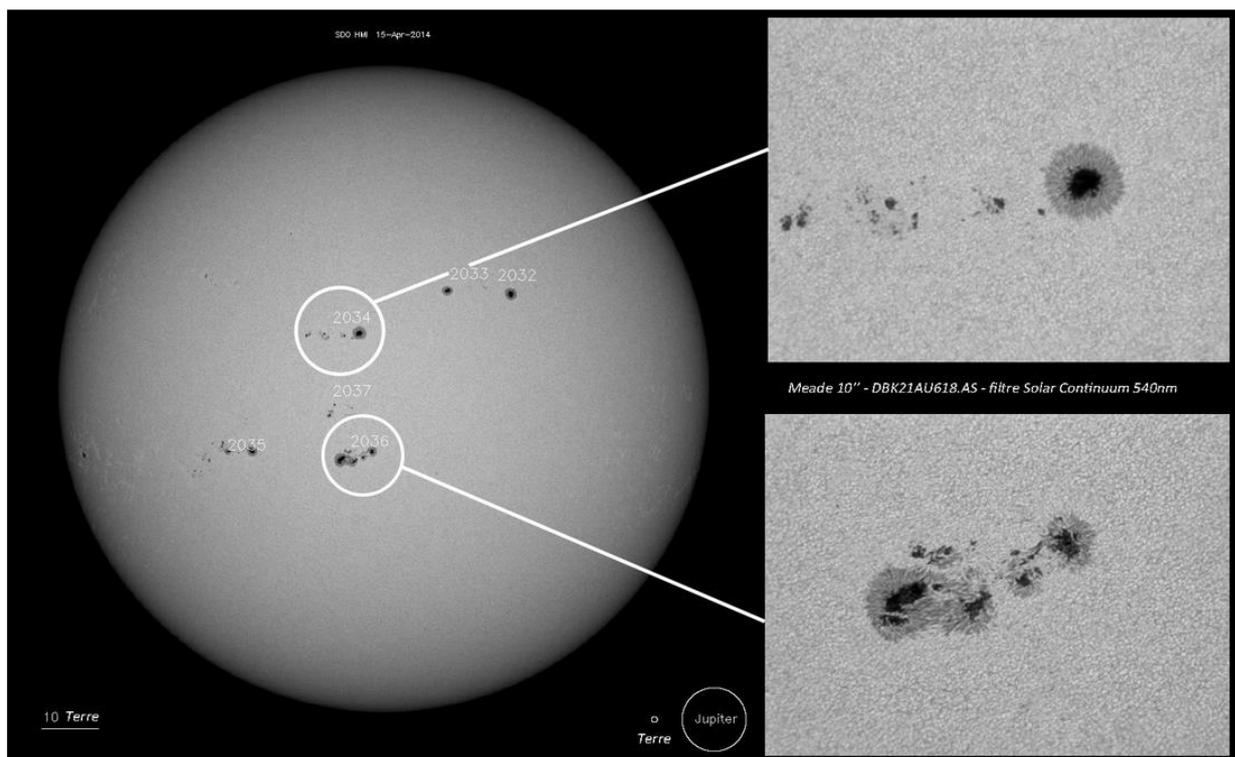


Figure I.1 Les taches solaires.

L'analyse des taches solaires a révélé une corrélation entre leur nombre et l'intensité du flux radiatif émis par la photosphère solaire. Cette relation a un impact sur la constante solaire, qui mesure la quantité d'énergie reçue par la Terre du Soleil. Une variation de 1 % de la constante solaire entraîne une variation correspondante d'environ 0,7 °C de la température terrestre. Ainsi, lors des périodes de faible activité solaire, comme les minimums de taches solaires, on pourrait s'attendre à un léger refroidissement de la Terre.

Les observations paléoclimatologiques qui ont permis de reconstituer la mesure de la température moyenne de surface, ont montré un mini âge glaciaire de 1645 à 1715 coïncidant avec une diminution de la constante solaire (du moins de sa valeur reconstruite) : c'est le « *minimum de Maunder* ». En revanche, la coïncidence disparaît à partir du *XIXe* siècle, ce qui laisse à penser que des facteurs autres que la constante solaire viennent affecter la température moyenne de la Terre à partir de cette époque (*figure I. 2*).

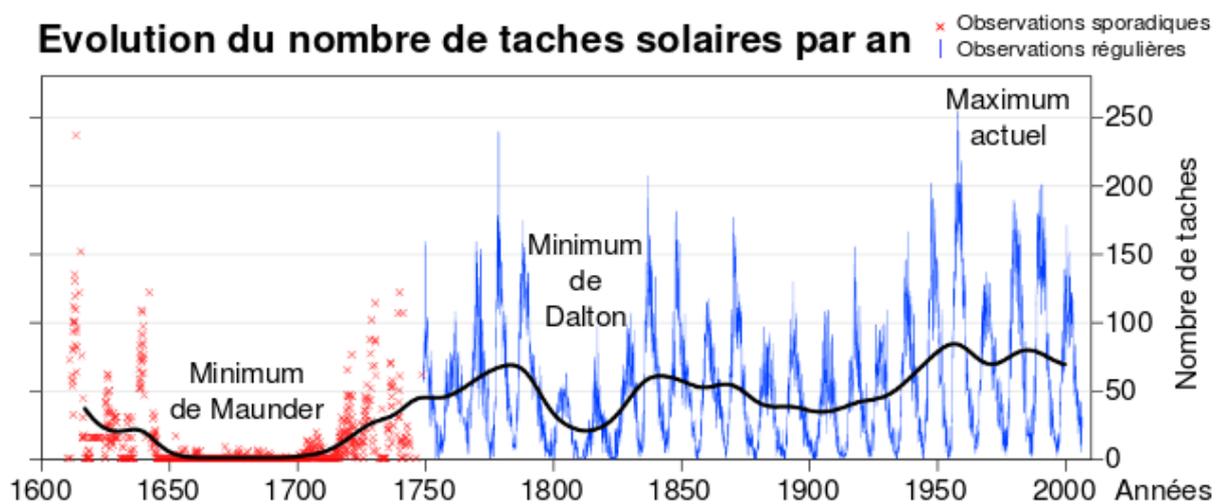


Figure I.2 Variation de la constante solaire et de la température terrestre de 1600 à 2000.

I.4.1.2 L'effet de serre

I.4.1.2.1 Causes naturelles

Les variations naturelles de l'effet de serre, indépendamment des activités humaines, ont effectivement joué un rôle dans les fluctuations climatiques de la Terre au fil des millénaires. Joseph Fourier, au début du XIXe siècle, et plus tard Svante Arrhenius en 1896, furent parmi les premiers scientifiques à suggérer que le dioxyde de carbone (CO₂) et d'autres gaz à effet de serre pouvaient avoir une influence directe sur le climat de la Terre.

Grâce aux techniques de carottage des glaces, les scientifiques ont pu remonter dans le temps et reconstituer la composition de l'atmosphère et la température sur des centaines de milliers d'années, notamment lors des campagnes de forage à Vostok et Dome C en Antarctique, ainsi qu'à Summit au Groenland.

Ces carottes glaciaires permettent de piéger les bulles d'air anciennes, fournissant des informations précieuses sur les concentrations passées de gaz comme le CO₂ et le méthane (CH₄), ainsi que sur la température.

Les résultats obtenus montrent que les périodes glaciaires et interglaciaires du Quaternaire étaient associées à des écarts de température de l'ordre de 12 °C. Durant les périodes glaciaires, les concentrations de CO₂ diminuaient de 100 ppm (parties par million) et celles de CH₄ de 300 ppbv (parties par milliard en volume).

Ces données révèlent une corrélation claire entre la baisse de température et la réduction des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, notamment au cours des quatre grandes périodes glaciaires du Quaternaire.

Cette corrélation entre gaz à effet de serre et changements climatiques montre l'importance de ces gaz dans le régulateur naturel du climat. Cependant, au-delà des processus naturels, les activités humaines depuis l'ère industrielle ont considérablement augmenté la concentration de ces gaz dans l'atmosphère, amplifiant l'effet de serre et entraînant un réchauffement global (*figure I.3*).

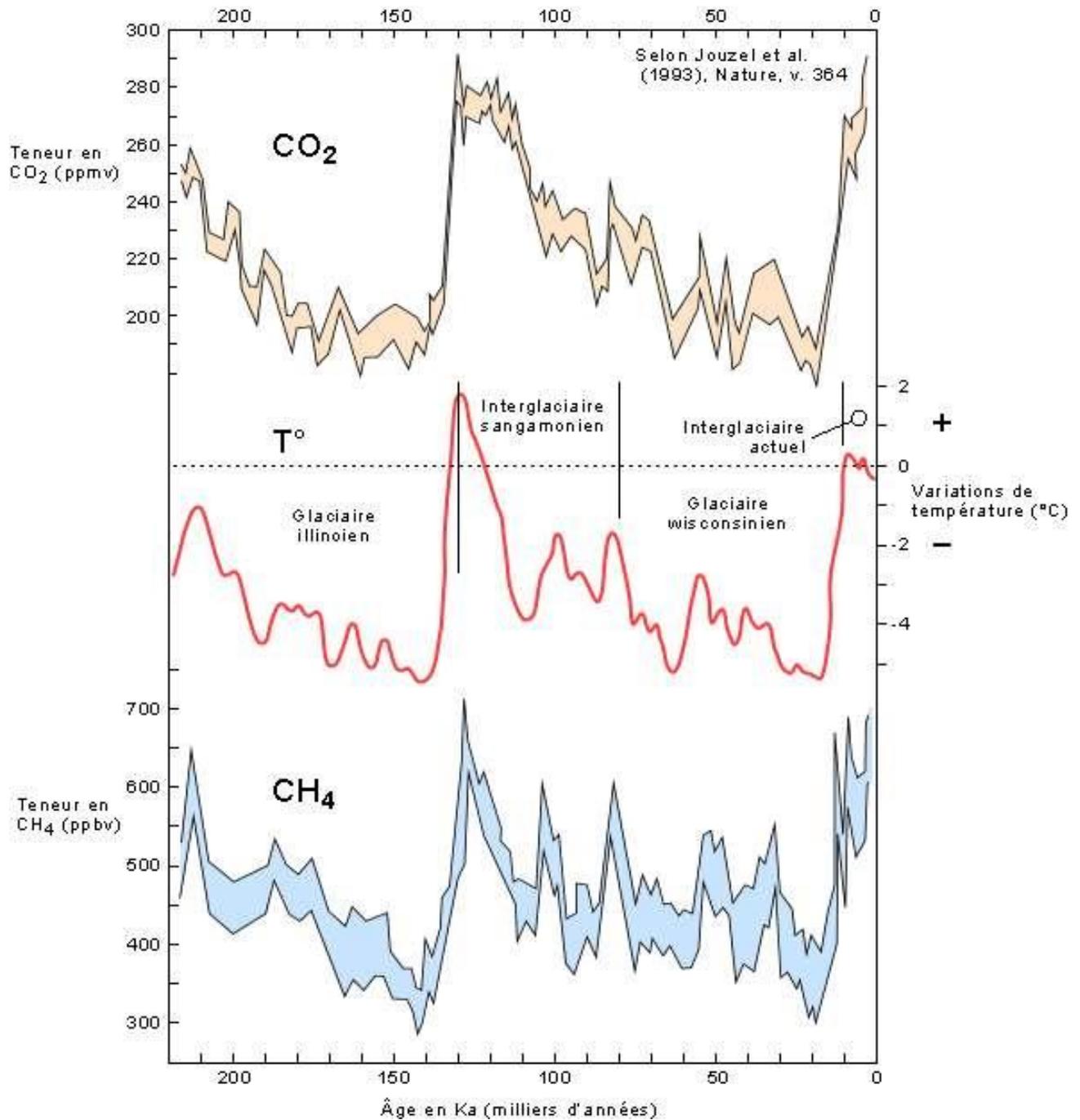


Figure I.3 Variations de la température moyenne et de la composition de l'air en dioxyde de carbone et méthane depuis 420000 ans.

Des analyses de l'air piégé dans les échantillons de glace de Vostok (Antarctique) au laboratoire de glaciologie et de géophysique de l'environnement de Grenoble. On observe une fluctuation naturelle des niveaux de dioxyde de carbone et de méthane en relation avec la température moyenne. Mais depuis le XIXe siècle, les augmentations sortent de cette fourchette de variations et semblent donc résulter des activités humaines.

I.4.1.2.2 Causes liées à l'intervention humaine :

➤ **(Dioxyde de carbone, méthane...)** :

Depuis 1957, des observations directes et précises de la concentration de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère sont réalisées à l'observatoire de Mauna Loa à Hawaï. Ces mesures ont été initiées par le scientifique américain Charles David Keeling. Le projet a permis de créer une base de données ininterrompue sur les niveaux de CO₂, qui est régulièrement mise à jour et analysée depuis 1970.

Les résultats des observations effectuées à Mauna Loa montrent clairement une tendance à la hausse des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère, qui croissent systématiquement chaque année depuis le début des mesures. Ce phénomène, souvent illustré par la courbe de Keeling, met en évidence l'augmentation constante des émissions de CO₂, principalement due à l'industrialisation et à la combustion des énergies fossiles.

Entre 1958 et 2000, la concentration atmosphérique de CO₂ est passée de 315 ppm à environ 370 ppm, marquant une augmentation significative qui se poursuit encore aujourd'hui. La courbe présente aussi une fluctuation saisonnière en raison des cycles de croissance et de décomposition des plantes dans l'hémisphère Nord, mais la tendance générale reste indéniablement à la hausse, un signe clair de l'impact des activités humaines sur l'effet de serre et le climat global.

L'augmentation constante du CO₂ mesurée à Mauna Loa est devenue un indicateur majeur des changements climatiques en cours, et elle est utilisée comme référence pour les politiques environnementales et les actions internationales visant à atténuer le réchauffement climatique.

On peut comparer la figure I.4 à ceux de l'évolution de la population mondiale sur la même période. Le taux de croissance de celle-ci est parfaitement équivalent à celui des gaz à effet de serre, ce qui témoigne d'une corrélation de cause à effet entre l'activité humaine, d'autant plus forte que la population est élevée, et l'augmentation de ces gaz.

Les mesures indirectes réalisées à partir des glaces polaires confirment cette tendance à une croissance rapide, exponentielle, pour la concentration en dioxyde de carbone, tout comme pour d'autres gaz à effet de serre (méthane CH₄, protoxyde d'azote N₂O...). Ces mesures ont permis de reconstituer les concentrations pour une période allant de l'an 1000 à nos jours (*figure I.4*).

On peut comparer les graphiques ci-dessous à ceux de l'évolution de la population mondiale sur la même période. Le taux de croissance de celle-ci est parfaitement équivalent à celui des gaz à effet de serre, ce qui témoigne d'une corrélation de cause à effet entre l'activité humaine, d'autant plus forte que la population est élevée, et l'augmentation de ces gaz.

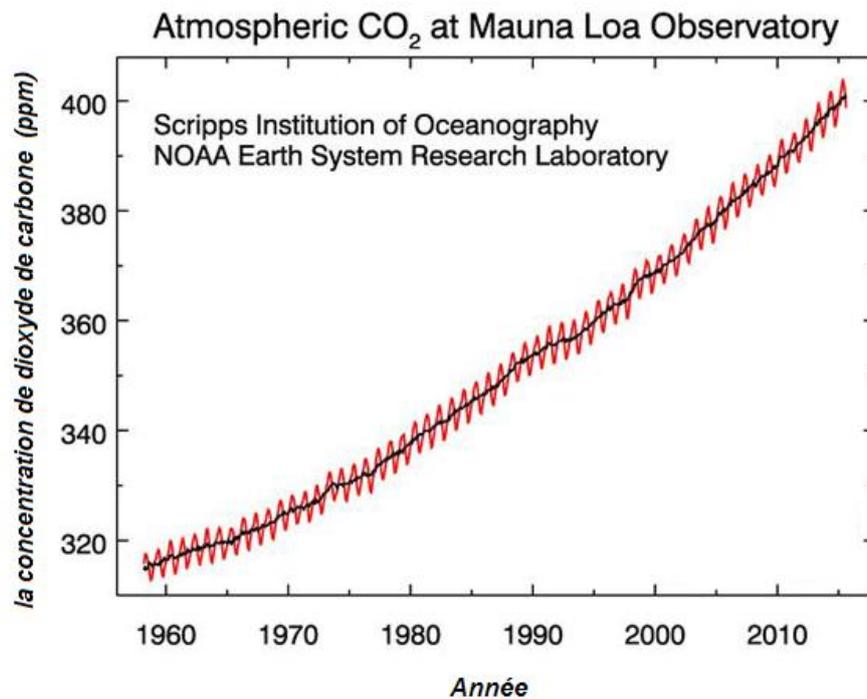


Figure I.4 La courbe de Keeling montre l'évolution de la concentration la concentration en CO_2 de l'atmosphère mesurée à Mauna Loa (Hawaii) depuis 1957 : *La concentration en CO_2 est passée de 315 ppm en 1958 à 399 ppm en 2014 (+26 %).*

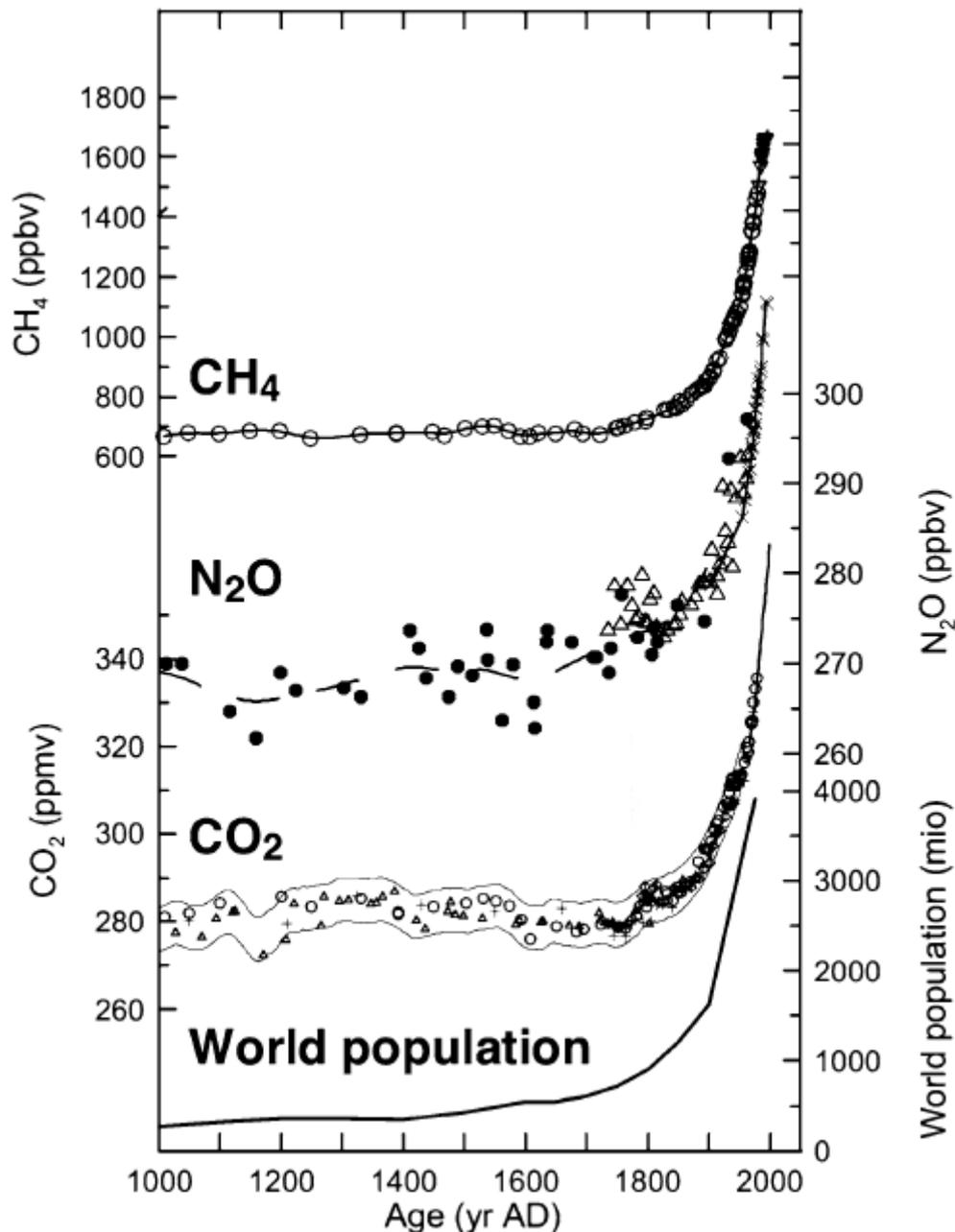


Figure I.5 Évolution des gaz à effet de serre à l'état de traces : CO_2 , CH_4 , N_2O , au cours du dernier millénaire. Comparaison avec l'évolution démographique.

➤ **Ozone troposphérique :**

La couche d'ozone, située dans la stratosphère, est la région de l'atmosphère où la concentration d'ozone (O_3) est la plus élevée. Elle se trouve à une altitude comprise entre 10 et 40 km au-dessus de la surface terrestre, atteignant environ 8 ppmv (parties par million en volume). Cette couche d'ozone stratosphérique joue un rôle crucial en absorbant la majorité des rayons ultraviolets (UV) nocifs du Soleil, protégeant ainsi la vie sur Terre des effets dangereux de ces radiations, tels que les cancers de la peau et les dommages oculaires.

Il est important de ne pas confondre l'ozone stratosphérique avec l'ozone troposphérique, qui se trouve plus près du sol dans la troposphère, la partie inférieure de l'atmosphère. L'ozone troposphérique est principalement produit par des réactions chimiques impliquant les émissions des véhicules, des industries et d'autres activités humaines. Cet ozone, souvent considéré comme un polluant, est un irritant puissant pour les yeux, les voies respiratoires et les poumons, contribuant aux problèmes de santé tels que l'asthme et les maladies respiratoires. Contrairement à l'ozone stratosphérique qui protège la vie sur Terre, l'ozone troposphérique est un composant clé du smog photochimique et représente une menace pour la santé publique et l'environnement.

Les recherches menées lors de l'expédition scientifique en Antarctique en 1986, notamment par Susan Solomon et James Anderson, ont révélé des concentrations de chlore bien supérieures aux niveaux habituels dans les régions les plus touchées par la diminution de la couche d'ozone. Cette découverte a permis de mieux comprendre le phénomène de destruction de l'ozone, notamment au-dessus de l'Antarctique, où le fameux "trou d'ozone" a été observé.

Paul Crutzen, Mario Molina et Frank Sherwood Rowland ont ensuite démontré que cette dégradation de la couche d'ozone est provoquée par des composés chimiques synthétiques, principalement les chlorofluorocarbones (CFC) et les halons. Ces substances, largement utilisées à l'époque dans les aérosols, les réfrigérateurs et les systèmes de climatisation, sont extrêmement stables dans les couches inférieures de l'atmosphère et mettent du temps à atteindre la stratosphère.

Une fois dans la stratosphère, sous l'effet des rayons ultraviolets (UV), ces composés subissent un processus de photolyse qui libère du chlore. Ce chlore réagit alors avec les molécules d'ozone (O_3), catalysant leur destruction. Un seul atome de chlore peut détruire plusieurs milliers de molécules d'ozone avant d'être neutralisé. Ce processus est amplifié par la présence de cristaux de glace dans les nuages stratosphériques polaires, qui transforment les composés chlorés en formes de chlore réactif capables d'accentuer la destruction de l'ozone, notamment dans les régions polaires.

Ces travaux ont joué un rôle central dans la prise de conscience internationale des dangers liés aux CFC (Les chlorofluorocarbones) et à d'autres substances appauvrissant l'ozone, aboutissant au Protocole de Montréal en 1987, un accord international visant à réduire et éliminer la production et l'utilisation de ces substances.

La destruction de l'ozone stratosphérique dans les régions polaires est un phénomène complexe, fortement influencé par les conditions climatiques extrêmes et les composés chimiques introduits par les activités humaines.

L'ozone est principalement détruit dans les régions, lorsque les températures dépasseront -80°C dans la stratosphère. Les températures basses favorisent la création de nuages stratosphériques polaires (PSC, *Polar Stratospheric Clouds*), qui se trouvent dans la basse stratosphère à une altitude d'environ 10-20 km.

Les nuages stratosphériques polaires jouent un rôle important dans la destruction de l'ozone. Ces nuages contiennent des cristaux de glace sur lesquels se produisent des réactions chimiques spécifiques. Ces réactions transforment des composés issus des halocarbures (comme les CFC et les halons), normalement inoffensifs vis-à-vis de l'ozone, en formes actives de chlore et de brome, qui sont capables de détruire l'ozone.

Un atome de chlore peut détruire des milliers de molécules d'ozone à travers une réaction en chaîne. Cela conduit à une destruction rapide et massive de l'ozone au-dessus des régions polaires, créant le phénomène connu sous le nom de trou d'ozone. Le trou d'ozone est le plus prononcé au-dessus de l'Antarctique.

➤ **Durée de vie longue des CFC**

- Les CFC et autres halocarbures utilisés dans les activités humaines sont des molécules très stables dans les couches basses de l'atmosphère, ce qui signifie qu'ils persistent longtemps avant d'atteindre la stratosphère. Une molécule de CFC peut mettre environ 25 ans à atteindre la stratosphère.
- Une fois dans la stratosphère, ces composés peuvent rester actifs pendant une période très longue, entre 60 et 100 ans. Cela signifie que même si la production et l'utilisation de CFC ont été drastiquement réduites grâce au Protocole de Montréal (1987), les CFC déjà présents dans l'atmosphère continueront à avoir des effets destructeurs sur l'ozone pendant plusieurs décennies.

I.4.1.3 Albédo

L'albédo est un indicateur de la réflexion de la lumière ou du rayonnement d'une surface. On le représente en pourcentage ou en fraction et il correspond à la part de la lumière incidente réfléchiée par une surface. À titre d'exemple, un albédo de 1 ou 100 % indique que toute la lumière est réfléchiée, tandis qu'un albédo de 0 indique que toute la lumière est absorbée. L'albédo dépend principalement de la couverture nuageuse, mais aussi dans une

moindre mesure de l'étendue des surfaces claires, comme la neige, les glaciers, les déserts... et des aérosols en suspension dans l'atmosphère.

L'albédo est un élément essentiel de la régulation climatique. Ces zones froides sont maintenues par les surfaces claires, telles que la neige ou la glace, qui ont un albédo élevé et qui réfléchissent une grande partie de la lumière solaire. D'un autre côté, les zones sombres, telles que les océans ou les forêts, présentent un albédo faible et absorbent plus de chaleur, ce qui contribue au réchauffement.

La modification de la concentration et de la répartition des particules en suspension dans l'atmosphère (aérosols) est d'origine naturelle ou humaine et contribue à l'évolution de l'albédo, soit par augmentation de l'effet parasol (refroidissement global), soit par diminution de l'effet parasol (réchauffement global).

I.4.1.3.1 Causes liées à l'émission du dioxyde de soufre

Le dioxyde de soufre SO_2 est émis dans l'atmosphère par des causes naturelles, telles que le volcanisme, et par des causes humaines, telles que les combustions d'hydrocarbures. Mais les effets et le séjour dans l'atmosphère du SO_2 ne sont pas les mêmes selon les causes d'émission :

➤ Le SO_2 résultant de la combustion de carburants fossiles

Le dioxyde de soufre (SO_2) issu de la combustion des carburants fossiles (hydrocarbures, charbons...) affecte principalement la troposphère, la couche inférieure de l'atmosphère où nous vivons et où se produisent la plupart des phénomènes météorologiques. Le SO_2 est rapidement transformé en acide sulfurique (H_2SO_4) sous l'action de l'oxygène et d'autres processus chimiques dans l'air. Puisque ces particules se trouvent dans la troposphère, elles se trouvent en partie dans les nuages et, avec les pluies, elles seront rejetées sur le sol, ce qui entraînera l'acidification de la terre et des lacs (pluies acides). La quantité de SO_2 émise dans l'atmosphère en raison des activités humaines est très faible et n'a presque aucun impact sur la variation de l'effet de serre ou de l'albédo.

➤ Le SO_2 d'origine volcanique,

Contrairement au SO_2 d'origine anthropique, qui reste dans la troposphère, le SO_2 volcanique est souvent injecté dans la stratosphère (la couche atmosphérique située au-dessus de la troposphère) lors d'éruptions explosives. Dans la stratosphère, le SO_2 réagit avec l'eau pour former des aérosols de sulfate (H_2SO_4). Ces aérosols peuvent persister pendant plusieurs

mois à plusieurs années en raison de l'absence de précipitations à cette altitude. Les aérosols de sulfate formés à partir du SO₂ volcanique augmentent l'albédo stratosphérique, c'est-à-dire la capacité de la Terre à réfléchir la lumière solaire. Cela crée un effet parasol global qui réduit la quantité de rayonnement solaire atteignant la surface terrestre, entraînant ainsi un refroidissement temporaire du climat. Les éruptions volcaniques majeures, comme celles du Mont Pinatubo (1991) ou du Krakatoa (1883), ont entraîné une diminution de la température moyenne mondiale de 0,5 à 1 °C pendant un ou deux ans après l'événement.

Le SO₂ d'origine volcanique a des impacts majeurs sur le climat, principalement en raison de son injection dans la stratosphère, où il forme des aérosols de sulfate qui augmentent l'albédo terrestre et provoquent un refroidissement temporaire. Bien que ces effets soient limités dans le temps, ils peuvent altérer les conditions climatiques globales pendant plusieurs années après une éruption majeure.

I.5 Les observations du climat et de ses changements (Les analyses de température de surface de la terre GISS)

Les analyses de température de surface terrestre menées par le Goddard Institute for Space Studies (GISS), en particulier celles concernant les changements climatiques, ont effectivement été initiées par James Hansen dans les années 1970. James Hansen, un climatologue américain de renom, a joué un rôle clé dans la modélisation du climat terrestre et dans la sensibilisation mondiale aux dangers du réchauffement climatique.

Dans les années 1970 (Hansen et *al.*, 1981), James Hansen et son équipe au GISS ont commencé à utiliser des modèles climatiques pour étudier la relation entre les concentrations de gaz à effet de serre (principalement le dioxyde de carbone, CO₂) et les changements de température de la planète.

En 1988, Hansen a témoigné devant le Congrès des États-Unis, affirmant que le réchauffement global causé par les activités humaines était déjà mesurable et que les conséquences du changement climatique deviendraient de plus en plus évidentes au fil du temps. Son témoignage a marqué un tournant dans la reconnaissance publique et politique du changement climatique et a contribué à orienter la recherche scientifique et les politiques environnementales.

Dans cet extrait de Hansen et *al.*, 1987, les auteurs présentent une analyse détaillée des changements de température de surface globale et hémisphérique entre 1880 et 1981, basée sur les données disponibles à l'époque. Voici un résumé des principales observations décrites :

I.5.1 Changements de température globale et hémisphérique (1880-1981)

➤ Tendance globale

- De 1880 à 1940, la température moyenne globale a augmenté d'environ **0,5°C**.
- Entre 1940 et 1965, il y a eu une diminution d'environ **0,2°C**.
- À partir de 1965 jusqu'à 1980, une nouvelle hausse d'environ **0,3°C** a été observée.

➤ Changements dans l'hémisphère Nord

La température dans l'hémisphère Nord suit une évolution similaire à la tendance globale (*figure I.6*):

- Une augmentation de **0,6°C** entre 1880 et 1940.
- Une baisse de **0,3°C** entre 1940 et 1970.
- Une hausse de **0,3°C** entre 1970 et 1980.

➤ Changements dans l'hémisphère Sud

L'évolution de la température dans l'hémisphère Sud est plus irrégulière ("plus bruyante"), mais elle montre un réchauffement global plus constant sur la période (*figure I.6*).

- Entre 1880 et 1980, la température a augmenté d'environ **0,6°C**.
- Le réchauffement le plus marqué s'est produit entre 1965 et 1980, similaire à celui observé dans l'hémisphère Nord.

➤ Record de température en 1981

- L'année 1981 a été identifiée comme la plus chaude jamais enregistrée à ce moment, avec des températures globales surpassant le précédent maximum de 1940 de **0,2°C**.
- De plus, 1981 est également notée comme l'année la plus chaude enregistrée dans l'hémisphère Nord, confirmée par d'autres études comme celle de Jones et *al.* (1982).

En résumé la période de réchauffement entre 1880 et 1940 pourrait être liée à des facteurs naturels et anthropiques, tandis que le refroidissement observé de 1940 à 1965 est souvent attribué à des facteurs tels que l'augmentation des aérosols dans l'atmosphère (d'origine humaine ou volcanique) qui augmentent l'albédo terrestre.

Le réchauffement rapide à partir des années 1970 est, lui, davantage associé à l'augmentation continue des émissions de gaz à effet de serre. Les analyses de Hansen et ses collègues ont été parmi les premières à alerter la communauté scientifique et le public sur le réchauffement climatique global.

Leur travail a permis de démontrer, dès les années 1980, l'impact croissant des activités humaines sur le climat, en particulier via les émissions de CO₂ et autres gaz à effet de serre.

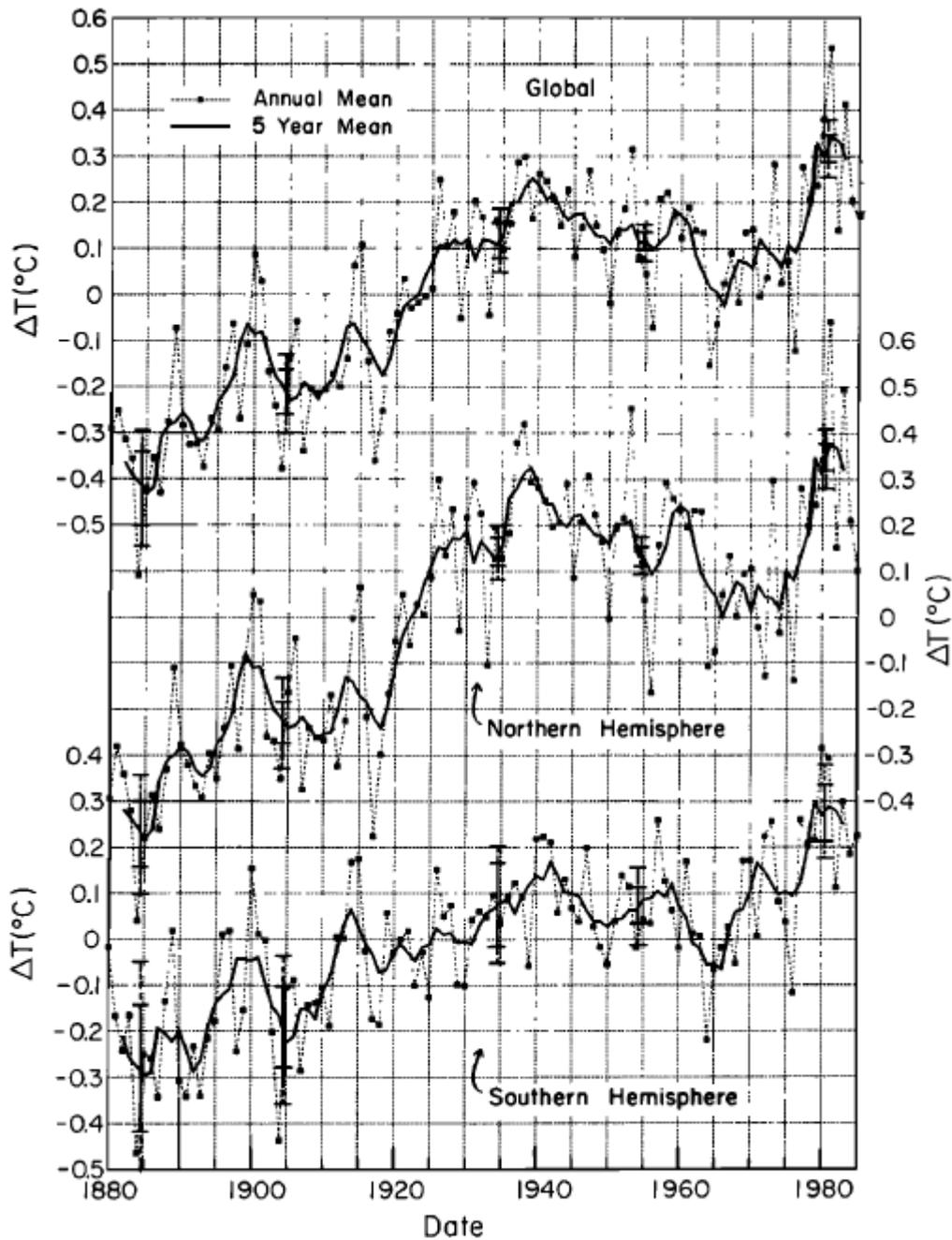


Figure I.6 Changement de la température de l'air de surface globale et hémisphérique estimé à partir des enregistrements des stations météorologiques.

D'après l'article original (Hansen et al., 1987).

I.5.2 Les Scénarios Climatiques de Hansen (1988)

Hansen a présenté ces trois scénarios dans un graphique emblématique lors de son témoignage devant le Sénat des États-Unis en 1988, afin de démontrer les conséquences potentielles du réchauffement climatique en fonction des actions prises pour limiter les émissions (*figure I.7*). Ce graphique montrait les prévisions de réchauffement en fonction des différents scénarios.

- Dans le scénario A, il est supposé que ces gaz poursuivront indéfiniment l'évolution qui a été observée dans les années 1970 et 1980. L'augmentation annuelle moyenne d'environ 1,5 % de ces émissions entraînera une augmentation exponentielle de l'effet de serre.
- Le scénario B tient compte d'une stabilisation de ces émissions de gaz ce qui aura pour conséquence de stabiliser l'effet de serre sur le climat.
- Les émissions de gaz entre les années 1990 et 2000 sont considérablement réduites dans le scénario C, ce qui signifie que le forcing sur le climat cesse après les années 2000. Ce qui a été constaté depuis lors et ajouté au célèbre graphique de Hansen présenté aux Sénateurs (Hansen et *al.*, 1988) est le suivant :

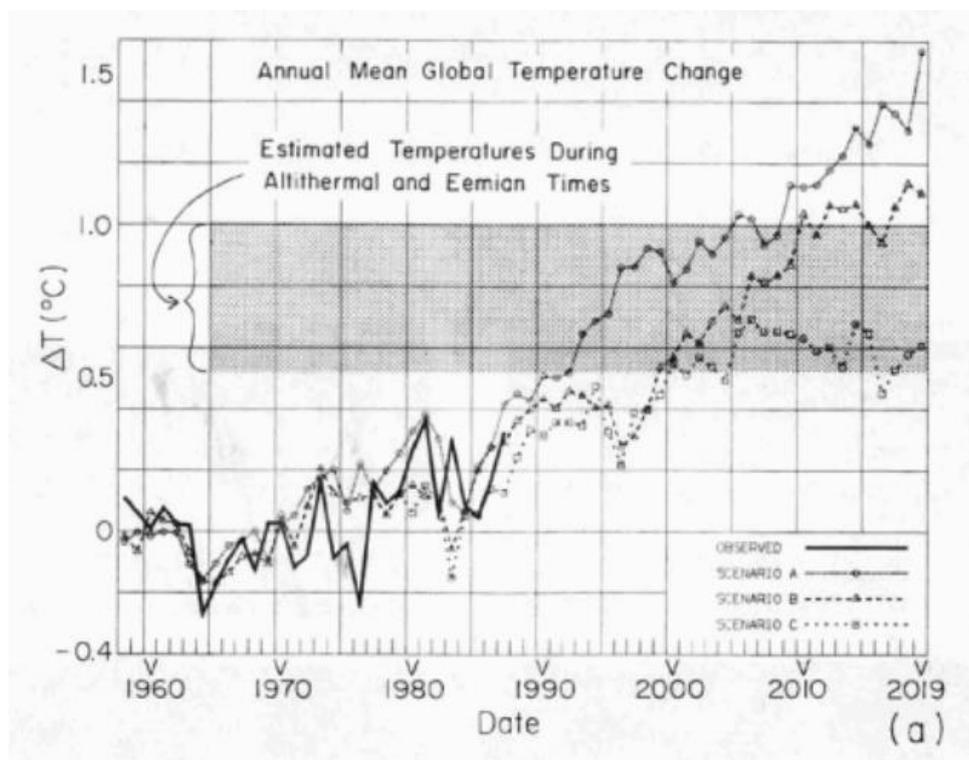


Figure I.7 La température moyenne annuelle globale de l'air en surface calculée pour les scénarios A, B et C, (Hansen et *al.*, 1988).

I.6 Conclusion

Les changements climatiques jouent un rôle essentiel dans l'évolution de la Terre depuis sa création. Les espèces ont évolué et certaines ont disparu en partie en raison de l'équilibre et des déséquilibres que le système climatique a pu subir. Ce système est composé de différentes composantes qui interagissent entre elles : l'atmosphère, l'hydrosphère, la cryosphère, la biosphère et la lithosphère.

La source d'énergie est le rayonnement solaire. Plusieurs facteurs perturbent son équilibre énergétique, tels que la composition atmosphérique ou l'état de la surface terrestre.

Récemment, un nouvel élément a été ajouté à la liste des perturbateurs de l'équilibre climatique. Dès le milieu du XIXe siècle, l'avènement de nouvelles technologies a entraîné un développement des sociétés humaines à une vitesse inédite. La croissance démographique et les différentes révolutions industrielles ont profondément modifié ces sociétés.

Effectivement, les changements technologiques et les évolutions socio-économiques ont été parmi les moteurs majeurs du réchauffement climatique moderne, notamment par l'émission de gaz à effet de serre. Cette évolution, qui a connu une accélération particulièrement marquée depuis la révolution industrielle, a eu des effets multiples et souvent inattendus, dont le principal est l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, ce qui perturbe l'équilibre énergétique de la Terre.

Depuis plusieurs décennies, l'évaluation et la quantification de ces changements anthropiques ont une place prépondérante dans les recherches sur le climat. La modélisation du système climatique permet non seulement de comprendre l'évolution des climats passés, mais aussi de pouvoir projeter leur amplitude à venir en fonction des décisions que nous prendrons et des comportements que nous adopterons.

Les observations de Hansen et *al.* (1987) ont marqué une étape importante dans la compréhension des changements climatiques au cours du 20^e siècle. Leur travail a montré non seulement la variabilité naturelle du climat, mais aussi la nette tendance au réchauffement dans les années 1980, attribuée à l'influence humaine croissante. Ces analyses pionnières ont contribué à orienter la recherche climatique et à sensibiliser à l'importance de surveiller les températures globales dans le contexte du changement climatique.

Le scénario C proposé par Hansen en 1988 prévoyait une forte réduction des émissions de gaz à effet de serre entre les années 1990 et 2000, conduisant à une stabilisation du réchauffement après 2000. Cependant, les observations montrent que cette réduction n'a

pas eu lieu. Les émissions de gaz à effet de serre ont continué d'augmenter, et les températures globales ont suivi une trajectoire plus proche du scénario B, avec un réchauffement continu au 21e siècle. Cela souligne l'écart entre les actions nécessaires pour limiter le réchauffement climatique et les politiques réellement mises en œuvre durant cette période.

CHAPITRE II :

Collecte et traitement des séries temporelles

II.1 Introduction

Avant d'entreprendre toute analyse climatologique ou hydrologique, il est essentiel de procéder à un contrôle de qualité rigoureux des données pour garantir leur fiabilité et leur précision. Le contrôle permet de combler les données manquantes en utilisant des techniques telles que l'interpolation spatiale ou temporelle, la détection des erreurs : Identifiez et corrigez les erreurs accidentelles ou systématiques dans les données, telles que les valeurs aberrantes ou les incohérences. Cela peut impliquer l'examen des données à l'aide de critères statistiques, la comparaison avec d'autres sources de données, ou l'examen visuel des enregistrements.

Et enfin, étudier l'homogénéité des séries temporelles : Vérifiez que les séries temporelles sont homogènes, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas affectées par des changements dans les conditions de mesure ou dans les instruments au fil du temps. Les changements d'emplacement de la station, les modifications de l'équipement ou les changements de méthode de mesure peuvent affecter l'homogénéité des données et doivent être identifiés et corrigés si nécessaire.

II.2 Zone d'étude

Le bassin versant de la Tafna est situé à l'extrême nord-ouest de l'Algérie, dans la région de Tlemcen, près de la frontière avec le Maroc, entre 0,9 et 2,4 de longitude ouest et de 34,4 à 35,3 de latitude nord (*figure I.1*).

Il s'étend sur une superficie de 7245 km², dont moins d'un tiers se trouve sur le territoire marocain. Il draine un bassin à relief de petites et moyennes montagnes constitué par les Mont des Traras et Sébaa Chioukh (1200 et 600 m) au nord, qui font partie du Tell septentrional et les Monts de Tlemcen (1800 m) au sud, qui appartiennent au Tell atlasique (Remaoun, 2003).

Entre ces massifs, on retrouve des plaines telles que celles de Maghnia. L'oued Tafna est un cours d'eau de 170 km de long, il prend sa source dans les Monts de Tlemcen et il débouche dans la mer Méditerranée. Le cours de cet oued peut se subdiviser en trois parties : la Haute Tafna, la Moyenne Tafna et la Basse Tafna. (Bouanani A., 2004)

Le bassin versant de la Tafna abrite plusieurs barrages, tels que le barrage de Hammam Boughrara, Béni Bahdel, Meffrouche, El Izdihar à Sidi Abdelli et le barrage de Sikkak, qui sont utilisés pour le stockage de l'eau, l'irrigation et l'approvisionnement en eau potable.

II.3 Les données disponibles

La base de données utilisée pour cette étude provient de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). Une étude du régime pluviométrique a été élaborée à partir de 16 stations pluviométriques réparties de façon plus ou moins homogène (figure I.1, tableau I.1). Elles répondent aux critères selon lesquels chaque station doit couvrir au moins cinq décennies ; les lacunes ne doivent pas contenir plus de trois années consécutives et moins de 20 % de lacunes sur la série totale à l'échelle mensuelle. À noter que 16 stations sur 25 remplissent ces conditions.

Tableau II.1 Liste de stations pluviométriques retenues.

Station	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Période d'observation
Beni Ouassine	-1,78	34,84	410	1953-2012
Sebdou	-1,33	34,65	875	1970-2015
Beni Bahdel Bge	-1,51	34,70	666	1939-2016
Khemis Ould Moussa	-1,56	34,63	920	1924-2015
Smala Sidi Medjahed	-1,64	34,78	360	1967-2016
Merchiche	-1,31	34,70	1250	1940-2016
Hammam Boughrara	-1,65	34,88	270	1969-2016
Sabra	-1,51	34,83	608	1914-2016
Chouly	-1,11	34,87	700	1956-2016
Meurbah	-1,17	34,75	1100	1940-2016
Ouled Mimoun	-1,04	34,90	705	1923-2016
Mefrouch Bge	-1,29	34,85	1110	1943-2014
Bensekran*	-1,21	35,08	260	1914-2006
Lalla Setti	-1,31	34,87	1020	1956-2016
Tlemcen	-1,33	34,87	830	1964-2016
Pierre du Chat	-1,45	35,14	80	1967-2016

* La station de Bensekran a été arrêtée en 2007.

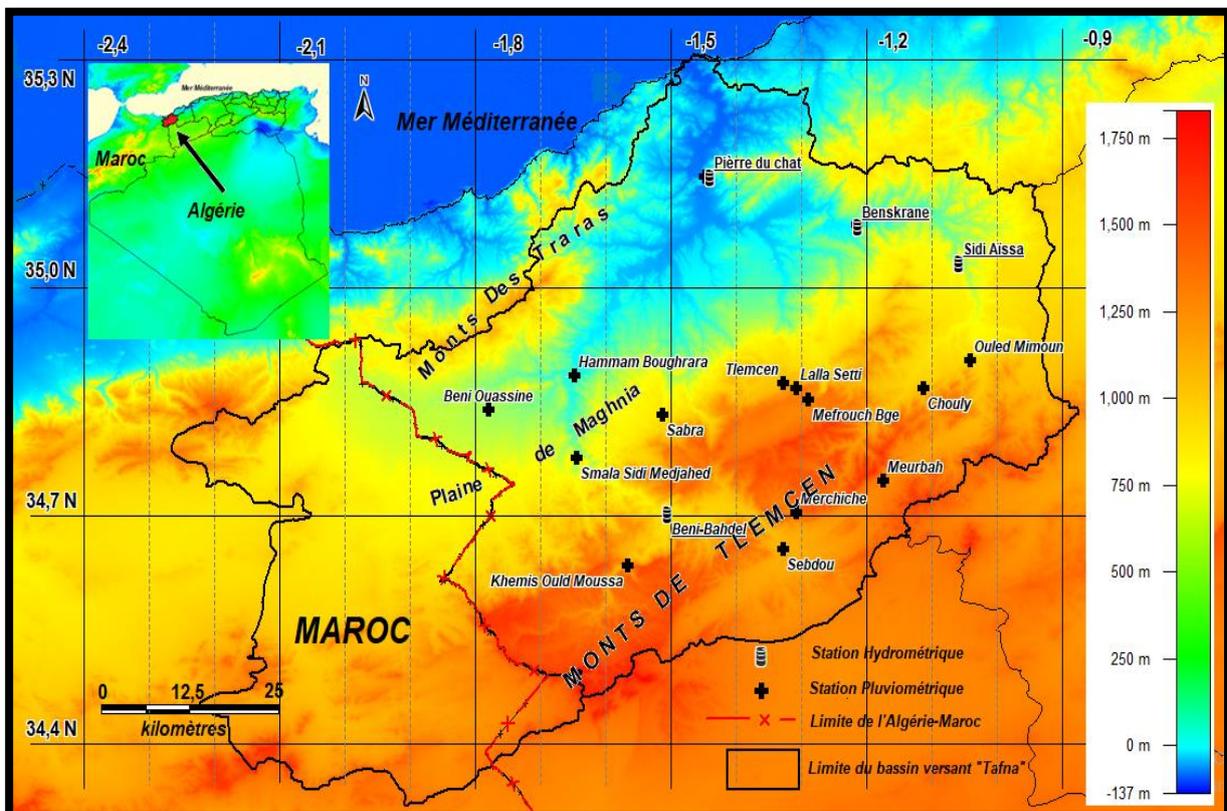
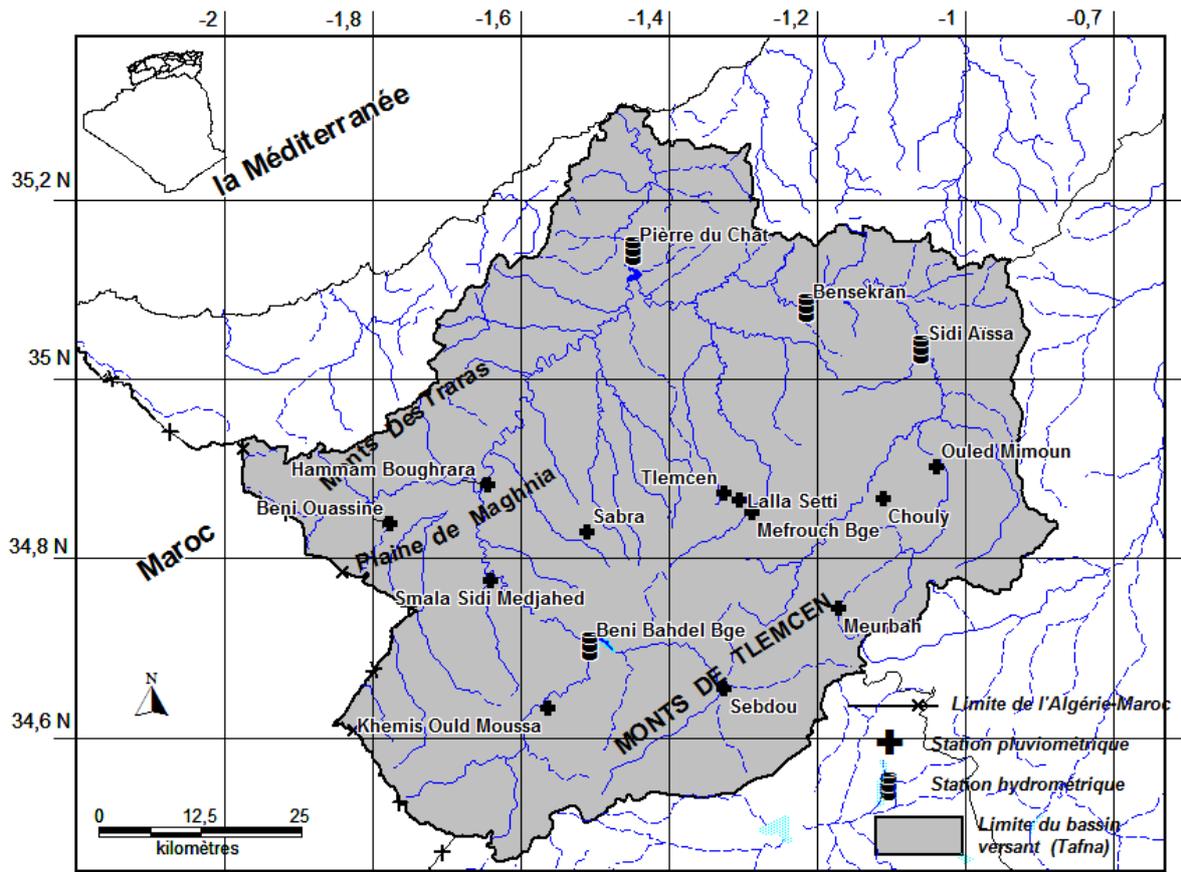


Figure II.1 Situation de la zone d'étude, le relief du bassin versant du Tafna et localisation des stations.

II.4 Le choix de la période d'étude

La plupart des stations en Algérie ont été arrêtées pendant la guerre, d'autres ont subi des modifications après 1962. Ceci a entraîné des problèmes de qualité des données, y compris des erreurs et des lacunes. D'autre part, un bon nombre de stations ont été installées lors de la restructuration du réseau pluviométrique algérien, ces séries considérées comme des séries récentes. Cela nous rend difficile de choisir une période d'étude commune caractérisée par l'antiquité et la modernité et nous sommes obligés de renoncer à des données anciennes très importantes ou des données récentes (Benstaali.I, 2007). Cette situation peut être frustrante, car elle limite la capacité de mener des analyses temporelles cohérentes et de comprendre les tendances à long terme.

Concernant cette étude, nous n'avons pas pu obtenir un nombre suffisant de données pluviométriques pour réaliser des traitements avant 1970. Pour cette raison et afin que les mesures soient les plus comparables entre elles, nous avons limité la période d'étude de 1970 à 2016. Il faut noter que ceci s'applique aux études qui nécessitent une comparaison entre les séries, par exemple le calcul des caractéristiques statistiques comme par exemple (la moyenne, l'écart type et le coefficient de variation...).

Sur la période 1970 à 2016, seulement la station de Beni Bahdel Bge offrent une série de 100 % d'observations et dix stations présentent un pourcentage d'observation de plus de 90 % (et cela signifie moins de 4 lacunes sur une période de 47 ans), mais 9 stations sur 25 présentent plus de 49 % de lacune (*figure II.2*), pour cette raison, nous nous en sommes dispensés après l'avoir utilisé dans le comblement des lacunes. Il est important de souligner que le tableau qui présente le nombre d'observation des séries pluviométriques annuelles de 1970 à 2016 apparaît en annexe A de cette thèse.

On peut extraire la période d'observation utilisant la figure II-3 qui présente la période d'observation de chaque station. Chaque colonne représente une des stations sélectionnées, la colonne bleue indique que la pluie est observée pour les 12 mois de l'année. La colonne blanche représente qu'il y a au moins une lacune dans cette année. On remarque que la couleur bleue apparaît en intensité entre 1970 et 2016.

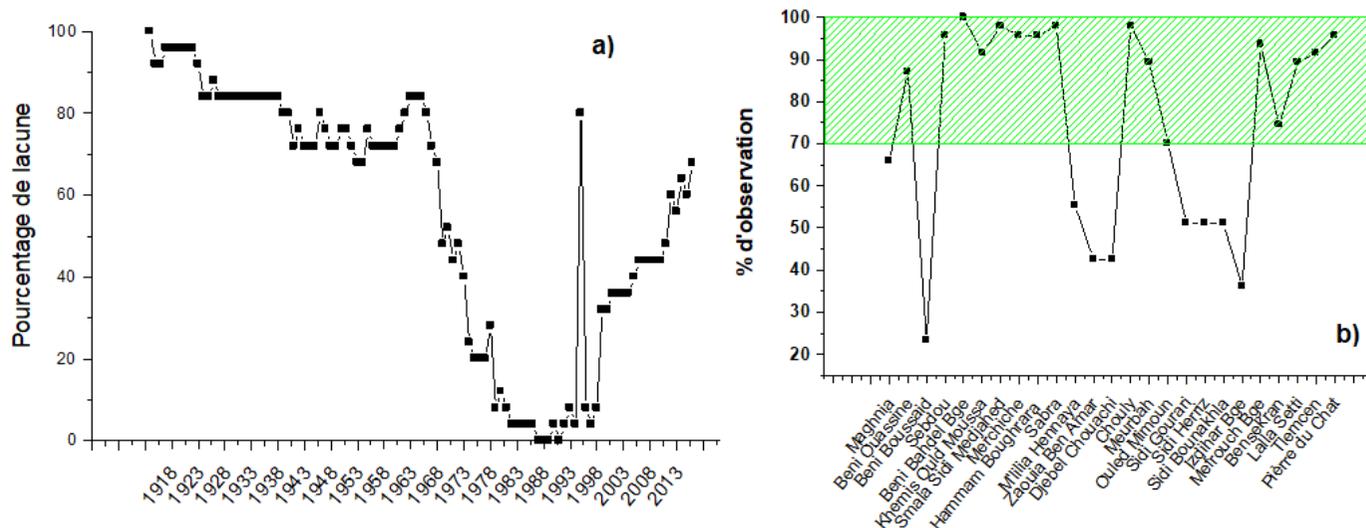


Figure II.2 a) Pourcentage de lacunes par année. b) Pourcentage d'observations dans la période de 1970 à 2016.

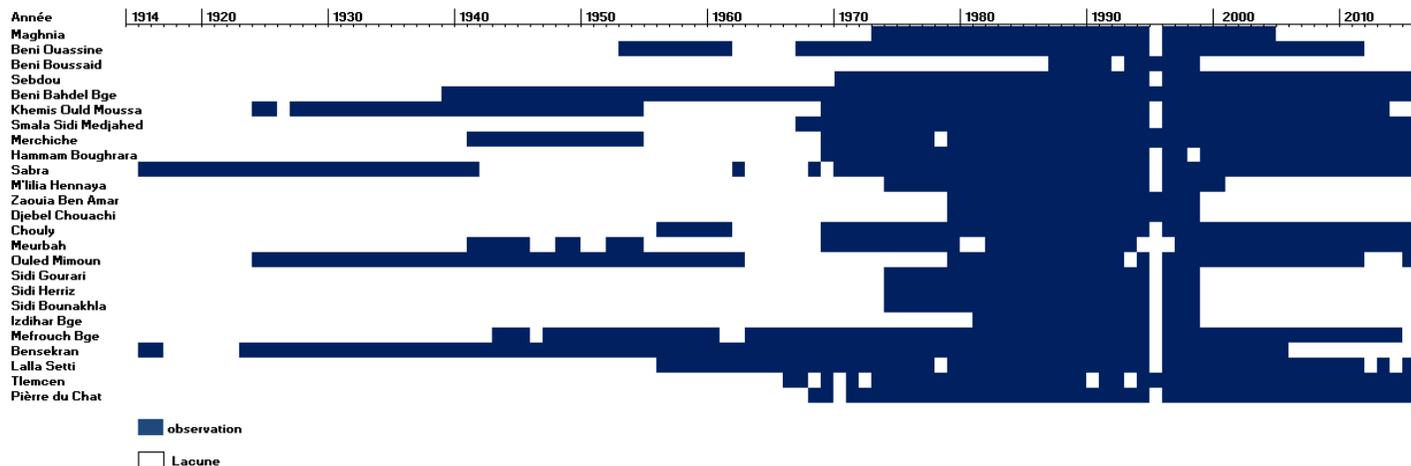


Figure II.3 Période d'observation des stations pluviométriques.

II.5 Critiques des données

II.5.1 Contrôle initial et reconstitution des données manquantes

La critique et le contrôle de la qualité des données hydrologiques sont des traitements qui doivent être effectués par l'hydrologue pour s'assurer de la fiabilité des données climatologiques. Ces traitements peuvent consister en un simple traitement primaire, comme ils peuvent consister en un comblement de données manquantes, en une extension de séries courtes ou en une homogénéisation des séries hétérogènes par le biais de méthodes statistiques, numériques ou graphiques.

Une série climatologique est considérée comme homogène si aucun élément perturbateur ne l'a affectée, c'est-à-dire si la loi de distribution de l'élément mesuré (considéré comme une variable aléatoire) n'a pas changé pendant toute la période étudiée (Lamarque P. & Jourdain S., 1994). Les hétérogénéités peuvent être d'origine :

- Climatique (tendance), se traduisant alors de manière progressive ;
- Artificielle (principalement par déplacements successifs des instruments), apparaissant dans ce cas par des erreurs systématiques sur les mesures qui affectent tous les relevés à partir d'un moment précis. On parle alors de rupture d'homogénéité, validée en principe par le fichier historique des postes. Ce sont ces hétérogénéités que l'on cherche à détecter dans cette partie.

II.5.1.1 Comblement des lacunes dans les séries pluviométriques

Toute étude climatologique nécessite des séries de données continues et surtout de longue durée. Un manque de données successives provoque des discontinuités dans la chronologie d'une série et rend les interprétations difficiles. De tous les problèmes qui se posent aux climatologues, ce sont ceux relatifs aux données manquantes. Car il est impossible de reconstituer des termes individuels exacts de la série.

Il est important de signaler que les séries de données climatologiques sont souvent incomplètes. Le manque de données dans une station peut être dû à une panne de l'appareil, à l'absence de l'observateur, à l'arrêt de la station...

Dans des cas simples, on peut procéder au comblement des lacunes par :

- Remplacer la pluie manquante par celle observée à la station la plus proche. Il faut vérifier la position en altitude des deux stations.

- Estimer la pluie manquante par la moyenne des pluies des stations voisines. Cette méthode est fiable lorsque les précipitations ne sont pas très irrégulières d'un poste à l'autre. Une différence de 10% est tolérable.
- D'autres méthodes plus élaborées dont la méthode basée sur la régression linéaire entre données de plusieurs stations régionales, la méthode d'IDWA (Inverse Distance Weighted Averaging) et méthode basée sur l'Analyse en Composantes Principales (ACP) développée par (Laborde & Mouhous, 1998).

Pour une meilleure répartition spatiale, nous avons procédé au comblement des lacunes des données manquantes en utilisant la technique développée par Laborde & Mouhous, 1998. Elle est basée sur l'analyse en composantes principales en utilisant le logiciel HYDROLAB. Cette technique suppose que la distribution statistique soit gaussienne (ou tout au moins pas trop éloignée de la normalité).

L'ACP est une méthode statistique efficace fréquemment employée afin de combler les lacunes dans les séries de données pluviométriques. Grâce à cette technique, il est possible de diminuer la taille des données tout en préservant l'essentiel de l'information, ce qui la rend très efficace pour estimer les données manquantes.

II.5.1.2 Le contrôle graphique des séries pluviométriques

Il est possible de repérer des anomalies accidentelles en effectuant un contrôle attentif des bordereaux et des fichiers de données. Il est toujours indispensable. Cependant, il sera souvent nécessaire d'utiliser des méthodes graphiques et numériques plus avancées ainsi que des tests statistiques afin de détecter l'existence d'erreurs systématiques et de vérifier la fiabilité et l'homogénéité des données.

II.5.1.2.1 La méthode de simple masse

La méthode de simple masse, également connue sous le nom de méthode de cumul, est une méthode simple mais efficace pour détecter les changements dans les séries temporelles de données pluviométriques enregistrées à une station météorologique.

Elle consiste à tracer les valeurs cumulées des précipitations en fonction des années. La linéarité du graphique est un indice d'homogénéité. L'hétérogénéité de la série se traduit par un changement de pente indiquant l'année de l'hétérogénéité.

II.5.1.2.2 La méthode du double cumul

Il s'agit de tracer les données pluviométriques cumulées à la station étudiée par rapport aux données cumulées de la station de référence (à condition que la station de référence soit homogène et bien corrélée avec la station à tester). Lorsque les séries sont homogènes, les points sont sensiblement alignés sur une droite. Les cassures dans la pente de la droite donnent les dates probables de rupture d'homogénéité.

II.5.1.2.3 La méthode des résidus (Bois, 1972)

Dans le cumul des résidus, la régression entre la série étudiée et la série de référence est calculée en premier lieu. La série des résidus peut donc être formée (le résidu ε_i représentant l'écart entre la valeur vraie et la valeur estimée par régression). La somme de ces résidus est ensuite calculée et représentée sur un graphe en fonction du temps. En cas d'homogénéité de la série testée, la répartition de ces résidus est totalement aléatoire.

En revanche, lorsque la série est hétérogène, on observe des portions qui sont anormalement croissantes ou décroissantes dans la courbe. Il est possible de conclure qu'une hétérogénéité est détectée à la cassure de la courbe lorsque celle-ci sort d'une ellipse de significativité définie pour un intervalle de confiance donné (Bois, 1986). P Selon Bois, la courbe de contrôle est une équation elliptique :

$$y_i = \pm t_{\alpha/2} \cdot S_y \cdot \sqrt{1 - r^2} \cdot \sqrt{\frac{i(n-i)}{n-1}}$$

Où : $[S_y \cdot \sqrt{1 - r^2} \cdot \sqrt{i(n-i)/n-1}]$ est la variance des résidus.

Ces résidus étant déterminés par la relation suivante :

$$\varepsilon_i = y_i - \bar{y} - r \cdot \frac{S_y}{S_x} (x_i - \bar{x})$$

- ε_i : Est donc la différence entre la valeur observée et la valeur donnée par la régression linéaire de y en x .
- $t_{\alpha/2}$: Variable de Student
- S_y : L'écart type de y
- S_x : L'écart type de x
- \bar{y} : Moyenne de y

- \bar{x} : Moyenne de x
- r : Coefficient de corrélation entre les deux variables.

Dans le but de mener à bien cette étape, nous avons divisé les stations sélectionnées en quatre groupes. Dans chacun de ces groupes, nous avons sélectionné une station de référence qui présente les deux caractéristiques suivantes : elle est homogène et elle est bien corrélée avec la série étudiée. S'il est aisé de trouver un poste proche présentant une corrélation élevée pour chaque poste à tester, il est cependant difficile de déterminer l'homogénéité interne de chaque poste.

La méthode utilisée pour vérifier l'homogénéité interne est la méthode simple cumul. Examinant la linéarité des graphiques de la figure II.4. Si la série de données est homogène, c'est-à-dire qu'elle présente une tendance constante au fil du temps, le graphique sera approximativement linéaire, avec une pente constante. C'est ce qui a été montré pour les stations suivantes : les stations de Sabra, Beni Bahdel Bge, Chouly et Bensekran. De ce fait, nous avons choisi ces dernières stations comme station de référence en raison qu'elles présentent une longue durée, un nombre de lacunes minimal et de leur homogénéité.

En résumé, les stations mentionnées sont considérées comme présentant des séries de données pluviométriques fiables et cohérentes, ce qui en fait des choix appropriés comme stations de référence pour notre étude.

La méthode des résidus est utilisée pour la vérification de l'homogénéité relative des stations à tester. Cette méthode est appliquée à toutes les stations à l'échelle annuelle, souligne l'existence d'une anomalie exceptant les deux stations Hammam Bouhrara et Tlemcen (*tableau II.2*), le choix des stations de référence est basé sur une bonne corrélation significative entre les stations à tester et les stations de référence.

La méthode de correction des hétérogénéités consiste à calculer une régression linéaire entre la série étudiée et la série de référence. Une fois les séries corrigées, on teste leur homogénéité comme précédemment. Les figures II.4 à II.16 représentent un exemple d'application de la méthode de simple cumul et de la méthode des résidus à l'échelle annuelle. Le reste sera regroupé dans l'Annexe A.

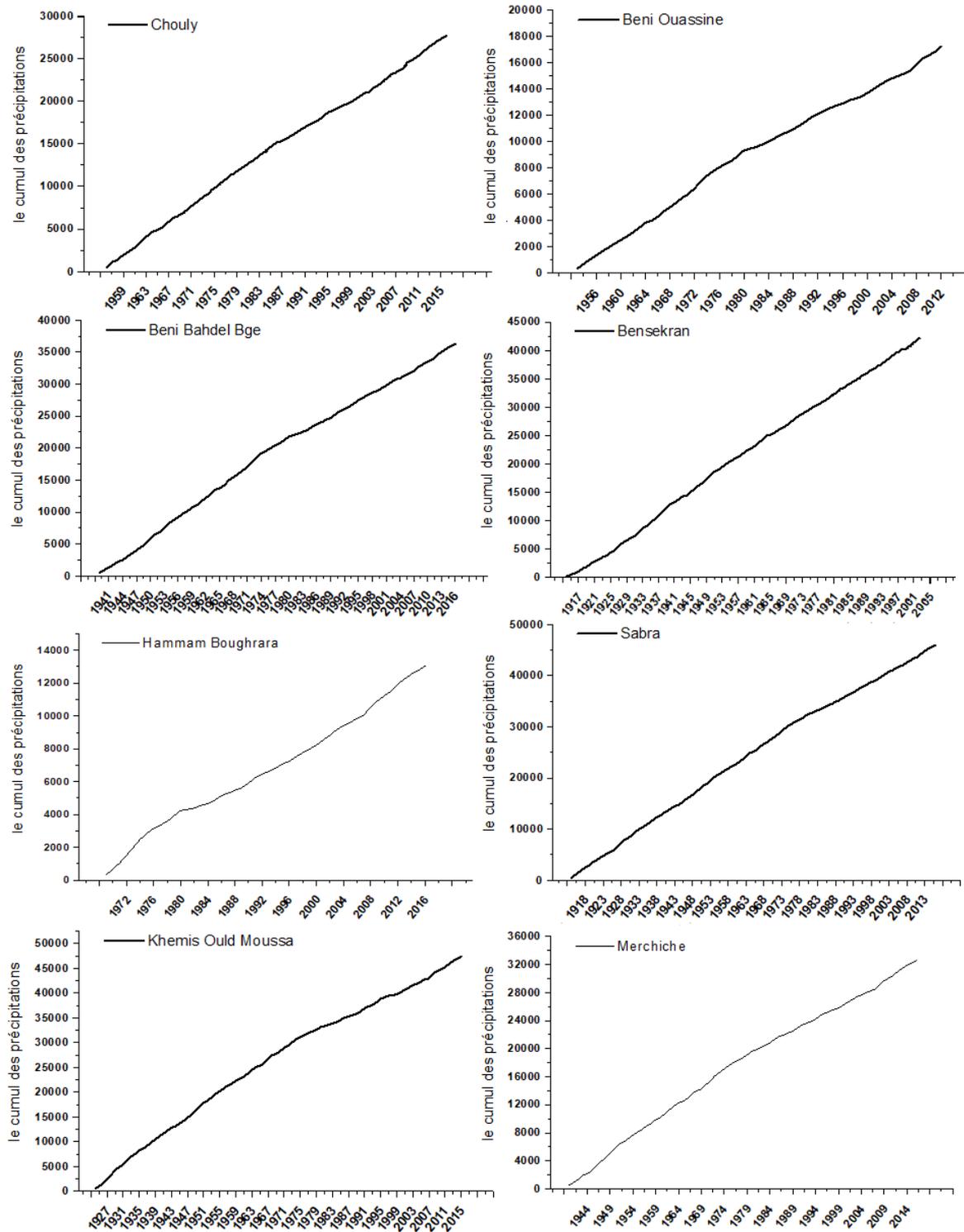


Figure II.4 Application de la méthode de simple cumul aux séries pluviométriques annuelles.

Tableau II.2 Détection des anomalies annuelles des stations par la méthode de Bois.

N°	Station à tester	Station de Référence	Coefficient de corrélation	Période d'étude	Les années	Les données de base	Les données corrigées	Remarque
1	Beni Ouassine	Sabra	0,75	1953-2012	1961	60,6	49,0	Hétérogène
2	Smala Sidi Medjahed		0,90	1967-2016	1988	177,3	92,4	Hétérogène
3	Hammam Bouhrara		0,84	1969-2016	/	/	/	Homogène
4	Tlemcen		0,65	1964-2016	/	/	/	Homogène
5	Khemis Ould Moussa	Beni Bahdel Bge	0,84	1939-2015	1940-1998	689,8-114,4	731,8-99,9	Hétérogène
6	Sebdou		0,83	1970-2016	1995	656,7	497,4	Hétérogène
7	Merchiche		0,79	1940-2016	1946,1969	694,8-177,6	611,0-188,8	Hétérogène
8	Meurbah	Chouly	0,79	1956-2016	1961,2009	633,6-473,8	577,0-450,7	Hétérogène
9	Ouled Mimoun		0,85	1956-2016	1970,2009	574,1-524,2	466,9-431,4	Hétérogène
10	Mefrouch Bge		0,77	1956-2014	2009,2012	609,8-1144,9	806,5-1388,0	Hétérogène
11	Lalla Setti		0,77	1956-2016	2009	581,3	706,5	Hétérogène
12	Pierre du Chat	Bensekran	0,82	1967-2016	1972	594,6	471,8	Hétérogène

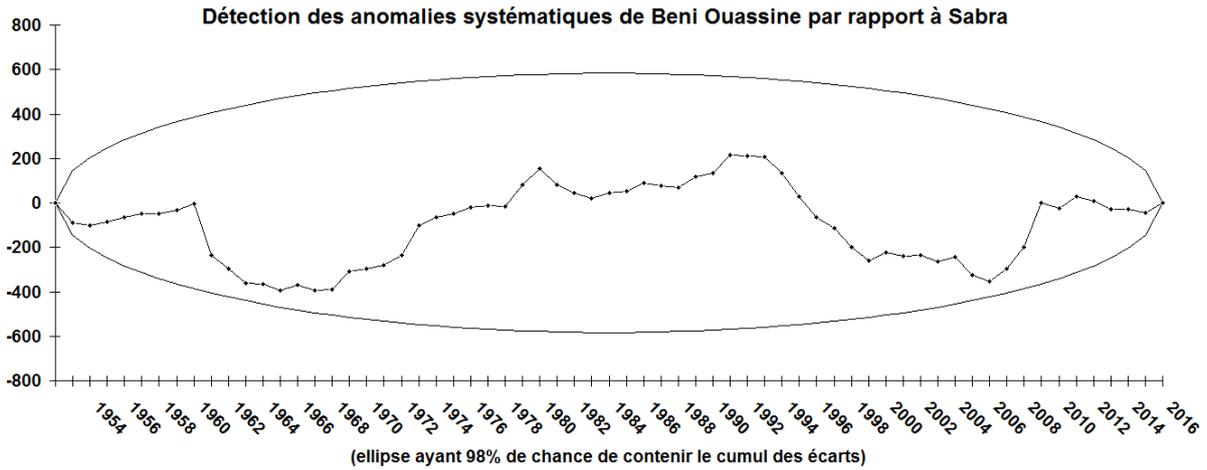


Figure II.5 Détection des anomalies annuelles de Bani Ouassine par rapport à Sabra.

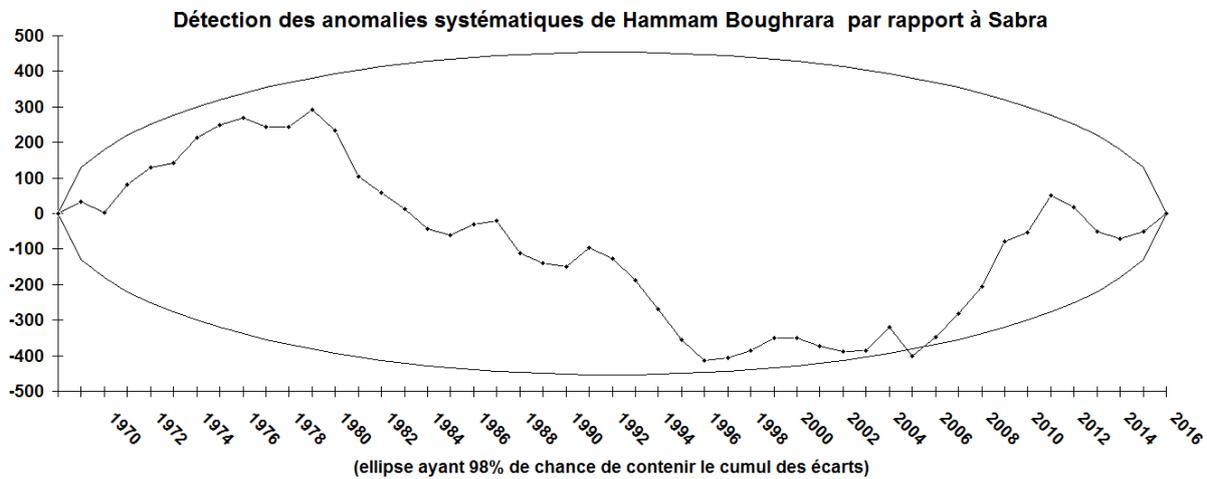


Figure II.6 Détection des anomalies annuelles de Hammam Boughrara par rapport à Sabra.

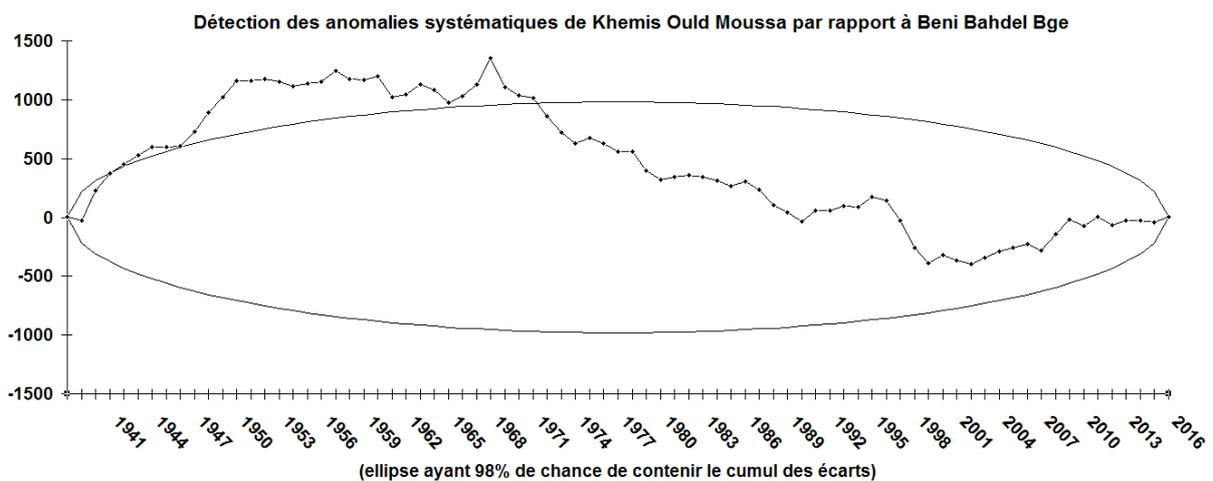


Figure II.7 Détection des anomalies annuelles de Khemis Ould Moussa par rapport à Beni Bahdel Bge.

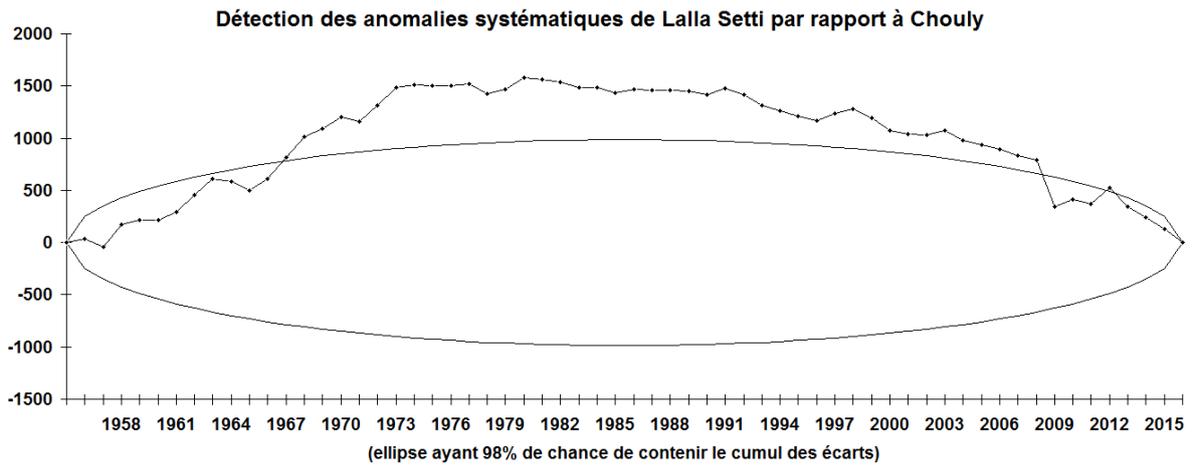


Figure II.8 Détection des anomalies annuelles de Lalla Setti par rapport à Chouly.

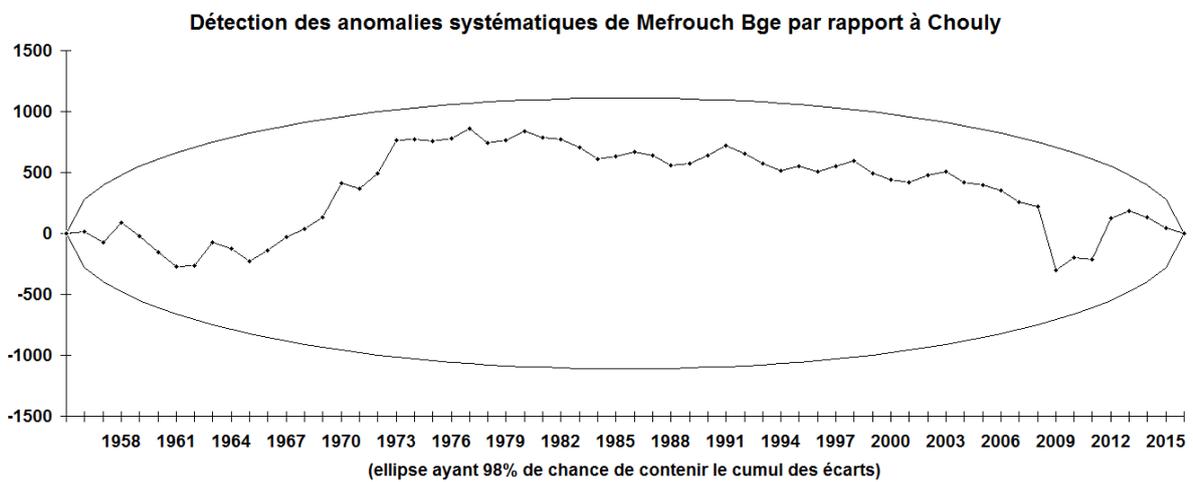


Figure II.9 Détection des anomalies annuelles de Mefrouche Bge par rapport à Chouly.

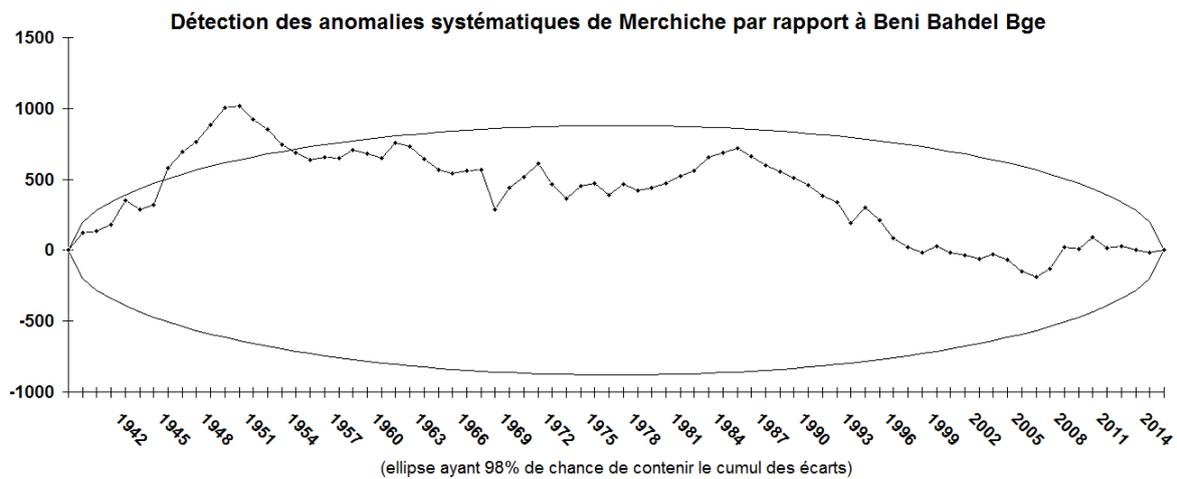


Figure II.10 Détection des anomalies annuelles de Merchiche par rapport à Beni Bahdel Bge.

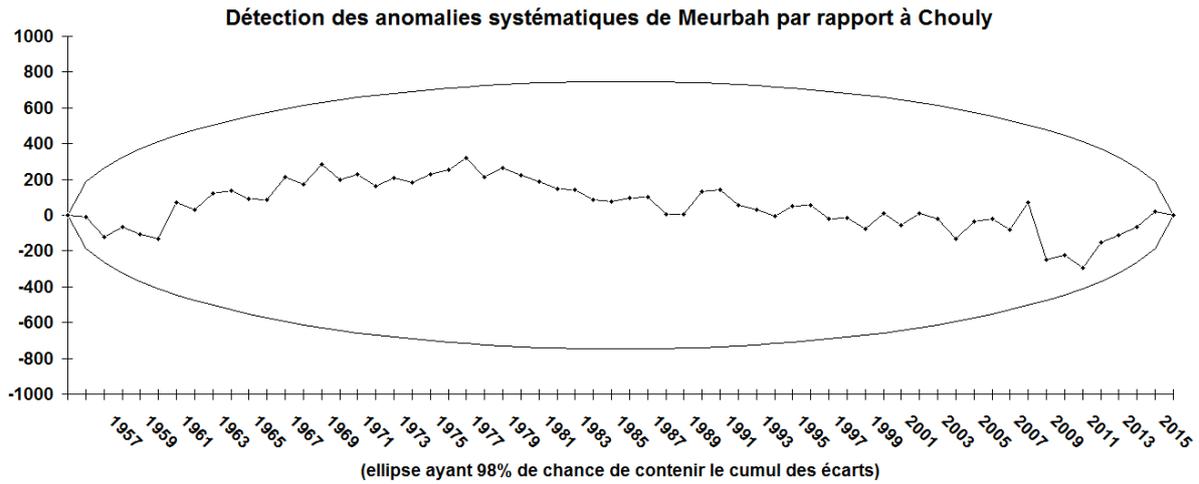


Figure II. 11 Détection des anomalies annuelles de Meurbah par rapport à Chouly.

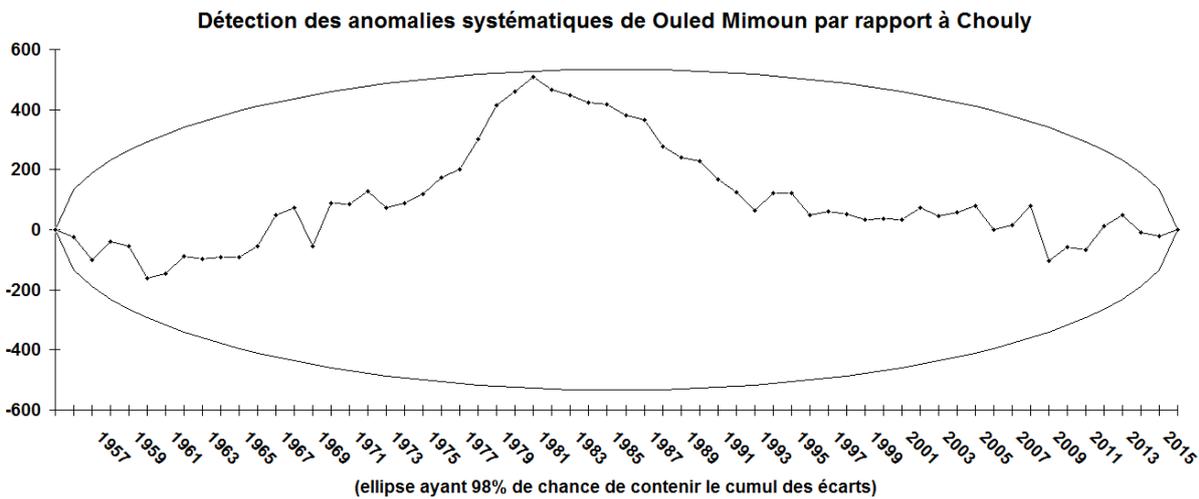


Figure II.12 Détection des anomalies annuelles de Mahdiaontf Ouled Mimoun par rapport à Chouly.

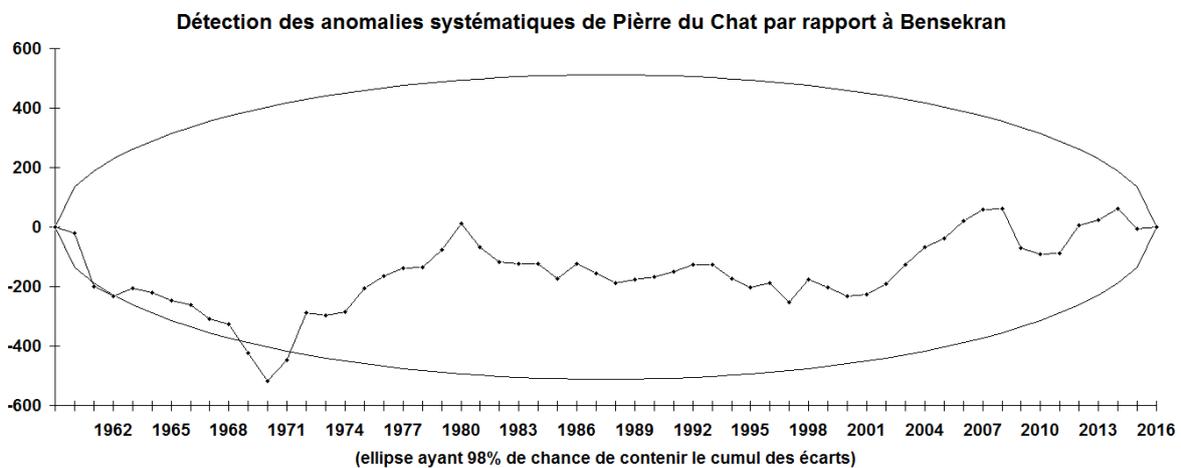


Figure II.13 Détection des anomalies annuelles de Pierre du Chat par rapport à Bensekran.

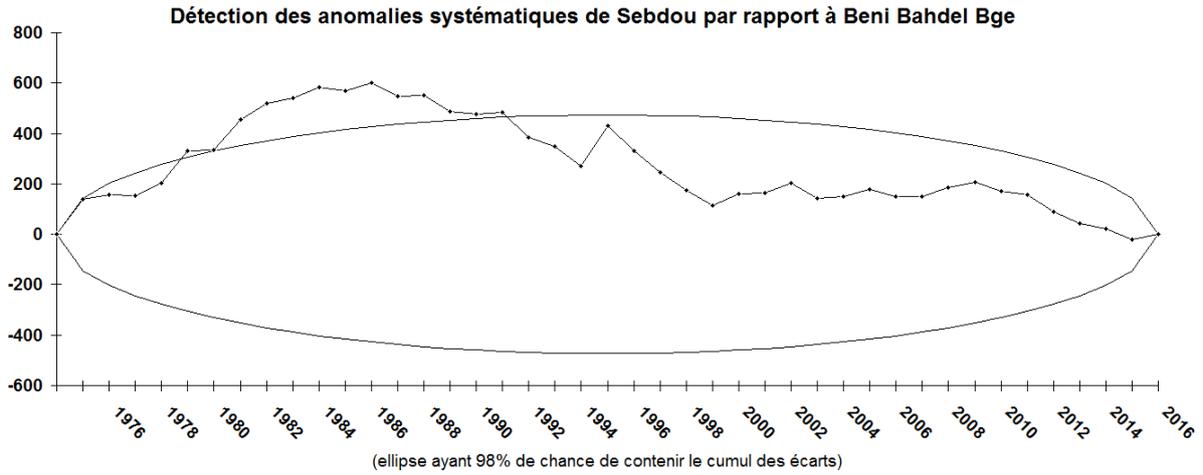


Figure II.14 Détection des anomalies annuelles de Sebdou par rapport à Beni Bahdel Bge.

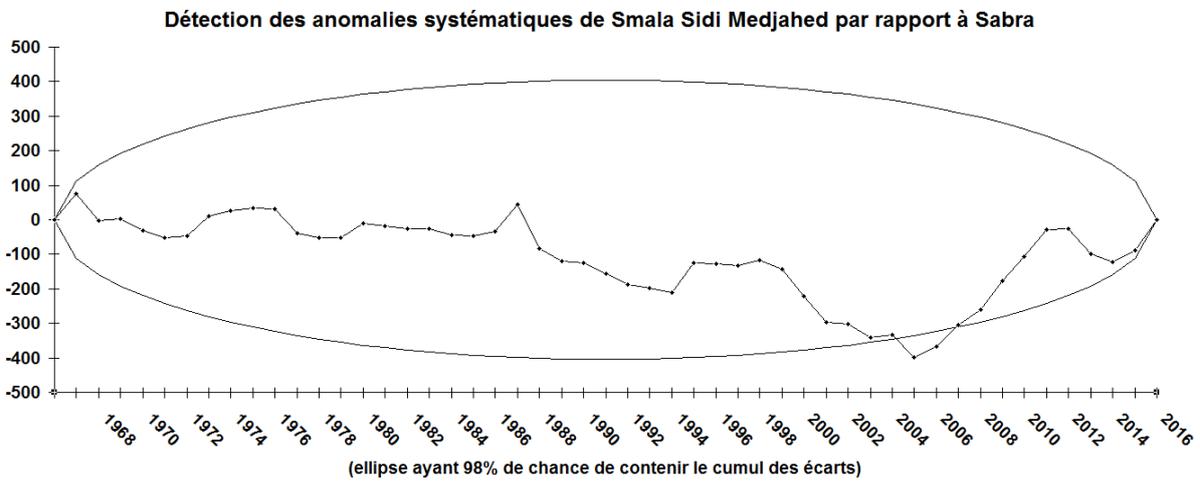


Figure II.15 Détection des anomalies annuelles de Smala Sidi Medjahed par rapport à Sabra.

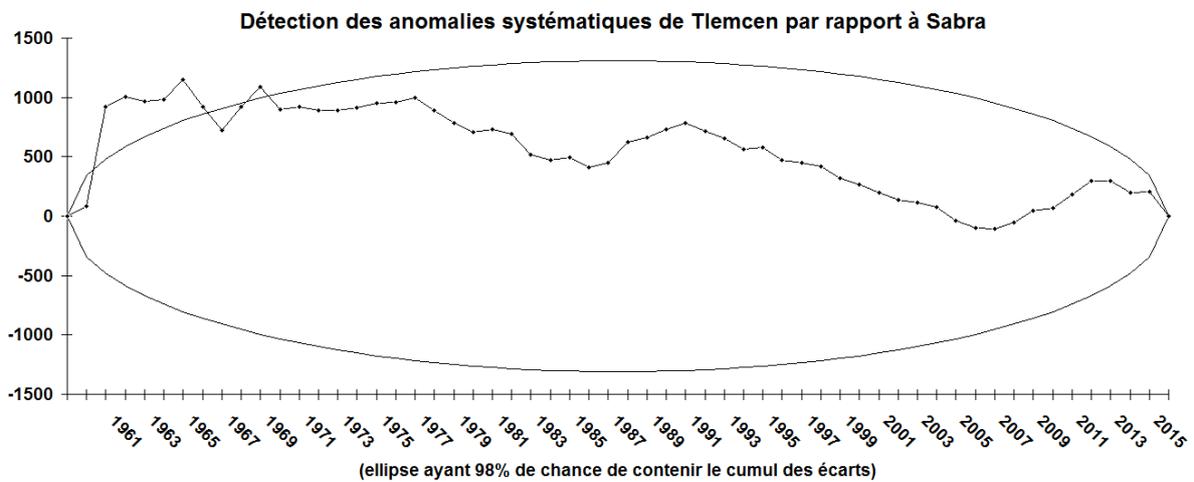


Figure II.16 Détection des anomalies annuelles de Tlemcen par rapport à Sabra.

II.6 Test de la normalité des séries pluviométriques annuelles

Cette étape décrit comment vérifier la normalité d'une série en utilisant le graphique de la courbe normale (méthode visuelle) et le test de Kolmogorov-Smirnov.

Notez que pour l'estimation visuelle, les points ne sont pas rigoureusement alignés. Un simple coup d'œil sur le graphique permet de se rendre compte si l'hypothèse de normalité est valable. Mais cette méthode est très intuitive, elle ne tient aucun compte du nombre de mesures dont on dispose. Il est normal qu'avec 40 mesures, la dispersion soit grande même si la distribution parente est normale (R. Tomassone, 1993).

Dans plusieurs situations, il faut évaluer la normalité d'une distribution, ou du moins jusqu'à quel point a-t-elle l'allure d'une courbe gaussienne. Au-delà des estimations visuelles ou intuitives, il existe un test de Kolmogorov-Smirnov. L'exigence pour considérer une distribution normale est celle-ci : la valeur de d_{\max} est inférieure à la valeur critique.

II.6.1 Ajustement graphique d'une loi normale : La droite de Henry

L'intérêt principal de la droite de Henry est de vérifier visuellement l'ajustement d'une série de données à une courbe normale. Cet ajustement utilise un papier dit « gausso-arithmétique » qui permet de rendre linéaire la courbe cumulative de la loi normale et de fournir d'autres informations très rapidement telles que la moyenne, la déviation standard.

La droite de Henry correspond aux fréquences théoriques cumulées tirées de la table de la Loi Normale. Les points indiquent les valeurs des fréquences réelles cumulées pour les différentes valeurs de la variable. Si la distribution des valeurs réelles de la variable était parfaitement « normale », tous les points se trouveraient sur la droite de Henry.

Nous avons reporté sur les figures II.17 à II.22 les probabilités empiriques au non-dépassement résultant de l'ajustement à une loi normale des données empiriques (droite de Henry). Il nous apparaît que l'ajustement est satisfaisant, sauf pour les valeurs extrêmes. Pour ces valeurs, le décrochage de la loi normale se produit pour une probabilité au non-dépassement de l'ordre de 0,99 à la station de Chouly, Sebdou et Ben Ouassine (soit une période de retour de 100 ans). Au-delà de cette valeur, les points représentatifs se situent systématiquement et très nettement en dessous de la droite représentant l'ajustement normal.

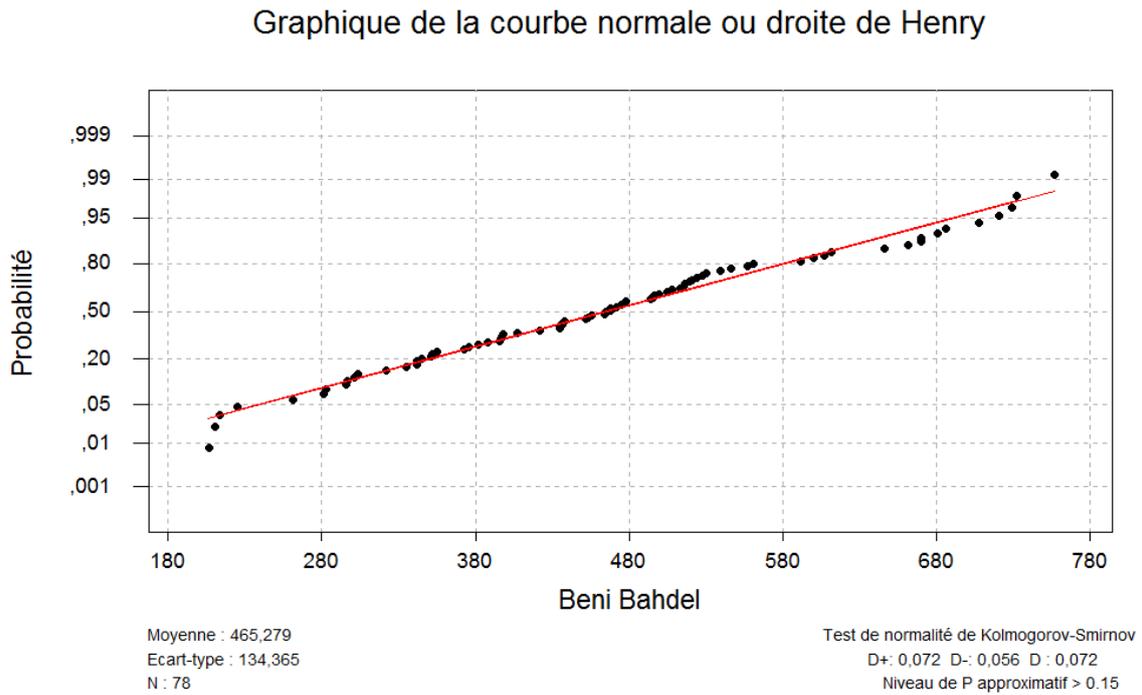


Figure II.17 Ajustement à une loi normale de la série pluviométrique de Beni Bahdel
(Droite de Henry)

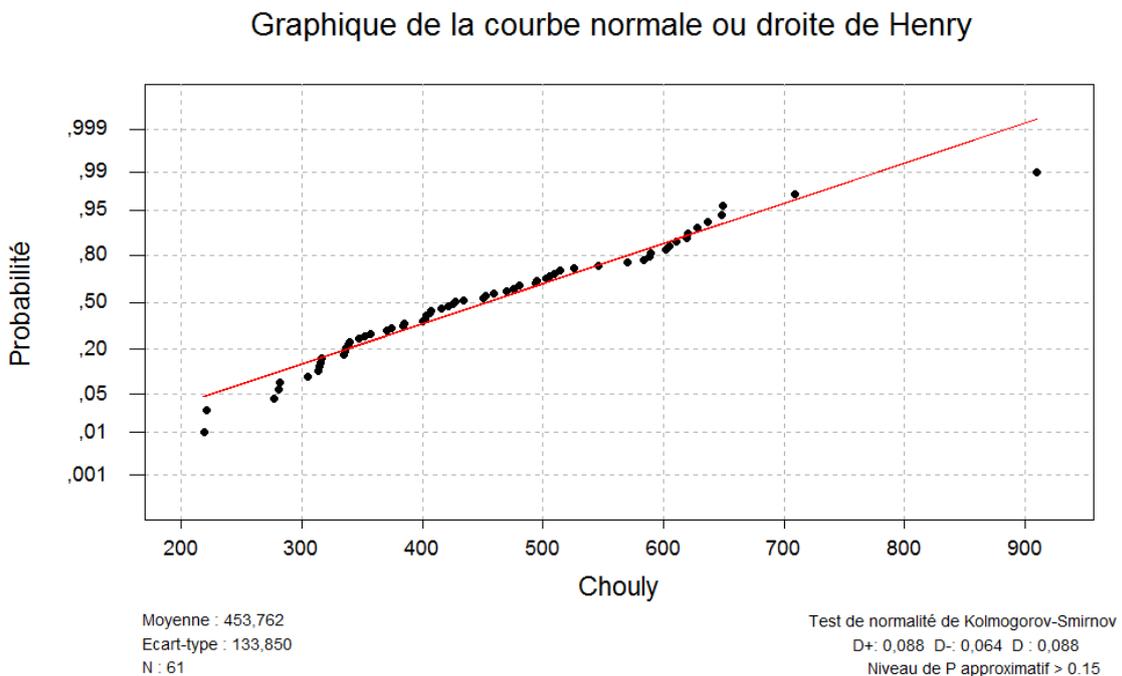


Figure II.18 Ajustement à une loi normale de la série pluviométrique de Chouly
(Droite de Henry)

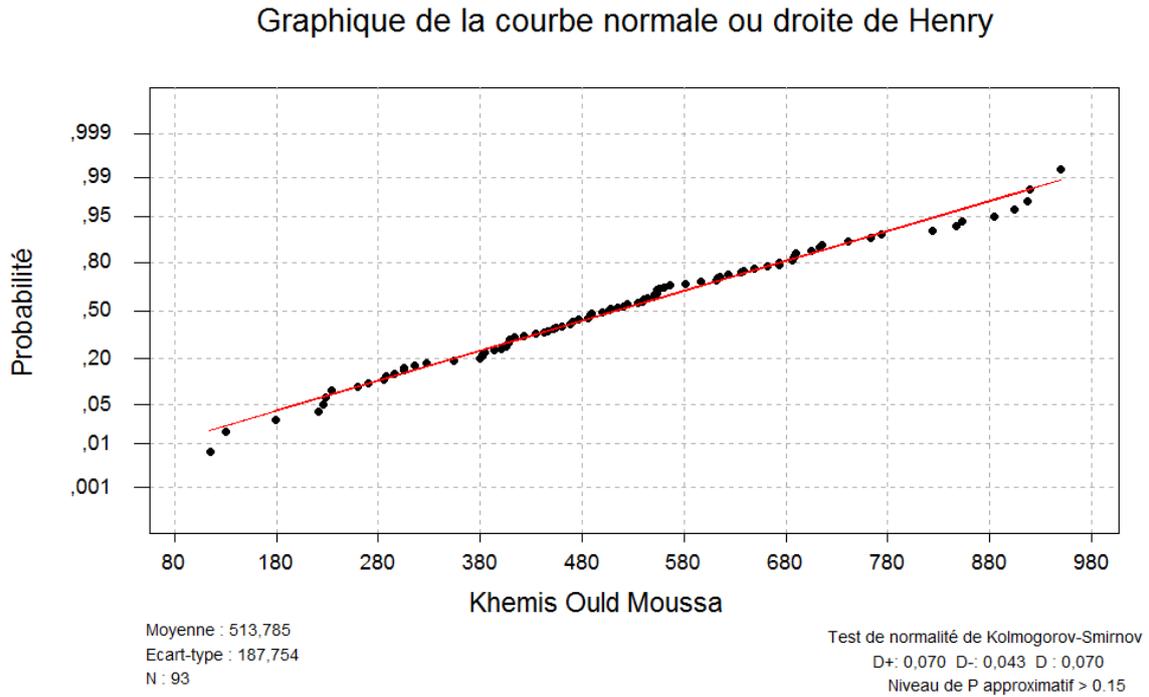


Figure II.19 Ajustement à une loi normale de la série pluviométrique de Khemis Ould Moussa (Droite de Henry)

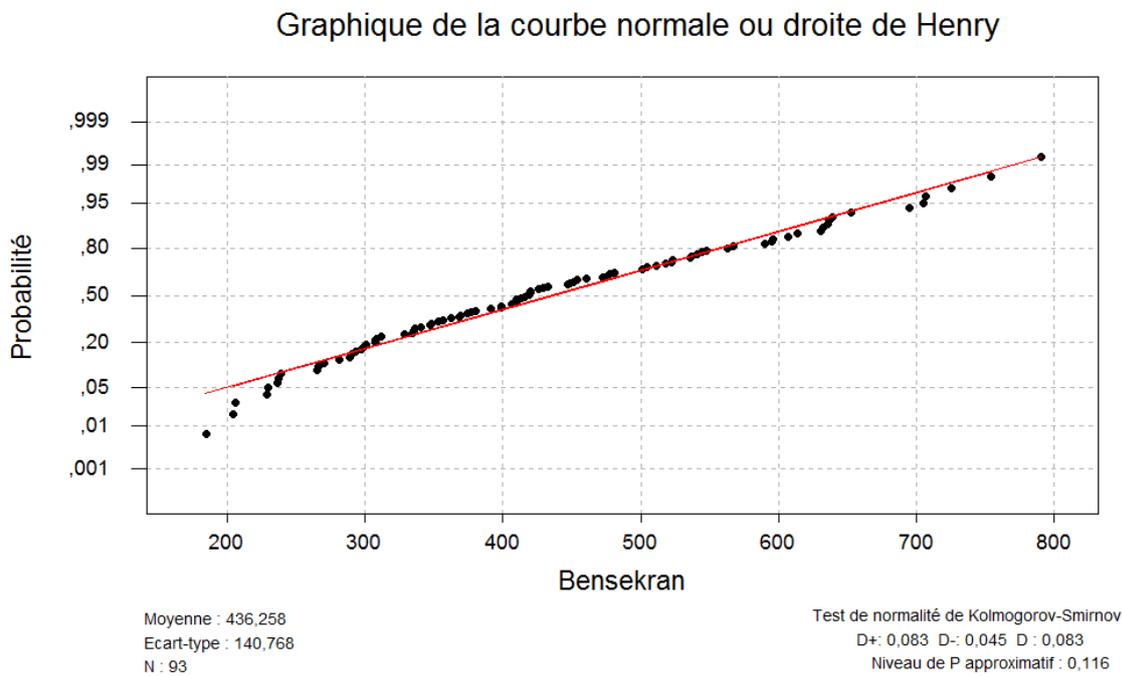


Figure II.20 Ajustement à une loi normale de la série pluviométrique de Bensekran (Droite de Henry)

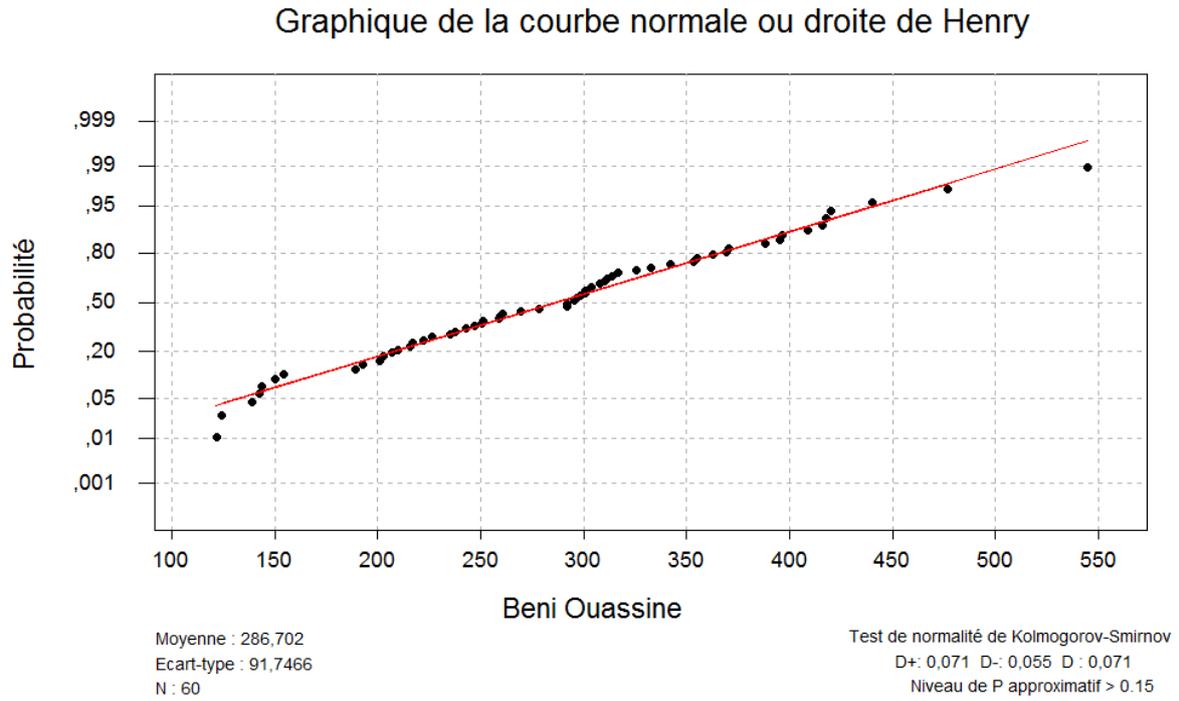


Figure II.21 Ajustement à une loi normale de la série pluviométrique de Beni Ouassine
(Droite de Henry)

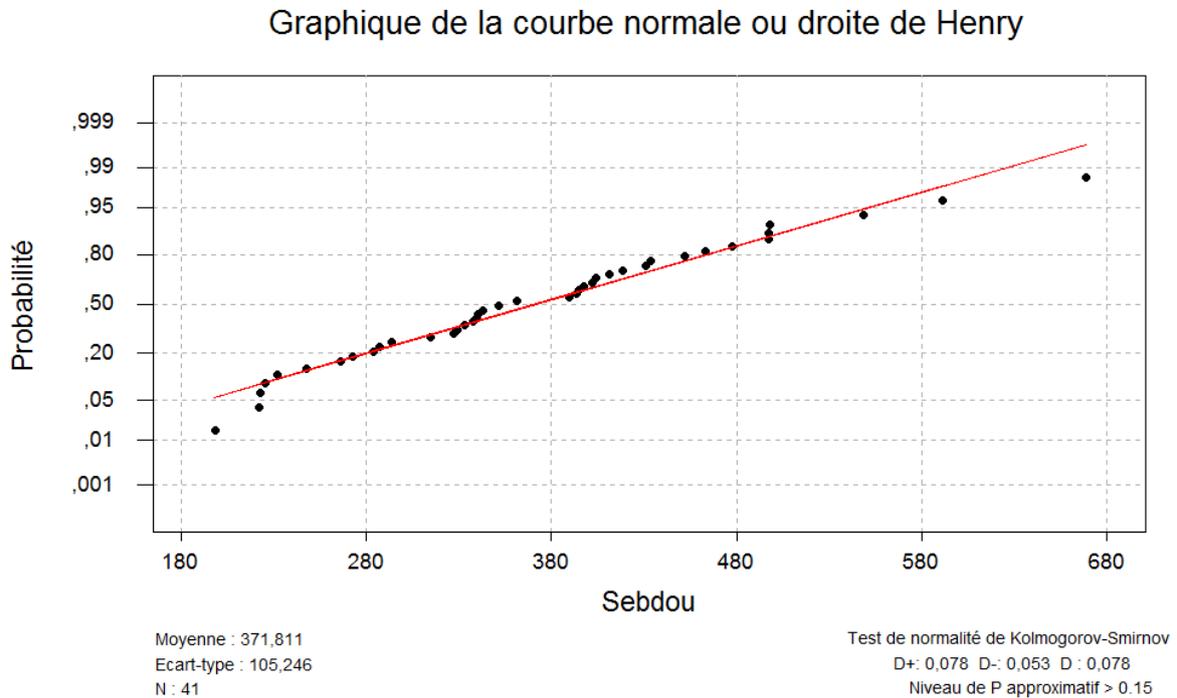


Figure II.22 Ajustement à une loi normale de la série pluviométrique de Sebdu
(Droite de Henry)

II.6.2 Test de normalité (Test de Kolmogorov-Smirnov)

L'estimation visuelle, décrite dans la section précédente, n'est généralement pas fiable. Il est possible d'utiliser un test de significativité comparant la distribution de l'échantillon à une distribution normale afin de déterminer si les données montrent ou non un écart important par rapport à la distribution normale. Il existe plusieurs méthodes pour évaluer la normalité, notamment le test de normalité de Kolmogorov-Smirnov (K-S).

L'objectif de ce test est de vérifier statistiquement si la distribution des données d'observation est similaire à certains modèles de distribution connus. Ce test est basé sur la différence entre la courbe de fréquence cumulative d'observation et la courbe de fréquence théorique d'espérance (Xu, 2001).

Tout d'abord, déterminer la fréquence cumulée de la distribution théorique $Fe(x)$ et la fréquence cumulée en fonction des données, c'est-à-dire, $Fo(x)$:

$$Fo(x) = \frac{k}{N}$$

où k est le nombre d'observations inférieur ou égal à x et N le nombre total d'observations. Ensuite calculer l'écart maximal D :

$$D = \max|Fe(x) - Fo(x)|$$

Étant donné l'hypothèse à tester comme:

$$H_0: Fe(x) = Fo(x), H_1: Fe(x) \neq Fo(x)$$

L'hypothèse de l'observation suivant la distribution décidée est rejetée si $D \geq D\alpha(N)$, où $D\alpha(N)$ est la valeur critique et α le niveau de signification.

Afin d'avoir une mesure de l'adéquation d'une loi de probabilité à un ensemble d'observations, on a utilisé le test de Kolmogorov-Smirnov. À chaque fois, la distance D_{max} proche de zéro est favorable à l'hypothèse nulle, et que plus D_{max} est élevée, plus on est tenté de rejeter H_0 .

Le tableau II.3 présente les résultats du test de Kolmogorov-Smirnov pour évaluer la normalité des séries pluviométriques annuelles de plusieurs stations du bassin versant étudié.

Il indique la période d'observation, la taille de l'échantillon (N), la valeur maximale de la statistique du test (D_{max}) et la valeur critique ($D_{\alpha}(N)$) pour différents niveaux de significativité (α).

Pour chaque station, si D_{max} est inférieur à $D_{\alpha}(N)$ pour un certain seuil α , l'hypothèse de normalité est acceptée à ce seuil. Les niveaux de signification (α) correspondent à la probabilité de rejeter l'hypothèse nulle qu'elle est vraie (erreur de type I).

Les résultats montrent que toutes les stations ont des valeurs de D_{max} inférieures aux valeurs critiques à des niveaux de significativité (1%, 5%, 10% et 20%). Cela signifie que l'hypothèse de normalité est acceptée pour toutes les stations.

Par exemple, la station de Beni Bahdel Bge a un degré de signification $\alpha = 0,01$ (1%) et $N=77$ on a :

$$\begin{cases} p = 0,19 \text{ à } \alpha = 0,01 \\ D_{max} = 0,072 \end{cases} \Rightarrow D_{max} < D_{0,01}(77)$$

$$\Rightarrow 0,072 < 0,18$$

\Rightarrow l'hypothèse de normalité est acceptée.

Tableau II. 3 Test de la normalité des différentes stations pluviométriques annuelles.

Station	N	Période d'observation	Test de Kolmogorov-Smirnov					
			Dmax	D _{N,α}	α			
					0,01 1%	0,05 5%	0,1 10%	0,2 20%
Beni Ouassine	59	1953-2012	0,071	$\alpha > 0,20$	0,21	0,17	0,16	0,14
Sebdou	46	1970-2015	0,078	$\alpha > 0,20$	0,24	0,20	0,18	0,15
Beni Bahdel Bge	77	1939-2016	0,072	$\alpha > 0,20$	0,18	0,15	0,14	0,12
Khemis Ould Moussa	91	1924-2015	0,069	$\alpha > 0,20$	0,17	0,14	0,13	0,11
Smala Sidi Medjahed	49	1967-2016	0,148	$\alpha > 0,20$	0,23	0,19	0,17	0,15
Merchiche	76	1940-2016	0,07	$\alpha > 0,20$	0,18	0,15	0,14	0,12
Hammam Boughrara	47	1969-2016	0,085	$\alpha > 0,20$	0,23	0,19	0,17	0,15
Sabra	102	1914-2016	0,057	$\alpha > 0,20$	0,16	0,13	0,12	0,11
Chouly	60	1956-2016	0,088	$\alpha > 0,20$	0,21	0,17	0,16	0,14
Meurbah	76	1940-2016	0,084	$\alpha > 0,20$	0,18	0,15	0,14	0,12
Ouled Mimoun	93	1923-2016	0,096	$\alpha > 0,20$	0,17	0,14	0,13	0,11
Mefrouch Bge	71	1943-2014	0,072	$\alpha > 0,20$	0,19	0,16	0,14	0,12
Bensekran	92	1914-2006	0,084	$\alpha > 0,20$	0,17	0,14	0,13	0,11
Lalla Setti	60	1956-2016	0,087	$\alpha > 0,20$	0,21	0,17	0,16	0,14
Tlemcen	52	1964-2016	0,09	$\alpha > 0,20$	0,22	0,19	0,17	0,15
Pierre du Chat	49	1967-2016	0,102	$\alpha > 0,20$	0,23	0,19	0,17	0,15

α : Niveau de signification

II.7 Conclusion

Une étude du régime pluviométrique a été élaborée à partir de 25 stations pluviométriques. Après avoir comblé les lacunes, où les séries très courtes ont été rejetées ce qui nous a amené à focaliser notre étude sur les séries des données recueillies au niveau de 16 stations, qui sont de tailles assez longues et de bonne répartition sur la région d'étude.

L'étude d'hétérogénéité dans les séries pluviométriques est identifiée par la méthode du Bois qui indique des anomalies qui ont été détectées. Une fois les données erronées corrigées, nous obtiendrons des séries de données plus cohérentes, facilitant ainsi une analyse plus fiable des tendances dans le bassin versant de la Tafna.

Les résultats du test de Kolmogorov-Smirnov montrent que toutes les stations pluviométriques à l'échelle annuelle acceptant l'hypothèse nulle (suivre la loi normale), cela signifie que toutes les stations suivent la loi normale et à tous les niveaux de signification (α), exceptant la station de Sebdo qui présente un ajustement à la loi normale acceptable à partir d'un niveau de significativité de 15 %, mais à des niveaux plus stricts (comme 20 %), des écarts apparaissent.

Cela pourrait signifier que les précipitations enregistrées à ces stations sont bien modélisées par une loi normale, facilitant ainsi l'utilisation de cette distribution dans des analyses statistiques comme les tests de ruptures (Buishand et Lee et Heghinian).

CHAPITRE III :

Evolution temporelle et spatiale des séries pluviométriques annuelles et saisonnières

III.1 Introduction

Les pluies sont l'un des éléments les plus climatiques dont les quantités changent clairement, à la fois au niveau temporel et spatial. La répartition de la pluie est influencée par un certain nombre de facteurs naturels et atmosphériques.

L'étude de la composition temporelle et spatiale de la zone d'étude contribue à la clarification et à la mise en évidence des caractéristiques pluviométriques de la zone d'étude, à la connaissance des fluctuations et des changements saisonniers des précipitations. Pour atteindre ces objectifs, nous avons appliqué des méthodes simples, mais un effet efficace dans la clarification du phénomène du changement climatique.

III.2 Les méthodes utilisées

Trois méthodes ont été appliquées pour apprécier la sécheresse dans le bassin versant du Tafna : la méthode de moyenne mobile, l'indice standardisé des précipitations (SPI) et la méthode de 2 filtres passe-bas Hanning de 2e ordre, qui permettent d'avoir un rapide aperçu du phénomène. Elles facilitent la comparaison des situations à différentes périodes et donc la mise en évidence d'éventuelles évolutions (S.H. Eriksen et P.M. Kelly, 2006).

III.2.1 Indice Standardisé des Précipitations (SPI)

C'est une moyenne des cumuls pluviométriques annuels centrés et réduits, calculés dans chaque station disponible pour une saison donnée. Cet indice indique si l'année est qualifiée d'excédentaire ($SPI > 0$) ou déficitaire ($SPI < 0$).

D'après Nicholson et *al.* (1988), le SPI est calculé de la manière suivante :

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

Où :

- X_i : Pluie de l'année i ;
- \bar{X} : Pluie moyenne de la série sur l'échelle temporelle considérée ;
- S : Ecart-type de la série sur l'échelle temporelle considérée.

Cet indice permet également de distinguer les années sèches et humides ou les années déficitaires et excédentaires. (M. Svoboda et *al.*, 2012)

McKee et al. (1993) ont utilisé le système de classification présenté dans le tableau des valeurs de l'indice SPI figurant ci-après (tableau III.1) pour définir l'intensité des épisodes de sécheresse en fonction de la valeur de l'indice.

Tableau III.1 Classification de la sécheresse en rapport avec la valeur de l'indice standardisé des précipitations (SPI).

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

III.2.2 Indice centré réduit pondéré : Filtre passe-bas Hanning de 2e ordre

Pour une meilleure observation des fluctuations interannuelles, les variations saisonnières sont éliminées en pondérant les totaux pluviométriques annuels avec les équations suivantes recommandées par Assani (1999) :

$$x(t) = 0,06x_{(t-2)} + 0,25x_{(t-1)} + 0,38x_{(t)} + 0,25x_{(t+1)} + 0,06x_{(t+2)}$$

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

Avec :

- $x(t)$ est le total pluviométrique pondéré du terme t ;
- $x_{(t-2)}$ et $x_{(t-1)}$ sont les totaux pluviométriques observés de deux termes qui précèdent immédiatement le terme t ;
- $x_{(t+2)}$ et $x_{(t+1)}$ sont les totaux pluviométriques observés de deux termes qui suivent immédiatement le terme t.

Les totaux pluviométriques pondérés des deux premiers $X(1)$ et $X(2)$ des deux derniers $X(n - 1)$ et $X(n)$ termes de la série sont calculés au moyen des expressions suivantes (n étant la taille de la série):

$$X(1) = 0,54x_{(1)} + 0,46x_{(2)}$$

$$X(2) = 0,25x_{(1)} + 0,50x_{(2)} + 0,25x_{(3)}$$

$$X(n - 1) = 0,25x_{(n-2)} + 0,50x_{(n-1)} + 0,25x_{(n)}$$

$$X(n) = 0,54x_{(n)} + 0,46x_{(n-1)}$$

Pour mieux visualiser les périodes de déficit et d'excédent pluviométrique, les moyennes mobiles ont été centrées et réduites au moyen de la formule suivante d'après Nicholson et al. (1988) :

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

Où :

- X_i : Pluie de l'année i ;
- \bar{X} : Pluie moyenne de la série sur l'échelle temporelle considérée ;
- S : Écart-type de la série sur l'échelle temporelle considérée.

III.2.3 La méthode de la moyenne mobile

Cet outil fait partie des premières méthodes pour l'analyse des séries chronologiques. Il semble que le physicien Poynting soit le premier, en 1884, à avoir utilisé les moyennes mobiles pour éliminer les variations accidentelles ou périodiques d'une série.

Une moyenne mobile permet de « lisser » une série de valeurs exprimées en fonction du temps (série chronologique). Elle permet d'éliminer les fluctuations les moins significatives. On calcule des moyennes mobiles d'ordre 1, d'ordre 2, d'ordre 3, etc.

Il s'agit de remplacer une valeur observée y_t par la moyenne arithmétique de p valeurs autour de y_t . On appelle moyenne mobile d'ordre p à la date t le nombre noté $MMp(t)$ et défini par :

$$MMp(t) = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p y_t$$

Ainsi, calculer la moyenne mobile d'ordre 5 pour les séries annuelles et saisonnières consiste à calculer, pour chaque année t , la moyenne arithmétique des cinq années. Le calcul n'est possible qu'à partir de la cinquième année de la série.

III.3 Caractérisation statistique des précipitations annuelles, mensuelles et saisonnières

Pour caractériser la variabilité interannuelle des précipitations, nous avons défini différentes variables statistiques descriptives de 16 stations pluviométriques (*tableau III.2*). Ces variables ont été calculées sur une période commune de mesure des pluies (1970-2016).

Le cumul pluviométrique annuel calculé sur l'ensemble des séries chronologiques, soit plus d'un demi-siècle, donne des valeurs moyennes allant de 270,2 mm à 620,4 mm, respectivement à la station de Hammam Bouhrara à Mefrouch barrage (*tableau III.2*). En plus, les moyennes pluviométriques annuelles dépassent 500 mm dans les stations situées en altitude supérieure à 1000 m (monts de Tlemcen) : Mefrouch barrage (620,4 mm), Lalla Setti : (547,2 mm) et Tlemcen : (537,6 mm), quant aux stations situées en plaine, la quantité de pluie n'excédant pas 350 mm : Station de Hammam Bouhrara : (270,2 mm), Beni Ouassine : (274,9 mm), Smala Sidi Medjahed : (311,3 mm) et Pierre du Chat : (334,5 mm).

Les variations spatiales sont modérées, elle est mesurée par le coefficient de variation (CV) qui est le quotient de l'écart type sur la moyenne, exprimé en pourcentage. Le coefficient de variation annuel varie entre 24,8 et 37,8 % (*tableau III.2*). Les valeurs les plus faibles sont observées dans les stations situées au nord et au centre du bassin : Sabra : (24,8 %), Bensekran : (26,5 %), Tlemcen : (27,3 %), Lalla Setti : (27,5 %) et Pierre du Chat : (28,8 %). Les valeurs les plus élevées sont observées dans le sud de la région, en particulier dans la partie sud-est : Hammam Bouhrara : (37,8 %), Khemis Ould Moussa : (37,0 %) et Smala Sidi Medjahed : (33,8 %).

Le maximum pluviométrique est survenu d'une façon remarquable en 2008 pour la majorité des stations, avec un excédent atteignant jusqu'à 919,9 mm à la station de Khemis Ould Moussa (soit de 53,8 % par rapport à la moyenne annuelle).

En 2009, certaines stations comme Chouly et Bensekran ont enregistré des excédents respectifs de 909,8 mm (51,5 %) et 633,9 mm (38,1 %).

En 2012, des stations telles que Mefrouch Bge, Tlemcen et Sabra ont enregistré des niveaux record, avec un maximum de 1144,9 mm à la station de Mefrouch Bge. Pour les autres stations, les valeurs maximales ont été enregistrées en 1972 et 1973.

Le minimum pluviométrique est survenu principalement en 1982 et 1999, avec un déficit de pluviométrie pouvant atteindre 264,7 % par rapport à la moyenne annuelle. Ces données montrent des variations pluviométriques importantes à travers différentes périodes, avec des années marquées par des excédents ou des déficits notables.

Pour mieux comprendre l'impact des pluies de chaque saison, on a calculé la moyenne, l'écart type, la médiane et le coefficient de variation pour chaque station. Ce tableau sera regroupé à l'annexe C. Il montre que la saison la plus pluvieuse est l'hiver, avec des valeurs allant de 36 % à 42 % du total pluviométrique annuel. Ensuite, le printemps présente des valeurs similaires à celles de l'hiver (30 % à 37 %) et enfin l'automne avec des valeurs allant de 22 % à 27 % (figure III.1). Le coefficient de variation (CV) de pluie saisonnière est plus élevé, qui peut atteindre 1,73 à l'été ; ce qui indique l'aspect aléatoire marqué des pluies saisonnières.

Les moyennes mensuelles de précipitations sur une période de 1970 à 2016 illustrent clairement deux périodes distinctes :

- Une période sèche correspondant à la période estivale (juin, juillet, août), marquée par des mois où les précipitations sont plus faibles, inférieures à 10 mm (figure III.2).
- Une période humide, qui s'étend généralement de septembre à mai, avec des précipitations de printemps (mars, avril, mai) et d'automne (septembre, octobre, novembre) particulièrement importantes. Dans la plupart des stations pluviométriques, le mois de mars est souvent le mois avec les précipitations mensuelles les plus élevées. Cependant, les mois d'hiver (décembre, janvier, février) présentent une baisse progressive des précipitations (figure III.2).

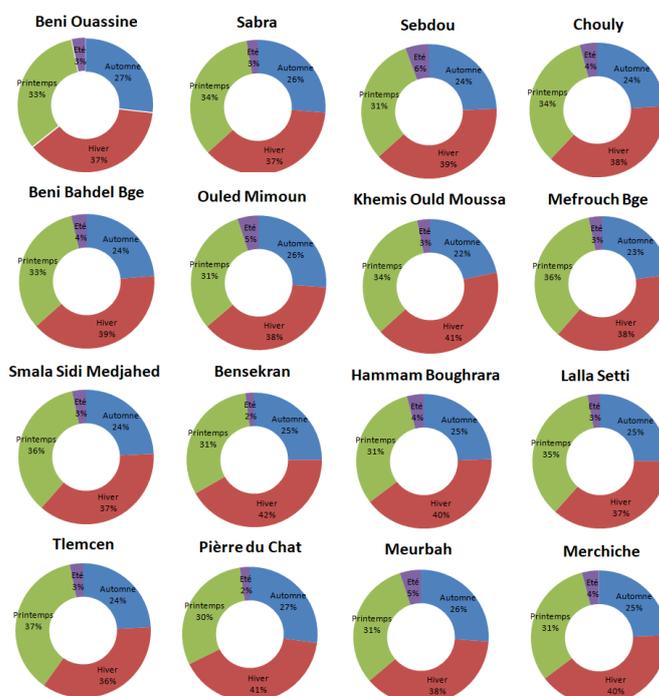


Figure III.1 Répartition saisonnière des pluies sur la période (1970-2016).

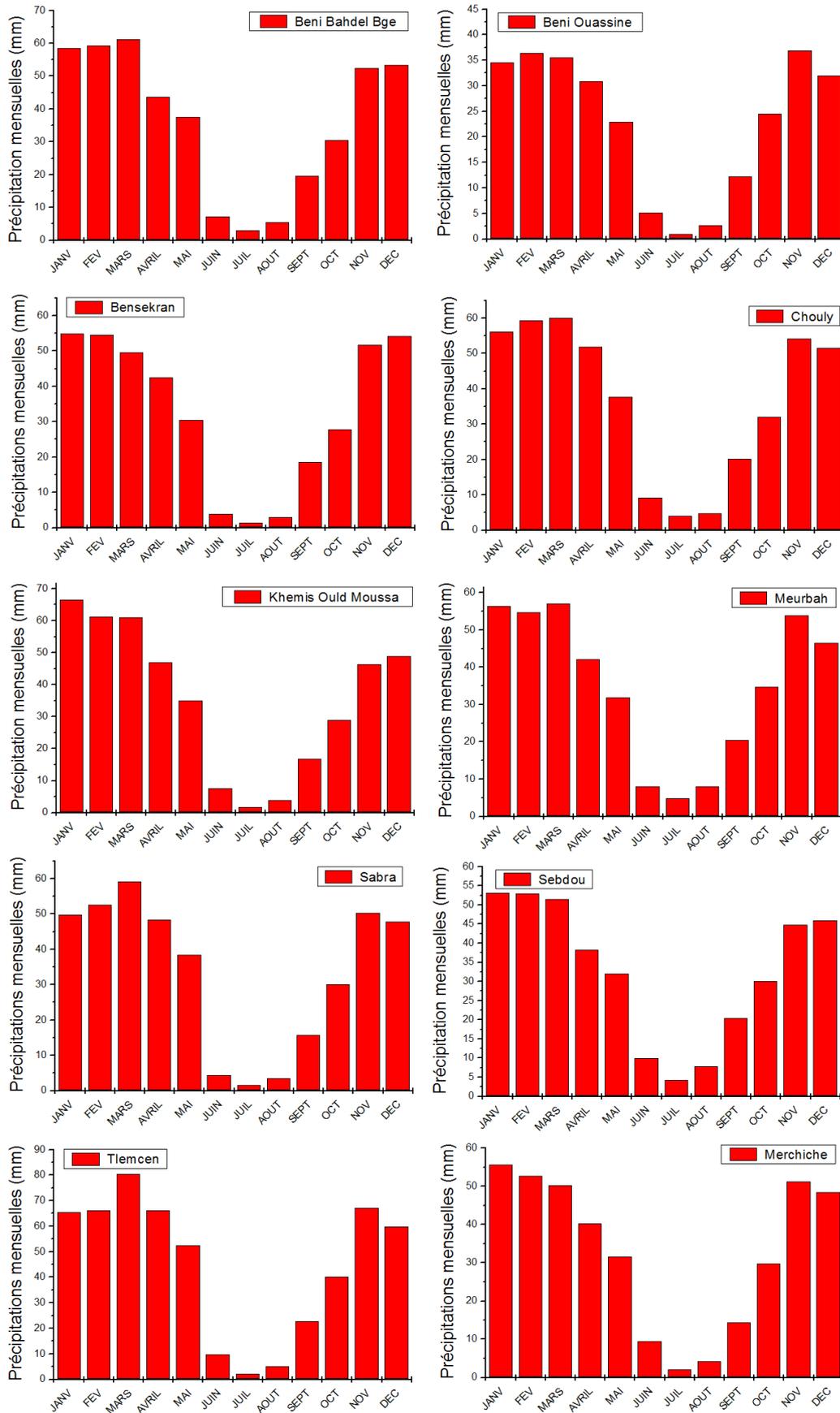


Figure III.2 Répartition mensuelle des pluies sur la période (1970-2016).

Tableau III.2 Statistiques descriptives des séries d'observations à l'échelle annuelle.

Station	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Période d'observation	Moy* (mm)	1970-2016							
						Moy (mm)	Ec-Type	Médiane (mm)	Min (mm)	Année	Max (mm)	Année	CV (%)
Beni Ouassine	-1,78	34,84	410	1953-2016	285,7	274,9	95,4	258,8	121,4	1982	544,8	1973	34,7
Sebdou	-1,33	34,65	875	1970-2015	388,5	387,7	109,6	389,2	198,0	1999	668,9	2008	28,3
Beni Bahdel Bge	-1,51	34,70	666	1939-2016	465,3	432,2	133,3	434,9	206,1	2004	731,8	2008	30,8
Khemis Ould Moussa	-1,56	34,63	920	1924-2015	515,0	425,4	157,4	422,2	114,4	1998	919,9	2008	37,0
Smala Sidi Medjahed	-1,64	34,78	360	1967-2016	317,7	311,2	105,1	300,8	133	1982	587	1973	33,8
Merchiche	-1,31	34,70	1250	1940-2016	423,0	390,5	125,1	388,8	214,2	1999	700,7	2008	32,0
Hammam Boughrara	-1,65	34,88	270	1969-2016	271,5	270,2	102,2	263,1	74,1	1982	498,8	2008	37,8
Sabra	-1,51	34,83	608	1914-2016	446,1	401,6	99,5	395,2	227	1982	629,6	2012	24,8
Chouly	-1,11	34,87	700	1956-2016	453,8	441,2	132,2	415,2	218,4	1987	909,8	2009	30,0
Meurbah	-1,17	34,75	1100	1940-2016	449,2	418,8	129,2	405,7	210,9	2004	787,7	2008	30,9
Ouled Mimoun	-1,04	34,90	705	1923-2016	432,7	376,2	117,4	364,0	197,9	1987	705,9	1970	31,2
Mefrouch Bge	-1,29	34,85	1110	1943-2014	665,9	620,4	186,8	581,9	342,4	1999	1144,9	2012	30,1
Bensekran**	-1,21	35,08	260	1914-2006	436,3	392,5	104,0	397,7	236,6	1982	633,9	2009	26,5
Lalla Setti	-1,31	34,87	1020	1956-2016	582,5	547,2	150,6	514,3	325,7	1999	906,4	1972	27,5
Tlemcen	-1,33	34,87	830	1964-2016	551,0	537,6	146,8	523,5	277,4	2016	936,1	2012	27,3
Pierre du Chat	-1,45	35,14	80	1967-2016	331,7	334,5	96,4	324,2	135,6	1981	594,6	1972	28,8

*La moyenne de la série totale.

** La station de Bensekran a été arrêtée en 2007.

III.4 Évolution temporelle des totaux pluviométriques annuels

III.4.1 La méthode des indices standardisés des précipitations (SPI)

L'évolution des indices centrés et réduits associée à l'élimination saisonnière au moyen du filtre de Hanning met en évidence l'existence de deux grandes périodes, les plus évidentes, les plus continues et les plus longues, l'une caractérisée par une période excédentaire et l'autre par une période déficitaire (*figure III.3*).

Alors que la première partie des séries chronologiques a été caractérisée par une longue période humide, entrecoupé de quelques courtes périodes de sécheresse ne dépasse pas 3 ans, avec des intensités différentes. On note également que la longueur de cette période varie d'une station à l'autre, selon la longueur de la série chronologique. Par exemple, la longueur de cette période peut atteindre jusqu'à 34 ans dans la station de Merchiche, cette phase excédentaire observée allant de 1942 à 1975 avec une moyenne pluviométrique de 491,1 mm. Ce qui représente plus de 16,1 % des totaux pluviométriques supérieurs à la moyenne annuelle totale qui est de 423,0 mm (*figure III.3*).

La deuxième partie a connu une réduction très inhabituelle des précipitations avec une période sèche de plus de 36 ans. Cette période déficitaire est particulièrement marquée à la fin de l'année 1970 et termine en 2007, avec des précipitations annuelles faibles et inférieures à la moyenne pluviométrique annuelle. Pendant cette période déficitaire, le total pluviométrique a pu atteindre des valeurs minimales de 28,3 % par rapport à la pluviométrie moyenne annuelle qui est de 432,37 mm à la station d'Ouled Mimoun (*figure III.3*).

La figure III.3 présente l'évolution des valeurs moyennes annuelles de l'indice SPI pour dix stations pluviométriques. Pendant la durée d'observation de chaque série pluviométrique, 31 ans sont inférieures à la moyenne annuelle à la station de Beni Bahdel Bge (soit -15,9 %), 36 ans à la station de Sabra (soit 16,4 %), 27 ans à la station de Chouly (soit -17,1 %), 34 ans à la station de Bensekran (soit -18,1 %), 33 ans à la station de Khemis Ould Moussaa (soit -27,5 %).

Dans cette étude, il ne faut pas ignorer une troisième période, malgré sa courte durée. Cette période excédentaire observée allant de 2008 avec des proportions équivalentes à ses valeurs approximativement la période excédentaire précédente. Mais la durée de cette période ne dépasse pas 6 ans dans la plupart des stations. Il est donc trop tôt pour la classer comme retour à la période pluvieuse.

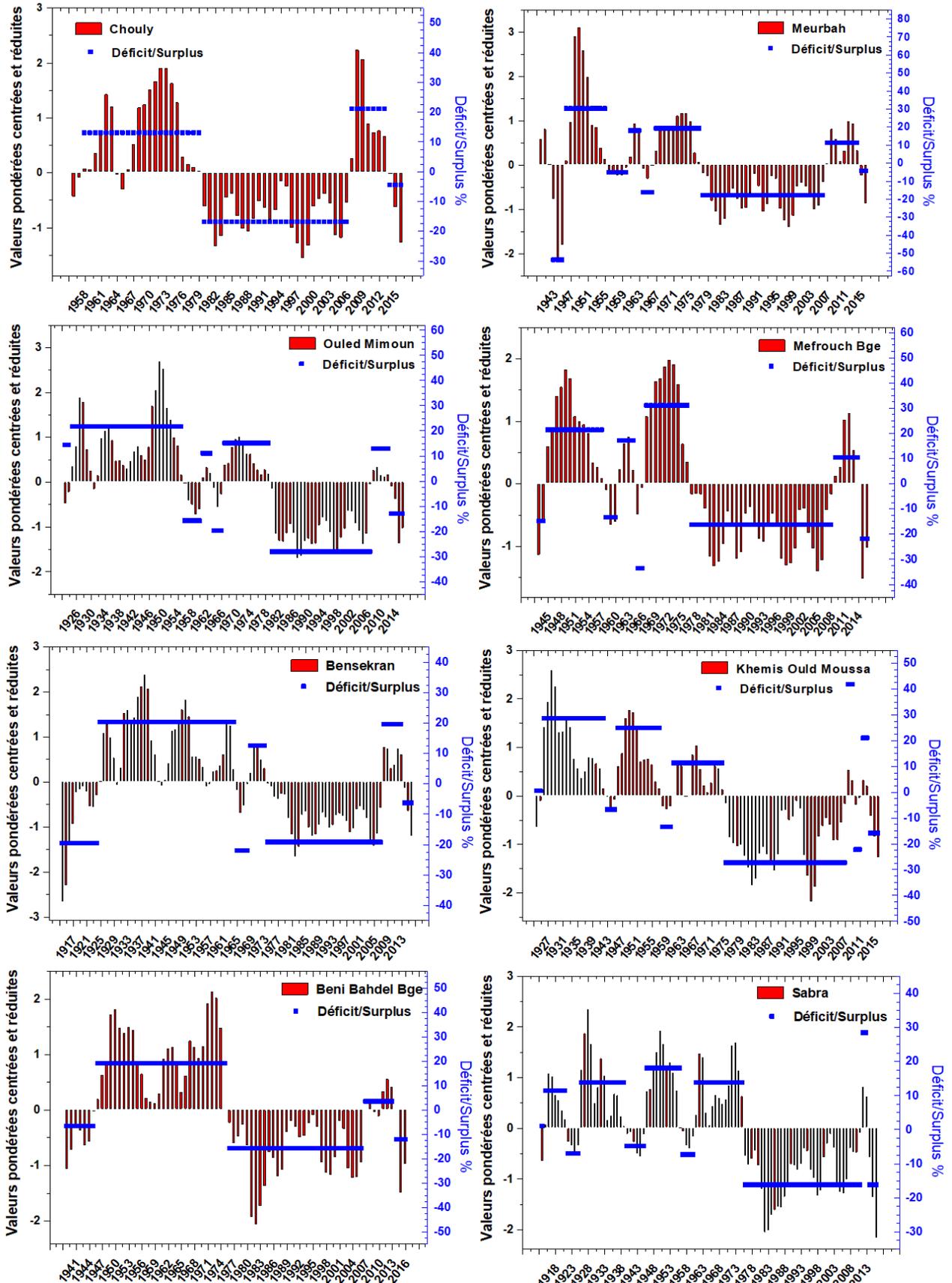


Figure III.3 Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies annuelles.

III.5 Évolution temporelle des totaux pluviométriques saisonniers

III.5.1 La méthode des indices standardisés des précipitations (SPI)

Il est essentiel d'analyser la variabilité saisonnière afin de déterminer si la diminution ou l'augmentation de la pluviométrie est propre à une saison spécifique ou à plusieurs saisons. Nous allons faire appel à la méthode des indices standardisés des précipitations pour cette analyse, ce qui permet de mieux observer la chronologie des moyennes pluviométriques saisonnières dans le temps. Les trois saisons (l'automne, l'hiver et le printemps) ont été étudiées dans cette recherche.

Les figures III.4, III.5 et III.6 illustrent la variation des totaux saisonniers pour les trois saisons (Hiver, Printemps et Automne). Les trois saisons ont connu des variations assez similaires par rapport aux séries annuelles. On observe une période humide qui s'étend du début des séries pluviométriques et se termine à la fin des années soixante-dix et une deuxième période où les précipitations saisonnières sont en forte baisse dès le début des années quatre-vingt.

Au printemps, nous avons constaté que la troisième période (à la hausse) a disparu dans la plupart des stations, à l'exception de la saison hivernale et automnale qui commence à partir de 2010. On peut donc en déduire que la troisième période (à la hausse) est principalement due à une augmentation des précipitations d'hiver et d'automne.

III.6 Évolution temporelle des totaux pluviométriques annuels et saisonniers par la méthode de moyenne mobile pondérée à 5 points

Il est évident que les fluctuations d'une année à l'autre sont souvent importantes et les graphiques des chronologies des totaux pluviométriques saisonnières permettent difficilement de déceler une tendance (*figure III.7 à figure III.12*). Nous avons représenté l'évolution de la moyenne mobile pondérée à cinq points à l'échelle annuelle et saisonnière afin d'illustrer cette tendance, si elle existe.

À partir des observations des (*figure III.7 à figure III.12*), on remarque qu'il y a une tendance à la baisse dans les pluies annuelles, particulièrement nette dans les séries chronologiques de longue durée.

Concernant les pluies saisonnières, nous remarquons une certaine stabilité dans les séries chronologiques, avec des difficultés à extraire une tendance pour la plupart des stations. À l'exception de la saison hivernale, qui enregistre des tendances à la baisse dans la plupart des

stations, ce qui indique que la saison hivernale est la principale cause de la diminution des précipitations annuelles à la fin des années soixante-dix.

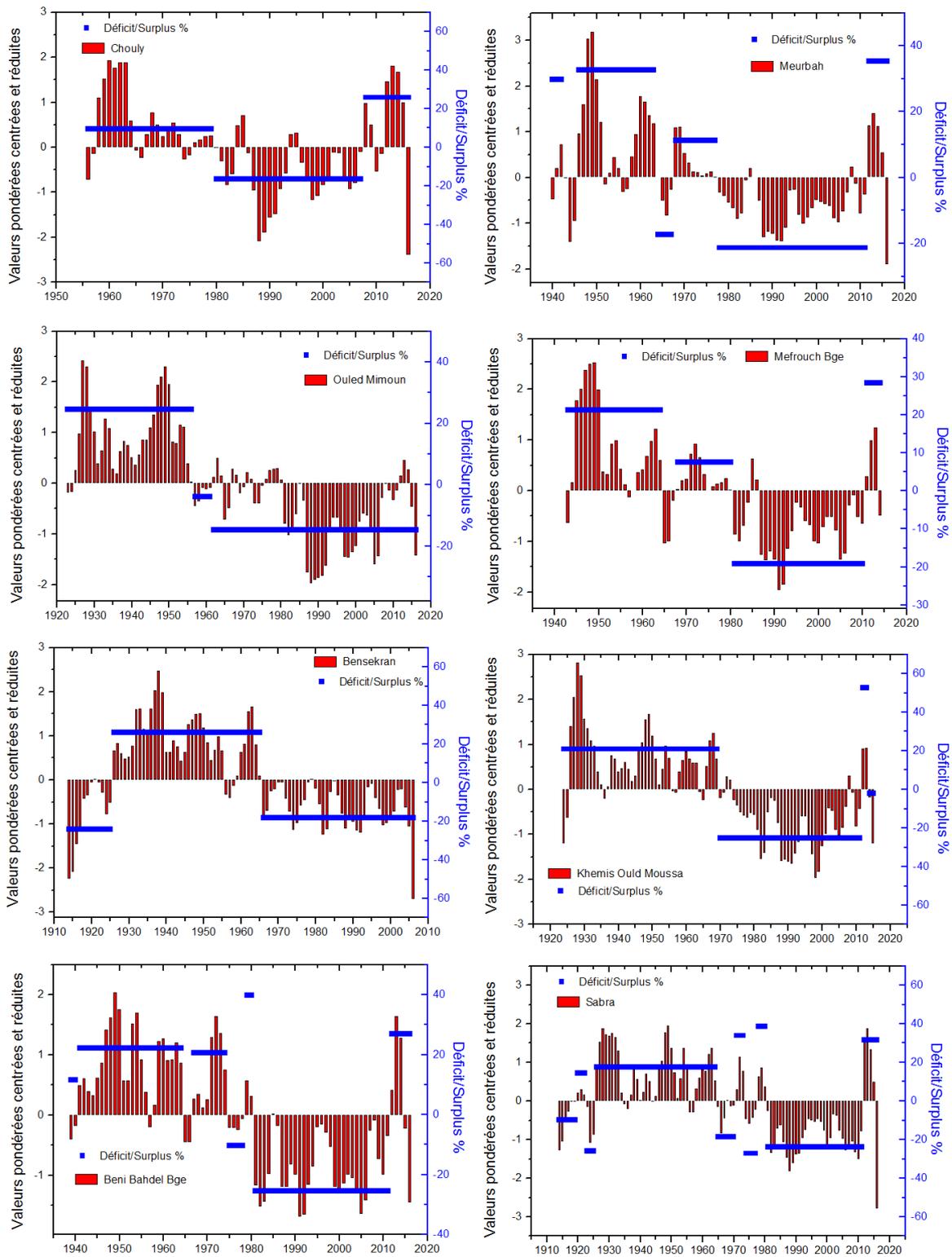


Figure III.4 Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'hivers.

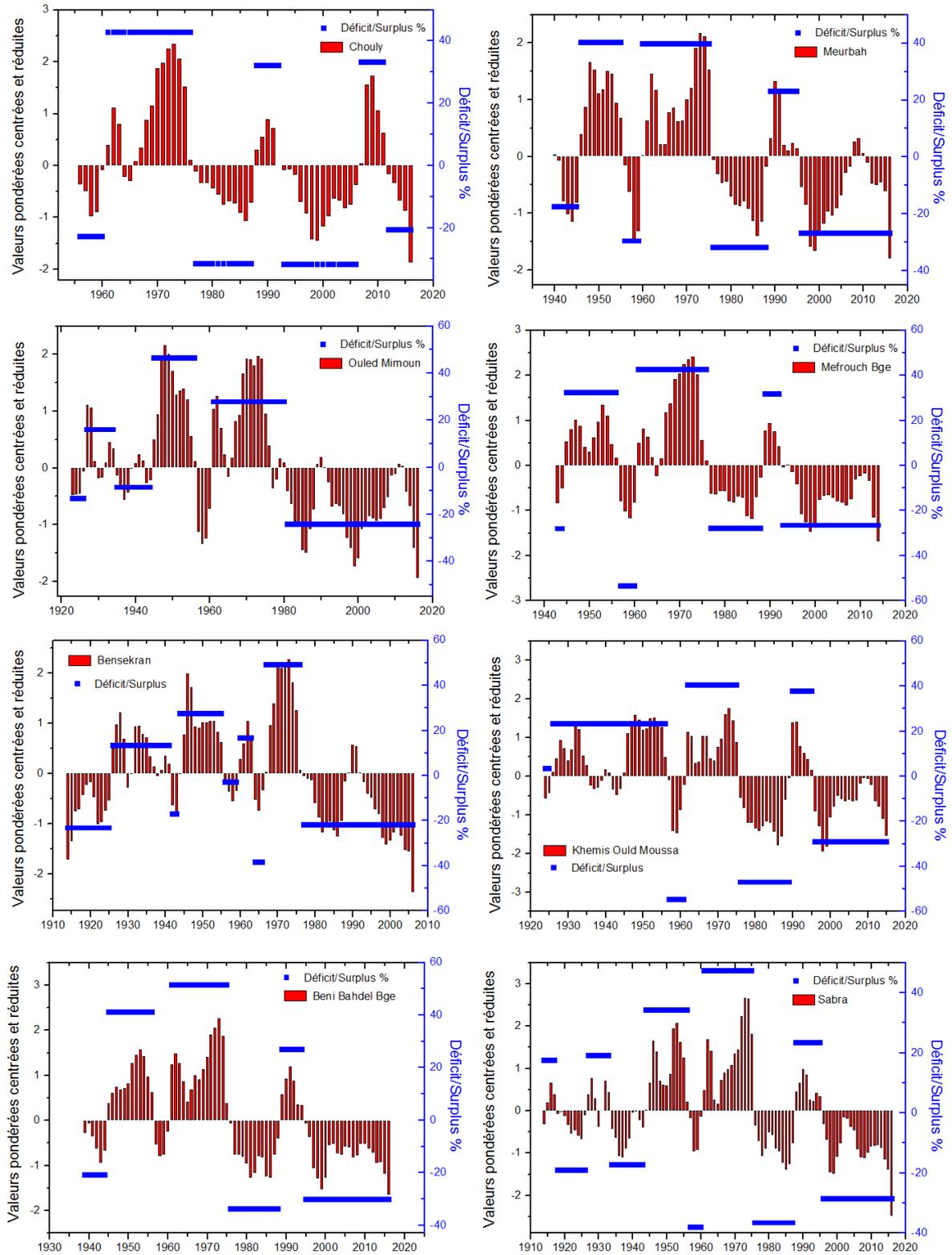


Figure III.5 Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies de printemps.

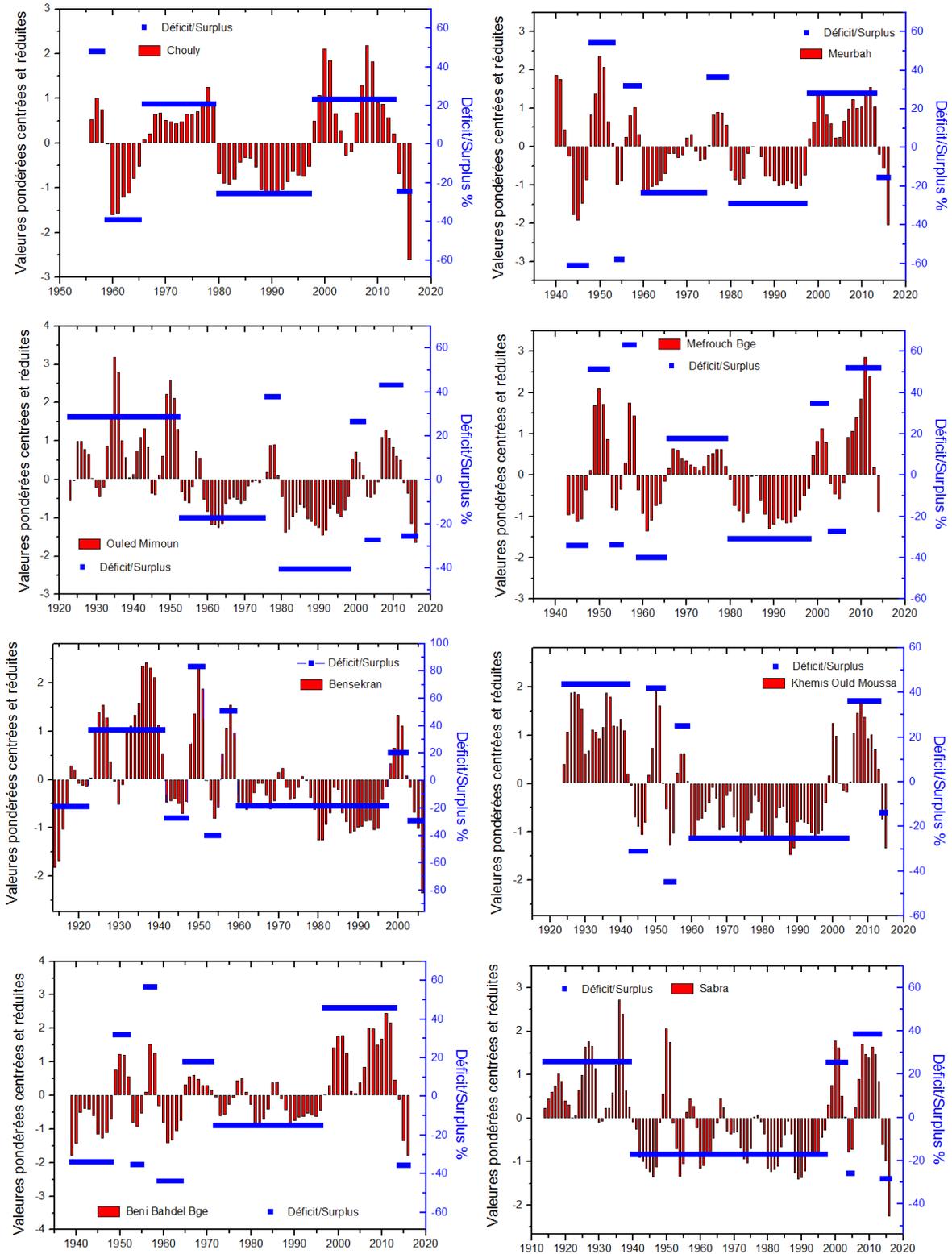


Figure III.6 Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d’automne.

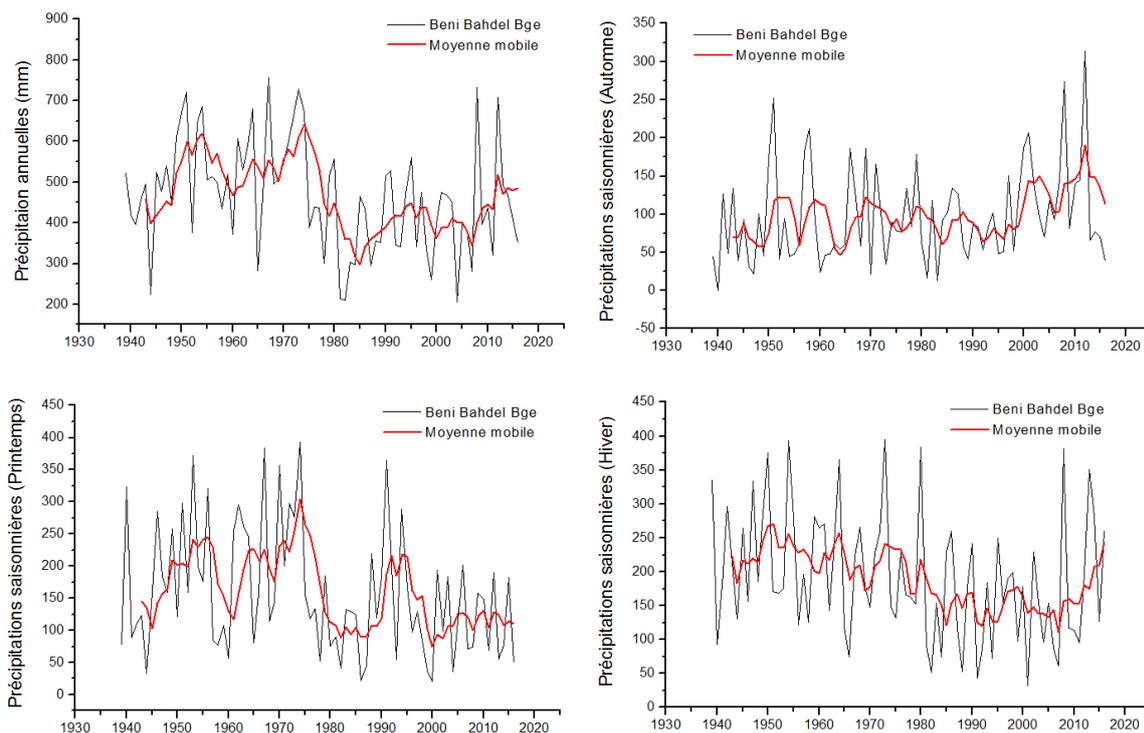


Figure III.7 Évolution des totaux annuels et saisonniers de la station de Beni Bahdel Bge (1939-2016).

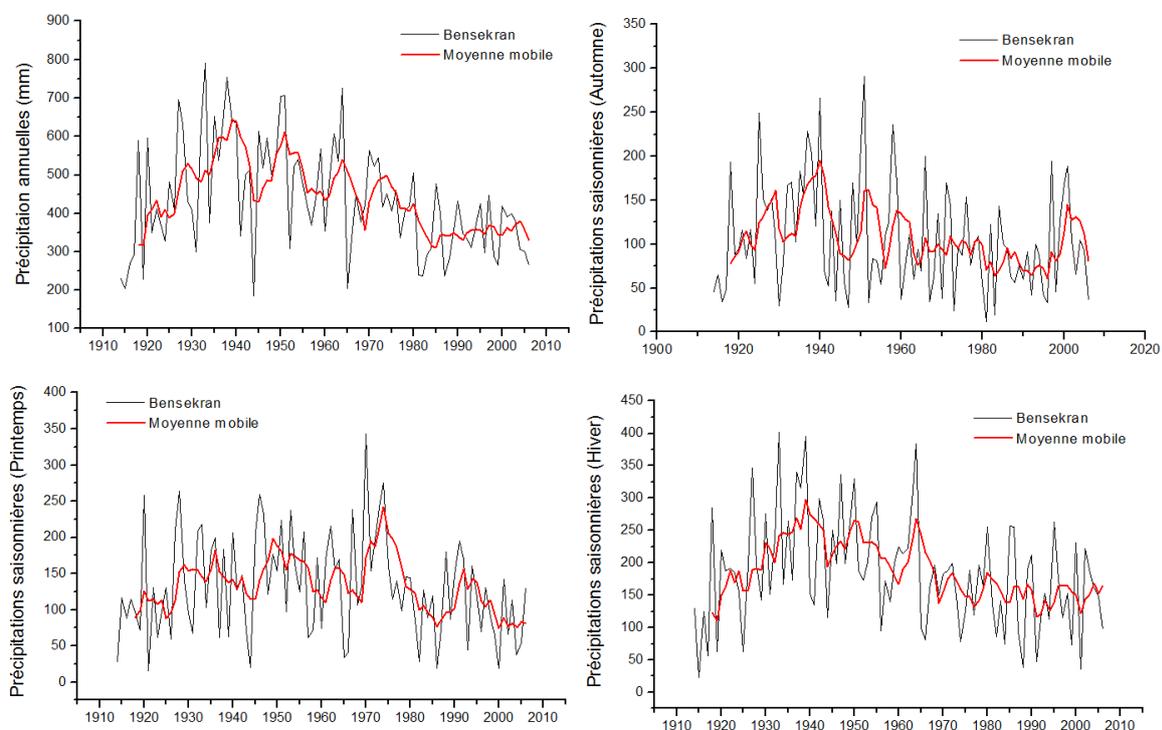


Figure III.8 Évolution des totaux annuels et saisonniers de la station de Bensekran (1914-2006).

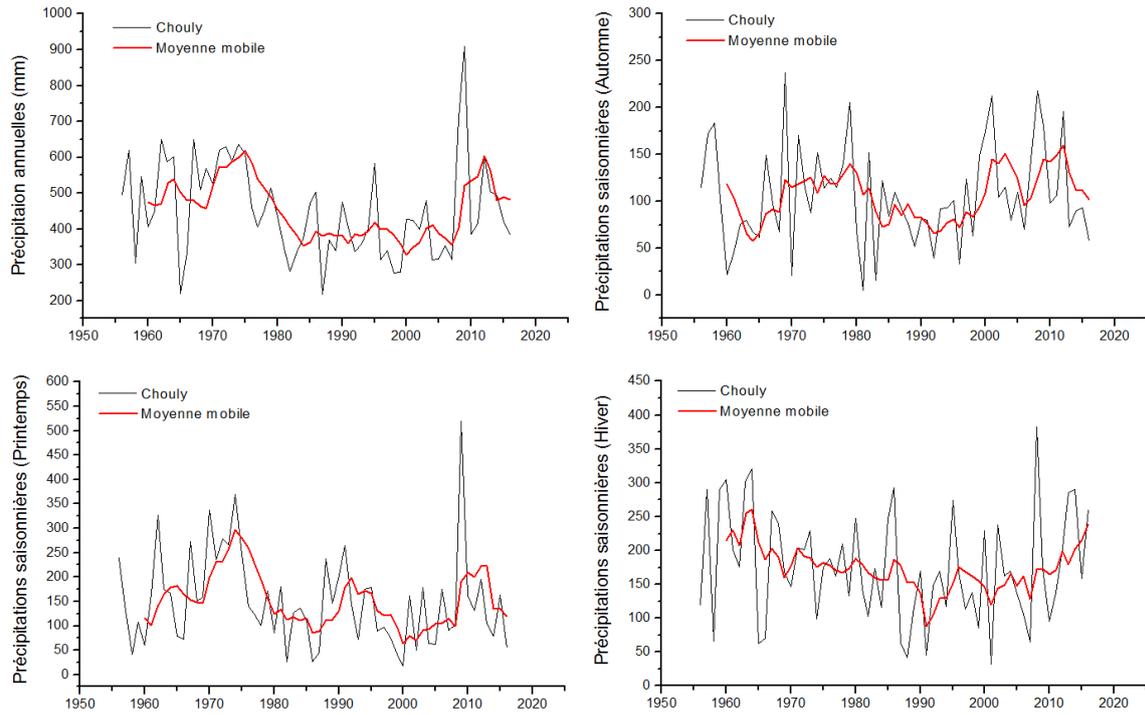


Figure III.9 Évolution des totaux annuels et saisonniers de la station de Chouly (1956-2016).

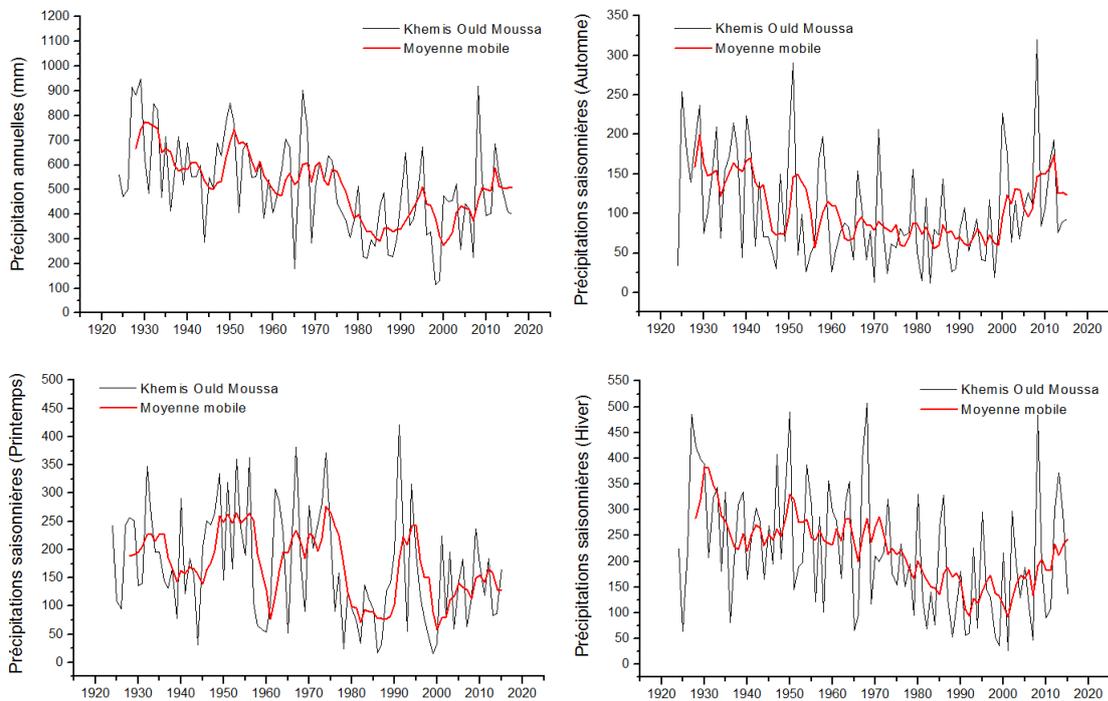


Figure III.10 Évolution des totaux annuels et saisonniers de la station de Khemis Ould Moussa (1924-2015).

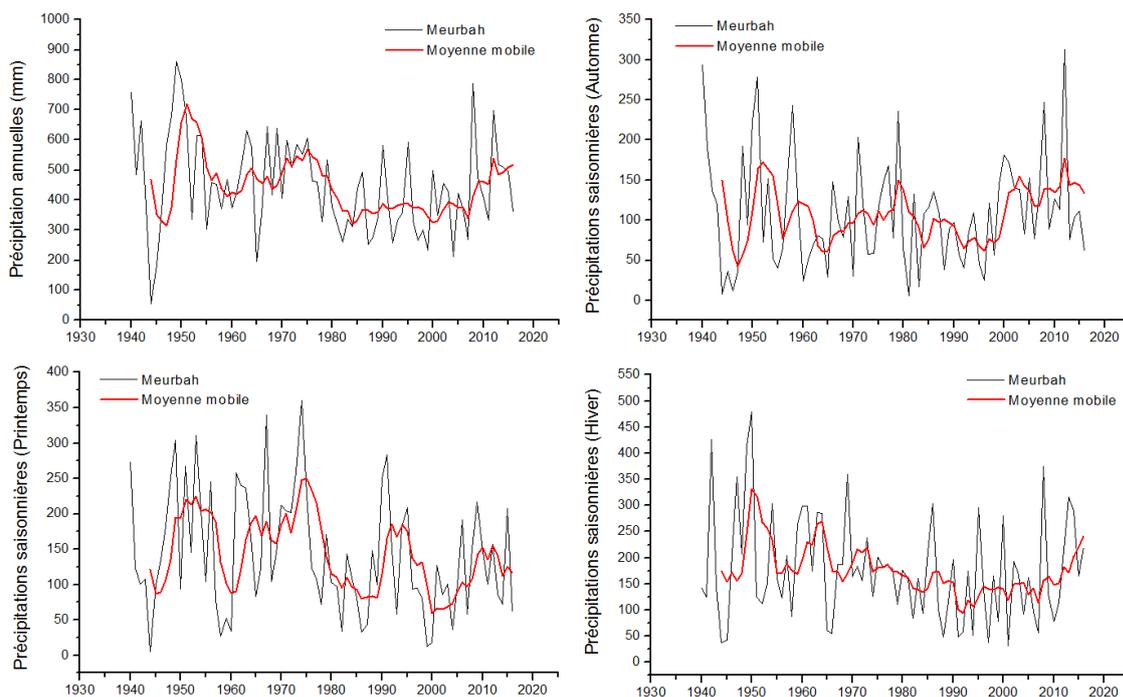


Figure III.11 Évolution des totaux annuels et saisonniers de la station de Meurbah (1940-2016).

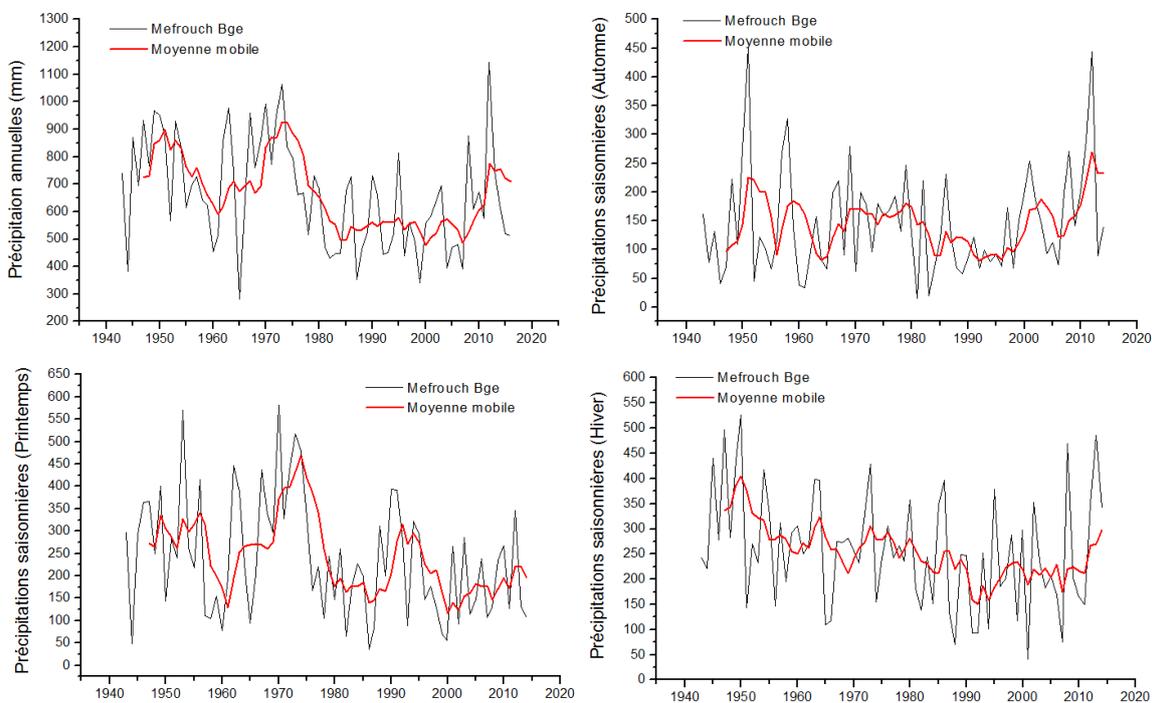


Figure III.12 Évolution des totaux annuels et saisonniers de la station de Mefrouch Bge (1943-2014)

III.7 Évolution spatiale de la pluviométrie moyenne annuelle

Pour mieux visualiser la succession des périodes déficitaires et excédentaires sur l'ensemble de la zone étudiée, nous avons rangé les stations par longitude croissante (d'ouest à l'est) (*figure III.13*). Ensuite, les mêmes résultats ont été reportés en même figure en rangeant les stations par latitude croissante. On y observe la même succession de périodes déficitaires et excédentaires que précédemment.

On remarque deux phases, la première phase pluvieuse, où l'on observe la couleur bleue prédominante, entrecoupée de quelques couleurs jaunes qui représentent les années sèches. L'année 1973 est l'année la plus pluvieuse tandis que l'année 1965 est caractérisée par une sécheresse sévère avec des valeurs d'SPI extrêmes descendant jusqu'à (-2,0) à la station de Mefrouch Bge, Sabra et Lalla Setti. Dans cette année (1965), toutes les stations sont largement déficitaires avec un indice descendant jusqu'à -2,0. Durant cette phase, les années 1961, 1978 et 1979 apparaissent également comme déficitaires, mais de façon moins marquée ($-1 < \text{SPI} < 0$).

À partir de 1981, on remarque que la couleur marron est devenue omniprésente avec quelques années pluvieuses qui apparaissent d'une façon aléatoire. Cette période déficitaire est caractérisée par des valeurs négatives de l'indice IPS sur la totalité de cette phase, avec des valeurs SPI extrêmes descendant jusqu'à (-1,9) en 1981, 1982 et 1987 à la station de Pierre du Chat, Chouly, Beni Bahdel Bge et Hammam Boughrara.

On note également que l'année 1999 est caractérisée par une sévère sécheresse au niveau de toutes les stations, où l'indice SPI atteint -2,0 à la station de Khemis Ould Moussa, tandis que les années 2008 et 2012 sont caractérisées par des valeurs positives exceptionnelles, elles sont représentées par un nombre important d'événements pluvieux avec des valeurs SPI positives élevées (+2). Ces années sont caractérisées par une reprise des précipitations, mais en raison de la courte durée de cette période, nous ne pouvons pas la considérer comme un retour aux années pluvieuses.

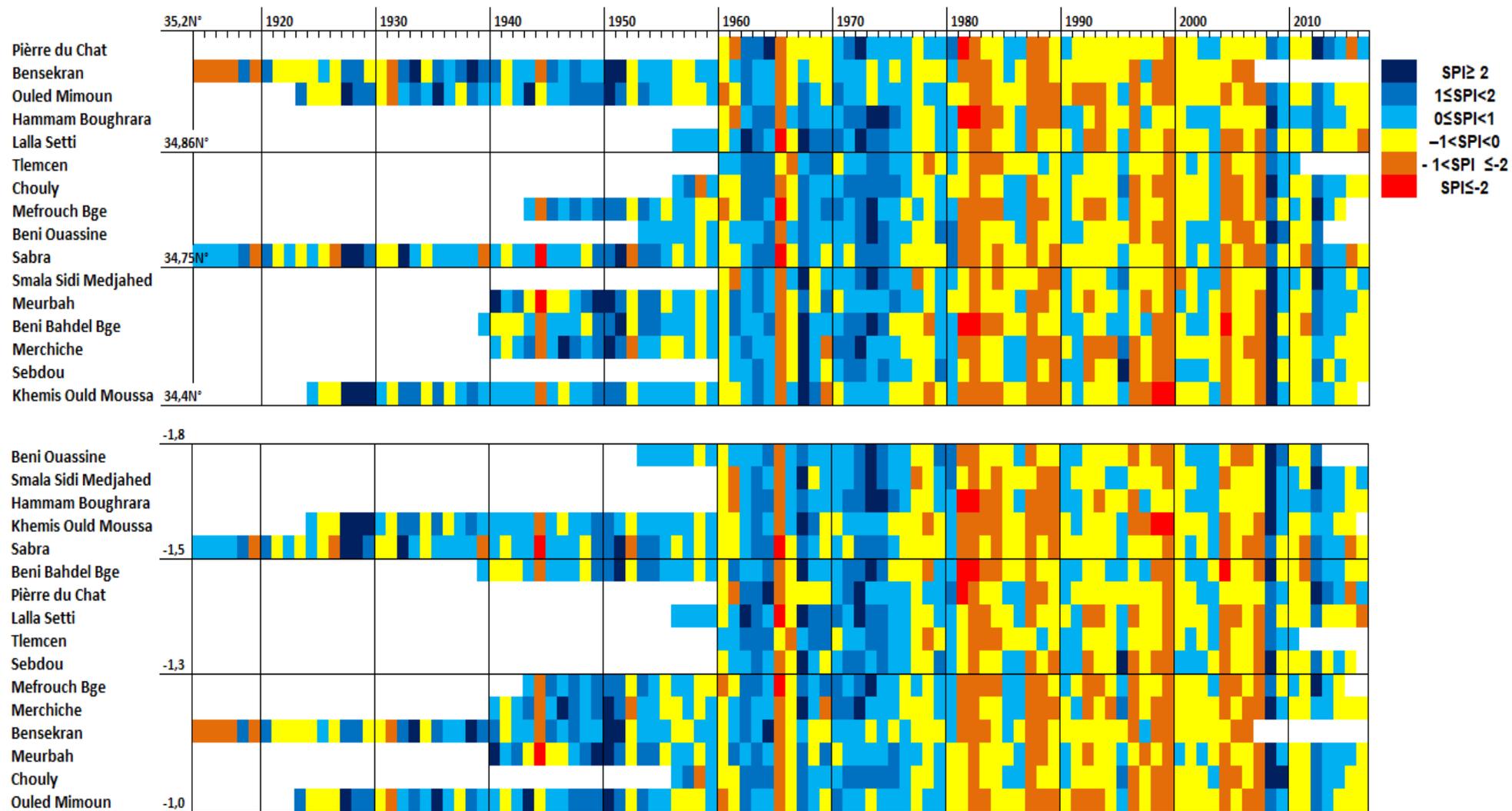


Figure III.13 Périodes déficitaires et excédentaires en fonction de la longitude et latitude du poste de mesure.

III.8 Conclusion

Le bassin versant du Tafna enregistre une moyenne pluviométrique allant de 270,2 mm à 620,4 mm, calculée de 1970 à 2016 à partir de 16 stations de pluviométrie. L'étude des précipitations saisonnières souligne que la saison hivernale est la plus pluvieuse, avec des taux allant de 36 % à 42 % du total des précipitations annuelles. Par la suite, le printemps est comparable à l'hiver (30 % à 37 %) et l'automne (22 % à 27 %).

L'analyse de la fluctuation des précipitations à partir des variables centrées réduites des totaux annuels a révélé la succession de deux grandes périodes, une période très pluvieuse qui s'est prolongée jusqu'à la fin des années soixante-dix, avec une durée allant jusqu'à 34 ans à la station Merchiche avec une pluviométrie supérieure de 16,1 % à la moyenne annuelle totale de cette station.

Une seconde période totalement déficitaire, qui commence à la fin de 1970 et se termine en 2007, avec des précipitations annuelles faibles qui enregistrent des valeurs inférieures à la moyenne annuelle totale des séries, qui peut atteindre des valeurs minimales de 28,3 % par rapport à la pluviométrie moyenne annuelle à la station d'Ouled Mimoun.

Il est important de ne pas négliger une troisième période, même si elle est de courte durée, dans cette étude. C'est à partir de 2008 que cette période apparaît, avec des proportions équivalentes à celles de la période précédente (humide). Toutefois, dans la majorité des stations, cette période ne dure pas plus de 6 ans, ce qui fait qu'il est trop tôt pour la considérer comme un retour à la période humide. D'après les graphiques des indices standardisés des précipitations saisonnières, il nous apparaît que l'augmentation des précipitations hivernales est à l'origine de cette troisième période.

CHAPITRE IV :

Analyse des tests de rupture dans les séries de pluie annuelle et saisonnière

IV.1 Introduction

Le caractère aléatoire d'une série d'observations est une hypothèse fondamentale pour l'analyse statistique d'une telle série. Cette dernière est considérée comme un caractère aléatoire si toutes les valeurs sont indépendantes et si elles proviennent d'une même population. Le caractère aléatoire peut être modifié par plusieurs causes, qui peuvent être soit naturelles ou artificielles. Quelle que soit leur nature, il y a plusieurs méthodes de les détecter. Dans cette étude, nous en avons sélectionné quatre tests de détection d'une non-stationnarité de type tendance en saut (rupture) et deux tests de détection d'une non-stationnarité de type tendance linéaire qui seront présentés et décrits dans ce chapitre.

IV.2 Généralités

IV.2.1 Les tests de d'hypothèses

IV.2.1.1 Principe des tests d'hypothèses classiques

Un test statistique est un outil pratique d'aide à la décision quand il s'agit de vérifier une hypothèse. Il nous permet de trancher entre deux hypothèses, l'une dite « nulle » ou « fondamentale » notée habituellement H_0 et l'autre alternative H_1 , au vu des résultats d'un échantillon.

Le tableau IV.1 résume les quatre cas possibles lors d'un test d'hypothèse en termes de prise de décision et des risques d'erreurs associés. Voici comment il pourrait se présenter :

Tableau IV.1 Risque d'erreur des tests d'hypothèses.

Décision / Réalité	H_0 est vraie	H_1 est vraie
Rejeter H_0 (accepter H_1)	Erreur de type I (risque α)	Bonne décision (puissance $1 - \beta$)
Ne pas rejeter H_0	Bonne décision	Erreur de type II (risque β)

- **Erreur de type I (α)** : Il s'agit du cas où on rejette l'hypothèse nulle H_0 , alors qu'elle est en réalité vraie. Ce risque est contrôlé par le niveau de signification α , qui est souvent fixé à 5 %.
- **Erreur de type II (β)** : C'est la situation où on ne rejette pas H_0 , alors que l'hypothèse alternative H_1 est en fait vraie. Le risque associé à cette erreur est noté β .

- **Puissance du test ($1 - \beta$)** : C'est la probabilité de rejeter correctement H_0 lorsque H_1 est vraie. Plus la puissance d'un test est élevée, plus il est efficace pour détecter un effet lorsqu'il existe vraiment.

Ainsi, l'objectif d'un test statistique est de minimiser à la fois le risque d'erreur de type I et de type II, tout en augmentant la puissance du test.

IV.2.1.2 Démarche d'un test

Le processus de réalisation d'un test d'hypothèse suit généralement les étapes suivantes :

a. Formulation des hypothèses :

- H_0 : Hypothèse nulle. C'est l'hypothèse à tester (elle représente l'état actuel des choses).
- H_1 : Hypothèse alternative. Elle est formulée en opposition à H_0 .
- Fixer le niveau de signification α : C'est le risque de rejeter H_0 alors qu'elle est vraie (généralement $\alpha = 0,05$).

b. Détermination de la statistique de test :

- La statistique de test dépend du type de test à effectuer (Le test du χ^2 (chi-carré) et le test de Kolmogorov-Smirnov, etc.).
- Elle permet de mesurer l'écart entre les données observées et ce qui est attendu sous H_0 .

c. Allure de la région de rejet en fonction de H_1 :

- Selon que H_1 est une hypothèse bilatérale ou unilatérale, la région de rejet sera définie sur une ou deux queues de la distribution de la statistique de test.

d. Calcul de la région de rejet en fonction de α et H_0 :

- En utilisant la distribution de la statistique sous H_0 , on détermine les valeurs critiques au niveau de signification α . Si la statistique de test dépasse cette valeur critique, H_0 sera rejetée.

e. Calcul de la valeur observée de la statistique de test :

- À partir des données, on calcule la statistique de test réelle observée. Cette valeur est comparée à la région de rejet.

f. Conclusion :

- Si la statistique observée tombe dans la région de rejet, H_0 est rejetée au risque α .
- Sinon, on accepte H_0 .

g. Calcul de la puissance du test (si possible) :

- La puissance du test, $(1 - \beta)$, représente la probabilité de rejeter correctement H_0 quand H_1 est vraie. Plus la puissance est élevée, plus le test est efficace.

Ces étapes permettent de prendre une décision fondée sur des données en fonction d'une hypothèse initiale, tout en contrôlant le risque d'erreur.

IV.2.1.3 Probabilité critique ou *P-valeur*

P-valeur est la probabilité pour que la statistique de test T dépasse la valeur seuil, sous l'hypothèse H_0 . Plus cette probabilité est proche de 0, plus forte est la contradiction entre H_0 et le résultat observé avec l'échantillon.

Dans le cas d'un test bilatéral, la région de rejet est de la forme : $R = \{|T| > l\}$.

- R : Région de rejet.
- T : La statistique de test (par exemple Z pour une loi normale).
- l : La valeur critique, définie par le niveau de signification α .

$|T| \geq l \Leftrightarrow$ On rejette H_0 si : $T < -l$ ou $T > l$ ce qui équivaut à $|T| \geq l$

La probabilité critique ou *P-valeur* est la quantité : $P_c(t) = P_{H_0} \{|T| \geq l\}$.

Une fois le niveau α fixé, et le test mis en œuvre par un logiciel qui fournit la *P-valeur*, la décision est immédiate : $\{P_c(t) < \alpha\} \Leftrightarrow \{t \in R\}$. Le test le plus significative est le test qui fournit la valeur de α la plus petite.

IV.2.2 La stationnarité des séries chronologiques

IV.2.2.1 Tests de vérification du caractère aléatoire des séries

IV.2.2.1.1 Test de corrélation sur le rang (Kendall et Stuart, 1943 ; WMO, 1966)

Le test de corrélation sur les rangs (Kendall & Stuart, 1943; WMO, 1966) est un test non paramétrique qui teste l'homogénéité d'une série temporelle avec pour hypothèse alternative celle d'une tendance. Soit la série chronologique $(X_i), i = 1, N$, les x_i désignent les réalisations de la variable X observées à des pas de temps successifs égaux (Kotz et al., 1981, vol.9). l'hypothèse nulle est donc : la série des $(X_i), i = 1, N$, est aléatoire.

On effectue il se propose de calculer le nombre de paires P pour lesquelles $X_j > X_i, j > i$, avec $i = 1, \dots, N - 1$. Pour n grand, sous l'hypothèse nulle, la variable t telle que :

$$\tau = 1 - \frac{4Q}{N(N-1)} \quad \text{avec} \quad Q = \frac{N(N-1)}{2} - P$$

Suit une distribution normale de moyenne nulle et de variance égale à

$$\sigma_r^2 = \frac{2(2N + 5)}{9N(N - 1)}$$

Il en résulte que si l'hypothèse nulle est vraie, la variable $U = \tau/\sigma_r$ est une variable normale réduite. Pour un risque α de première espèce donnée, la région d'acceptation de l'hypothèse nulle est comprise entre : $-U_{(1-\alpha)/2\sigma_r}$ et $+U_{(1-\alpha)/2\sigma_r}$. L'hypothèse alternative reconnue de ce test est celle d'une tendance.

IV.2.2.2 Test de tendance (tendance linéaire)

Deux tests non-paramétriques peuvent être utilisés pour mettre en évidence l'existence éventuelle d'une tendance ; le premier est basé sur le coefficient de Spearman r_s (Spearman, 1904; Lehmann et D'abrera 1976; Sneyers, 1990), le second, sur la statistique de corrélation de rang t de Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975).

IV.2.2.2.1 Rho de Spearman (E. L Lehmann 1975; R. Sneyers, 1990)

Les observations originales x_i , avec, $i = 1, 2, \dots, n$ sont remplacées par le rang y_i qui leur est attribué lorsqu'on les range par ordre de grandeur croissante et la statistique du test est le coefficient de corrélation r_s entre les séries i et y_i , coefficient qui peut calculer au moyen de la formule suivante :

$$r_s = 1 - \frac{6}{n(n^2 - 1)} \sum (y_i - i)^2$$

Sous l'hypothèse nulle, la distribution de cette quantité est asymptotiquement normale avec:

$$E(r_s) = 0 \text{ et } \text{var } r_s = \frac{1}{n - 1}$$

Après avoir calculé r_s , il convient de déterminer à l'aide d'une table de la loi normale réduite la probabilité H_1 telle que :

$$H_1 = P(|u| > |u(r_s)|)$$

$$u(r_s) = r_s \sqrt{n - 1}$$

L'hypothèse nulle est acceptée ou rejetée au niveau H_0 selon que l'on a $H_1 > H_0$ ou $H_1 < H_0$.

Lorsque les valeurs de $|r_s|$ sont significatives, on conclut à une tendance croissante ou décroissante selon que $r_s > 0$ ou $r_s < 0$.

IV.2.2.2.2 Calcul du coefficient t de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975)

Dans ce test, l'hypothèse nulle H_0 correspond à l'absence de rupture, L'hypothèse alternative H_1 correspond à une tendance soit à la baisse ou à la hausse. Les équations mathématiques pour le calcul des statistiques Mann-Kendall, $V(S)$ et les statistiques normalisées $u(S)$ des tests sont les suivantes :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{signe}(x_j - x_i)$$

Avec :

$$\text{signe}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & \text{si } (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{si } (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{si } (x_j - x_i) < 0 \end{cases}$$

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right]$$

$$u(S) = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S < 0 \end{cases}$$

Dans ces équations x_i et x_j sont les observations des séries chronologiques dans l'ordre chronologique, n est la longueur des séries chronologiques, t_p est le nombre de données dans le groupe d'ordre p , et q est le nombre de groupes liés.

Il convient de déterminer à l'aide d'une table de la loi normale réduite la probabilité H_1 telle que :

$$H_1 = P(|u| > |u(S)|)$$

L'hypothèse nulle est acceptée ou rejetée au niveau H_0 selon que l'on a $H_1 > H_0$ ou $H_1 < H_0$. Lorsque les valeurs de $u(S)$ sont significatives, on conclut une tendance croissante ou décroissante selon que $u(S) > 0$ ou $u(S) < 0$.

IV.2.2.2.3 L'approche de Theil-Sen (Theil, 1950; Sen, 1968)

Cette approche a été utilisée pour estimer l'ampleur de la pente des tendances identifiées (par les méthodes de Mann-Kendall et Rho de Spearman). C'est une méthode non

paramétrique basée sur la pente médiane. Pour l'ensemble des paires (i, x_i) où x_i sont les observations des séries chronologiques. La pente de Sen est définie comme :

$$\text{Sen's slope} = \text{Median} \left\{ \frac{x_j - x_i}{j - i} : i < j \right\}$$

Une valeur positive de la pente de Sen indique une augmentation tendance (à la hausse)

IV.2.2.3 Test de détection de rupture (tendance en saut)

Une « rupture » peut être définie d'une façon générale par un changement dans la loi de probabilité de la série chronologique à un instant donné (Lubes *et al.*, 1994).

Ces séries ont été analysées à l'aide du logiciel KhronoStat (IRD, 1998) en vue de détecter une éventuelle rupture liée à une non-stationnarité. Nous avons ainsi appliqué différents tests de rupture : test de Mann Whitney modifié par Pettitt (1979), et la segmentation d'Hubert (Hubert *et al.*, 1989).

Le test de Pettitt est adapté pour déterminer une seule rupture, tandis que la segmentation d'Hubert permet de détecter plusieurs ruptures. Il faut juste rappeler que, l'hypothèse nulle H_0 correspond à l'absence de rupture, ils sont particulièrement sensibles à un changement de moyenne et si l'hypothèse nulle d'homogénéité de la série est rejetée, ils suggèrent une estimation de la date de rupture.

La robustesse de ces méthodes statistiques utilisées ont été prouvées par divers auteurs (Lubès-Niel *et al.*, 1998 ; Hubert *et al.*, 1989 et Paturol *et al.* 2010).

IV.2.2.3.1 La procédure de segmentation d'Hubert (Hubert *et al.*, 1989)

La procédure de segmentation de séries chronologiques est adaptée à la recherche de nombreux changements de moyenne. Elle fournit, au moyen d'un algorithme spécifique, une ou plusieurs dates de rupture (éventuellement aucune) qui séparent des segments contigus dont les moyennes sont significativement différentes au regard du test de Scheffé (Dagnélie, 1970).

Considérons une série temporelle de n observations notée $\{X_i, i = 1 \dots N\}$ divisée en m segments ($m \in [1; N]$). pour tout k compris entre 1 et m , soit i_k le rang dans la série, initiale du dernier élément du $k^{\text{ième}}$ sous-série en n_k le nombre d'éléments qu'elle contient.

Soit :

$$d_k = \sum_{i=i_{k-1}+1}^{i_k} (X_i - X_k)^2 \text{ et } D_m = D(i_1, i_2, \dots, i_m) = \sum_{k=1}^m \sum_{i=i_{k-1}+1}^{i_k} (X_i - X_k)^2 = \sum_{k=1}^m d_k$$

L'élément d_k représente l'écart quadratique entre le segment k et les éléments associés de la série initiale. D_m représente l'écart quadratique entre la série et la segmentation considérée.

La procédure d'Hubert vise à obtenir la segmentation la plus optimale au sens des moindres carrés, c'est-à-dire celle qui réduit D_m . Il est nécessaire que les moyennes successives de deux segments consécutifs soient significativement différentes pour obtenir le résultat souhaité. On peut le faire à l'aide du test de Scheffe (1959).

Si une solution est plus adaptée à la série que la meilleure des solutions déjà explorées par l'algorithme (au sens des moindres carrés), celle-ci sera choisie uniquement si l'hypothèse nulle du test de Scheffe pour cette nouvelle solution est rejetée pour un niveau de confiance préalablement établi. Le déroulement de la procédure est le suivant :

Nous commençons par $m = 2$. Si aucune segmentation ne remplit le critère de Scheffe, la série sera réputée stationnaire. Dans le cas contraire, nous passons à $m = m + 1$.

Supposons que nous soyons à l'ordre m . la meilleure segmentation obtenue jusqu'à présent est S_m délimitée par $\{i_0, i_1, \dots, i_m\}$. L'écart quadratique D_m entre S_m et les termes de la série est donc inférieur à tous les D_p (d'ordre $p < m$) dont la segmentation associée S_p satisfait au critère de Scheffe.

Nous passons maintenant à l'ordre $m + 1$ et nous cherchons s'il existe une segmentation S_{m+1} vérifiant le critère de Scheffe et telle que D_{m+1} soit inférieur à D_m si c'est le cas, nous incrémentons m à nouveau. Sinon, nous retiendrons la segmentation d'ordre m comme étant la meilleure. La procédure de segmentation est alors arrêtée.

IV.2.2.3.2 Le test de Pettitt (1979)

Pettitt (1979) est un test non paramétrique examine l'existence d'une rupture à un instant inconnu de la série à partir d'une formulation dérivée de celle du test de Mann-Whitney (Dagnélie, 1970).

Le fondement de test Mann-Whitney est le suivant (Ceresta, 1986) : La série analysée est subdivisée en deux sous-échantillons de taille m et n . On regroupe et classe les valeurs des deux échantillons par ordre croissant. L'ensemble des rangs des éléments de chaque sous-

échantillon est alors calculé dans l'échantillon total. On établit une statistique à partir des deux sommes ainsi obtenues et on la teste en supposant que les deux sous-échantillons appartiennent à la même population.

La formulation de test de Mann-Whitney modifiée par Pettitt (Pettitt, 1979) est le suivant :

L'absence d'une rupture dans la série (X_i) de taille N constitue l'hypothèse nulle. Pettitt définit la variable $U(t)$:

$$U(t) = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^n \text{signe}(X_i - X_j) ; \text{ avec: } \begin{cases} X > 0, \text{signe}(X) = 1 \\ X = 0, \text{signe}(X) = 0 \\ X < 0, \text{signe}(X) = -1 \end{cases}$$

Il propose de tester l'hypothèse nulle en utilisant la statistique T définie par le maximum en valeur absolue de $U(t)$ pour t variant de 1 à $(N - 1)$.

Si k désigne la valeur de T prise sur la série étudiée, sous l'hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur k est donnée approximativement par :

$$p = p(T \geq k) \approx 2 \exp\left(\frac{-6 k^2}{N^3 + N^2}\right)$$

si $p(T \geq k)$ est inférieurs à α , l'hypothèse nulle est rejetée. En cas de rejet de l'hypothèse nulle, une estimation de la date de rupture est donnée par l'instant T définissant le maximum en valeur absolue de la variable $U(t)$.

IV.2.2.3.3 Approche bayésienne de Lee & Heghinian (1977)

L'approche bayésienne de Lee et Heghinian (1977) est une méthode statistique permettant d'estimer un changement de point dans une série temporelle. La méthode bayésienne de Lee & Heghinian propose une approche paramétrique. Elle nécessite une distribution normale des valeurs de la série. L'absence de rupture dans la série constitue l'hypothèse nulle.

Le modèle de base de la procédure est le suivant

$$:x_i = \begin{cases} u + \varepsilon_i & i = 1, \dots, \tau \\ u + \delta + \varepsilon_i & i = \tau + 1, \dots, N \end{cases}$$

Les ε_i sont indépendants et normalement distribués, de moyenne nulle et de variante σ^2 . τ et δ représentent respectivement la position dans le temps et l'amplitude d'un changement éventuel de moyenne. La procédure Bayésienne se fonde sur la distribution

marginale a posteriori de τ et δ . Quant à l'approche de Buishand, elle est basée sur la statistique U .

IV.2.2.3.4 Test paramétrique des écarts cumulés (Buishand, 1982,1984)

Le test de Buishand est un test paramétrique, supposant normalité de la série. La statistique de Buishand est dérivée d'une formulation originale donnée par Gardner (1969).

On s'intéresse aux termes de cumul d'écarts suivants :

$$S_k = \sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})$$

Pour $k = 1, \dots, N$ et \bar{X} est la moyenne des valeurs X_1, X_2, \dots, N

En supposant une distribution a priori uniforme pour la position du point de rupture m , la statistique U est définie par :

$$U = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} (S_k / D_x)^2}{N(N+1)}$$

Pour $k = 1, \dots, N$ et D_x désigne l'écart type de la série.

$$D_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2$$

Des valeurs critiques de la statistique U sont données par Buishand (1982) à partir d'une procédure de Monte Carlo. En cas de rejet de l'hypothèse nulle, aucune estimation de la date de rupture n'est proposée par ce test.

De meilleures estimations sont parues ultérieurement (Buishand, 1984). Buishand (1982) suggère aussi de s'intéresser à la quantité :

$$Q = \max \left| S_k / D_x \right|^N$$

Pour une série stationnaire, Q garde des valeurs modérées. Au contraire, de grandes valeurs de Q traduisent un comportement non-stationnaire. Les valeurs critiques de la statistique Q ont été calculées par simulations par Buishand (1982), qui a par ailleurs montré que la puissance de la statistique bayésienne U est comparable à celle de Q .

IV.3 Résultats et Discussions

IV.3.1 Analyse de stationnarité des séries pluviométriques annuelles

IV.3.1.1 La vérification du caractère aléatoire

L'analyse statistique par le test de corrélation sur le rang a été appliquée aux stations pluviométriques annuelles (*tableau IV.2*). Sur un total de 16 stations, 3 indiquent que l'hypothèse nulle d'absence de changement a été acceptée aux seuils de confiance de 90, 95 et 99 % : les séries présentent un caractère aléatoire. Par contre, les 13 stations ont subi une tendance dans les séries pluviométriques, donc l'hypothèse nulle d'absence de changement est rejetée pour ces stations : – Beni Ouassine, Chouly, Meurbah, Sebdou et Tlemcen aux seuils de confiance de 90 et 95 %.

- Beni Bahdel Bge, Khemis Ould Moussa, Merchiche, Sabra, Ouled Mimoun, Mefrouch Bge, Bensekran, Lalla Setti et Smala Sidi Medjahed aux seuils de confiance de 90, 95 et 99 %.

Tableau IV.2 Résultats du test de corrélation sur le rang.

Station	Période d'étude	H ₀	Rang	U
			Intervalle de confiance	
Beni Ouassine	1953-2012	rejetée	95%,90%	-2,4449
Beni Bahdel Bge	1939-2016	rejetée	99%,95%,90%	-2,6362
Khemis Ould Moussa	1924-2015	rejetée	99%,95%,90%	-4,5999
Merchiche	1940-1996	rejetée	99%,95%,90%	-3,3339
Hammam Boughrara	1969-2016	acceptée	99%,95%,90%	-0,0826
Sabra	1914-2016	rejetée	99%,95%,90%	-3,3596
Chouly	1956-2016	rejetée	95%,90%	-2,066
Meurbah	1940-2016	rejetée	95%,90%	-2,2519
Ouled Mimoun	1923-2016	rejetée	99%,95%,90%	-4,4846
Mefrouch Bge	1943-2014	rejetée	99%,95%,90%	-3,1687
Bensekran	1914-2006	rejetée	99%,95%,90%	-3,0467
Lalla Setti	1956-2016	rejetée	99%,95%,90%	-3,9204
Pierre du Chat	1967-2016	acceptée	99%,95%,90%	-0,3442
Sebdou	1975-2015	rejetée	95%,90%	-2,2854
Smala Sidi Medjahed	1967-2016	acceptée	99%,95%,90%	-0,2065
Tlemcen	1964-2010	rejetée	95%,90%	-2,1478

IV.3.1.2 Détection de tendance au sein des séries pluviométriques annuelles

Les résultats des tests de tendance de Mann-Kendall, Spearman et la pente de Sen sont consignés dans le tableau IV.3. Toutes les stations présentent des valeurs négatives, cela signifie qu'elles enregistrent une tendance à la baisse. Si la valeur p est inférieure au niveau de signification ($\alpha = 0,05$) H_0 est rejeté. Le rejet de H_0 indique qu'il y a une tendance dans les séries chronologiques, tout en acceptant H_0 indique qu'aucune tendance n'a été détectée.

Les tendances dans les précipitations moyennes annuelles sont toutes significatives à un seuil de 0,05 (tableau IV.3), excepté les trois stations Hammam Boughrara, Pierre du Chat et Smala Sidi Medjahed. Ce résultat montre qu'il y a une baisse dans ces trois séries, mais elles ne sont pas significatives au seuil de confiance étudié.

Concernant le test de Mann-Kendall, plus la valeur de S est élevée, plus la valeur de $u(S)$ est élevée et plus la tendance est très significative, et c'est ce que nous avons remarqué à la station de Khemis Ould Moussa ($S = -1388$ et $u(S) = -4,60$), Ouled Mimoun ($S = -1373$ et $u(S) = -4,48$) et Sabra ($S = -1179$ et $u(S) = -3,36$).

Le test Spearman nous fournit presque les mêmes résultats du test de Mann-Kendall en montrant une tendance significative pour toutes les stations à un seuil de signification de 0,05 exceptant les trois stations, c'est ce que nous avons mentionné précédemment. En tant que les trois stations Khemis Ould Moussa, Ouled Mimoun et Sabra se sont les stations les plus significatives ($p\text{-value} \lll 0,05$).

Après avoir détecté la présence d'une tendance significative, sa magnitude est estimée à travers la pente de Sen. Elle montre l'ampleur de la tendance et révèle une forte pente négative pour la majorité des stations étudiées. Les stations de Lalla Setti, Mefrouch Bge, Khemis Ould Moussa et Tlemcen enregistrent respectivement des réductions plus importantes dans les totaux pluviométriques annuels, de -4,8 mm/ans, -3,6 mm/ans, -3,3 mm/ans et -3,1 mm/ans, alors qu'elle montre une légère pente négative au niveau des trois stations Hammam Boughrara, Pierre du Chat et Smala Sidi Medjahed (tableau IV.3).

Par conséquent, nous concluons qu'il y a une tendance à la baisse et il ne nous reste plus qu'à la déterminer quand elle sera produite.

Tableau IV.3 Résultats du test de Mann-Kendall, du test de Spearman et de la pente de Sen appliqués sur les totaux pluviométriques annuels.

Station	Période d'étude	S	Mann Kendall			Test de Spearman				
			Statistique $u(S)$	Degré de signification (p -value)	Hypothèse nulle (H_0)	r_s	Statistique $u(r_s)$	Degré de signification (p -value)	Hypothèse nulle (H_0)	Pente de Sen (mm/ans)
Beni Bahdel Bge	1939-2016	-611	-2,6318	0,0084922	Rejetée	-0,3241	-2,8439	0,0044564	Rejetée	-1,7281
Beni Ouassine	1953-2012	-424	-2,4507	0,0142578	Rejetée	-0,3347	-2,6563	0,0079005	Rejetée	-1,3920
Bensekran	1914-2006	-813	-2,3138	0,0206768	Rejetée	-0,1991	-2,0113	0,0442921	Rejetée	-1,3000
Chouly	1956-2016	-332	-2,0598	0,0394191	Rejetée	-0,2568	-1,9891	0,0466871	Rejetée	-2,1157
Hammam Bouhrara	1969-2016	-12	-0,0757	0,9396400	Acceptée	-0,0626	-0,4686	0,6393870	Acceptée	-0,0998
Khemis Ould Moussa	1924-2015	-1388	-4,6032	0,0000042	Rejetée	-0,4768	-4,5731	0,0000048	Rejetée	-3,2761
Lalla Setti	1956-2016	-632	-3,9267	0,0000861	Rejetée	-0,4958	-3,8406	0,0001227	Rejetée	-4,8494
Mefrouch Bge	1943-2014	-679	-3,1640	0,0015559	Rejetée	-0,3764	-3,2163	0,0012986	Rejetée	-3,6172
Merchiche	1940-1996	-758	-3,3295	0,0008700	Rejetée	-0,3688	-3,2155	0,0013022	Rejetée	-2,4261
Meurbah	1940-2016	-512	-2,2475	0,0246059	Rejetée	-0,2376	-2,0714	0,0383226	Rejetée	-2,0642
Ouled Mimoun	1923-2016	-1373	-4,4813	0,0000074	Rejetée	-0,4628	-4,4634	0,0000081	Rejetée	-2,2813
Pierre du Chat	1967-2016	-52	-0,3511	0,7255311	Acceptée	-0,0730	-0,5462	0,5849535	Acceptée	-0,2852
Sabra	1914-2016	-1179	-3,3568	0,0007886	Rejetée	-0,3342	-3,3749	0,0007385	Rejetée	-1,3619
Sebdou	1975-2015	-334	-2,2923	0,0218871	Rejetée	-0,2989	-2,2370	0,0252837	Rejetée	-2,4920
Smala Sidi Medjahed	1967-2016	-30	-0,1996	0,8417687	Acceptée	-0,0597	-0,4467	0,6550708	Acceptée	-0,1520
Tlemcen	1964-2010	-312	-2,1409	0,0322840	Rejetée	-0,2672	-1,9999	0,0455163	Rejetée	-3,0571

*Tendance significative au seuil de 0,05.

IV.3.1.3 Détection de rupture au sein des séries pluviométriques annuelles

L'application de la segmentation d'Hubert, avec un niveau de signification de 1 % du test de Scheffé, a permis d'identifier plusieurs ruptures dans les séries pluviométriques. La plus importante se situe entre 1974 et 1980 pour la plupart des stations pluviométriques, avec un maximum enregistré en 1975 et 1980. Cette rupture négative enregistre une baisse notable des précipitations moyennes annuelles.

Les années 1975 et 1980 sont apparues pour dix stations pluviométriques comme les années de rupture les plus abondantes. Par exemple, la pluie moyenne annuelle avant la date de rupture était de 488,5 mm, 488,1 mm et 729,5 mm, respectivement à la station de Merchich, Sabra et à Lalla Setti. Après la date de la rupture, elle est diminuée jusqu'à 365,6 mm, 382,5 mm et 510,9 mm. Ceci correspond à un déficit de -25,2 %, -21,6 % et -30 % (*tableau IV.4*).

Nous ne devons pas ignorer que la segmentation d'Hubert révèle une autre rupture, cette fois à la hausse pour quelques postes pluviométriques comme (Hammam Boughrara, Chouly, Meurbah, Ouled Mimoun, Bensekran et Tlemcen), respectivement dans les années 1989, 2007, 1946, 1947, 1931 et 1960. Ces postes sont cependant isolés les uns des autres et leurs résultats ne reflètent donc en rien un comportement régional.

Le test de Pettitt a été appliqué à chacune des séries chronologiques étudiées (*tableau IV.4*). Les résultats des tests montrent qu'une rupture négative très significative (inférieure à 1 %) au sein de la série chronologique s'observe majoritairement entre 1974 et 1980. Ce niveau de signification traduit ici l'importance réelle ou non d'un changement de la moyenne au sein de la série pluviométrique. Ce résultat est en excellent accord avec le test d'Hubert. On constate qu'un seul cas de la station de Smala Sidi Medjahed où la rupture n'a pas été signalée. Le rapport entre les deux moyennes avant et après la date de rupture enregistre un déficit moyen de 24,6 % dans le bassin versant du Tafna. La réduction la plus importante est enregistrée à la station de Khemis Ould Moussa, avec plus de 32,0 % de diminution des pluies annuelles après la date de rupture.

Les deux procédures de Lee et Heghinian et Buishand ont également identifié la rupture négative entre 1974 et 1980 (*figure IV.1* et *figure IV.2*). Les années 1975 et 1980 ont enregistré un nombre maximal de ruptures, ce qui a conduit à un déficit moyen de 24,9 % (*tableau IV.5*).

Tableau IV.4 Résultats de segmentation d'Hubert et test Pettitt appliqués aux séries pluviométriques annuelles.

STATION	Date d'observation	Hubert								Pettitt				
		Année de rupture	Moy 1	Moy 2	$R_{2/1}$ (%)	Moy 3	$R_{3/2}$ (%)	Moy 4	$R_{4/3}$ (%)	Année de rupture	Probabilité associée	Moy 1	Moy 2	$R_{2/1}$ (%)
Beni Ouassine	1953-2012	1980,2007	332,9	224,5	-32,6	322,1	43,5			1980	0,000268	332,9	248,9	-25,2
Beni Bahdel Bge	1939-2016	1974	532,9	407,3	-23,6					1974	0,000196	532,9	407,3	-23,6
Khemis Ould Moussa	1924-2015	1974	602,1	406,6	-32,5					1974	0,000001	602,1	406,6	-32,5
Merchiche	1940-1996	1975	488,5	365,6	-25,2					1976	0,000746	486,5	364,4	-25,1
Hammam Boughrara	1969-2016	1980,1989	320,8	154,4	-51,9	274,3	77,7			1980	0,0462	320,8	244,3	-23,9
Sabra	1914-2016	1975	488,1	382,5	-21,6					1975	0,000075	488,1	382,5	-21,6
Chouly	1956-2016	1979,2007,2009	516	373,8	-27,6	809,6	116,6	458,4	-43,4	1980	0,00552	512,8	412,8	-19,5
Meurbah	1940-2016	1942,1946,1951	635,6	246,7	-61,2	720,9	192,2	432,2	-40,0	1977	0,00984	502,3	397,5	-20,9
Ouled Mimoun	1923-2016	1979	492,1	341,2	-30,7					1980	2,09E-06	490,7	339,2	-30,9
Mefrouch Bge	1943-2014	1975	764,5	579,2	-24,2					1977	0,000187	758,7	574,8	-24,2
Bensekran	1914-2006	1931,1940,1980	401,5	627,8	56,4	472,4	-24,8	338,5	-28,3	1976	0,000704	477,8	348,9	-27
Lalla Setti	1956-2016	1975	729,5	510,9	-30,0					1980	0,0000276	702,9	498,9	-29
Pierre du Chat	1967-2016	PR	/	/						1980	0,0976	378,5	310,7	-17,9
Sebdou	1975-2015	1980	470,5	357,1	-24,1					1980	0,00619	470,5	357,1	-24,1
Smala Sidi Medjahed	1967-2016	1975	377,3	291,8	-22,7					PR	/	/	/	/
Tlemcen	1964-2010	1975	678,5	515,5	-24,0					1977	0,00998	666,6	512,6	-23,1
Moyenne					-25,0									-24,6

R : C'est le rapport entre les deux moyennes avant et après la rupture $R = [(M_2 - M_1)/M_1] \times 100$

- M_2 : La moyenne avant la date de rupture.
- M_1 : La moyenne après la date de rupture.

PR: Pas de rupture.

Tableau IV.5 Résultats du test de Lee et Heghinian et Buishand appliqués aux séries pluviométriques annuelles.

Station	Date d'observation	Buishand					Lee et Heghinian				
		Année de rupture	(U) Statistique de Buishand	Moy 1	Moy 2	R (%)	Année de rupture	Densité de probabilité	Moy 1	Moy 2	R (%)
Beni Ouassine	1953-2012	1980	1323,2438	332,9	248,9	-25,2	1980	0,3983	332,9	248,9	-25,2
Beni Bahdel Bge	1939-2016	1974	2434,2385	532,9	407,3	-23,6	1974	0,3324	532,9	407,3	-23,6
Khemis Ould Moussa	1924-2015	1974	4501,6677	602,1	406,6	-32,5	1974	0,2567	602,1	406,6	-32,5
Merchiche	1940-1996	1975	2355,5571	488,5	365,6	-25,2	1975	0,164	488,5	365,6	-25,2
Hammam Boughrara	1969-2016	1976	1023,0982	332,7	246,9	-25,8	1976	0,1808	332,7	246,9	-25,8
Sabra	1914-2016	1975	2605,7874	488,1	382,5	-21,6	1975	0,2128	488,1	382,5	-21,6
Chouly	1956-2016	1976	1482,7918	524,4	416,7	-20,5	1975	0,1542	527,7	417,7	-20,8
Meurbah	1940-2016	1977	2015,6039	502,3	397,5	-20,9	1977	0,0887	502,3	397,5	-20,9
Ouled Mimoun	1923-2016	1979	82,7932	492,1	341,2	-30,6	1980	0,2992	490,7	339,2	-30,9
Mefrouch Bge	1943-2014	1977	3392,7108	758,7	574,8	-24,2	1975	0,18	764,5	579,2	-24,2
Bensekran	1914-2006	1976	5,7642	477,8	348,9	-27,0	1980	0,1293	474,2	338,5	-28,6
Lalla Setti	1956-2016	1982	61,1439	682,4	503,2	-26,3	1975	0,2356	729,5	510,9	-30,0
Pierre du Chat	1967-2016	PR	/	/	/	/	1980	0,1316	378,5	310,7	-17,9
Sebdou	1975-2015	1980	1503,3105	470,5	357,1	-24,1	1980	0,2874	470,5	357,1	-24,1
Smala Sidi Medjahed	1967-2016	1975	983,7404	377,3	291,8	-22,7	1975	0,134	377,3	291,8	-22,7
Tlemcen	1964-2010	1976	1902,3649	673,2	513,7	-23,7	1975	0,2588	678,5	515,5	-24,0
Moyenne						24,9					24,9

R : C'est le rapport entre les deux moyennes avant et après la rupture $R = [(M_2 - M_1)/M_1] \times 100$

- M_2 : La moyenne avant la date de rupture.
- M_1 : La moyenne après la date de rupture.

PR: Pas de rupture.

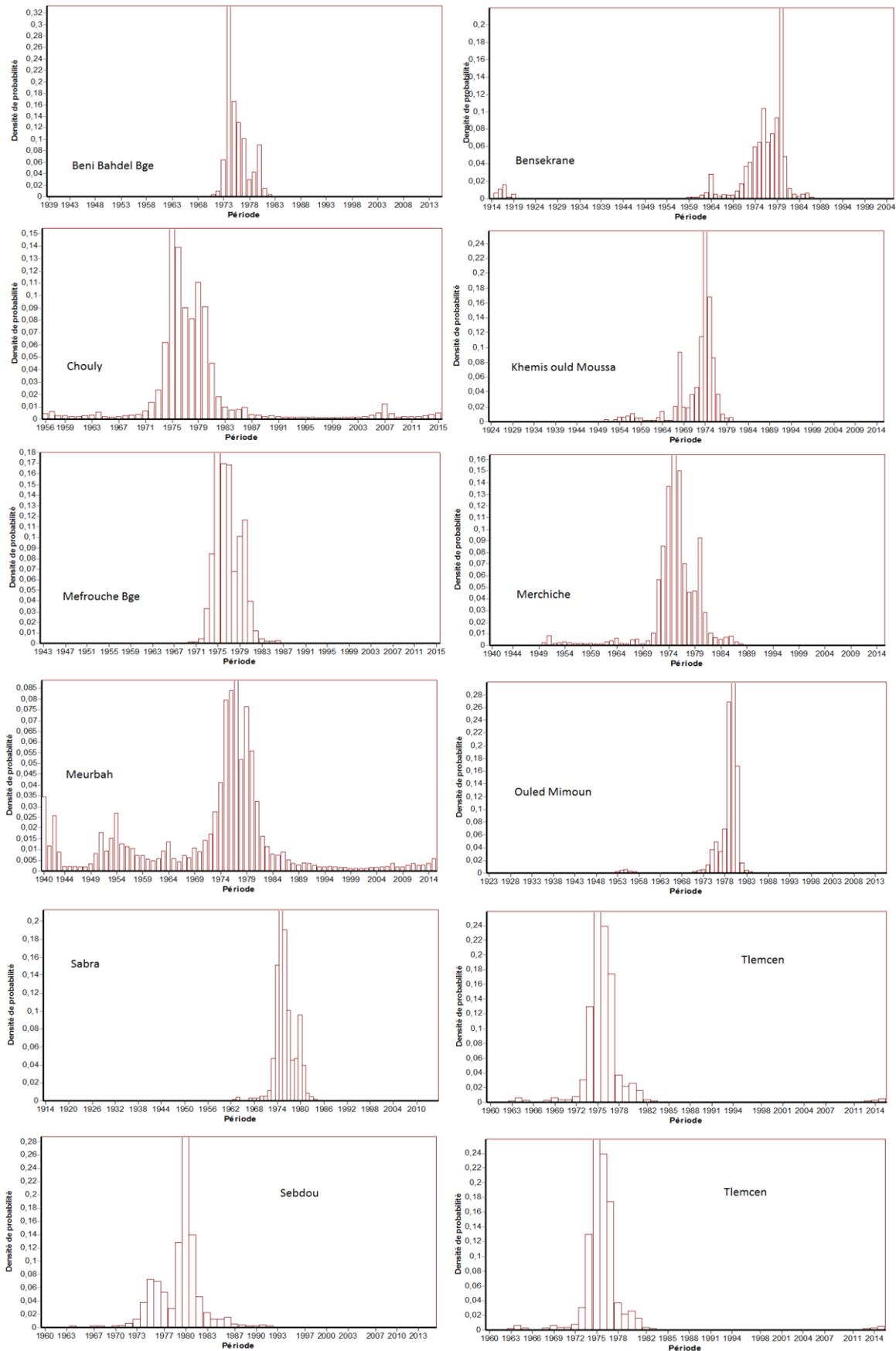


Figure IV.1 « Procédure de Lee Heghinian »
 Densité de probabilité *a posteriori* de la position du point de rupture (pluie annuelle).

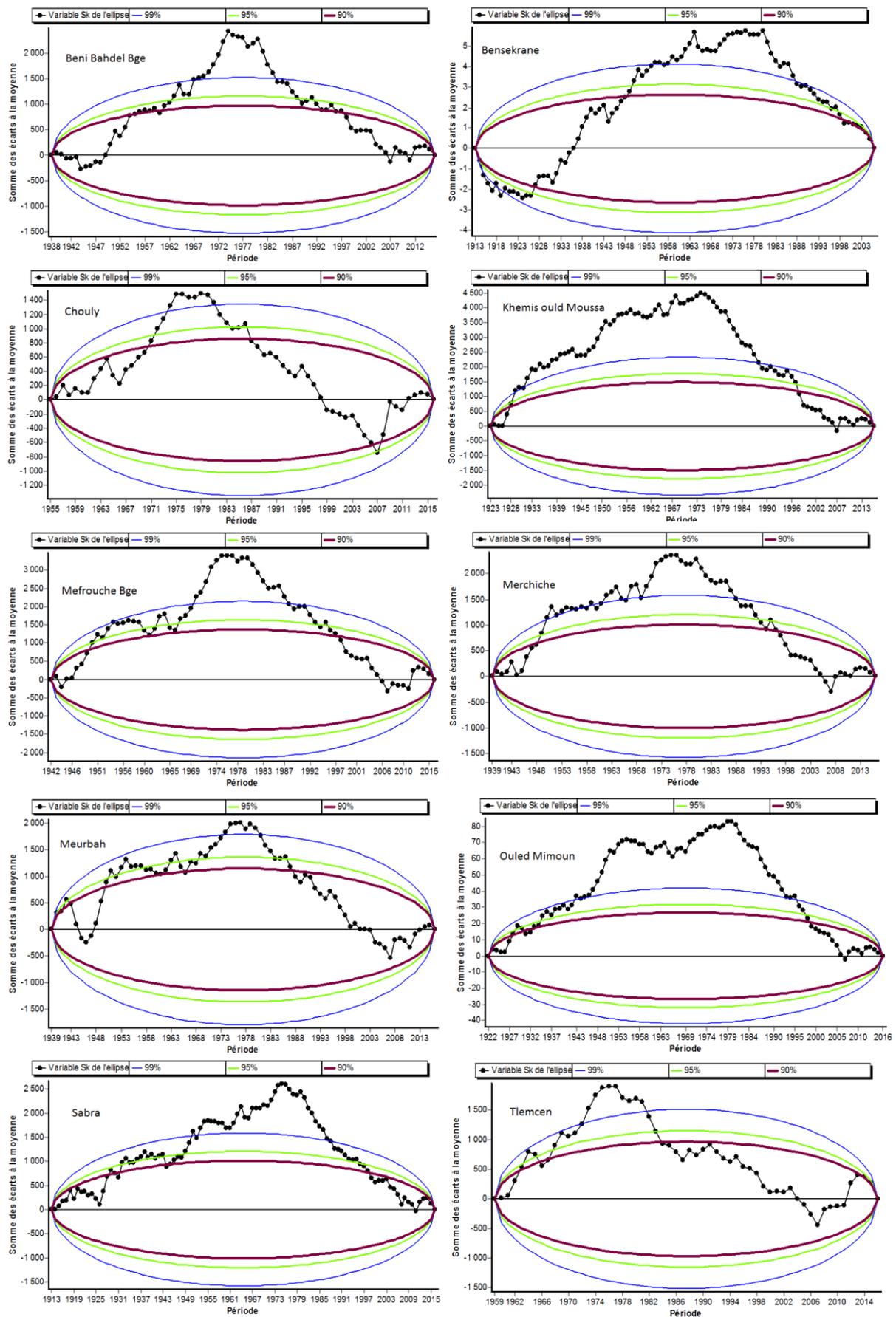


Figure IV.2 Test de Buishand et ellipse de Bois (pluie annuelle).

IV.3.2 Analyse de stationnarité des séries pluviométriques saisonnières

IV.3.2.1 La vérification du caractère aléatoire

Les précipitations automnales dans la majorité des stations ont montré que l'hypothèse nulle d'absence de rupture a été acceptée aux seuils de confiance de 90 %, 95 % et 99 %. Cela signifie que, dans la plupart des stations, il n'y a pas de changements significatifs ou de ruptures dans la série temporelle des données pluviométriques à ces niveaux de confiance. Cependant, trois stations font exception, où les données suggèrent un caractère non aléatoire ou une rupture dans les séries temporelles, indiquant un changement significatif dans les séries pluviométriques.

Les précipitations de printemps indiquent que dans la majorité des stations, l'hypothèse nulle (absence de changement significatif ou de tendance) a été rejetée, sauf pour quatre stations : Hammam Boughrara, Bensekran, Sabra, et Chouly, où les séries de données montrent un caractère aléatoire. En outre, la station de Beni Bahdel Bge a également rejeté l'hypothèse nulle d'absence de tendance pour les trois saisons analysées (automne, hiver et printemps), suggérant qu'il existe des changements significatifs dans les précipitations à cette série chronologique. Les tableaux vérifiant le caractère aléatoire des totaux pluviométriques saisonniers sont présentés dans l'Annexe C.

IV.3.2.2 Détection de tendance au sein des séries pluviométriques saisonnières

Les résultats des tests de tendance de Mann-Kendall et Spearman illustrent que l'hypothèse nulle (absence de tendance) est acceptée pour toutes les stations (*tableau IV.6*). Ce qui signifie que les précipitations en automne sont aléatoires et ne présentent aucune tendance.

En ce qui concerne la saison d'hiver, huit stations rejettent l'hypothèse nulle selon le test de Mann-Kendall. Ce qui indique que la tendance est significative, le *tableau IV.7* présente le degré de signification à chaque station. La tendance la plus importante et la plus significative est observée à la station de Khemis Ould Moussa, avec une pente de Sen de -1,76 mm/an et une probabilité très significative de $0,000129 \lll 0,05$.

Il est important de noter que les statistiques (S) de Mann-Kendall et (rs) de Spearman sont positives dans deux stations, à savoir Pierre du Chat et Hammam Boughrara, avec respectivement (S = 165, rs = 1,34) et (S = et rs = 0,46).

Ces valeurs positives signifient qu'il y a une augmentation dans les séries chronologiques. L'intensité de cette tendance est représentée par la pente de Sen qui atteint 1 mm/an à la station de Pierre du Chat (*tableau IV.7*).

Le test de Spearman confirme ces constatations, avec des différences très modérées. Par exemple, l'hypothèse nulle est acceptée à la station de Sabra ((p-valeur = 0,051) > 0,05) et, avec une probabilité très significative (p-valeur = 0,00020), la station de Ouled Mimoun est considérée comme la station la plus affectée par la sécheresse (*tableau IV.7*).

D'après les deux tests Mann-Kendall et Spearman, l'hypothèse nulle (absence de tendance) pour les pluies de printemps a été rejetée par la majorité des stations, avec un niveau de signification élevé (inférieur à 5 %), à l'exception de cinq stations qui ont accepté l'hypothèse nulle. La pente de Sen est fortement négative dans toutes les stations, et en particulier les stations de Tlemcen, Lalla Setti, Mefrouch Bge et Pierre du Chat enregistrent des pentes importantes des précipitations printemnières, avec des réductions de -2,81 mm/an, -2,27 mm/an, -1,94 mm/an et -1,73 mm/an (*tableau IV.8*).

Tableau IV.6 Résultats du test de Mann-Kendall, du test de Spearman et de la pente de Sen appliqués aux pluies d'automne.

STATION	Période d'étude	Mann Kendall				Test de Spearman				Pente de Sen (mm/ans)
		S	Statistique $u(S)$	Degré de signification (p-value)	Hypothèse nulle (H_0)	r_s	Statistique $u(r_s)$	Degré de signification (p-value)	Hypothèse nulle (H_0)	
Beni Bahdel Bge	1939-2016	535	2,3039	1,9787742	Acceptée	0,2570	2,2549	1,9758610	Acceptée	0,6100
Beni Ouassine	1953-2012	280	1,7794	1,9248327	Acceptée	0,2418	1,8576	1,9367807	Acceptée	0,5151
Bensekran	1914-2006	-438	-1,4503	0,1469676	Acceptée	-0,1554	-1,4908	0,1360142	Acceptée	-0,3247
Chouly	1956-2016	70	0,4294	1,3323541	Acceptée	0,0530	0,4109	1,3188187	Acceptée	0,1582
Hammam Boughrara	1969-2016	182	1,6087	1,8923258	Acceptée	0,2087	1,4311	1,8476025	Acceptée	0,6854
Khemis Ould Moussa	1924-2015	-356	-1,1973	0,2311723	Acceptée	-0,1357	-1,2948	0,1953737	Acceptée	-0,3419
Lalla Setti	1956-2016	16	0,0933	1,0743695	Acceptée	0,0162	0,1258	1,1000735	Acceptée	0,0627
Mefrouch Bge	1943-2014	200	0,9674	1,6666500	Acceptée	0,1109	0,9348	1,6501054	Acceptée	0,4069
Merchiche	1940-1996	78	0,3387	1,2651414	Acceptée	0,0276	0,2402	1,1898151	Acceptée	0,0835
Meurbah	1940-2016	150	0,6553	1,4877561	Acceptée	0,0688	0,5998	1,4513479	Acceptée	0,2427
Ouled Mimoun	1923-2016	-435	-1,4176	0,1563188	Acceptée	-0,1403	-1,3531	0,1760237	Acceptée	-0,3146
Pierre du Chat	1967-2016	205	1,7064	1,9120721	Acceptée	0,2537	1,7758	1,9242338	Acceptée	0,8286
Sabra	1914-2016	-447	-1,2709	0,2037644	Acceptée	-0,1482	-1,4971	0,1343699	Acceptée	-0,2601
Sebdou	1975-2015	93	0,8711	1,6162840	Acceptée	0,1220	0,8187	1,5870535	Acceptée	0,4842
Smala Sidi Medjahed	1967-2016	145	1,2045	1,7716189	Acceptée	0,1583	1,1082	1,7322398	Acceptée	0,4542
Tlemcen	1964-2010	190	1,4498	1,8528753	Acceptée	0,2078	1,4984	1,8659676	Acceptée	1,0787

*Tendance significative au seuil de 0,05.

Tableau IV.7 Résultats du test de Mann-Kendall, du test de Spearman et de la pente de Sen appliqués aux pluies d'hiver.

STATION	Période d'étude	Mann Kendall				Test de Spearman				Pente de Sen (mm/ans)
		S	Statistique $u(S)$	Degré de signification (p-value)	Hypothèse nulle (H_0)	r_s	Statistique $u(r_s)$	Degré de signification (p-value)	Hypothèse nulle (H_0)	
Beni Bahdel Bge	1939-2016	-585	-2,5197	0,0117465	Rejetée	-0,2819	-2,4735	0,0133793	Rejetée	-1,1676
Beni Ouassine	1953-2012	-236	-1,4988	0,1339221	Acceptée	-0,1978	-1,5196	0,1286161	Acceptée	-0,6258
Bensekran	1914-2006	-656	-2,1738	0,0297179	Rejetée	-0,2124	-2,0371	0,0416442	Rejetée	-0,7186
Chouly	1956-2016	-174	-1,0766	0,2816750	Acceptée	-0,1299	-1,0060	0,3143994	Acceptée	-0,6023
Hammam Boughrara	1969-2016	74	0,6488	1,4835498	Acceptée	0,0673	0,4614	1,3554953	Acceptée	0,3558
Khemis Ould Moussa	1924-2015	-1136	-3,8281	0,0001291	Rejetée	-0,3784	-3,6097	0,0003065	Rejetée	-1,7756
Lalla Setti	1956-2016	-406	-2,5203	0,0117261	Rejetée	-0,3031	-2,3475	0,0188974	Rejetée	-1,6915
Mefrouch Bge	1943-2014	-472	-2,2896	0,0220418	Rejetée	-0,2509	-2,1145	0,0344700	Rejetée	-1,5742
Merchiche	1940-1996	-528	-2,3179	0,0204543	Rejetée	-0,2630	-2,2930	0,0218473	Rejetée	-0,9993
Meurbah	1940-2016	-324	-1,4207	0,1554176	Acceptée	-0,1377	-1,2000	0,2301313	Acceptée	-0,7104
Ouled Mimoun	1923-2016	-1159	-3,7823	0,0001554	Rejetée	-0,3853	-3,7157	0,0002027	Rejetée	-1,0895
Pierre du Chat	1967-2016	165	1,3718	1,8298857	Acceptée	0,1910	1,3368	1,8187143	Acceptée	1,0034
Sabra	1914-2016	-701	-1,9947	0,0460772	Rejetée	-0,1929	-1,9482	0,0513908	Acceptée	-0,5411
Sebdou	1975-2015	-149	-1,4013	0,1611284	Acceptée	-0,2178	-1,4608	0,1440738	Acceptée	-1,1000
Smala Sidi Medjahed	1967-2016	-45	-0,3681	0,7128332	Acceptée	-0,0438	-0,3069	0,7589265	Acceptée	-0,2333
Tlemcen	1964-2010	-42	-0,3145	0,7531422	Acceptée	-0,0444	-0,3204	0,7486824	Acceptée	-0,3649

*Tendance significative au seuil de 0,05.

Tableau IV.8 Résultats du test de Mann-Kendall, du test de Spearman et de la pente de Sen appliqués aux pluies de printemps.

STATION	Période d'étude	Mann Kendall				Test de Spearman				Pente de Sen (mm/ans)
		S	Statistique $u(S)$	Degré de signification (p-value)	Hypothèse nulle (H_0)	r_s	Statistique $u(r_s)$	Degré de signification (p-value)	Hypothèse nulle (H_0)	
Beni Bahdel Bge	1939-2016	-571	-2,4593	0,0139221	Rejetée	-0,2781	-2,4407	0,0146603	Rejetée	-1,1125
Beni Ouassine	1953-2012	-408	-2,5958	0,0094366	Rejetée	-0,3439	-2,6418	0,0082475	Rejetée	-1,1564
Bensekran	1914-2006	-358	-1,1848	0,2360886	Acceptée	-0,1061	-1,0177	0,3088345	Acceptée	-0,3521
Chouly	1956-2016	-260	-1,6117	0,1070196	Acceptée	-0,2074	-1,6061	0,1082452	Acceptée	-1,0774
Hammam Boughrara	1969-2016	-160	-1,4132	0,1575974	Acceptée	-0,2105	-1,4430	0,1490144	Acceptée	-0,6219
Khemis Ould Moussa	1924-2015	-802	-2,7016	0,0069004	Rejetée	-0,3057	-2,9162	0,0035429	Rejetée	-0,9933
Lalla Setti	1956-2016	-440	-2,7319	0,0062978	Rejetée	-0,3511	-2,7199	0,0065303	Rejetée	-2,2739
Mefrouch Bge	1943-2014	-512	-2,4841	0,0129880	Rejetée	-0,2938	-2,4754	0,0133071	Rejetée	-1,9460
Merchiche	1940-1996	-626	-2,7489	0,0059788	Rejetée	-0,3155	-2,7507	0,0059469	Rejetée	-1,1017
Meurbah	1940-2016	-478	-2,0980	0,0359058	Rejetée	-0,2369	-2,0654	0,0388824	Rejetée	-0,8479
Ouled Mimoun	1923-2016	-815	-2,6587	0,0078432	Rejetée	-0,2821	-2,7201	0,0065269	Rejetée	-0,6651
Pierre du Chat	1967-2016	-373	-3,1117	0,0018600	Rejetée	-0,4509	-3,1566	0,0015960	Rejetée	-1,7370
Sabra	1914-2016	-527	-1,4989	0,1339091	Acceptée	-0,1427	-1,4416	0,1494069	Acceptée	-0,4349
Sebdou	1975-2015	-237	-2,2345	0,0254513	Rejetée	-0,3407	-2,2857	0,0222711	Rejetée	-1,8200
Smala Sidi Medjahed	1967-2016	-199	-1,6562	0,0976729	Acceptée	-0,2529	-1,7704	0,0766572	Acceptée	-1,0974
Tlemcen	1964-2010	-356	-2,7231	0,0064673	Rejetée	-0,3801	-2,7409	0,0061264	Rejetée	-2,8153

*Tendance significative au seuil de 0,05.

IV.3.2.3 Détection de rupture au sein des séries pluviométriques saisonnières

Les résultats du test d'Hubert révèlent trois ruptures majeures et bien distinctes durant la saison d'automne (*figure IV.3*). La première rupture, en 1951, est négative et a entraîné un déficit de plus de 50 % dans plusieurs stations : Sabra (71,3 %), Ouled Mimoun (69,8 %), Meffrouche (63,4 %) et Bensekran (60,9 %). La deuxième rupture négative, en 2012, a également causé une pénurie de plus de 50 %, avec un maximum enregistré à la station de Béni Bahdel (79,8 %).

La troisième rupture, positive, est apparue en 2006, mais seulement dans trois stations, où une reprise des précipitations de plus de 100 % a été observée. Il est à noter que ces deux dernières ruptures (négative et positive) ne se manifestent pas clairement dans les autres saisons. Il est également important de noter que d'autres ruptures apparaissent de manière aléatoire selon les tests de Buishand, Lee Heghinian et Pettitt (*figure IV.3*).

Tous les tests montrent une rupture significative durant la saison de printemps de 1975 (*figure IV.3*), observée dans toutes les stations. Le test de Pettitt souligne l'importance de cette rupture avec des probabilités inférieures à 0,01, la valeur maximale ayant été enregistrée à la station de Khemis Ould Moussa (0,000719). Cette rupture a entraîné un déficit pluviométrique considérable dans toutes les stations. Par exemple, la station de Khemis Ould Moussa a enregistré une diminution de 37,7 %, Béni Bahdel (37,7 %), Merchiche (30,5 %), Sabra (34,6 %), Meurbah (36,9 %) et Meffrouche (40,4 %).

Deux ruptures majeures se produisent pendant la saison d'hiver en 1964 et 1980, qui se manifestent de manière significative à la station de Merchiche, Beni Bahdel Bge, Sabra, Mefrouch Bge, Bensekran et Lalla Setti. Ces deux ruptures ont également entraîné un déficit important. D'après ces résultats, il est évident que la saison printanière est responsable de la rupture annuelle en 1975 et que la saison hivernale est responsable de la rupture annuelle en 1980 (*figure IV.3*).

Les tableaux concernant les tests de détection de rupture à l'échelle saisonniers (Buishand, Lee & Heghinian, Pettitt et Hubert) sont présentés dans l'Annexe C.

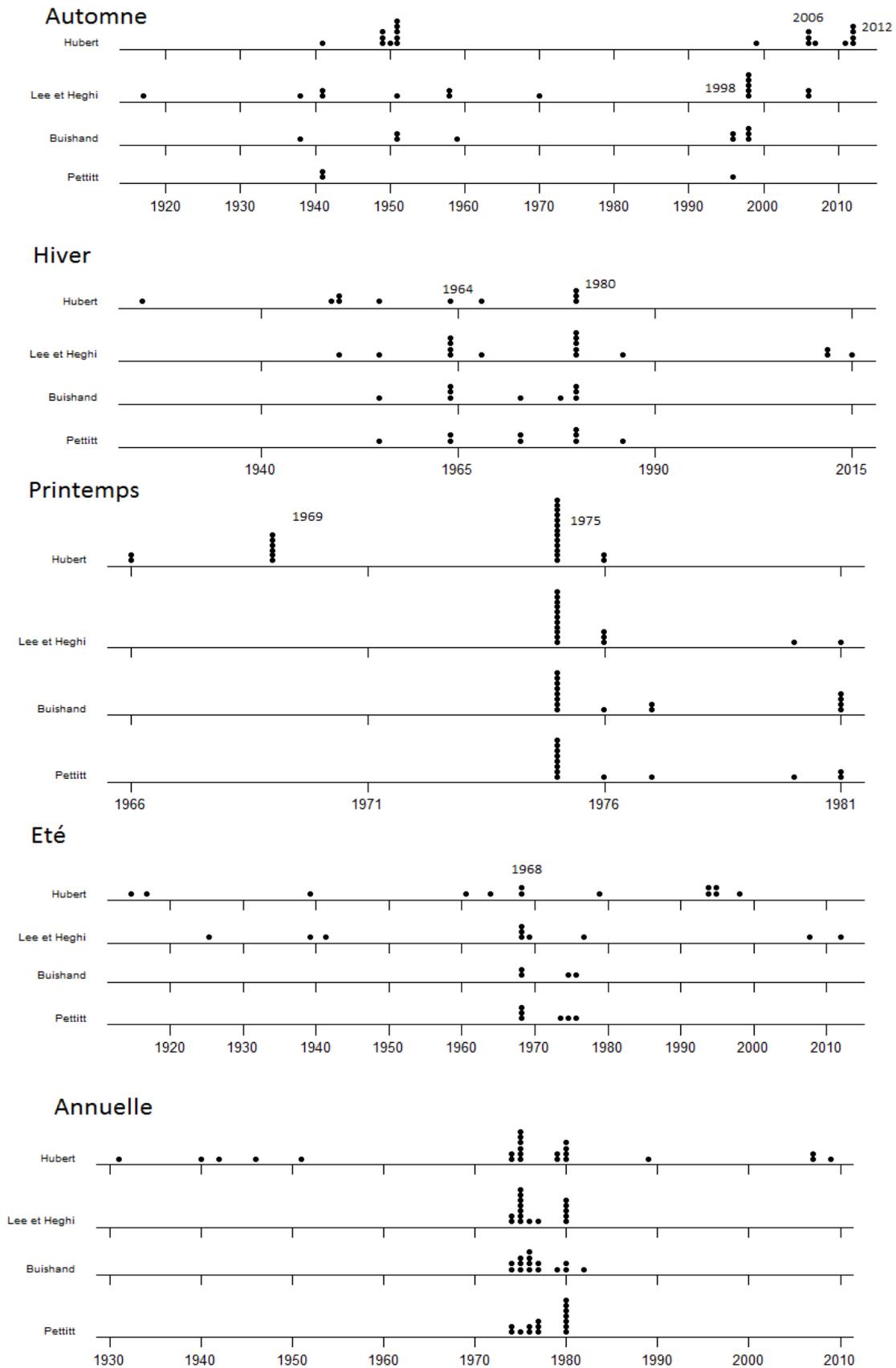


Figure IV.3 Représentation graphique des tests des ruptures saisonnières et annuelles.

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre, plusieurs méthodes puissantes ont été utilisées pour identifier les tendances climatiques dans le bassin versant de la Tafna. Ces méthodes statistiques sont essentielles pour analyser les séries chronologiques de précipitations et détecter les ruptures ou tendances dans les données.

Les résultats des tests de tendance de Mann-Kendall, Spearman, et de la pente de Sen révèlent des tendances claires de diminution des précipitations dans le bassin versant de la Tafna. Toutes les stations présentent des valeurs négatives, ce qui signifie qu'il existe une tendance à la baisse des précipitations annuelles, avec des tendances significatives dans la majorité des stations. Les stations de Khemis Ould Moussa, Ouled Mimoun, Sabra, ainsi que celles de Lalla Setti et Tlemcen, montrent les tendances les plus marquées.

Par ailleurs, des tests de détection de ruptures, comme ceux de Buishand, Lee & Heghinian, Pettitt et Hubert, ont mis en lumière des changements importants dans les régimes pluviométriques, en particulier entre 1974 et 1980. Cette période marque une transition vers des périodes de sécheresse accrue, suggérant un changement climatique significatif affectant durablement les précipitations et les ressources hydriques.

Les ruptures identifiées révèlent des périodes prolongées de sécheresse, accompagnées de quelques phases de récupération des précipitations. Ces ruptures affectent principalement les saisons de printemps et d'hiver, avec des événements marquants en 1975 et 1980, soulignant l'importance de ces saisons dans la dynamique des précipitations dans le bassin versant.

En conclusion, les analyses montrent que la région du bassin versant de la Tafna fait face à une diminution progressive des précipitations, particulièrement au printemps et en hiver, ce qui pourrait entraîner des répercussions importantes sur les ressources en eau, l'agriculture et la gestion des barrages.

CHAPITRE V:

Évolution du régime hydrologique et détection de rupture

V.1 Introduction

L'Algérie a connu, au cours des 20 dernières années, une grave pénurie de ressources en eau, une situation documentée par plusieurs études (Meddi, 2003 ; Meddi et Hubert, 2009 ; Meddi et *al.*, 2010 ; Khaldi, A., 2005). Ces travaux ont mis en évidence l'effet du déficit pluviométrique sur les ressources en eau superficielles et souterraines, particulièrement dans le nord-ouest de l'Algérie.

L'objectif de ce chapitre est d'utiliser des données récentes observées en station hydrométrique pour identifier l'évolution du régime d'écoulement en région d'étude, d'établir un lien avec les tendances des précipitations et de vérifier la persistance de la sécheresse dans les années à venir, si elle existe.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons mis en œuvre de nombreuses méthodes statistiques qui sont très efficaces pour étudier la stationnarité des séries chronologiques, par l'application des méthodes de Nicholson du filtre passe-bas d'Hanning, des tests de rupture (test de Lee et Heghian, test de Pettitt, test de Buishand et la segmentation d'Hubert) et les tests de tendance linéaire (test de Mann Kendall et test Rho de Spearman).

Avant de procéder à ces tests, nous aborderons certaines caractéristiques statistiques des séries hydrométriques étudiées (le module, la médiane, le maximum, le minimum, le coefficient de variation et les apports moyens et extrêmes...), ainsi que plusieurs facteurs importants identifiés dans les études des écoulements superficiels, y compris la nature du régime d'écoulement, le débit spécifique et la lame d'eau écoulée.

V.2 Données hydrométriques, choix de période d'observation

Pour étudier les variations hydroclimatologiques, nous avons sélectionné neuf stations hydrométriques, caractérisées par des séries continues de données d'au moins vingt ans, afin de garantir des résultats suffisamment représentatifs (*tableau V.1*).

Concernant les séries hydrométriques à l'échelle annuelle, toutes les stations respectent les deux critères : pas de données manquantes et série de longue durée). Ces stations hydrométriques sont localisées au niveau de l'affluent principal de chaque sous-bassin versant. Il convient de noter que certaines stations ont été arrêtées à des dates précises : Sidi Belkheir en 1999, Hennaya et Benskrane en 2007, et la station d'Aïn Youcef a été déplacée à la station de Sidi Moussa en 1999.

Les données sélectionnées couvrent une période moyenne d'environ 35 ans. Cependant, la station du Tafna Village et celle de Sidi Belkheir présentent une période d'observation plus courte, de 25 ans chacune. La liste des stations hydrométriques retenues, ainsi que leurs spécificités, est présentée dans le tableau V.1.

Pour que les mesures soient autant que possible comparables entre elles, nous avons limité la période d'étude de 1985 à 2005. Sur cette période, seulement les deux stations de Sidi Belkheir et Tafna Village contiennent des lacunes. La station de Tafna Village enregistre 9,5 %, se la signifie de 2 lacunes sur une période de 21 ans (*figure V.1*). Alors que la station de Sidi Belkheir présente 38,1 % de lacune (c'est-à-dire qu'il a 8 lacunes sur 21 ans).

Il est important de souligner que les séries chronologiques ne doivent pas comporter plus de trois années consécutives et plus de 10 % de lacunes sur la série totale à l'échelle mensuelle. C'est la raison pour laquelle la station Sidi Belkheir a été retirée des calculs statistiques annuels de 1985 à 2005 et de la station d'Aïn Youce des études mensuelles (manque de données à l'échelle mensuelle).

Les périodes de fonctionnement des stations hydrométriques sont mentionnées dans la *figure V.2*. Chaque colonne représente une des stations sélectionnées, la colonne bleue indique que le débit est observé pour les 12 mois de l'année. La colonne blanche représente qu'il y a au moins une lacune dans cette année.

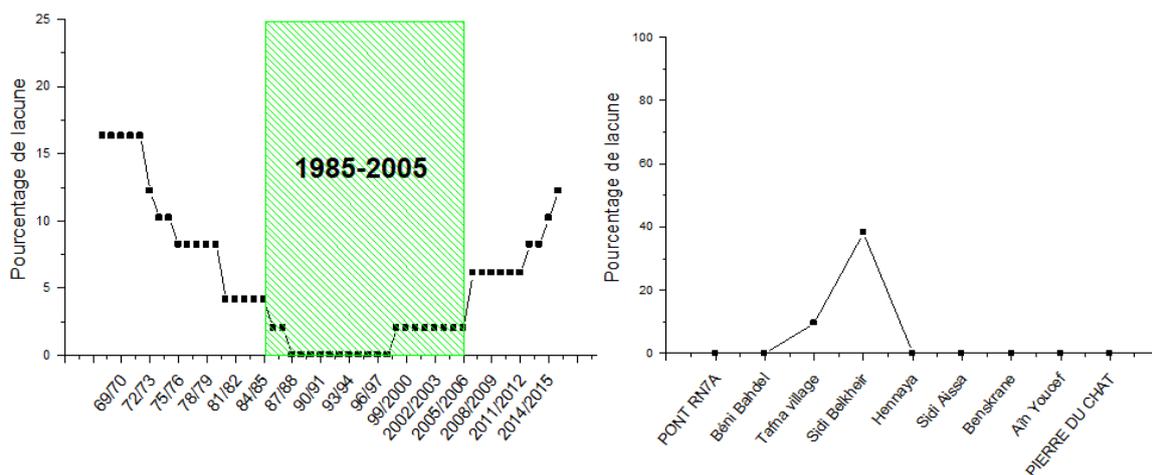


Figure V.1 Pourcentage des lacunes en fonction de la période d'étude.

Tableau V.1 Liste de stations hydrométriques retenues.

Stations Hydrométriques	Code	Période d'observation	Cours d'eau	Superficie (km ²)	Longitude	Latitude	Altitudes (m)
Beni Bahdel	160402	1972-2015	Oued khemis	299,7	-1,51	34,70	666
Maghnia-Frontière ou Pont RN7A	160202	1980-2014	Oued Mouilah	2108,7	-1,86	34,85	420
Aïn Youcef	160704	1975-2015	Oued Sikkak	320	-1,34	35,04	210
Sidi Aïssa	160614	1985-2013	Oued Isser	779,2	-1,06	35,03	380
Sidi Belkheir	160504	1973-1997	Oued Mouilah	4335	-1,66	34,89	285
Tafna Village	160426	1987-2011	Oued Tafna	1263	-1,65	34,82	
Hennaya	160509	1972-2005	Oued Boumessaoude	227,5	-1,40	34,91	320
Benskrane*	160702	1967-2005	Oued Isser	1189	-1,21	35,08	260
Pierre du chat	160801	1980-2015	Oued Tafna	7337	-1,44	35,15	80

* La station de Bensekran a été arrêtée en 2007.

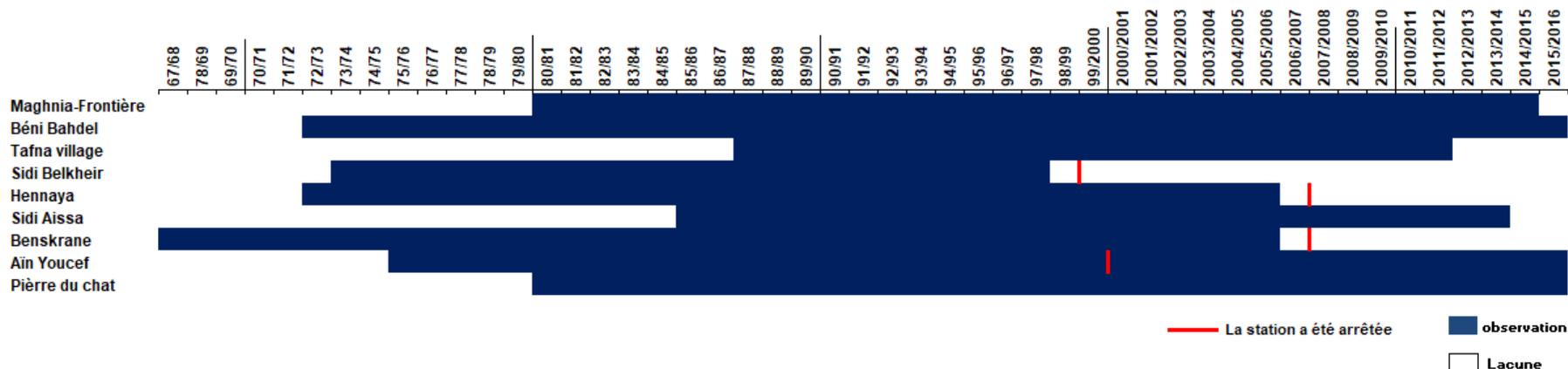


Figure V.2 Période de fonctionnement des stations hydrométriques.

V.3 Analyse des débits moyens annuels

V.3.1 Le module et la variation des débits moyens annuels

Les valeurs caractéristiques du régime sont de deux sortes : valeurs centrales et valeurs extrêmes. Les valeurs centrales (moyenne, médiane) caractérisent l'abondance des régimes, et les valeurs extrêmes (le maximum et le minimum) caractérisent leur irrégularité (Dubreuil. P., 1974). Pour pouvoir analyser le régime d'écoulement, nous devons en premier lieu déterminer son débit moyen interannuel (le module) à partir d'une série de mesures des stations hydrométriques effectuées pendant une durée qui varie d'une station à une autre selon la date de mise en service et l'arrêt de la station hydrologique (*tableau V.1*).

Les modules (débit moyen interannuel) et les régimes des débits définissent le comportement moyen des cours d'eau en mettant en valeur leurs caractères permanents, dépendants de l'ensemble des facteurs naturels, ils présentent la plus grande signification géographique. (Sébastien L., 2000)

Les débits varient d'une année à l'autre. Sur une période de 36 ans à la station hydrométrique Pierre du Chat (oued Tafna), le débit moyen annuel le plus élevé a été enregistré en 2013, avec 10,95 m³/s, correspondant à un apport annuel de 345,23 Hm³. En revanche, le débit moyen annuel le plus faible, observé en 2007, est estimé à 0,106 m³/s, soit un apport de 3,36 Hm³/an. Le débit moyen interannuel s'établit à 2,578 m³/s (*tableau V.2*).

À la station hydrométrique Sidi Belkheir, sur une période de 25 ans, le module est estimé à 1,718 m³/s, ce qui correspond à un apport moyen de 54,18 Hm³/an. Le débit moyen annuel le plus élevé a été enregistré en 1994, atteignant 4,695 m³/s, équivalent à un apport de 148,1 Hm³/an. Cette station a été mise hors service en 1999.

À la station de Béni Bahdel, située sur l'oued Khemis, le débit moyen interannuel est de 0,981 m³/s, ce qui correspond à un apport moyen de 30,93 Mm³/an. Le débit annuel maximal a été enregistré en 1973, atteignant 2,750 m³/s, avec un apport de 86,73 Hm³/an. En revanche, le débit annuel minimal a été observé en 2004, avec une valeur de 0,299 m³/s, représentant un apport de 9,423 Hm³/an.

À la station hydrométrique de Benskrane, le débit moyen interannuel est estimé à 1,043 m³/s. Le débit le plus élevé, enregistré en 1972, a atteint 3,750 m³/s, correspondant à un apport de 118,26 Hm³/an. En revanche, le module le plus faible a été observé en 2005, avec un débit de 0,032 m³/s, soit un apport de 0,99 Hm³/an. L'apport moyen s'établit à 32,90 Hm³/an.

La station de Pont RN7A, située sur l'oued Mouilah, enregistre un débit moyen interannuel de $0,635 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui correspond à un apport moyen de $20,00 \text{ Hm}^3/\text{an}$. Le débit annuel maximal a été observé en 1987, atteignant $1,684 \text{ m}^3/\text{s}$, avec un apport de $53,09 \text{ Hm}^3/\text{an}$. En revanche, le débit annuel minimal a été enregistré en 2004, avec une valeur de $0,154 \text{ m}^3/\text{s}$, soit un apport de $4,84 \text{ Hm}^3/\text{an}$.

À la station de Sidi Aissa (oued Chouly), le débit moyen interannuel est de $0,613 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui équivaut à un apport moyen de $19,32 \text{ Hm}^3/\text{an}$. Le débit annuel maximal a été enregistré en 2008, atteignant $3,382 \text{ m}^3/\text{s}$, pour un apport de $106,65 \text{ Hm}^3/\text{an}$. En revanche, le débit annuel minimal a été observé en 2006, avec une valeur de $0,039 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondant à un apport de $1,24 \text{ Hm}^3/\text{an}$.

À la station d'Aïn Youcef, le débit moyen interannuel est de $0,574 \text{ m}^3/\text{s}$. Le débit annuel maximal, enregistré en 2002, atteint $3,373 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondant à un apport de $106,4 \text{ Hm}^3/\text{an}$. En revanche, le débit annuel minimal est de $0,087 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui équivaut à un apport de $2,7 \text{ Hm}^3/\text{an}$.

La station de Tafna Village, bien qu'elle soit située en aval du bassin sur le principal cours d'eau (oued Tafna), enregistre un débit moyen de $0,360 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui correspond à un apport annuel de $11,34 \text{ Hm}^3/\text{an}$. Il convient cependant de préciser que cette réduction du module annuel résulte du stockage des eaux d'écoulement dans le barrage de Béni Bahdel.

La station de Hennaya enregistre le plus faible débit moyen interannuel, avec une valeur de $0,064 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondant à un apport moyen de $2,02 \text{ Hm}^3/\text{an}$. Le débit moyen le plus élevé a été observé en 1973, atteignant $0,437 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui donne un apport de $13,77 \text{ Hm}^3/\text{an}$. En revanche, le débit moyen le plus faible a été enregistré en 1977, avec une valeur de $0,001 \text{ m}^3/\text{s}$, soit un apport de $0,03 \text{ Hm}^3/\text{an}$.

Les débits moyens interannuels ont été établis pour toutes les stations hydrométriques (*tableau V.2*). Nous avons calculé l'apport moyen, ainsi que les apports maximaux et minimaux, les débits maximaux et minimaux, puis le rapport entre ces deux valeurs, appelé coefficient d'immodération. Ce coefficient est faible dans les stations de Béni Bahdel (9,2), de Sidi Belkheir (10,7) et du Pont RN7A (11,0), reflétant ainsi des irrégularités moins importantes des débits annuels. En revanche, il est plus élevé pour les autres stations, atteignant un maximum dans la station de Hennaya, ce qui indique que ce cours d'eau présente une grande irrégularité, avec un coefficient d'irrégularité de 451,43.

L'irrégularité interannuelle est généralement exprimée par le coefficient de variation, qui est égal à l'écart type divisé par le module annuel. Ce coefficient est estimé à 64,9 % pour Sidi Belkheir, 66,9 % pour Pont RN7A, 70,2 % pour Béni Bahdel, 105,6 % pour Pierre du Chat, 107,1 % pour Benskrane, 128,5 % pour Hennaya, 129,1 % pour Sidi Aissa, 129,7 % pour Aïn Youcef, et 171,6 % pour Tafna Village. Cette variabilité est principalement liée à l'alimentation irrégulière des cours d'eau par les pluies, surtout durant une période climatique considérée comme « sèche » (Bouanani, A., 2004).

Tableau V.2 Statistiques descriptives des séries hydrométriques à l'échelle annuelle.

Stations Hydrométriques	Nbr d'observation	Débit Médiane (m ³ /s)	Valeurs extrêmes (m ³ /s)		Apport extrêmes (Hm ³)		Le Module (m ³ /s)	Apport moyen (Hm ³)	Ecart type	CV (%)	$R = \frac{Q_M}{Q_m}$
			Maximum	Minimum	Minimum	Maximum					
Maghnia-Frontière ou Pont RN7A	35	0,489	1,684 (1986)	0,154 (1992)	4,8	53,1	0,635	20,0	0,424	66,9	11,0
Béni Bahdel	44	0,797	2,750 (1973)	0,299 (2004)	9,4	86,7	0,981	30,9	0,689	70,2	9,2
Tafna Village	25	0,174	3,014 (2008)	0,008 (1999)	0,3	95,0	0,360	11,3	0,617	171,6	368,2
Sidi Belkheir	25	1,389	4,695 (1994)	0,438 (1985)	13,8	148,1	1,718	54,2	1,116	64,9	10,7
Hennaya	34	0,045	0,437 (1973)	0,001 (1977)	0,0	13,8	0,064	2,0	0,082	128,5	451,4
Sidi Aissa	29	0,289	3,382 (2008)	0,039 (2006)	1,2	106,6	0,613	19,3	0,791	129,1	86,2
Benskrane	39	0,516	3,750 (1972)	0,032 (2005)	1,0	118,3	1,043	32,9	1,117	107,1	118,9
Aïn Youcef	41	0,386	3,373 (2002)	0,087 (2007)	2,7	106,4	0,574	18,1	0,701	122,0	38,9
Pierre du Chat	36	1,599	10,947 (2013)	0,106 (2007)	3,4	345,2	2,578	81,3	2,722	105,6	102,8

CV : le coefficient de variation en %.

R : le coefficient d'immodération = Q_M/Q_m = le débit maximal/ le débit minimal.

Selon le tableau V.2, la distribution présente une asymétrie, avec un débit moyen interannuel supérieur au débit médian. Pour la station de Sidi Aissa, le débit moyen atteint même le double de la médiane.

Les variations interannuelles des débits moyens annuels montrent de grandes fluctuations, liées à l'irrégularité des apports liquides ; cette situation est confirmée par le coefficient de variation. En effet, on peut voir d'après la figure V.3 que les débits moyens annuels sont en général faibles (inférieurs au module) sauf en période de crue.

Cependant, les années (1972/1973), (1973/1974) et (2008/2009) sont assez remarquables par son apport liquide, trois fois plus grand que le débit moyen interannuel (module). Il faut mentionner que les extrêmes, maxima et minima, se produisent les mêmes années pour les cinq stations (Benskrane, Aïn Youcef, Hennaya, Sidi Aissa et Béni Bahdel).

L'hydraulicité, un autre indicateur important pour évaluer la variabilité des débits, montre que plus de 50 % des années hydrologiques sont déficitaires dans toutes les stations.

La fréquence des années déficitaires est la suivante : 21 ans sur 35 (60,0 %) à Pont RN7A, 29 ans sur 44 (65,9 %) à Béni Bahdel, 19 ans sur 25 (76,0 %) à Tafna Village, 14 ans sur 25 (56,0 %) à Sidi Belkheir, 26 ans sur 34 (76,5 %) à Hennaya, 22 ans sur 29 (75,9 %) à Sidi Aissa, 24 ans sur 39 (61,5 %) à Benskrane, 29 ans sur 44 (65,9 %) à Aïn Youcef et 26 ans sur 36 (72,2 %) à Pierre du Chat. Cela indique que l'hydraulicité moyenne annuelle est inférieure à la normale pour l'ensemble des stations (*figure V.4*).

Les années les plus humides sont 1972/1973 et 1973/1974, marquées par des coefficients d'hydraulicité moyens de 6,814 à la station de Hennaya, 3,594 à Benskrane, 2,804 à Béni Bahdel et 2,732 à Sidi Belkheir. Ces périodes sont suivies par 2008/2009, où l'hydraulicité moyenne atteint 8,378 à la station de Tafna Village et 5,518 à Sidi Aissa, ainsi que par l'année 1999/2000, avec un coefficient de 6,139 à la station d'Aïn Youcef.

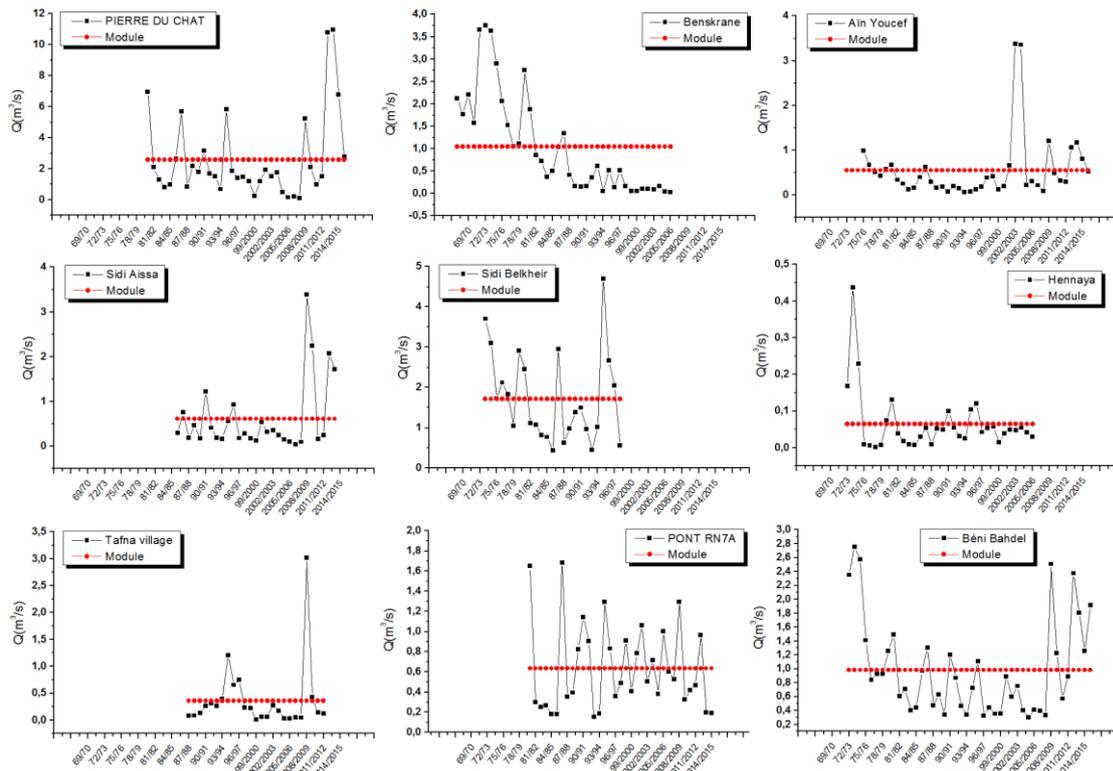


Figure V.3 Variations des débits moyens annuels.

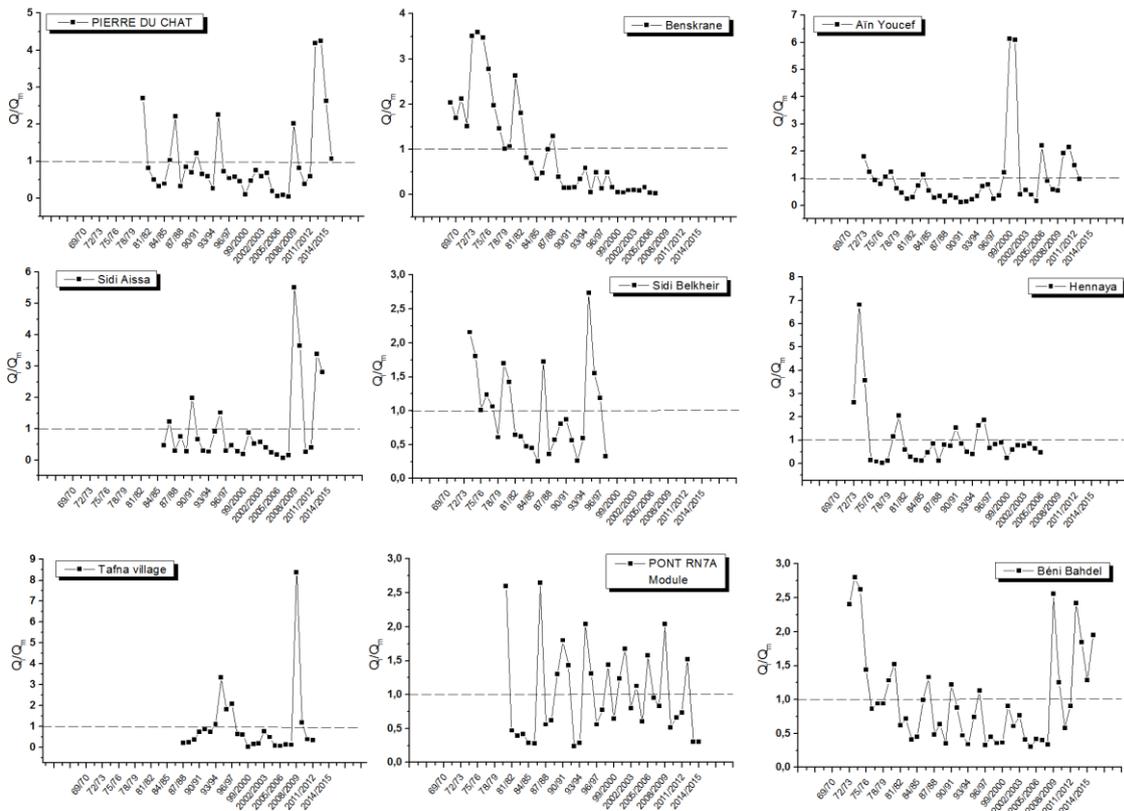


Figure V.4 Évolution du coefficient d'hydraulicité.

Pour assurer la comparabilité et la synchronisation, les séries hydrométriques doivent être relevées dans des conditions homogènes. C'est pourquoi la période 1985-2005 a été choisie comme référence. Les débits moyens interannuels sur cette période montrent que l'oued Tafna, avec une superficie de 7 337 km², est le plus important avec une moyenne annuelle de 1,868 m³/s (*tableau V.3*), suivi par l'oued Mouilah à la station de Maghnia-Frontière avec un débit moyen de 0,694 m³/s, puis par l'oued Khemis à la station de Béni Bahdel, un petit bassin de montagne (299,7 km²) avec 0,630 m³/s.

La station d'Aïn Youcef, qui draine l'oued Sikkak (301,2 km²), enregistre un débit moyen de 0,600 m³/s, tandis que le bassin de l'oued Isser à la station de Sidi Aissa (779,2 km²) n'atteint en moyenne que 0,372 m³/s. Les stations de Benskrane et Tafna Village enregistrent respectivement des débits moyens de 0,298 m³/s et 0,327 m³/s, bien que leurs bassins couvrent plus de 1 000 km². Avec une superficie de seulement 227,5 km², la station de Hennaya affiche le débit moyen le plus faible (0,050 m³/s). On peut ainsi conclure que les bassins versants de la Tafna se distinguent par des débits généralement faibles.

La lame d'eau écoulee permet d'évaluer l'apport hydrique moyen en tenant compte à la fois du volume d'eau écoulé et de la superficie du bassin. Généralement exprimée en millimètres par an (mm/an), elle est un indicateur essentiel pour comparer l'intensité des écoulements d'un bassin versant à un autre, et elle est souvent plus faible dans les régions semi-arides, comme c'est le cas dans le bassin de la Tafna.

Logiquement, les petits bassins versants tendent à enregistrer une lame d'eau écoulee plus élevée. Ainsi, on observe que les cours d'eau de l'oued Khemis (station de Béni Bahdel) et de l'oued Sikkak (station d'Aïn Youcef) présentent les lames d'eau écoulee les plus importantes (*tableau V.3*).

L'irrégularité interannuelle est généralement mesurée par le coefficient de variation, qui correspond au rapport de l'écart type au débit moyen annuel. Par ordre décroissant, les coefficients de variation sont les suivants : oued Sikkak à Aïn Youcef (155,0 %), oued Isser à Benskrane (116,5 %), Tafna Village (102,9 %), Pierre du Chat (79,7 %), oued Isser à Sidi Aissa (78,2 %), Maghnia-Frontière (58,5 %), Hennaya (55,4 %), et Béni Bahdel (50,0 %). Cette variabilité importante s'explique par l'alimentation irrégulière et essentiellement pluviale de ces cours d'eau, dans un contexte climatique marqué par la sécheresse (Bouanani, A., 2004).

Tableau V.3 Statistiques descriptives des séries hydrométriques à l'échelle annuelle (1985-2005).

Stations Hydrométriques	Cours d'eau	Superficie Km ²	1985-2005							
			Valeurs extrêmes (m ³ /s)		Q (m ³ /s)	E (mm)	Pluie annuelle (mm)	D (mm)	Ecart type	CV (%)
			Max	Min						
Maghnia-Frontière ou Pont RN7A	Oued Mouilah	2108,7	1,684 (1986)	0,154 (1992)	0,694	10,4	237,0 (Beni Ouassine)	226,6	0,406	58,5
Béni Bahdel	Oued khemis	299,7	1,300 (1986)	0,299 (2004)	0,630	66,3	403,4 (Béni Bahdel Bge)	337,1	0,315	50,0
Tafna Village	Oued Tafna	1263	1,203 (1994)	0,008 (1987)	0,327	8,2	273,4 (Smala Sidi Medjahed)	265,2	0,337	102,9
Hennaya	O. Boumessaoude	227,5	0,120 (1995)	0,008 (1987)	0,050	6,9	383,9 (Milla Hennaya)	377,0	0,028	55,4
Sidi Aissa	Oued Isser	779,2	1,220 (1990)	0,107 (2005)	0,372	15,1	313,9 (Ouled Mimoun)	298,9	0,291	78,2
Benskrane	Oued Isser	1189	1,345 (1986)	0,032 (2005)	0,298	7,9	355,3 (Bensekran)	347,4	0,348	116,5
Aïn Youcef	Oued Sikkak	301,2	3,373 (2002)	0,130 (1999)	0,600	62,8	486,9 (Lalla Setti)	424,1	0,931	155,0
Pierre du Chat	Oued Tafna	7337	5,840 (1994)	0,159 (2005)	1,868	8,0	302,6 (Pierre du Chat)	294,5	1,488	79,7

Q : module (m³/s) ; *E* : lame d'eau écoulée (mm) ; *CV* : coefficient de variation ; *D* : le déficit d'écoulement = $P - E$.

V.3.2 Distribution statistique des débits moyens annuels

La répartition statistique des débits moyens annuels permet d'estimer la fréquence d'apparition de certaines valeurs exceptionnelles, comme les débits maximaux instantanés. Cette prédétermination est essentielle pour quantifier les risques et évaluer les débits de crue associés aux différentes périodes de retour T .

Tout d'abord, la forte dispersion des débits annuels, comme l'indiquent les valeurs du coefficient de variation (*tableau V.2*), suggère une distribution dissymétrique des échantillons. Cette dissymétrie est particulièrement visible lors de l'ajustement à la loi normale (*figure V.5* à *figure V.13*). Parmi les lois d'ajustement possibles, la loi log-normale offre les meilleurs résultats pour correspondre à la distribution expérimentale. Il convient de rappeler que dans ce cadre, la variable normalement distribuée est $x = \log(Q)$, qui représente la valeur réduite (ou variable de Gauss).

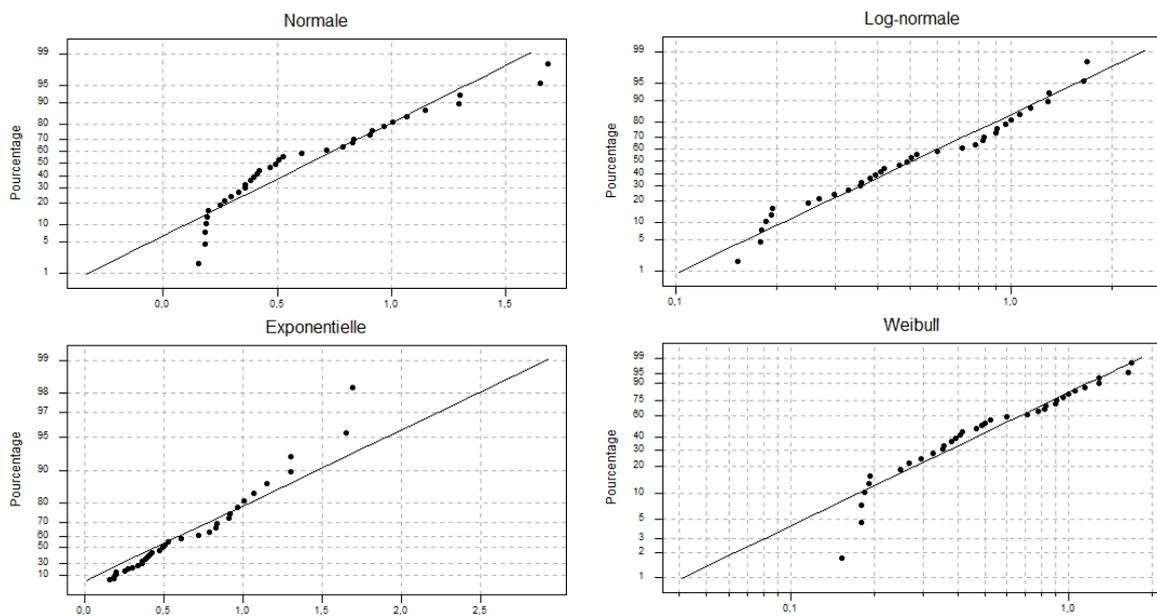


Figure V.5 Diagramme de probabilité à quatre facteurs contrôlés pour Pont RN7A.

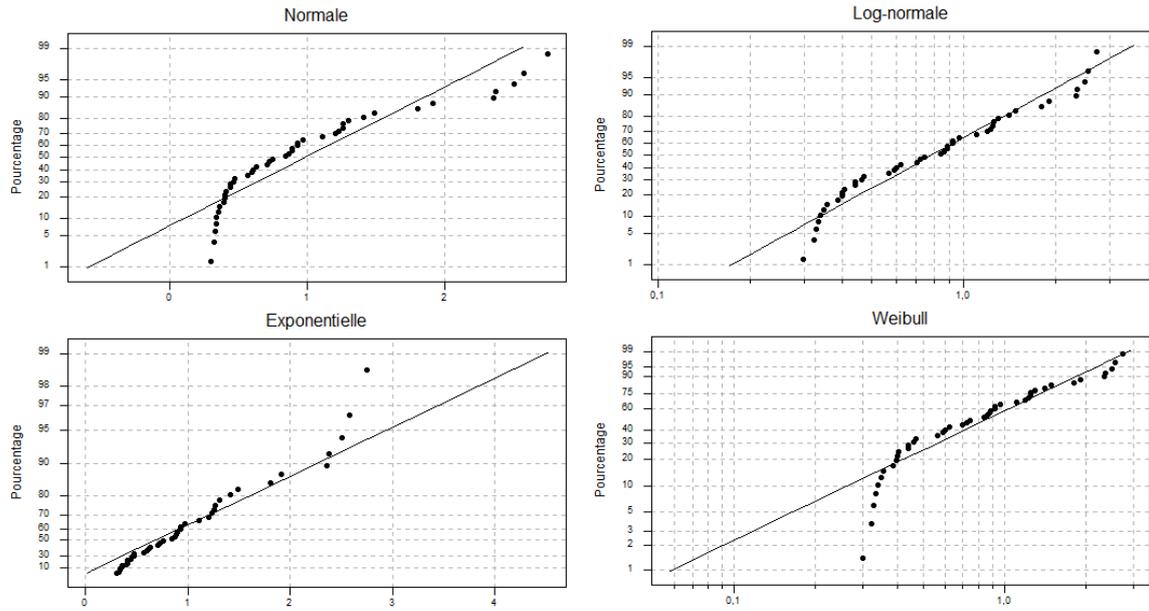


Figure V.6 Diagramme de probabilité à quatre facteurs contrôlés pour Béni Bahdel.

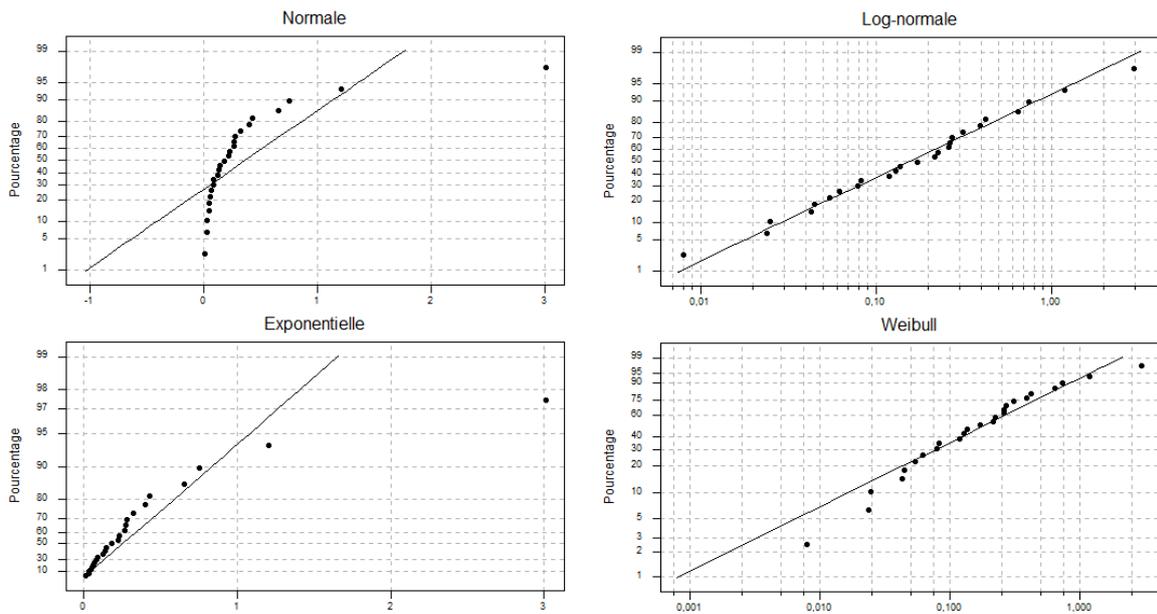


Figure V.7 Diagramme de probabilité à quatre facteurs contrôlés pour Tafna Village.

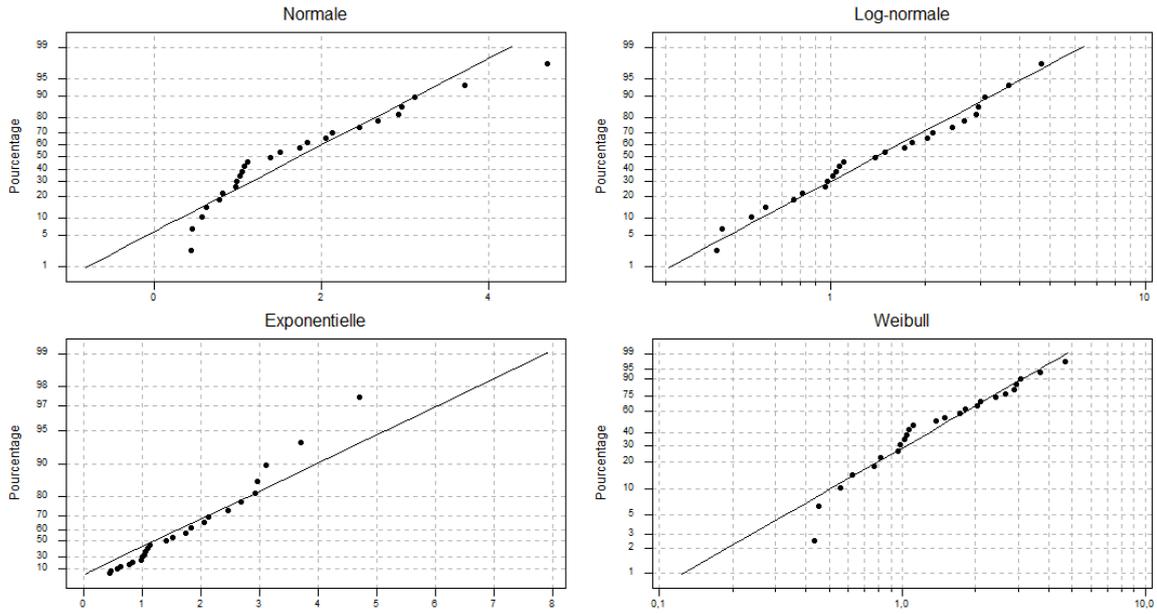


Figure V.8 Diagramme de probabilité à quatre facteurs contrôlés pour Sidi Belkhei.

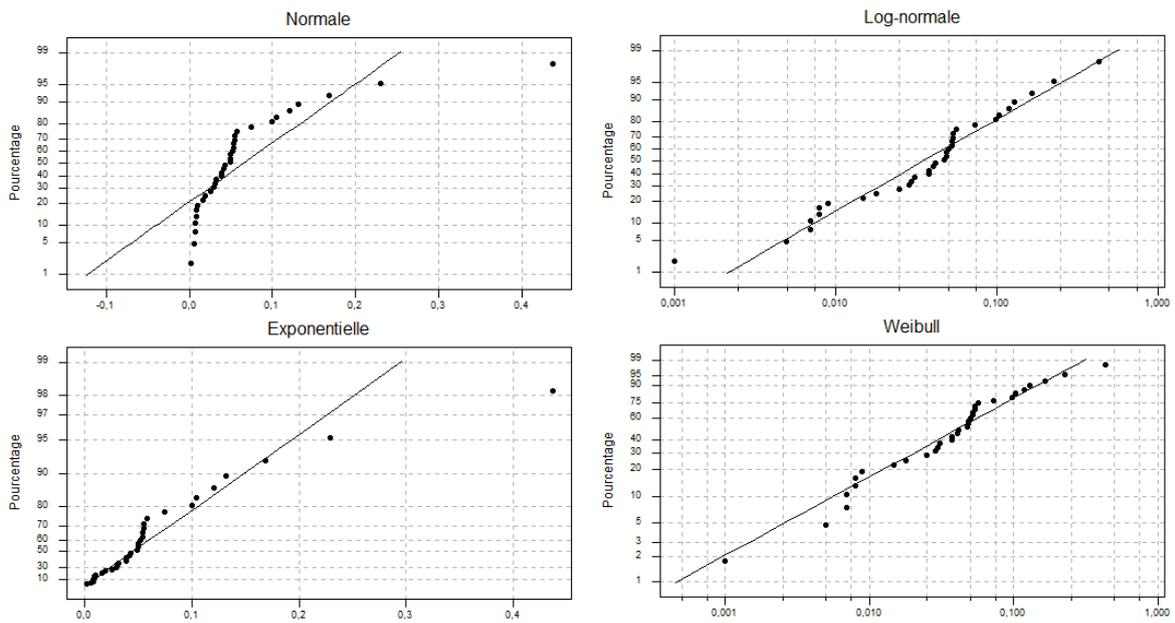


Figure V.9 Diagramme de probabilité à quatre facteurs contrôlés pour Hennaya.

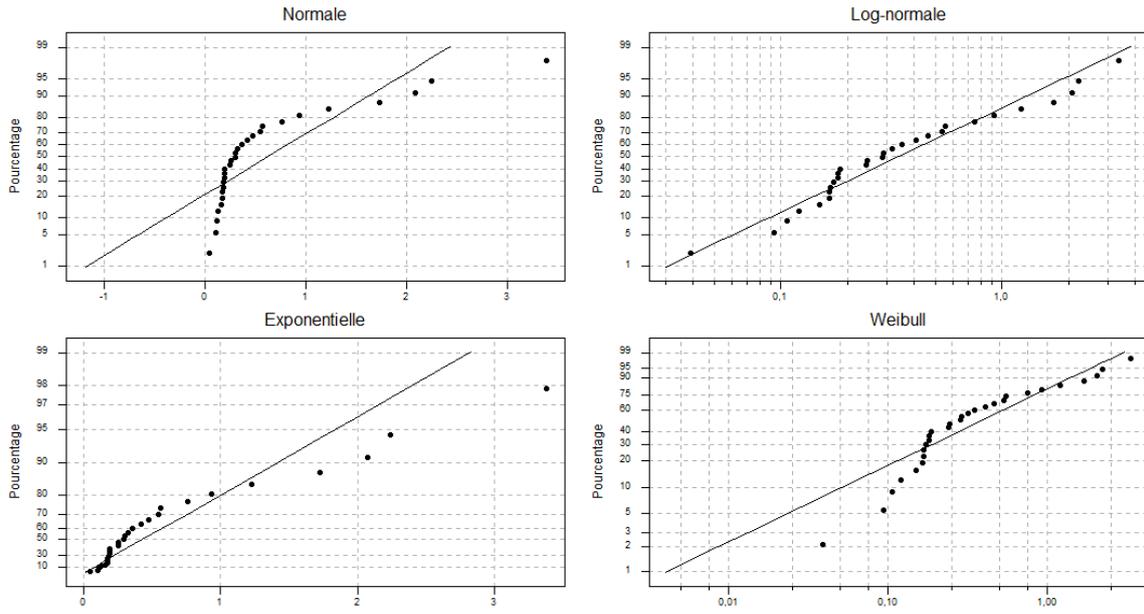


Figure V.10 Diagramme de probabilité à quatre facteurs contrôlés pour Sidi Aissa.

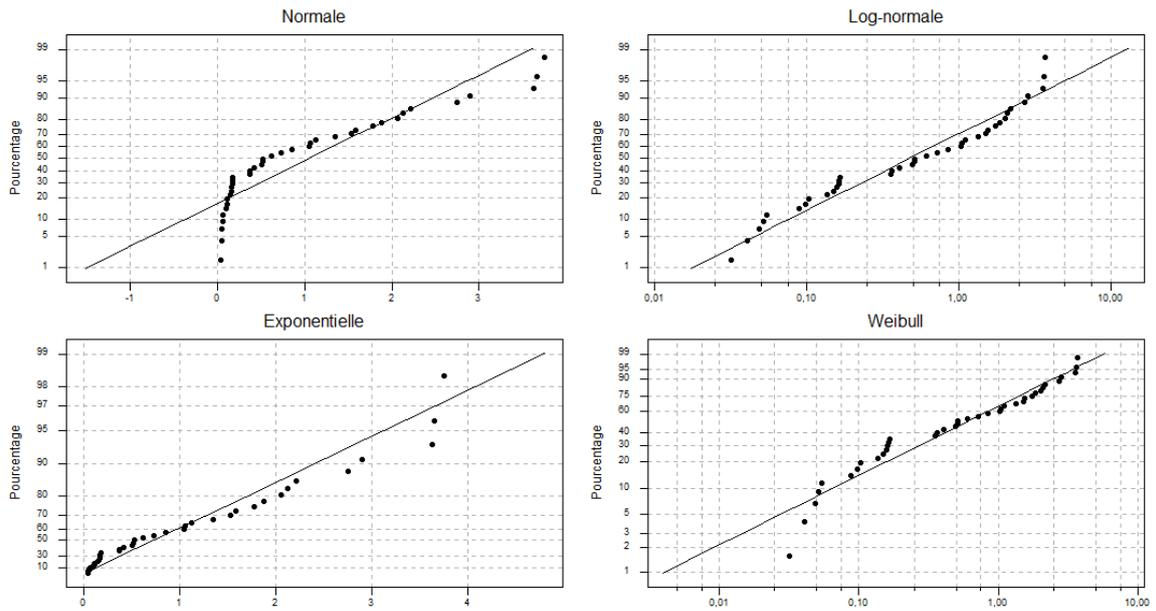


Figure V.11 Diagramme de probabilité à quatre facteurs contrôlés pour Benskrane.

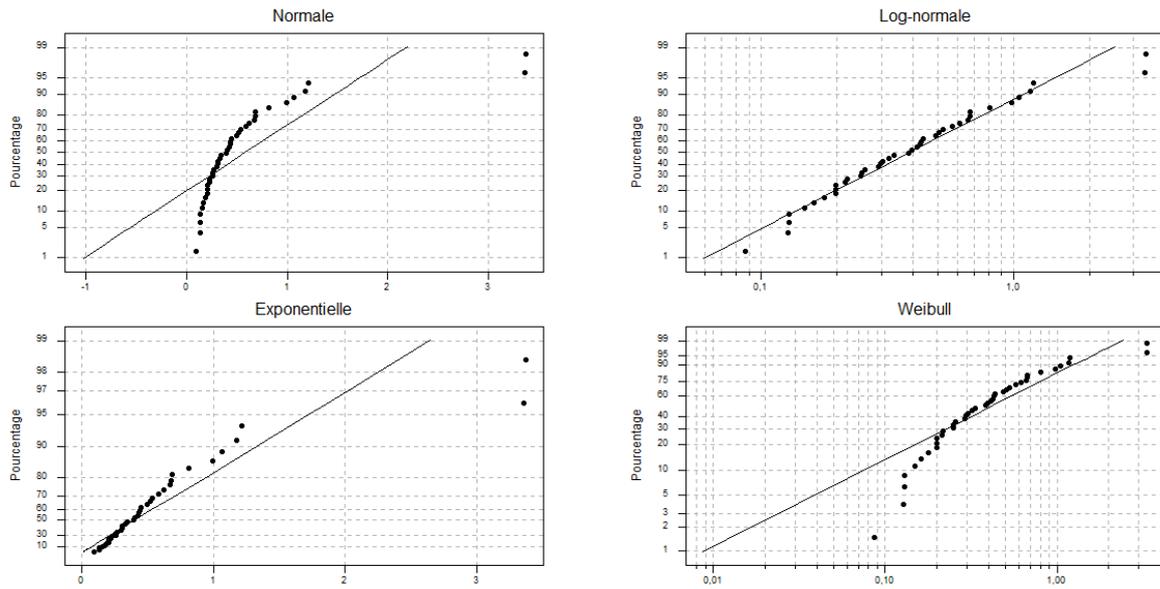


Figure V.12 Diagramme de probabilité à quatre facteurs contrôlés pour Ain Youcef.

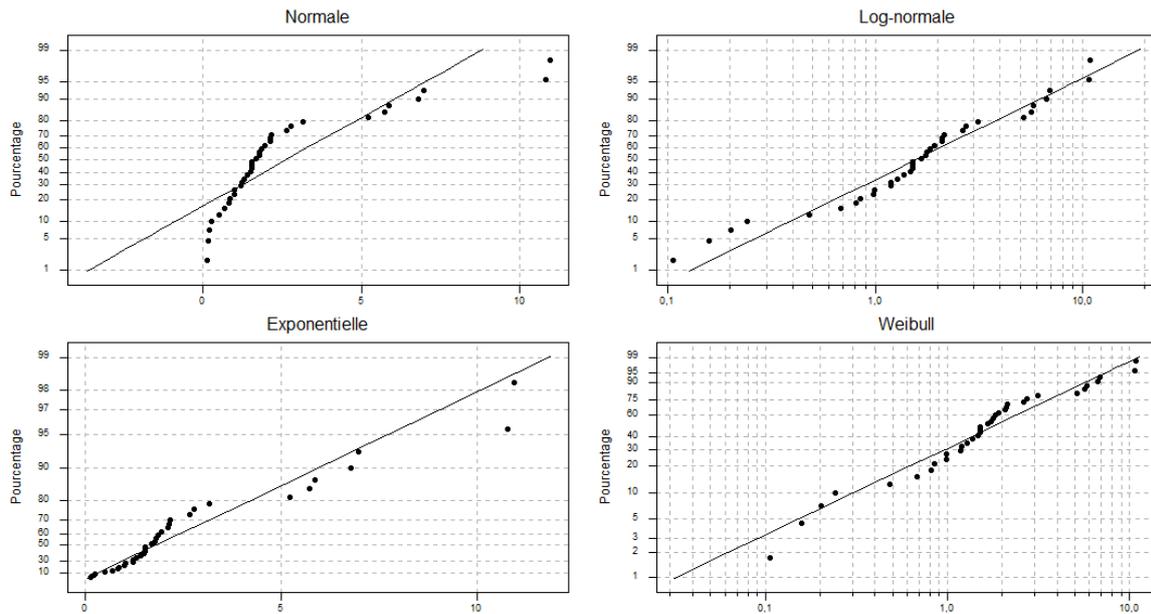


Figure V.13 Diagramme de probabilité à quatre facteurs contrôlés pour Pierre du chat.

Les débits estimés pour les différentes stations hydrométriques, en fonction des probabilités de retour choisies, sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau V.4 Les débits moyens annuels fréquentiels en (m³/s).

Station hydrométrique		Fréquence	U de Gauss	Valeur théo.	Borne inf.	Borne sup.
Maghnia-Frontière ou Pont RN7A	T=100	0,99	2,327	2,559	1,976	3,580
	T=50ans	0,98	2,054	2,117	1,669	2,876
	T=10 ans	0,9	1,282	1,237	1,026	1,556
	T=5 ans	0,8	0,841	0,911	0,772	1,105
Béni Bahdel	T=100	0,99	2,327	3,675	2,944	4,862
	T=50ans	0,98	2,054	3,068	2,502	3,962
	T=10 ans	0,9	1,282	1,841	1,569	2,230
	T=5 ans	0,8	0,841	1,375	1,195	1,618
Tafna Village	T=100	0,99	2,327	3,465	1,952	7,590
	T=50ans	0,98	2,054	2,411	1,420	4,927
	T=10 ans	0,9	1,282	0,862	0,568	1,471
	T=5 ans	0,8	0,841	0,480	0,331	0,752
Sidi Belkheir	T=100	0,99	2,327	6,592	4,947	9,760
	T=50ans	0,98	2,054	5,498	4,220	7,862
	T=10 ans	0,9	1,282	3,288	2,667	4,294
	T=5 ans	0,8	0,841	2,452	2,036	3,069
Hennaya	T=100	0,99	2,327	0,605	0,381	1,104
	T=50ans	0,98	2,054	0,433	0,283	0,750
	T=10 ans	0,9	1,282	0,168	0,120	0,254
	T=5 ans	0,8	0,841	0,098	0,073	0,139
Sidi Aissa	T=100	0,99	2,327	3,997	2,607	7,074
	T=50ans	0,98	2,054	2,995	2,020	5,041
	T=10 ans	0,9	1,282	1,322	0,970	1,952
	T=5 ans	0,8	0,841	0,830	0,630	1,152
Benskrane	T=100	0,99	2,327	13,701	8,230	26,350
	T=50ans	0,98	2,054	9,249	5,785	16,796
	T=10 ans	0,9	1,282	3,038	2,102	4,753
	T=5 ans	0,8	0,841	1,610	1,163	2,350
Aïn Youcef	T=100	0,99	2,327	2,606	1,965	3,737
	T=50ans	0,98	2,054	2,086	1,608	2,897
	T=10 ans	0,9	1,282	1,110	0,905	1,420
	T=5 ans	0,8	0,841	0,774	0,647	0,954
Pierre du chat	T=100	0,99	2,327	19,909	13,337	33,468
	T=50ans	0,98	2,054	14,780	10,220	23,737
	T=10 ans	0,9	1,282	6,354	4,755	9,063
	T=5 ans	0,8	0,841	3,927	3,038	5,298

V.3.3 Calcul des caractéristiques de l'écoulement

V.3.3.1 Débit moyen annuel spécifique

Le débit spécifique est une mesure hydrologique qui indique le volume d'eau écoulé par unité de surface d'un bassin versant sur une période donnée. Il est généralement exprimé en mètres cubes par seconde par kilomètre carré (L/s/km²). Cette mesure permet de normaliser les débits en prenant en considération la superficie du bassin versant, facilitant ainsi la comparaison entre diverses régions ou cours d'eau.

Il est évident que ce sont les bassins versants avec une petite surface qui enregistrent un débit spécifique plus important. Sur cette base, on note que les cours d'eau de l'oued Khemis (Béni Bahdel) ainsi que de l'oued Sikkak (Aïn Youcef) enregistrent les débits spécifiques les plus importants (*tableau V.5*). En revanche, la station de l'Hennaya présente le plus faible débit spécifique (0,282 l/s/km²) malgré une superficie restreinte de 227,5 km². Ces contrastes peuvent témoigner de comportements hydrologiques distincts, en rapport plus avec des facteurs climatiques (précipitations) et/ou certaines caractéristiques des bassins versants.

V.3.3.2 Bilan moyen annuel

La notion de module peut être remplacée par celle de lame d'eau écoulée annuelle. C'est, par définition, la hauteur d'eau écoulée à l'exutoire définie comme étant le rapport entre le débit et la surface du bassin versant en fonction du laps de temps considéré (Rmich et Hafoud, 2004). Elle s'exprime donc en fonction du module Q par la relation :

$$E = \frac{Q \text{ (m}^3\text{/s)} \times 31,6 \times 1000}{S \text{ (Km}^2\text{)}}$$

Avec :

- Q : le débit moyen annuel en (l/s).
- E : la lame d'eau annuelle écoulée en (mm).
- S : la surface du bassin versant en (km²).

À partir des données d'écoulement et des pluies annuelles, nous avons calculé la lame d'eau écoulée (mm) et la hauteur d'eau précipitée (mm) sur chaque sous-bassin, ainsi que le coefficient d'écoulement (*tableau V.5*).

Le bilan d'écoulement, calculé comme la différence entre la lame d'eau précipitée P (en mm) et la lame d'eau écoulée E (en mm), permet de comparer les entrées et sorties d'eau

dans un bassin versant. Cette différence, appelée déficit d'écoulement, s'exprime par la formule :

$$D (\text{déficit d'écoulement}) = P - E \text{ (mm)}$$

Elle indique la quantité d'eau qui ne participe pas à l'écoulement, principalement en raison des pertes par évaporation, infiltration, et autres processus dans le bassin.

Le coefficient d'écoulement, quant à lui, est un indicateur hydrologique exprimant la fraction des précipitations qui contribue à l'écoulement. Il se calcule ainsi :

$$C_e = E/P$$

Où E est la lame d'eau écoulée (en mm) et P la lame d'eau précipitée (en mm) sur la même période. Ce coefficient, exprimé en pourcentage, évalue l'efficacité d'un bassin versant à produire un écoulement, en tenant compte de l'infiltration, de la rétention dans le sol, et de l'évapotranspiration.

Le coefficient d'écoulement varie de 2,2 % à 24,1 %, respectivement aux stations de Hennaya et de Béni Bahdel. Cette variation est principalement liée au régime des précipitations, influençant les processus d'infiltration et de ruissellement par la saturation des sols. Selon le tableau V.5, les sous-bassins du bassin versant de l'oued Tafna présentent une lame d'eau écoulée relativement faible par rapport aux précipitations moyennes. Les forts déficits d'écoulement observés dans ces bassins traduisent la perméabilité du substratum, favorisant l'infiltration vers les nappes et réduisant ainsi les écoulements par évapotranspiration (Sébastien. L., 2000).

Le coefficient d'écoulement varie de 2,2 % à 24,1 %, respectivement aux stations de Hennaya et de Béni Bahdel. Cette variation est principalement due au régime des précipitations, qui influence les processus d'infiltration et de ruissellement, notamment par saturation des sols.

Les faibles valeurs des coefficients d'écoulement peuvent être attribuées à une bonne infiltration, avec peu de ruissellement, et se rencontrent souvent dans des zones rurales dotées de sols modérément perméables et d'une végétation abondante. En revanche, des valeurs élevées indiquent un ruissellement significatif, souvent causé par des sols moins perméables ou des pentes plus raides, et peuvent également être observées dans des zones urbanisées ou des régions recevant des pluies intenses.

En se basant sur le tableau V.5, il ressort que les sous-bassins caractérisant le bassin versant de l'oued Tafna présentent une lame d'eau écoulée faible par rapport à la hauteur

pluviométrique moyenne. Les fortes valeurs des déficits d'écoulement dans les bassins reflètent la nature perméable du substratum, qui favorise l'infiltration vers les nappes et soustrait une partie des écoulements aux phénomènes évapotranspirations (Sébastien. L., 2000).

Tableau V.5 Bilans moyens interannuels de l'écoulement aux différentes stations, débits spécifiques et lames d'eau écoulées.

Stations Hydrométriques	Période d'observation	Superficie des Bassins (km ²)	Q (m ³ /s)	q (l/s/km ²)	E (mm)	P (mm)	D (mm)	Ce (%)
Maghnia-Frontière ou RN7A	(1980-2014)	2108,7	0,635	0,301	9,5	254,6	245,1	3,7
Béni Bahdel	(1972-2015)	299,7	0,981	3,273	103,217	427,7	324,4	24,1
Tafna village	(1987-2011)	1263	0,360	0,285	8,982	288,9	280,0	3,1
Sidi Belkheir	(1973-1997)	4335	1,718	0,396	12,499	240,6	228,1	5,2
Hennaya	(1972-2005)	227,5	0,064	0,282	8,881	407,2	398,4	2,2
Sidi Aissa	(1985-2013)	779,2	0,613	0,786	24,800	345,3	320,5	7,2
Benskrane	(1967-2005)	1189	1,043	0,877	27,669	379,8	352,1	7,3
Aïn Youcef	(1975-2015)	301,2	0,574	1,907	60,147	519,3	459,2	11,6
Pierre du chat	(1980-2015)	7337	2,578	0,351	11,083	314,8	303,7	3,5

Q : module (m³/s) ; *q* : débit spécifique (l/s/km²) ; *E* : lame d'eau écoulée (mm), *p*: lame d'eau précipité (mm), *D* : déficit d'écoulement (mm), *Ce*: coefficient d'écoulement (%).

V.4 Analyse des débits moyens mensuels

V.4.1 Débits moyens mensuels

L'analyse des débits moyens mensuels permet de déterminer le régime d'écoulement d'un cours d'eau ainsi que ses variations interannuelles. À partir des données mensuelles, les valeurs moyennes, minimales, maximales, l'écart-type, le coefficient de variation et les coefficients mensuels ont été calculés statistiquement pour chaque mois, chaque année et pour chaque station hydrométrique (*tableau V.6*).

À la station de Pierre du Chat, le débit moyen interannuel est de 2,578 m³/s, avec un débit annuel maximal moyen de 19,53 m³/s et un débit annuel minimal moyen de 0,002 m³/s. Le débit moyen mensuel le plus élevé est observé en mars, atteignant 7,864 m³/s, et le débit maximal mensuel le plus haut atteint 63,664 m³/s ce même mois. Par ailleurs, des débits minimaux nuls sont relevés tous les mois, à l'exception de février, qui enregistre un débit minimal mensuel de 0,021 m³/s.

D'après le *tableau V.6*, les mois les plus secs de l'année sont, dans l'ordre, août, juillet, septembre, juin, octobre, mai et avril, tandis que les mois les plus humides sont mars, février, janvier et décembre. Cette observation est appuyée par les résultats du coefficient mensuel de débit (CMD), qui indique que les mois secs ont un CMD inférieur à 1, tandis que les mois humides présentent un CMD supérieur à 1.

Le coefficient mensuel de débit varie entre 0,026 et 3,97, avec un maximum enregistré en mars et le minimum observé en juillet et août. Ces variations s'expliquent par le caractère aléatoire des écoulements.

À partir de l'oued Isser, les stations de Benskrane et Sidi Aissa enregistrent respectivement un débit moyen interannuel de 1,043 m³/s et 0,613 m³/s, un débit maximal moyen annuel de 5,916 m³/s et 5,401 m³/s, ainsi qu'un débit minimal moyen annuel de 0,026 m³/s et 0,012 m³/s.

L'analyse des débits moyens mensuels révèle un débit minimal au mois d'août, avec 0,223 m³/s à la station de Benskrane et 0,040 m³/s à celle de Sidi Aissa. Ce débit augmente progressivement pour atteindre un maximum en mars, s'élevant à 2,602 m³/s à Benskrane et à 2,434 m³/s à Sidi Aissa. Par ailleurs, les débits maximaux les plus élevés sont enregistrés avec 16,604 m³/s à Benskrane et 22,201 m³/s à Sidi Aissa. Le débit minimal le plus élevé est relevé en janvier à Benskrane (0,078 m³/s) et en février à Sidi Aissa (0,069 m³/s).

Les valeurs de coefficient de variation mensuelle reflètent un régime très irrégulier à la station de Benskrane en comparaison avec celles de la station de Sidi Aissa, atteignant un pic de 2,5 au mois de novembre.

Depuis l'oued Mouilah, les stations de Sidi Belkheir et du Pont RN7A enregistrent respectivement un débit moyen interannuel de 1,718 m³/s et 0,635 m³/s, un débit maximal moyen annuel de 11,579 m³/s et 5,842 m³/s, ainsi qu'un débit minimal moyen annuel de 0,124 m³/s et 0,018 m³/s.

La répartition des débits moyens mensuels présente deux pics et deux creux. Les pics se distinguent par des débits bien définis : le premier, plus marqué au printemps (en mars, en raison de la fonte des neiges), et le second en automne (en novembre, en raison des précipitations). En revanche, les creux montrent une légère diminution en janvier et février, respectivement à la station de Sidi Belkheir et au Pont RN7A, ainsi qu'une baisse plus significative en juillet.

Les deux stations présentent un régime d'écoulement très variable, avec une dispersion particulièrement marquée à la station du Pont RN7A durant la plupart des mois, où les coefficients de variation dépassent 100 %. À la station de Sidi Belkheir, ce coefficient oscille entre 0,7 et 2,2, atteignant son maximum en novembre.

À la station de Béni Bahdel, le débit moyen interannuel est de 0,981 m³/s, avec un débit maximal moyen annuel de 5,197 m³/s et un débit minimal moyen annuel de 0,129 m³/s. L'évolution des débits moyens mensuels révèle un débit minimal moyen de 0,429 m³/s en juillet, tandis que le débit maximal est atteint au printemps, en mars, avec 2,082 m³/s. Cela est probablement dû, en partie, à la fonte des neiges prise en compte dans le bilan hydrologique du bassin de la Tafna (Bakreti et al., 2013).

La période d'étiage dure 8 mois, avec un maximum observé en juillet. Les coefficients de variation mensuels (*tableau V.6*) montrent une irrégularité marquée des débits mensuels, dépassant 100 % pendant la plupart des mois, et atteignant un pic de 1,4 en avril.

Les stations de Tafna Village et Hennaya affichent respectivement les débits moyens interannuels les plus bas, avec 0,360 m³/s et 0,064 m³/s. Leurs débits maximaux moyens annuels sont de 4,071 m³/s et 0,547 m³/s, tandis que les débits minimaux moyens annuels sont nuls. Le débit moyen mensuel le plus élevé est observé en mars pour les deux stations. Par ailleurs, le débit maximal le plus important (16,474 m³/s) est enregistré en janvier à Tafna

Village, tandis qu'à Hennaya, il atteint 1,647 m³/s en mars. En revanche, des débits minimaux nuls sont constatés tous les mois.

Les coefficients de variation mensuels (*tableau V.6*) illustrent une irrégularité extrême avec des débits mensuels qui dépassent le 100 % pendant tous les mois, atteignant un maximum de 4 en septembre à la station de Tafna Village.

Tableau V.6 Statistiques descriptives des séries hydrométriques à l'échelle mensuelle.

Pont RN7A													
	Sep	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Annuelle
Moy	0,733	0,972	1,319	0,778	0,556	0,371	1,256	0,423	0,427	0,320	0,208	0,251	0,635
Max	4,501	6,790	14,05	15,13	4,48	1,430	12,377	3,715	2,018	2,616	2,088	0,905	5,842
Min	0,000	0,011	0,019	0,045	0,064	0,051	0,015	0,001	0,000	0,003	0,002	0,000	0,018
σ	0,928	1,456	2,853	2,531	0,804	0,308	2,705	0,671	0,502	0,469	0,358	0,242	
CV	1,3	1,5	2,2	3,3	1,4	0,8	2,2	1,6	1,2	1,5	1,7	1,0	
CMD	1,155	1,531	2,078	1,227	0,877	0,585	1,979	0,666	0,673	0,505	0,328	0,395	
Béni Bahdel													
	Sep	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Annuelle
Moy	0,634	0,778	0,782	0,890	1,212	1,660	2,082	1,363	0,898	0,609	0,429	0,433	0,981
Max	2,304	3,270	6,199	6,048	8,228	7,123	10,670	9,705	3,634	2,256	1,624	1,305	5,197
Min	0,129	0,111	0,181	0,228	0,208	0,165	0,141	0,112	0,119	0,053	0,043	0,056	0,129
σ	0,477	0,669	0,912	0,952	1,396	1,656	2,420	1,906	0,793	0,534	0,352	0,328	
CV	0,8	0,9	1,2	1,1	1,2	1,0	1,2	1,4	0,9	0,9	0,8	0,8	
CMD	0,647	0,793	0,797	0,907	1,236	1,692	2,122	1,390	0,916	0,621	0,437	0,441	
Tafna Village													
	Sep	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Annuelle
Moy	0,143	0,088	0,137	0,284	0,950	0,809	1,116	0,360	0,275	0,125	0,022	0,009	0,360
Max	2,895	0,423	0,45	2,60	16,474	10,045	10,397	1,885	1,598	1,782	0,159	0,148	4,071
Min	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
σ	0,576	0,127	0,157	0,611	3,257	2,017	2,250	0,535	0,418	0,362	0,051	0,031	
CV	4,0	1,4	1,1	2,2	3,4	2,5	2,0	1,5	1,5	2,9	2,4	3,4	
CMD	0,398	0,245	0,380	0,789	2,641	2,248	3,103	1,001	0,763	0,346	0,060	0,026	

Sidi Belkheir													
	Sep	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Annuelle
Moy	1,269	1,983	2,329	2,075	1,533	1,605	3,736	1,869	1,421	1,124	0,815	0,859	1,718
Max	4,527	16,453	26,82	14,54	4,74	6,152	33,66	18,13	4,17	3,028	3,192	3,528	11,579
Min	0,078	0,183	0,096	0,194	0,292	0,263	0,177	0,044	0,043	0,048	0,026	0,038	0,124
σ	1,045	3,235	5,183	3,593	1,106	1,306	6,969	3,51	0,964	0,904	0,812	0,836	
CV	0,8	1,6	2,2	1,7	0,7	0,8	1,9	1,9	0,7	0,8	1,0	1,0	
CMD	0,739	1,154	1,355	1,208	0,892	0,934	2,174	1,088	0,827	0,654	0,474	0,5	
Hennaya													
	Sep	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Annuelle
Moy	0,019	0,033	0,044	0,064	0,068	0,093	0,217	0,126	0,059	0,023	0,012	0,011	0,064
Max	0,18	0,232	0,29	0,63	0,26	0,422	1,647	1,631	0,598	0,317	0,196	0,16	0,547
Min	0	0	0	0	0	0,002	0	0	0	0	0	0	0
σ	0,041	0,063	0,064	0,117	0,075	0,106	0,372	0,317	0,107	0,055	0,034	0,028	
CV%	2,1	1,9	1,5	1,8	1,1	1,1	1,7	2,5	1,8	2,4	2,8	2,6	
CMD	0,299	0,512	0,68	0,996	1,062	1,448	3,387	1,972	0,921	0,358	0,19	0,173	
Sidi Aissa													
	Sep	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Annuelle
Moy	0,17	0,203	0,514	0,514	0,899	1,426	2,434	0,548	0,405	0,154	0,046	0,04	0,613
Max	1,829	1,304	6,88	5,95	9,93	8,402	22,201	3,472	2,27	1,807	0,374	0,389	5,401
Min	0	0	0	0,008	0,011	0,069	0,045	0,007	0,006	0	0	0	0,012
σ	0,375	0,313	1,296	1,12	1,929	2,38	4,573	0,804	0,584	0,37	0,108	0,09	
CV	2,2	1,5	2,5	2,2	2,1	1,7	1,9	1,5	1,4	2,4	2,3	2,2	
CMD	0,277	0,331	0,839	0,839	1,468	2,327	3,972	0,894	0,661	0,251	0,076	0,065	
Benskrane													
	Sep	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Annuelle
Moy	0,284	0,453	0,751	0,973	1,318	1,638	2,602	1,77	1,4	0,777	0,331	0,223	1,043
Max	1,225	1,495	2,253	3,693	7,177	8,514	16,604	11,368	9,074	6,996	1,495	1,096	5,916
Min	0	0	0,028	0,071	0,078	0,074	0,059	0,002	0	0	0	0	0,026
σ	0,354	0,484	0,67	1,039	1,566	1,955	4,069	2,778	2,155	1,28	0,428	0,315	
CV	1,2	1,1	0,9	1,1	1,2	1,2	1,6	1,6	1,5	1,6	1,3	1,4	
CMD	0,272	0,434	0,72	0,932	1,263	1,57	2,495	1,696	1,342	0,744	0,318	0,214	
Pierre du chat													
	Sep	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Annuelle
Moy	0,653	0,966	2,659	2,771	3,966	6,063	7,864	2,434	1,985	0,92	0,408	0,252	2,578
Max	5,558	8,841	32,812	24,349	16,812	45,509	63,664	14,661	14,33	3,081	2,187	2,592	19,533
Min	0	0	0	0	0	0,021	0	0	0	0	0	0	0,002
σ	1,142	1,624	5,647	4,76	5,192	10,227	13,375	3,211	2,591	0,955	0,625	0,524	
CV	1,8	1,7	2,1	1,7	1,3	1,7	1,7	1,3	1,3	1,0	1,5	2,1	
CMD	0,253	0,375	1,031	1,075	1,538	2,351	3,05	0,944	0,77	0,357	0,158	0,098	

σ : Écart type.

CV : coefficient de variation.

CMD : coefficient mensuel des débits.

V.4.2 Coefficient mensuel des débits (CMD)

Tout d'abord, il est essentiel de savoir ce qu'est un régime hydrologique. Pardé, dans son ouvrage *Fleuves et rivières* (1955), définit le régime hydrologique comme « l'ensemble des phénomènes qui concernent l'alimentation des cours d'eau et les variations de leurs débits ».

L'étude du régime hydrologique d'un cours d'eau a pour objet l'analyse de l'occurrence des périodes de basses et hautes eaux au cours d'une année moyenne et la détermination de l'origine des écoulements : pluviale, nivale, glaciaire, etc. Ce sont généralement les variations saisonnières des débits qui vont permettre la classification en différents régimes hydrologiques, car elles permettent de traduire visiblement l'action de ces différents facteurs. (Nicole, P., 2010)

L'analyse des variations saisonnières des débits s'effectue par le coefficient mensuel (CMD), qui correspond au rapport entre chaque moyenne mensuelle et le module annuel. Ces coefficients permettent de comparer facilement les écarts des moyennes mensuelles par rapport à la moyenne annuelle. L'examen des histogrammes des figures V.14 et figure V.15 révèle que le mois de mars affiche la moyenne la plus élevée (maximum) pour toutes les stations, tandis que les mois d'août et juillet se partagent la moyenne la plus faible (le minimum).

Le CMD permet de définir les périodes de hautes eaux et les périodes de basses eaux. Selon la classification de Pardé (1955), un CMD supérieur ou égal à 1 correspond à une période de hautes eaux et un CMD inférieur à 1 est assimilé à une période de basses eaux. Le calcul du coefficient mensuel du débit montre que le CMD le plus fort règne pendant le printemps (la période des hautes eaux), surtout au mois de mars pour toutes les stations. Ces coefficients peuvent atteindre des maxima de 3 et plus, indiquant que la totalité du débit annuel s'écoule durant la période des hautes eaux.

Avec des maxima pouvant atteindre des coefficients mensuels de débit de 4 et plus, ce qui veut dire que la totalité du débit annuel s'écoule en période des hautes eaux.

Selon la classification de Pardé, la répartition mensuelle des débits de toutes les stations hydrométriques, à l'exception des deux stations de l'oued Mouilah (Sidi Belkheir et Pont RN7A), correspond à un régime pluvial. Ce régime est caractérisé par des hautes eaux au printemps, avec un maximum enregistré en mars, et des étiages en été, où le débit minimal se produit en août, parfois en juillet, en raison de faibles précipitations et d'une

évapotranspiration élevée. Ce type de régime est typique des bassins versants principalement alimentés par des précipitations sous forme de pluie.

Contrairement aux stations précédentes, la répartition des débits mensuels aux stations de Sidi Belkheir et Pont RN7A présente un régime mixte, avec deux minima (en février, janvier et en juillet) et deux maxima (en mars et novembre) (*figure V.16*). Ce type de régime, ayant deux modes d'alimentation, peut montrer deux saisons de hautes eaux, l'une étant généralement plus marquée que l'autre. Ces cours d'eau dépendent de contributions qui s'ajoutent ou se relaient au cours de l'année, comme les précipitations et la fonte du manteau neigeux (J.P. Amat et *al.*, 2008).

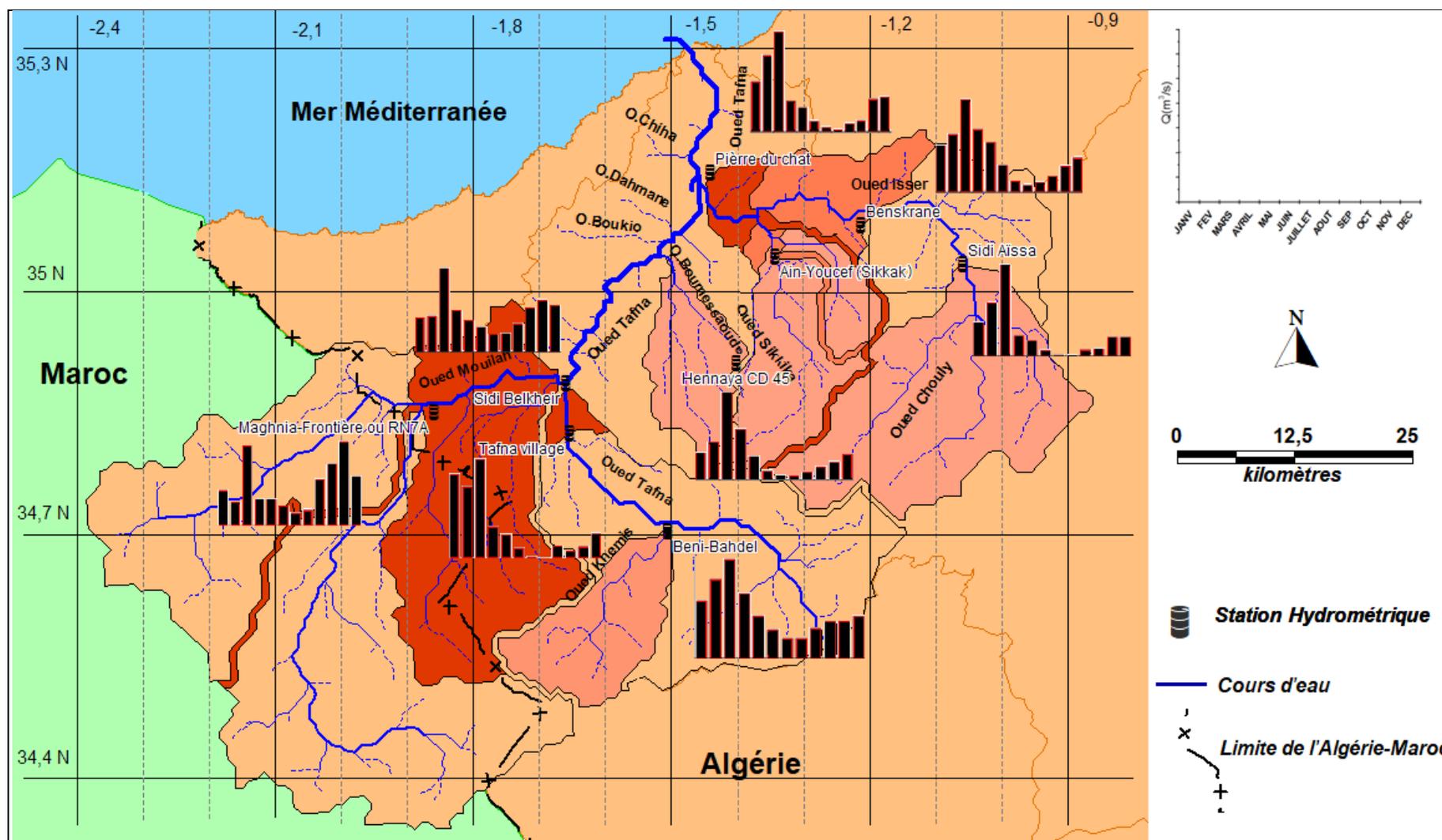


Figure V.14 Carte des régimes hydrologiques le long du réseau hydrographique.

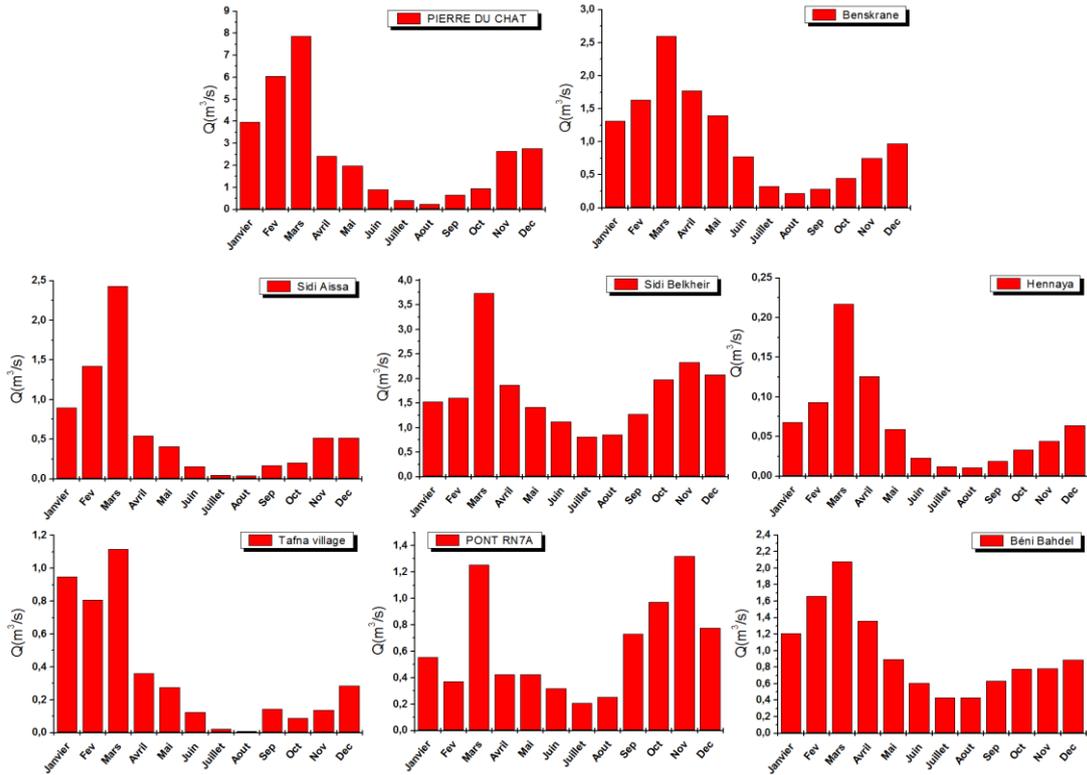


Figure V.15 Variation des débits moyens mensuels.

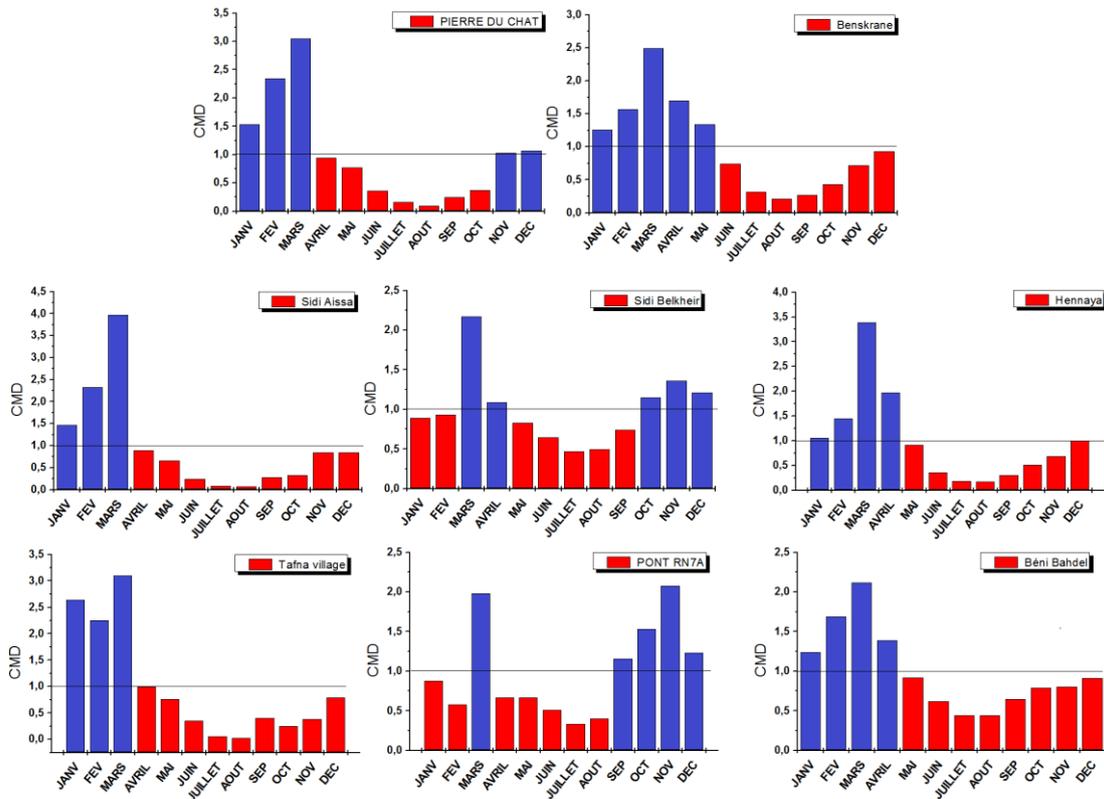


Figure V.16 Variation mensuelle du coefficient mensuel des débits (CMD).

V.4.3 Variabilités interannuelles des débits

La figure V.17 montre clairement que la variabilité interannuelle est l'une des caractéristiques majeures de l'écoulement superficiel dans la région étudiée, fortement influencée par les crues et les étiages.

Sur une période de 36 ans, la station de Pierre du Chat enregistre la majorité des maxima mensuels en mars, représentant environ 25,0 % des occurrences (soit 9 fois), suivie de novembre et février avec 6 occurrences chacun (16,7 %). Viennent ensuite janvier et avril avec 4 occurrences chacun (11,1 %). En revanche, les débits mensuels les plus élevés n'ont été observés qu'une à trois fois maximum en septembre, décembre, mai et juin.

Le minimum mensuel peut survenir tous les mois de la saison estivale (mai à octobre), voire lors d'étiages accusés en novembre, décembre, janvier et avril : il est survenu à l'égalité 1 fois en novembre, décembre et janvier, 2 fois en avril, 3 fois en mai, 7 fois en juin, 11 fois en octobre, 18 fois en septembre et 23 fois au mois d'août et juillet (63,9 %).

Sur une période de 39 ans, la station de Benskrane a enregistré le maximum mensuel 10 fois en mars (25,6 %), 9 fois en janvier (23,1 %) et 8 fois en février (20,5 %). Pour les mois d'octobre, novembre, décembre, avril, mai et juin, le maximum mensuel n'a été observé qu'une à quatre fois au maximum.

En ce qui concerne le minimum mensuel, le mois d'août enregistre la fréquence la plus élevée avec environ 27 fois, soit 69,2 %, suivi de septembre avec 16 fois (41,0 %) et de juillet avec 7 fois. Pour les mois de juin, octobre, novembre et mai, le minimum est apparu de 1 à 4 fois au maximum.

La station de Sidi Aissa se caractérise par un débit mensuel faible, marqué par des maxima et minima fluctuants de manière aléatoire. L'année 2009/2010 se distingue par une crue printanière importante, avec un débit maximum atteignant 22,201 m³/s, soit 35 fois le débit annuel moyen.

La répétition du maximum mensuel est la plus marquée en février, avec 8 occurrences (27,6 %), suivie de mars avec 7 occurrences (24,1 %) et de janvier avec 5 occurrences (17,2 %). Pour les mois de septembre, octobre, novembre, décembre, avril et mai, le maximum mensuel n'est apparu qu'une à quatre fois au maximum.

Le minimum mensuel a été observé 22 fois en août, 19 fois en juillet, 14 fois en septembre, 11 fois en octobre, 5 fois en juin et 2 fois en novembre.

À la station de Pont RN7A, sur une période de 35 ans, le maximum mensuel a été observé 7 fois en novembre (20 %), 5 fois en septembre, octobre et mars (14,3 %), 3 fois en décembre (8,6 %), 2 fois en janvier, avril, mai et juin (5,7 %), et 1 fois en février (2,9 %).

Le minimum mensuel peut se produire chaque mois durant la saison estivale, atteignant un maximum en juillet (25,7 %) et en août (22,9 %). Il peut également être observé lors d'étiages marqués en novembre (2 fois : 5,7 %), en janvier (1 fois : 2,9 %) et en avril (5 fois : 14,3 %).

À la station de Sidi Belkheir, entre 1973 et 1999, le maximum mensuel a été observé 4 fois en mars, atteignant la même fréquence que le mois de mai (16 %). Il a été relevé 3 fois consécutivement en septembre, octobre, novembre et février (12 %), 2 fois en janvier et avril, et 1 fois en décembre.

Le minimum mensuel se manifeste principalement en juillet, avec 10 occurrences (40,0 %), suivi de 6 fois en août (24,0 %). Pour les mois de septembre, octobre, novembre, mars, avril et juin, le minimum a été observé de 1 à 3 fois au maximum.

À la station de Béni Bahdel, le maximum mensuel se produit durant les mois de la saison froide. Entre 1972 et 2016, il a été observé 12 fois en mars (27,3 %), 9 fois en février (20,5 %) et 7 fois en janvier (15,9 %). Pour les autres mois, le maximum mensuel n'est apparu qu'une à quatre fois au maximum.

Le minimum mensuel est particulièrement fréquent en août, avec 20 occurrences (45,5 %), suivi de juillet et septembre, où il est observé 9 fois (20,5 %). Pour les mois de juin, octobre et janvier, le minimum a été enregistré de 1 à 3 fois au maximum.

L'analyse de l'évolution interannuelle des débits mesurés à la station de Tafna Village entre 1987 et 2012 révèle que l'oued de Tafna subit des sécheresses presque toute l'année, avec des valeurs nulles fréquentes. Le minimum mensuel (débits nuls) se manifeste pratiquement chaque mois, pouvant être observé jusqu'à 8 fois dans une même année. En août, il apparaît 20 fois, en juillet 19 fois, en septembre 16 fois, en juin 14 fois, en octobre 13 fois, en novembre et décembre 9 fois, 4 fois en janvier, 2 fois en février, avril et mai, et 1 fois en mars.

Le maximum mensuel est caractérisé par des débits très faibles par rapport à ceux des autres stations, à l'exception des années 2008/2009 et 1994/1995, qui ont enregistré respectivement des débits maximaux de 16,474 m³/s en janvier et de 10,397 m³/s en mars. Les mois ayant connu les valeurs les plus élevées des débits mensuels sont mars (8 occurrences) et

janvier (5 occurrences). En revanche, pour les mois de septembre, novembre, décembre, février, avril et mai, le maximum a été observé de 1 à 3 fois au maximum.

La station de l'Hennaya, avec un module de 0,064 m³/s, affiche un débit très faible. Les variations interannuelles des débits de cette station permettent d'évaluer l'ampleur des fluctuations, qui se caractérisent par une différence significative entre les valeurs maximales et minimales. Sur une période de 34 ans, le maximum mensuel a été observé 11 fois en mars, 5 fois en février, 4 fois en avril et en décembre, 3 fois en janvier et en mai, et 1 fois en septembre et en octobre.

Le minimum mensuel se manifeste en août (24 fois), en septembre (20 fois), en juillet (17 fois) et en octobre (11 fois). Pour les mois de novembre, mai, avril, décembre et janvier, le minimum a été observé de 1 à 4 fois au maximum.

Dans l'ensemble, la variabilité interannuelle des séries hydrométriques, en relation avec les fluctuations pluviométriques, est largement influencée par les crues et les étiages. L'évolution de ces séries révèle une succession d'événements, notamment des crues printanières significatives, avec un débit maximal atteint en mars (durant la période des hautes eaux), ce qui caractérise le régime pluvial. Cela repose sur les variations pluviométriques, qui sont à leur tour liées à la variabilité de la circulation atmosphérique globale, entraînant ainsi l'instabilité des maxima et des minima mensuels d'une année à l'autre. (Bouanani. A., 2004)

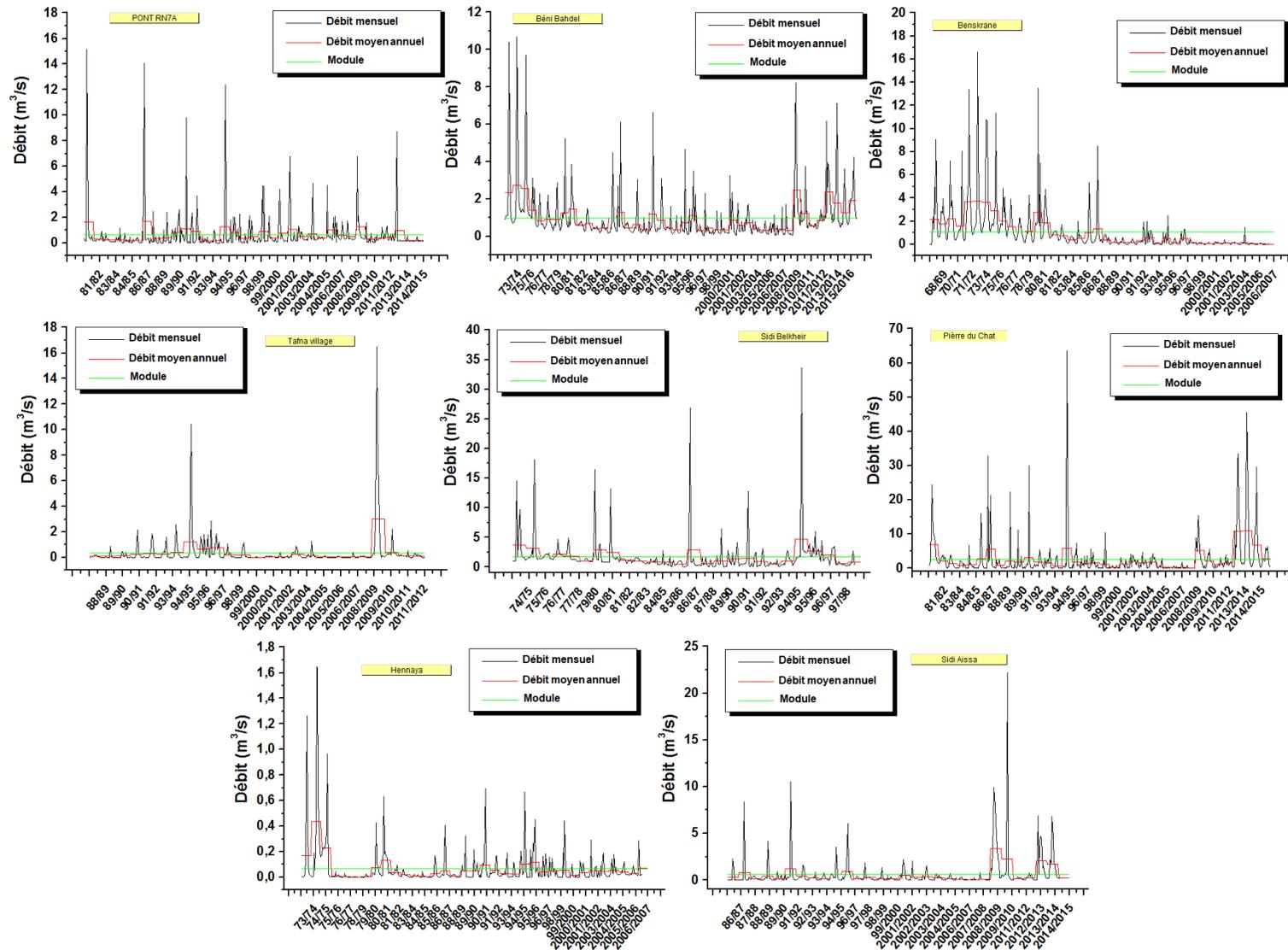


Figure V.17 Variations des débits mensuels des stations hydrométriques.

V.5 Évolution temporelle des débits moyens annuels

V.5.1 Évolution annuelle des indices centrés et réduits

L'analyse des indices centrés réduits des débits moyens annuels et de leurs valeurs pondérées met en évidence des variations interannuelles notables d'une année à l'autre pour toutes les séries chronologiques. En observant les graphiques (*figure V.18*), on constate que, malgré les différences dans les périodes d'observation de chaque station, les courbes montrent des périodes excédentaires et déficitaires similaires.

Cette méthode a permis de visualiser de manière plus claire les variations des écoulements moyens annuels, en mettant en évidence trois périodes distinctes. La première période, de 1968 à 1979, est excédentaire, avec des pics remarquables en 1972 (SPI > 2) à la station de Benskrane et en 1973 (SPI > 2,5) à la station de Béni Bahdel. Cela est suivi d'une période déficitaire de 1980 à 2007, durant laquelle on observe une baisse marquée des écoulements, particulièrement en 2004. La station de Benskrane est la plus affectée par cette longue période déficitaire, enregistrant un déficit allant jusqu'à 66,6 % par rapport à la moyenne générale de la série. Elle est suivie par la station de Sidi Aissa, qui affiche un déficit de 41,8 %, et enfin par les stations de Béni Bahdel et Pierre du Chat, qui présentent respectivement des déficits de 39,2 % et 23,7 %.

Après cette période déficitaire, on constate un retour à une période excédentaire, caractérisée par une augmentation des débits moyens annuels, avec des valeurs atteignant jusqu'à 131,2 % à la station de Sidi Aissa.

Généralement, les courbes de tendance signalent une longue et une forte baisse au niveau des séries des débits moyens annuels à partir de 1980, suivie d'une période de récupération à partir de 2008. Ce constat est corrélé à la diminution de la pluviométrie. Il est à noter que cette réduction de la pluviométrie s'aligne relativement bien avec les courbes de tendance des débits moyens annuels.

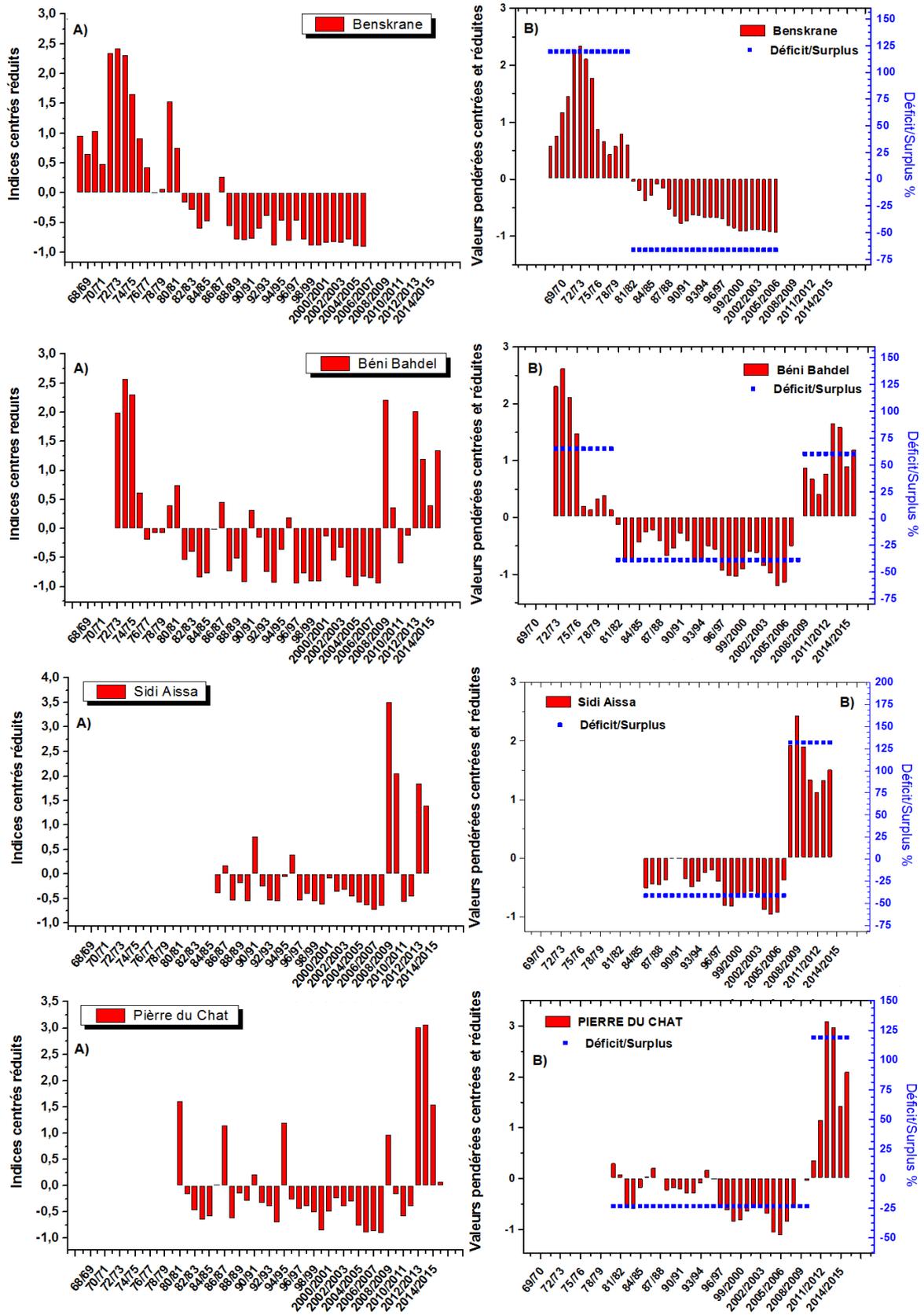


Figure V.18 Évolution de l'écoulement avec les indices centrés réduits des débits moyens annuels (A) et des valeurs pondérées centrées et réduites des débits moyens annuels (B).

V.5.2 Analyse préliminaire des évolutions (détection de tendances)

La recherche de tendance linéaire (à la hausse ou à la baisse) a été effectuée à l'aide de régressions linéaires entre la variable d'intérêt $y(t)$ et la date t :

$$y(t) = bt + a$$

Le coefficient de pente (b) : de la régression nous renseigne sur le signe de la tendance. L'analyse des débits moyens annuels révèle une tendance linéaire, tant à la baisse qu'à la hausse, comme le montrent les courbes de tendance linéaire (*figure V.19*). D'après le tableau V.7, la station de Benskrane présente la pente la plus prononcée, avec une valeur négative de -0,079, indiquant une décroissance maximale dans cette station, avec un seuil de signification inférieur à 1 %.

Cette tendance illustre la dégradation du système hydrologique en raison de la diminution des quantités de précipitations, comme démontré dans le chapitre précédent. Le coefficient de corrélation des débits moyens annuels pour la station de Benskrane est élevé (-0,81), ce qui indique que cette série chronologique n'est pas aléatoire et confirme l'existence d'une tendance. En revanche, une légère tendance à la hausse est observée aux stations de Pierre du Chat, Aïn Youcef, Sidi Aissa et Tafna Village (*figure V.19* et *tableau V.7*).

Tableau V.7 Paramètre de la tendance linéaire.

Station hydrométrique	R	P	$Y(t) = a + b \times t$	
			a	b
Pierre du chat	0,21	0,21	1,562	+0,055
Sidi Belkheir	-0,21	0,32	2,13	-0,032
Benskrane	-0,81	<0,0001	2,628	-0,079
Béni Bahdel	-0,14	0,38	1,144	-0,007
Aïn Youcef	0,20	0,21	0,331	+0,012
Pont RN7A	-0,07	0,69	0,687	-0,003
Sidi Aissa	0,36	0,06	0,118	+0,033
Hennaya	-0,32	0,06	0,111	-0,003
Tafna Village	0,12	0,57	0,229	+0,010

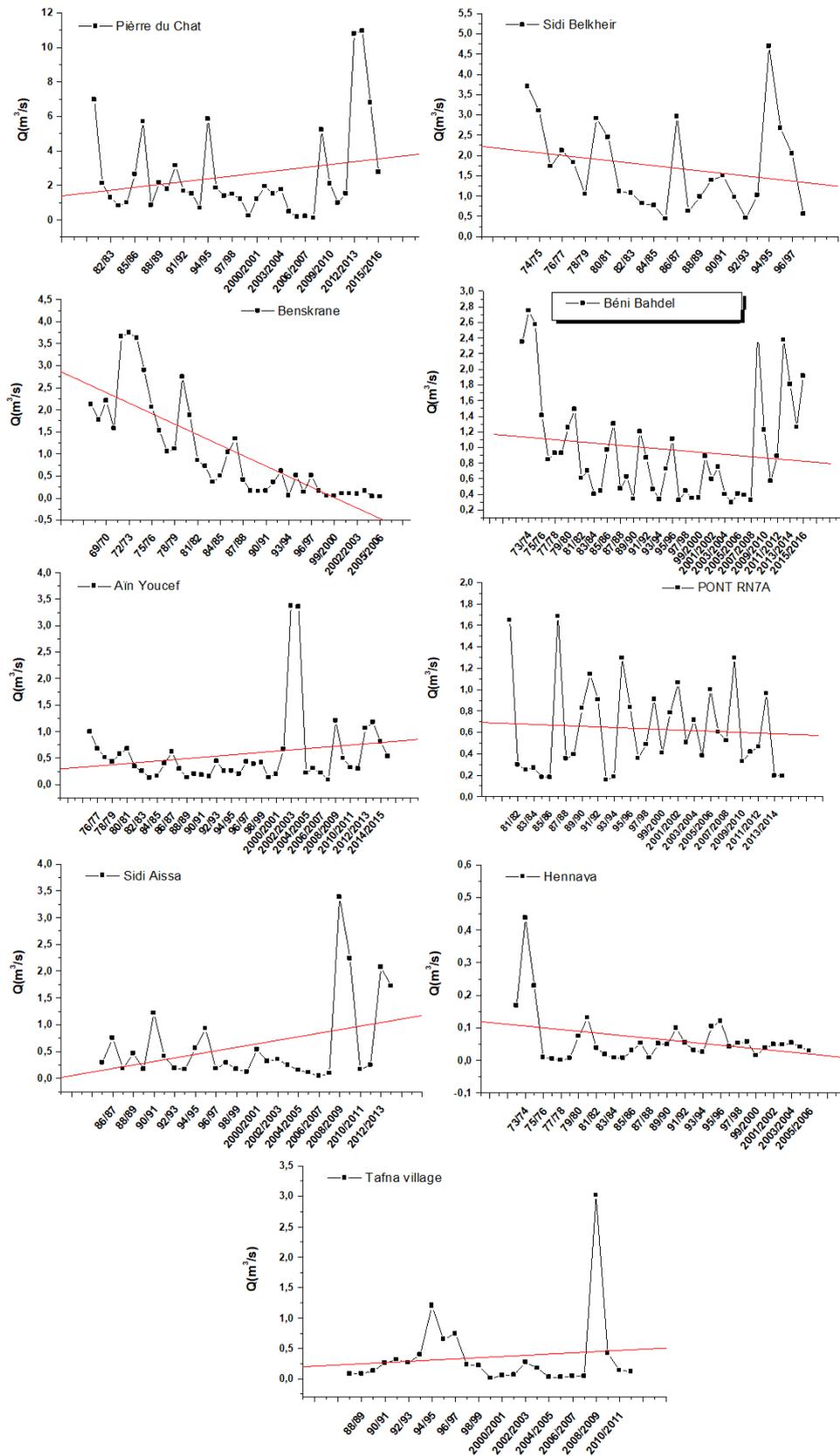


Figure V.19 Chroniques des débits moyens annuels. La ligne droite pointillée représente la tendance linéaire ajustée.

V.6 Analyse de la stationnarité des séries temporelles

V.6.1 Détection de rupture au sein des séries des débits moyens annuels

Les résultats de la segmentation d'Hubert (Hubert et *al.*, 1989) et Pettitt (1979) appliquées aux séries chronologiques sont consignés dans le tableau V.8. La segmentation d'Hubert met en évidence plusieurs ruptures dans les séries des débits moyens annuels.

La station de Bani Bahdel présente deux ruptures : la première, en 1974, indique une baisse de 72,8 %, et la seconde, en 2007, montre une augmentation du module avec un accroissement de 125,5 % après cette date (*tableau V.8*). Il est important de noter que la segmentation d'Hubert est significative à un seuil de 1 % (Dagnélie, 1970).

La station de Benskrane présente trois ruptures : la première, en 1970, est marquée par une augmentation des écoulements, avec une hausse de 81,5 % dans les débits moyens annuels. La deuxième rupture, en 1974, indique une baisse des écoulements avec un déficit de 50,4 %. La troisième, survenue en 1980, montre également une diminution de l'écoulement, mais avec un déficit plus marqué de 79,9 % (*tableau V.8*). Pour la station d'Hennaya, une rupture à la baisse est observée en 1974, avec un déficit estimé à 84,4 %.

Les stations de Pierre du Chat, Sidi Aissa et Aïn Youcef présentent chacune deux ruptures. La première est une rupture positive survenue respectivement en 2011, 2007 et 2001, avec des excédents des débits moyens annuels atteignant 465,1 %, 713,2 % et 799,0 % (*tableau V.8*). Sur ces mêmes séries, la segmentation d'Hubert révèle une deuxième rupture en 2013, 2009 et 2003, avec un déficit allant jusqu'à 83,4 % à la station d'Aïn Youcef. À noter qu'une seule année peut séparer une rupture à la hausse d'une rupture à la baisse, ne permettant pas de définir clairement une période excédentaire ou déficitaire.

Les résultats du test de Pettitt montrent que les séries temporelles ne présentent pas de rupture, à l'exception des stations de Bani Bahdel et Benskrane. Les ruptures identifiées indiquent une diminution significative des débits moyens annuels en 1980 et 1986, respectivement pour les stations de Bani Bahdel et Benskrane. La probabilité de dépassement statistique associée est inférieure à 1 % pour Benskrane et inférieure à 10 % pour Bani Bahdel. À Bani Bahdel, la moyenne des sous-séries avant et après la rupture est de 1,613 m³/s et 0,818 m³/s, marquant une baisse de 49,3 %. Pour Benskrane, les moyennes avant et après la rupture sont de 1,840 m³/s et 0,193 m³/s, soit une diminution de 89,5 %.

Les procédures de Lee et Heghinian (1977) et Buishand (1982, 1984) sont des approches paramétriques qui nécessitent une distribution normale pour être appliquées à une série de données. Le logiciel KhronoStat (IRD, 1998) permet de vérifier la normalité des séries chronologiques, et si l'hypothèse de normalité est rejetée, les méthodes de Buishand et Lee et Heghinian ne sont pas appliquées (*tableau V.9*). Cela a été observé pour toutes les stations, sauf celles d'Aïn Youcef et Sidi Belkheire.

La station de Sidi Belkheire présente une rupture négative en 1980, tandis que la station d'Aïn Youcef enregistre une rupture positive en 2000, c'est la même date que cette station a été remplacée par une autre station Sidi Moussa en (1999/2000), nous considérons donc ce changement non pas pour des raisons climatiques, mais comme un résultat artificiel du changement des coordonnées de la station.

Puisque les deux procédures de Lee et Heghinian (1977) et Buishand (1982, 1984) ne sont pas exécutées pour la majorité des stations, nous avons utilisé d'autres tests, qui sont : le test de Spearman (Spearman.C, 1904), Mann-Kendall (Mann, 1945 ; Kendall, 19) et la pente de Sen (Sen, 1968).

Les résultats des tests de Mann-Kendall, de Spearman et de la pente de Sen sont présentés dans le *tableau V.10*. Ce *tableau* révèle une combinaison de tendances négatives et positives parmi les différentes stations. Les stations affichant des valeurs positives montrent une tendance à la hausse, tandis que celles avec des valeurs négatives indiquent une tendance à la baisse. Lorsque la valeur p est inférieure au seuil de signification ($\alpha = 0,05$), l'hypothèse nulle H_0 est rejetée, ce qui signifie qu'une tendance existe dans les séries chronologiques. En revanche, si H_0 est acceptée, cela indique qu'aucune tendance n'a été détectée.

Concernant les débits moyens annuels, une tendance négative significative n'a été observée qu'à la station de Benskrane, où la statistique de Mann-Kendall (S) atteint son maximum à -537. Parmi les 9 stations, 3 affichent des tendances positives, avec des augmentations annuelles variant de +0,0011 à +0,0024. En revanche, 6 stations montrent une tendance à la baisse, avec des variations annuelles allant de -0,0022 à -0,0627, la plus forte diminution étant enregistrée à Benskrane (-0,0627/an). De plus, le test de Spearman a également révélé une tendance à la baisse significative ($\alpha = 0,05$) à la station de Benskrane, avec une probabilité bien inférieure à 0,05.

Tableau V.8 Résultats de tests de Pettitt et segmentation d'Hubert.

Station	Période d'étude	Pettitt					Hubert*							
		Date de rupture	Probabilité associée	Moy 1	Moy 2	$R_{2/1}$	Date de rupture	Moy 1	Moy 2	$R_{2/1}$	Moy 3	$R_{3/2}$	Moy 4	$R_{4/3}$
Aïn Youcef	(1975-2015)	PR	/	/	/	/	2001,2003	0,37	3,36	799,03	0,56	-83,34	/	/
Bani Bahdel	(1972-2015)	1980	0,0854	1,61	0,82	-49,28	1974,2007	2,56	0,70	-72,81	1,57	125,46	/	/
Benskrane	(1967-2005)	1986	0,00000317	1,84	0,19	-89,53	1970,1974,1980	1,92	3,48	81,49	1,73	-50,35	0,35	-79,85
Hennaya	(1972-2005)	PR	/	/	/	/	1974	0,28	0,04	-84,37	/	/	/	/
Pierre du chat	(1980-2015)	PR	/	/	/	/	2011,2013	1,92	10,87	465,08	4,77	-56,07	/	/
PONT RN7A	(1980-2014)	PR	/	/	/	/	PR	/	/	/	/	/	/	/
Sidi Aissa	(1985-2013)	PR	/	/	/	/	2007,2009	0,35	2,81	713,22	1,05	-62,56	/	/
Sidi Belkheire	(1973-1997)	PR	/	/	/	/	PR	/	/	/	/	/	/	/
Tafna Village	(1987-2011)	PR	/	/	/	/	PR	/	/	/	/	/	/	/

$R_{2/1}$: C'est le rapport entre les deux moyennes avant et après la rupture $R_{2/1} = [(M_2 - M_1)/M_1] \times 100$.

- M_2 : La moyenne avant la date de rupture.
- M_1 : La moyenne après la date de rupture.

* Niveau de signification du test de Scheffé : 1%.

PR: Pas de rupture.

Tableau V.9 Résultats de tests de Buishand et la méthode bayésienne de Lee et Heghinian.

Station	Période d'étude	Date de rupture	(U) Statistique de Buishand	Buishand			Date de rupture	Lee et Heghinian			
				Moy 1	Moy 2	$R_{2/1}$		Densité de probabilité	Moy 1	Moy 2	$R_{2/1}$
Aïn Youcef	(1975-2015)	acceptée	/	/	/	/	2000	0,1041	0,36	0,94	159,33
Bani Bahdel	(1972-2015)	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Benskrane	(1967-2005)	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Hennaya	(1972-2005)	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Pierre du chat	(1980-2015)	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Pont RN7A	(1980-2014)	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Sidi Aissa	(1985-2013)	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Sidi Belkheire	(1973-1997)	acceptée	/	/	/	/	1980	0,1465	2,36	1,42	-40,04
Tafna Village	(1987-2011)	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

$R_{2/1}$: C'est le rapport entre les deux moyennes avant et après la rupture $R = [(M_1 - M_2)/M_1] \times 100$

- M_1 : La moyenne avant la date de rupture.
- M_2 : La moyenne après la date de rupture.

/ : Normalité non vérifiée sur les valeurs observées et transformées. (Les méthodes de Buishand et Lee et Heghinian n'ont pas été exécutées).

Tableau V.10 Résultats du test de Mann-Kendall, du test de Spearman et de la pente de Sen appliqués sur les débits moyens annuels.

Station	Période d'étude	Mann Kendall				Test de Spearman				
		S	Statistique $u(s)$	Degré de signification (p -valeur)	Hypothèse nulle (H_0)	r_s	Statistique $u(r_s)$	Degré de signification (p -valeur)	Hypothèse nulle (H_0)	Pente de Sen /an
Aïn Youcef	(1975-2015)	49	1,4102	0,539167	Acceptée	0,1222	0,7729	1,56044	Acceptée	0,0025
Bani Bahdel	(1972-2015)	-138	-1,3857	0,165853	Acceptée	-0,1769	-1,1599	0,24608	Acceptée	-0,0082
Benskrane	(1967-2005)	<u>-537</u>	-6,4839	<u>8,936744E-11*</u>	<u>Rejetée</u>	<u>-0,9004</u>	-5,5505	<u>2,84905E-08*</u>	<u>Rejetée</u>	<u>-0,0628</u>
Hennaya	(1972-2005)	17	0,2372	1,187491	Acceptée	0,0304	0,1747	1,13866	Acceptée	0,0002
Pierre du chat	(1980-2015)	-8	-0,0953	0,924040	Acceptée	0,0327	0,1934	1,15335	Acceptée	-0,0022
PONT RN7A	(1980-2014)	27	0,3692	1,288049	Acceptée	0,0936	0,5455	1,41461	Acceptée	0,0011
Sidi Aissa	(1985-2013)	-26	-0,4690	0,639104	Acceptée	-0,0123	-0,0652	0,94804	Acceptée	-0,0016
Sidi Belkheire	(1973-1997)	-76	-1,7516	0,079839	Acceptée	-0,3215	-1,5752	0,11521	Acceptée	-0,0469
Tafna Village	(1987-2011)	-34	-0,7707	0,440876	Acceptée	-0,1954	-0,9572	0,33847	Acceptée	-0,0035

*tendance significative au seuil de 0,05.

V.7 Impact des longues périodes de sécheresse sur les eaux superficielles du Tafna

Le bassin versant de la Tafna comprend cinq barrages en service, totalisant un volume initial de 392 millions de mètres cubes. Ces barrages sont situés sur les cours d'eau suivants : l'oued Khemis, l'oued Tafna, l'oued Isser et l'oued Sikkak. Sur l'oued Khemis se trouve le barrage de Béni Bahdel (63 Hm³), tandis que sur l'oued Tafna, on trouve le barrage de Hammam Boughrara (177 Hm³). L'oued Isser abrite le barrage de Sidi Abdelli (110 Hm³), et enfin, sur l'oued Sikkak, il y a le barrage de Mefrouche (15 Hm³) et le barrage de Sikkak (27 Hm³).

En raison du manque de données disponibles, nous avons restreint notre étude à quatre barrages : Béni Bahdel, Sidi Abdelli, Hammam Boughrara et le barrage de Sikkak. Le tableau V.11 présente les apports annuels moyens et extrêmes pour chacun de ces barrages.

La moyenne des apports annuels est de 30,9 Hm³ pour l'oued Khemis au barrage de Béni Bahdel, dont le volume initial est de 63 Hm³, avec un taux de remplissage de 49,1 %. Pour le barrage de Sidi Abdelli sur l'oued Isser, la moyenne des apports annuels est de 32,9 Hm³, avec un volume initial de 110 Hm³ et un taux de remplissage de 29,9 %. Au barrage de Sikkak sur l'oued de Sikkak, la moyenne des apports annuels est de 18,1 Hm³, pour un volume initial de 27 Hm³ et un taux de remplissage de 67 %. Enfin, pour le barrage de Hammam Boughrara sur l'oued Tafna, la moyenne annuelle des apports est de 177 Hm³, avec un volume initial de 54,2 Hm³ et un taux de remplissage de 30,6 %.

Le test de Pettit a montré que les apports moyens annuels des deux périodes avant et après la date de rupture sont 50,9 Hm³ et 25,8 Hm³ (*tableau V.12*), soit une baisse de 49,3 % à la station de Bani Bahdel. Cela signifie qu'entre 1972 et 1980 le taux de remplissage du barrage atteint jusqu'à 80,8 %. Alors qu'entre 1981 et 2015, il a diminué jusqu'à atteindre presque la moitié de la période précédente. Durant la période de 1967 et 1986 le barrage de Sidi-Abdelli a enregistré un apport annuel de 58 Hm³, ce qui permet de remplir environ la moitié du barrage (52,7 %), alors que la deuxième période (1987-2005) le remplissage du barrage ne dépasse pas 5,5 % (*tableau V.12*), ceci est considéré comme désastreux pour un barrage d'une capacité de 110 Hm³.

La méthode des indices centrés réduits montre trois périodes à la station de Bani Bahdel (*tableau V.13*):

- La première est à la hausse s'étale de 1972 à 1980, enregistre un apport annuel de 50,9 Hm³, soit un débit de 1,613 m³/s, ce qui permet de remplir 80,8 % du barrage.

- La deuxième période est à la baisse de 1981 à 2007, cette période se caractérise par une diminution intense des apports annuels, pouvant aller jusqu'à $18,8 \text{ Hm}^3$ avec une diminution du taux de remplissage jusqu'à 29,8 %.
- A la suite de l'année 2007, la récupération revient au barrage de Bani Bahdel avec un taux de remplissage de 78,5% ($49,4 \text{ Hm}^3$).

Malheureusement la station de Benskrane a été arrêtée définitivement en 2007 dans ce cas la méthode des indices centrés réduits fait apparaître deux périodes (*tableau V.13*):

- La première période est à la hausse de 1967 à 1980, elle est marquée par des valeurs extrêmes atteignent jusqu'à $3,750 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1972, soit un apport annuel de $118,3 \text{ Hm}^3$. La moyenne des apports annuels de cette période est de 72 Hm^3 , avec un taux de remplissage de 114,3 %, cela signifie que la plupart des années de cette période, le barrage est plein jusqu'au débordement.
- La deuxième période est à la baisse de 1981 à 2007, les apports annuels ont diminué jusqu'à $11,0 \text{ Hm}^3$ avec une diminution du taux de remplissage jusqu'à 17,4 %. Ces résultats montrent la grande différence entre les deux périodes, la première période (humide), qui s'est caractérisé la plupart de ses années par un excédent de $51,3 \text{ Hm}^3$, tandis que la deuxième période (sèche) n'a pas rempli un tiers du barrage.

La méthode des indices centrés réduits met en évidence quatre périodes distinctes à la station d'Aïn Youcef (*tableau V.13*) :

- Première période (1975-1999) : période de baisse avec un apport annuel moyen de $11,7 \text{ Hm}^3$, correspondant à un débit de $0,369 \text{ m}^3/\text{s}$, permettant de remplir le barrage de Sikkak à 43,2 % de sa capacité.
- Deuxième période (2000-2004) : période de hausse avec un apport annuel moyen de $49,3 \text{ Hm}^3$, soit un débit de $1,563 \text{ m}^3/\text{s}$, entraînant un taux de remplissage de 182,5 %, ce qui indique que le barrage déborde durant la majorité des années de cette période.
- Troisième période (2005-2010) : nouvelle période de baisse caractérisée par une forte diminution des apports annuels (-23,7 %), atteignant $13,8 \text{ Hm}^3$, avec un taux de remplissage réduit à 51,2 %.
- Quatrième période (2011-2016) : reprise avec un apport annuel de $24,4 \text{ Hm}^3$, permettant de remplir le barrage de Sikkak à 90,5 % de sa capacité.

Avec une capacité de 117 Hm³, le barrage de Hammam Bouhrara est effectivement le plus grand barrage du bassin versant de la Tafna. Les eaux de l'oued Mouilah se rejoignent avec celles de l'oued Tafna, qui est le principal cours d'eau alimentant le barrage. Cette confluence augmente le volume d'eau disponible pour le stockage dans le barrage. La méthode des indices centrés réduits identifie trois périodes à la station de Sidi Belkheir (tableau V.13) :

- Première période (1973-1980) : période de hausse, avec un apport annuel de 74,5 Hm³, correspondant à un débit de 2,361 m³/s, ce qui permet de remplir le barrage à 42,1 % de sa capacité.
- Deuxième période (1981-1992) : période de baisse marquée par une forte diminution des apports annuels, qui peuvent descendre à 34,4 Hm³, entraînant un taux de remplissage réduit à 19,4 %.
- Troisième période (1993-1998) : période de récupération pour le barrage de Hammam Bouhrara, avec un taux de remplissage de 39,2 % et un apport annuel de 69,2 Hm³.

Nous concluons que l'année 1980 a été le début de longues périodes de sécheresse, qui ont affecté négativement sur les ressources superficielles. L'année 2008 semble être une reprise des apports annuels, mais cette période est courte pour une étude climatique.

Tableau V.11 Potentialités en eau de surface dans le bassin versant de la Tafna.

Stations Hydrométriques	Cours d'eau	Nom du barrage	Période d'observation	Q (m ³ /s)	Q (m ³ /s)		Apport moyen (Hm ³)	Apport extrêmes (Hm ³)		Taux de remplissage %
					Max	Min		Max	Min	
Beni-Bahdel	Oued khemis	Beni-Bahdel (63 Hm ³)	1972-2015	0,981	2,750	0,299	30,9	86,7	9,4	49,1
Benskrane	Oued Isser	Sidi-Abdelli (110 Hm ³)	1967-2005	1,043	3,750	0,032	32,9	118,3	1,0	29,9
Aïn Youcef	Oued Sikkak	Barrage Sikkak (27 Hm ³)	1975-2015	0,574	3,373	0,087	18,1	106,4	2,7	67,0
Sidi Belkheir	Oued Mouilah	Barrage Hammam Boughrara (177 Hm ³)	1973-1997	1,718	4,695	0,438	54,2	148,1	13,8	30,6

Tableau V.12 Résultats du test de Pettitt appliqués sur les débits annuels.

Test de pettitt										
Station	Période d'étude	Année de rupture	Probabilité associée	Moy 1	Moy 2	Apport (Hm ³)		$R_{2/1}$ (%)	Taux de remplissage %	
						Moy1	Moy2		Moy1	Moy2
Bani Bahdel	(1972-2015)	1980	0,0854	1,613	0,818	50,9	25,8	-49,28	80,8	41,0
Benskrane	(1967-2005)	1986	0,00000317	1,840	0,193	58,0	6,1	-89,53	52,7	5,5

Tableau V.13 Résultats de la méthode des indices centrés réduits des débits et des apports annuels.

Stations	Période d'observation	Q (m ³ /s)	Apport moyen (Hm ³)	Méthode de SPI				
				Période	Q (m ³ /s)	Déficit/Surplus (%)	Apport moyen (Hm ³)	Taux de remplissage (%)
Beni-Bahdel	1972-2015	0,981	30,9	1972/1980	1,613	64,5	50,9	80,8
				1981/2007	0,596	-39,2	18,8	29,8
				2008/2015	1,568	59,8	49,4	78,5
Benskrane	1967-2005	1,043	32,9	1967/1980	2,284	118,9	72,0	114,3
				1981/2005	0,348	-66,6	11,0	17,4
Aïn Youcef	1975-2015	0,575	18,1	1975/1999	0,369	-35,7	11,7	43,2
				2000/2004	1,563	171,8	49,3	182,5
				2005/2010	0,439	-23,7	13,8	51,2
				2011/2016	0,775	34,7	24,4	90,5
Sidi Belkheir	1973-1997	1,718	54,2	1973/1980	2,361	37,4	74,5	42,1
				1981/1992	1,090	-36,6	34,4	19,4
				1993/1998	2,198	27,9	69,3	39,2

V.8 Conclusion

L'analyse des variations hydroclimatologiques sur neuf stations hydrométriques a permis de mettre en lumière des fluctuations significatives des débits moyens interannuels, illustrant l'abondance et l'irrégularité des cours d'eau dans la région. Les données collectées sur une période de 25 à 36 ans révèlent une variabilité marquée, avec des stations comme Pierre du Chat enregistrant des extrêmes allant d'un débit maximum de 10,95 m³/s en 2013 à un minimum de 0,106 m³/s en 2007. D'autres stations, telles que Sidi Belkheir, Béni Bahdel et Benskrane, présentent également des fluctuations notables des débits.

L'analyse des débits moyens mensuels montre des régimes hydrologiques très irréguliers, avec des pics de débit au printemps, principalement en mars, dus à la fonte des neiges, et des creux en été, particulièrement en juillet et août. Les stations de Tafna Village et Hennaya affichent les débits les plus faibles, tandis que Pierre du Chat se distingue par des débits élevés, soulignant les différences géographiques et climatiques au sein des sous-bassins. Cette irrégularité et les périodes d'étiage prolongées ont des implications significatives pour la gestion des ressources en eau.

En approfondissant l'étude des régimes hydrologiques, il a été observé que la majorité des stations suivent un régime pluvial, tandis que Sidi Belkheir et le Pont RN7A présentent un régime mixte, ce qui démontre l'importance des apports pluviaux et de la fonte des neiges dans l'alimentation des cours d'eau. L'analyse des indices centrés réduits révèle des périodes de surplus et de déficit, avec des débits excédentaires entre 1967 et 1980, suivis d'une phase déficitaire de 1981 à 2005, particulièrement marquée à Benskrane, qui a enregistré un déficit de 66,6 % par rapport à la moyenne.

L'analyse des ruptures dans les séries chronologiques des débits moyens annuels, à travers les méthodes de segmentation d'Hubert et de Pettitt, révèle des variations significatives dans le temps, soulignant l'impact des événements climatiques et des changements environnementaux sur les cours d'eau. Les résultats montrent des ruptures notables dans plusieurs stations, avec des baisses et des hausses marquées, notamment à la station de Bani Bahdel, qui présente une forte augmentation de 125,5 % après 2007, et à la station de Benskrane, qui subit des diminutions importantes en 1980.

Les tests de Pettitt ont confirmé des ruptures à Bani Bahdel et Benskrane, mettant en évidence une réduction significative des débits annuels après 1980. Cependant, les autres stations n'ont pas montré de ruptures significatives. L'utilisation de tests complémentaires,

comme ceux de Mann-Kendall et de Spearman, a permis de révéler des tendances variées parmi les stations, avec une tendance négative marquée à Benskrane, tandis que d'autres stations ont affiché des augmentations.

L'analyse de l'impact de ces longues périodes de sécheresse sur les ressources superficielles, comme les barrages, révèle une dynamique complexe des apports en eau, influencée par divers facteurs hydrologiques au fil des décennies. Actuellement, cinq barrages sont en service, parmi lesquels le barrage de Hammam Boughrara se distingue par sa capacité de 117 Hm³, le système de gestion des ressources en eau de la région fait face à des défis significatifs.

Les données collectées montrent des variations importantes dans les apports annuels, illustrant des périodes de hausse et de baisse marquées, en particulier dans les barrages de Béni Bahdel et de Sidi Abdelli. Les résultats des méthodes statistiques, telles que les indices centrés réduits et le test de Pettit, indiquent des changements notables dans le taux de remplissage des barrages au fil du temps, allant d'un excès d'eau dans les périodes humides à des niveaux critiques de remplissage durant les périodes sèches. Ces observations soulignent l'importance d'une gestion proactive et durable des ressources en eau pour garantir l'approvisionnement et la résilience face aux variations climatiques futures.

CONCLUSION GENERALE

L'analyse statistique menée à travers divers tests (Mann-Kendall, Spearman, Sen, Pettitt, Hubert, Buishand, et Lee-Heghinian) révèle une tendance significative à la baisse des précipitations dans la majorité des stations pluviométriques du bassin versant de la Tafna. Les ruptures les plus marquantes se sont produites entre 1974 et 1980, notamment en 1975 et 1980, entraînant une réduction considérable des précipitations annuelles et saisonnières, particulièrement au printemps et en hiver. Les baisses les plus significatives ont été observées à des stations comme Khemis Ould Moussa, Beni Bahdel, et Sabra.

Toutefois, quelques stations ont montré des ruptures positives dans certaines années (par exemple, en 2006 et 1989), mais ces phénomènes restent isolés et ne représentent pas un changement climatique régional. Globalement, l'ampleur des tendances négatives, confirmée par la pente de Sen, montre une dégradation continue des ressources hydriques, avec des réductions pluviométriques importantes et des déficits supérieurs à 30 % dans certaines stations après les ruptures.

L'analyse, basée sur les indices pondérés centrés réduits, distingue deux grandes périodes : une première humide, suivie d'une seconde caractérisée par un déficit pluviométrique important, atteignant jusqu'à 38 % à la station de Khemis Ould Moussa. Une troisième période, débutant en 2008, montre une légère reprise des précipitations. Cependant, la durée limitée de cette période (moins de 6 ans) rend prématurée toute conclusion quant à un véritable retour à des conditions humides. Ainsi, bien que les précipitations hivernales aient contribué à cette reprise, la tendance globale dans le bassin reste marquée par une variabilité importante et un déficit prolongé après les années 1980.

L'analyse des apports annuels dans le bassin versant de la Tafna met en évidence l'impact significatif des longues périodes de sécheresse sur les ressources en eau. Les résultats montrent une diminution marquée des apports et des taux de remplissage des barrages à partir de 1980, suite à une rupture climatique majeure. Par exemple, Béni Bahdel a vu son taux de remplissage baisser de 80,8 % à 29,8 % après 1980, tandis que Sidi-Abdelli a enregistré une chute catastrophique, ne dépassant pas 5,5 % de remplissage dans la deuxième période étudiée.

De manière générale, le bassin versant de la Tafna a subi de longues périodes de sécheresse depuis 1980, ce qui a considérablement affecté les ressources en eau, notamment les barrages, essentiels pour répondre aux besoins hydriques de la région. Face à cette

situation, l'Algérie a adopté diverses stratégies pour améliorer la gestion de l'eau, notamment l'amélioration de l'efficacité de l'irrigation agricole, la mise en œuvre de projets de transfert d'eau entre régions, et l'exploitation de sources d'eau non conventionnelles, comme le dessalement.

Cependant, malgré ces initiatives, des actions supplémentaires sont cruciales pour assurer une gestion durable des ressources en eau. Cela inclut la sensibilisation du public à la préservation de l'eau, l'adoption de technologies durables, et le renforcement des politiques et réglementations en matière de gestion de l'eau. Anticiper la pénurie d'eau en Algérie et élaborer des plans de gestion proactifs sont essentiels pour garantir un approvisionnement en eau suffisant à long terme, face aux défis futurs liés aux changements climatiques et à la croissance démographique.

Amat, J. P., Dorize, L., & Gautier, E. (2008). *Éléments de géographie physique* (2^e éd.). Collection Bréal, Paris. ISBN : 978-2-7495-0205-2, 463 pages.

Arrhenius, S. (1896). On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 41, 237-276.

Assani, A. A. (1999). Variabilité pluviométrique et sécheresse en Afrique de l'Ouest : cas du Burkina Faso. *Cahiers Agricultures*, 8(3), 191-198.

Assani, A. A. (1999). Analyse de la variabilité temporelle des précipitations (1916-1996) à Lumbashi (Congo-Kinshasa) en relation avec certains indicateurs de la circulation atmosphérique (oscillation australe) et océanique (El Niño/La Niña). *Sécheresse* ; 10, 4, 245-252

Bakreti, A., Braud, I., Leblois, E., & Benali, A. (2013). Analyse conjointe des régimes pluviométriques et hydrologiques dans le bassin de la Tafna, Algérie Occidentale. *Hydrological Sciences Journal*, 58(1), 133-151.

Benstaali, I. (2007). Évaluation de la variabilité climatique et de son impact sur les ressources en eau dans le bassin versant de la Tafna (Algérie). *Revue de l'Institut des Régions Arides*, 9(1), 85-92.

Bouanani, A. (2004). Hydrologie, transport solide et modélisation, étude de quelques sous-bassins de la Tafna (NW–Algérie). *Thèse de doctorat. Université Abou-Bakr Belkaid, Tlemcen, Algérie*, 250 pages. Disponible en ligne : <http://dspace.univ-tlemcen.dz/handle/112/15094>.

Bouanani, A. (2004). Variabilité climatique et gestion des ressources en eau en Algérie. *Revue des Sciences de l'Eau*, 17(2), 235-245.

Bois, G. (1972). L'hydrologie des bassins versants méditerranéens. *Annales de l'Aménagement et de l'Eau*, 1, 1-50.

Buishand, T. A. (1982). Some methods for the detection of trends in climatological data. *Journal of Climatology*, 2(2), 149-163. <https://doi.org/10.1002/joc.3370020207>

Buishand, T. A. (1984). A review of the statistical methods for the detection of trends in climatological data. *Climatic Change*, 6(4), 297-308. <https://doi.org/10.1007/BF00139882>

Ceresta, R. (1986). La variabilité climatique en Afrique : conséquences sur les ressources en eau. *Cahiers de l'ORSTOM, Série Hydrologie*, 23(1), 45-60.

- Crutzen, P. J., Molina, M. J., & Rowland, F. S.** (1979). Stratospheric ozone depletion due to man-made gases. *Science*, 204(4381), 1120-1122. <https://doi.org/10.1126/science.204.4381.1120>
- Dagnélie, P.** (1970). *Statistique Théorique et Appliquée*. Bruxelles : Presses Universitaires de Bruxelles.
- Dubreuil, P.** (1974). *Précis de statistique*. Paris : Dunod.
- Eriksen, S. H., & Kelly, P. M.** (2006). Developing a science of climate adaptation. *Climate Policy*, 6(4), 505-526. <https://doi.org/10.1080/14693062.2006.9685632>
- Fourier, J.** (1824). Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires. *Annales de Chimie et de Physique*, 27, 136-167.
- Gardner, R. H.** (1969). Statistical methods for the detection of trends in climatological data. *Journal of Applied Meteorology*, 8(2), 135-139. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1969\)008<0135](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1969)008<0135)
- Hansen, J., et al.** (1981). Climate impact of increasing atmospheric carbon dioxide. *Science*, 213(4511), 957-966. <https://doi.org/10.1126/science.213.4511.957>
- Hansen, J., et al.** (1988). Global climate changes as forecast by Goddard Institute for Space Studies three-dimensional model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 93(D8), 9341-9364. <https://doi.org/10.1029/JD093iD08p09341>
- Hansen, J., et al.** (1987). Radiative forcing and climate response. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 92(D4), 6831-6864. <https://doi.org/10.1029/JD092iD04p06831>
- Hubert, P., Carbonnel, J. P., & Chauuche, A.** (1989). Segmentation des séries hydrométéorologiques—application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, 110, 349-367. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90197-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90197-2).
- Hubert, P., Dabo, K., & Mignot, J.** (1989). Analyse des sécheresses en Afrique de l'Ouest. *Revue de climatologie et de météorologie*, 9, 45-58.
- IRD (1998).** *KhronoStat version 1.0*. Logiciel, IRD, Montpellier. Disponible en ligne : <http://www.hydrosciences.org/spip.php?article239>.
- Keeling, C. D.** (1970). Carbon dioxide and climate: A scientific appraisal. *The Journal of Geophysical Research*, 75(21), 3912-3920. <https://doi.org/10.1029/JC075i021p03912>

- Keeling, C. D., Whorf, T. P., Wahlen, M., & Van der Plicht, J.** (2001). Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. *Nature*, 375(6533), 666-670. <https://doi.org/10.1038/375666a0>
- Kendall, M. G., & Stuart, A.** (1943). *The Advanced Theory of Statistics, Volume 1: Distribution Theory*. London: Charles Griffin & Company.
- Kendall, M. G.** (1975). *Rank Correlation Methods*. London: Charles Griffin & Company.
- Khaldi, A.** (2005). Étude de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau dans le bassin versant du Medjerda en Algérie. *Cahiers de l'Institut National Agronomique de Tunisie*, 21, 33-47.
- Khaldi, A.** (2005). Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien « Monts de Tlemcen-Saida ». *Thèse de doctorat, Université de Mascara, Algérie. Disponible en ligne* : <http://hydrologie.org/THE/KHALDI.pdf>.
- Laborde, J. & Mouhous, A.** (1998). Contribution à l'étude de la variabilité pluviométrique en Algérie. *Hydrological Sciences Journal*, 43(4), 575-585. <https://doi.org/10.1080/02626669809492178>
- Lamarque, P. & Jourdain, S.** (1994). Modélisation des impacts des changements climatiques sur les ressources en eau en Algérie. *Revue des Sciences de l'Eau*, 7(1), 63-79.
- Lebaut, S.** (2000). L'apport de l'analyse et de la modélisation hydrologiques de bassins versants dans la connaissance du fonctionnement d'un aquifère : les grès d'Ardenne-Luxembourg. *Thèse de doctorat, Géographie, Université de Metz*, 305 pages.
- Lee, C. & Heghinian, A.** (1977). Estimating the variance of the ratio of two correlated normal random variables. *Journal of the American Statistical Association*, 72(359), 905-911. <https://doi.org/10.1080/01621459.1977.10480950>
- Lehmann, E. L.** (1975). *Nonparametrics: Statistical Methods Based on Ranks*. San Francisco: Holden-Day.
- Lehmann, E. L., & D'Abrera, H.** (1976). *Nonparametrics: Statistical Methods Based on Ranks*. San Francisco: Holden-Day.

- Lubès-Niel, H., Hubert, P., & Dabo, K.** (1998). Analyse des caractéristiques des sécheresses en Afrique de l'Ouest. *Hydrological Sciences Journal*, 43(4), 525-540. <https://doi.org/10.1080/02626669809492176>
- Lubes, L., Boucher, F., & Meyer, P.** (1994). The impact of climate change on hydrological resources: A case study in the Mediterranean region. *Journal of Hydrology*, 153(1-4), 135-149. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90013-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90013-1)
- Mann, H. B.** (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J.** (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17-22.
- Meddi, H., Meddi, M., & Bentouati, A.** (2010). Impact of climate change on surface water resources in the west of Algeria. *Larhyss Journal*, 8, 15-26.
- Meddi, H., & Hubert, P.** (2009). Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du nord-ouest de l'Algérie. *Sécheresse*, 20(1), 57-65.
- Meddi, H.** (2003). Variabilité des précipitations dans les régions de l'Ouest et du Centre-Ouest Algérien. *Sécheresse*, 14(4), 217-224.
- Nicole, P.** (2010). Prise en compte de la neige dans la prévision hydrologique : quel apport pour mieux prévoir les crues nivales. *Mémoire de Master*, Sciences de l'Univers, Environnement, Écologie, NGREF, Université Pierre et Marie Curie, Cemagref, 53 pages.
- Nicholson, S. E., Some, A., & Agete, A.** (1988). An analysis of recent rainfall conditions in the Sahel. *Journal of Climate*, 1(6), 581-599. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1988\)001<0581](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1988)001<0581)
- Nicholson, S. E., Some, B., & Kone, B.** (2000). *An analysis of recent rainfall conditions in West Africa, including the rainy seasons of the 1997 El Niño and the 1998 La Niña years.* *Journal of Climate*, 13, 2628-2640. DOI : 10.1175/1520-0442(2000)013<2628>2.0.CO;2.
- Pardé, M.** (1933). *Fleuves et rivières*. Collection Armand Colin, Paris, 224 pages, avec 18 graphiques et cartes.
- Pardé, M.** (1955). *Fleuves et rivières* (3^e éd.). Armand Colin, Paris, 223 pages.

Paturol, J. E., Servat, É., Kouamé, B., Boyer, J. F., Lubes, H., & Masson, J. M. (1996). Procédures d'identification de "ruptures" dans des séries chronologiques ; modification du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest non sahélienne. In : *L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement, IAHS Publication n° 238, Mélanges à la mémoire de Jean Rodier*, pp. 99-110.

Servat, É., Paturol, J. E., Lubes-Niel, H., Kouamé, B., Masson, J. M., Travaglio, M., & Marieu, B. (1999). De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne. *Revue des Sciences de l'Eau*, 12(2), 363-387. DOI : 10.7202/705356ar.

Paturol, J. E., Mahe, G., & Kone, B. (2010). Climate change and its impact on hydrology in the West African region. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(4), 689-702. <https://doi.org/10.5194/hess-14-689-2010>

Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 28(2), 126-135. <https://doi.org/10.2307/2986292>

Pouillet, C.-S.-M. (1837). Mémoire sur la chaleur solaire, sur les puissances réfractives des corps, et sur la température de l'espace. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences*, 7, 24-65.

Rmich, A., & Hafoud, N. (2004). *Relation entre les précipitations et les débits au niveau du bassin versant de la Rhéraya de 1962 à 2003*. Mémoire de fin d'études, Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech, pp. 27-33.

Remaoun, A. (2003). Contribution à l'étude de la variabilité pluviométrique dans la région de Tlemcen (Algérie). *Revue de géographie alpine*, 91(1), 51-62.

Remaoun, K. (2003). Le bassin-versant de l'Oued Tafna (Algérie occidentale) : mise en place du réseau hydrographique et processus morphogéniques à l'origine de l'organisation du bassin. In: Collection EDYTEM, *Cahiers de géographie*, numéro 1. *Dynamiques et vulnérabilités des milieux montagnards méditerranéens et alpins. Mélanges offerts au professeur René Lhenaff*, pp. 73-82. <https://doi.org/10.3406/edyte.2003.862>.

Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>

Sébastien, L. (2000). *Hydrologie : processus, analyse et modélisation*. Paris : Dunod.

Sneyers, R. (1990). On the use of a statistical technique for the detection of trends in climatological data. *WMO Technical Note No. 143*. Genève, Suisse: World Meteorological Organization.

Sneyers, R. (1990). On the use of a statistical technique for the detection of trends in climatological data. *WMO Technical Note No. 143*. Genève, Suisse: World Meteorological Organization.

Solomon, S., Anderson, J. G., & Eisele, F. L. (1986). Climate and atmospheric chemistry in the Antarctic. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 91(D2), 2487-2500. <https://doi.org/10.1029/JD091iD02p02487>

Spearman, C. (1904). The proof and measurement of association between two things. *The American Journal of Psychology*, 15(1), 72-101. <https://doi.org/10.2307/1412159>

Svoboda, M., Hayes, M., & Wood, D. (2012). Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé. *Organisation météorologique mondiale*, Genève : OMM-N° 1090.

Talia, A., Bessaoud, F., & Djidel, M. (2011). Quantification de l'érosion hydrique dans le bassin versant de la Tafna (Nord-Ouest Algérien). *Sécheresse*, 22(3), 177-184.

Theil, H. (1950). A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen*, 53, 386-392.

United Nations Environment Programme. (1987). Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. *United Nations*.

WMO & UNEP. (2018). Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018. *Global Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 58*.

World Meteorological Organization (WMO). (1966). *Weather and Climate Modification*. WMO Technical Note No. 99. Genève, Suisse.

Xu, Y. (2001). Climate change and its impact on water resources in arid and semi-arid regions: A case study of the Yellow River basin. *Climate Change*, 50(1-2), 1-17. <https://doi.org/10.1023/A:1010643921370>

CHAPITRE I :

CLIMAT, CHANGEMENTS CLIMATIQUES, DETECTION ET ATTRIBUTION

Figure I.1 Les taches solaires	6
Figure I.2 Variation de la constante solaire et de la température terrestre de 1600 à 2000.	7
Figure I.3 Variations de la température moyenne et de la composition de l'air en dioxyde de carbone et méthane depuis 420000 ans.	9
Figure I.4 La courbe de Keeling montre l'évolution de la concentration la concentration en CO_2 de l'atmosphère mesurée à Mauna Loa (Hawaii) depuis 1957 : <i>La concentration en CO_2 est passée de 315 ppm en 1958 à 399 ppmv en 2014 (+26 %)</i> .	11
Figure I.5 Évolution des gaz à effet de serre à l'état de traces : CO_2 , CH_4 , N_2O , au cours du dernier millénaire. Comparaison avec l'évolution démographique.	12
Figure I.6 Changement de la température de l'air de surface globale et hémisphérique estimé à partir des enregistrements des stations météorologiques. D'après l'article original (Hansen et al., 1987).	18
Figure I.7 La température moyenne annuelle globale de l'air en surface calculée pour les scénarios A, B et C, (Hansen et al., 1988).	19

CHAPITRE II :

COLLECTE ET TRAITEMENT DES SERIES TEMPORELLES

Figure II.1 Situation de la zone d'étude, le relief du bassin versant du Tafna et localisation des stations.	25
Figure II.2 a) Pourcentage de lacunes par année. b) Pourcentage d'observations dans la période de 1970 à 2016.	27
Figure II.3 Période d'observation des stations pluviométriques.	27
Figure II.4 Application de la méthode de simple cumul aux séries pluviométriques annuelles.	32
Figure II.5 Détection des anomalies annuelles de Bani Ouassine par rapport à Sabra	34
Figure II.6 Détection des anomalies annuelles de Hammam Boughrara par rapport à Sabra.	34
Figure II.7 Détection des anomalies annuelles de Khemis Ould Moussa par rapport à Beni Bahdel Bge.	34
Figure II.8 Détection des anomalies annuelles de Lalla Setti par rapport à Chouly.	35
Figure II.9 Détection des anomalies annuelles de Mefrouche Bge par rapport à Chouly.	35
Figure II.10 Détection des anomalies annuelles de Merchiche par rapport à Beni Bahdel Bge.	35
Figure II. 11 Détection des anomalies annuelles de Meurbah par rapport à Chouly.	36
Figure II.12 Détection des anomalies annuelles de Mahdiaontf Ouled Mimoun par rapport à Chouly.	36
Figure II.13 Détection des anomalies annuelles de Pièrre du Chat par rapport à Bensekran.	36
Figure II.14 Détection des anomalies annuelles de Sebdou par rapport à Beni Bahdel Bge.	37
Figure II.15 Détection des anomalies annuelles de Smala Sidi Medjahed par rapport à Sabra.	37

Figure II.16 Détection des anomalies annuelles de Tlemcen par rapport à Sabra.	37
Figure II.17 Ajustement à une loi normale de la série pluviométrique de Beni Bahdel	39
Figure II.18 Ajustement à une loi normale de la série pluviométrique de Chouly	39
Figure II.19 Ajustement à une loi normale de la série pluviométrique de Khemis Ould Moussa	40
Figure II.20 Ajustement à une loi normale de la série pluviométrique de Bensekran	40
Figure II.21 Ajustement à une loi normale de la série pluviométrique de Beni Ouassine	41
Figure II.22 Ajustement à une loi normale de la série pluviométrique de Sebdu	41

CHAPITRE III :

EVOLUTION TEMPORELLE ET SPATIALE DES SERIES PLUVIOMETRIQUES ANNUELLES ET SAISONNIERES

Figure III.1 Répartition saisonnière des pluies sur la période (1970-2016).	51
Figure III.2 Répartition mensuelle des pluies sur la période (1970-2016).	52
Figure III.3 Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies annuelles.	55
Figure III.4 Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'hivers.	57
Figure III.5 Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies de printemps.	58
Figure III.6 Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'automne.	59
Figure III.7 Évolution des totaux annuels et saisonniers de la station de Beni Bahdel Bge (1939-2	60
Figure III.8 Évolution des totaux annuels et saisonniers de la station de Bensekran (1914-2006).	60
Figure III.9 Évolution des totaux annuels et saisonniers de la station de Chouly (1956-2016).	61
Figure III.10 Évolution des totaux annuels et saisonniers de la station de Khemis Ould Moussa (1924-2015).	61
Figure III.11 Évolution des totaux annuels et saisonniers de la station de Meurbah (1940-2016).	62
Figure III.12 Évolution des totaux annuels et saisonniers de la station de Mefrouch Bge (1943-2014)	62
Figure III.13 Périodes déficitaires et excédentaires en fonction de la longitude et latitude du poste de mesure.	64

CHAPITRE IV :

ANALYSE DES TESTS DE RUPTURE DANS LES SERIES DE PLUIE ANNUELLE ET SAISONNIERE

Figure IV.1 « Procédure de Lee Heghinian » Densité de probabilité <i>a posteriori</i> de la position du point de rupture (pluie annuelle).	82
Figure IV.2 Test de Buishand et ellipse de Bois (pluie annuelle).	83
Figure IV.3 Représentation graphique des tests des ruptures saisonnières et annuelles	90

CHAPITRE V:

ÉVOLUTION DU REGIME HYDROLOGIQUE ET DETECTION DE RUPTURE

Figure V.1 Pourcentage des lacunes en fonction de la période d'étude.	94
Figure V.2 Période de fonctionnement des stations hydrométriques	95
Figure V.3 Variations des débits moyens annuels.	101
Figure V.4 Évolution du coefficient d'hydraulicité.	101
Figure V.5 Diagramme de probabilité à quatre facteurs contrôlés pour Pont RN7A.	104
Figure V.6 Diagramme de probabilité à quatre facteurs contrôlés pour Béni Bahdel	105
Figure V.7 Diagramme de probabilité à quatre facteurs contrôlés pour Tafna Village.	105
Figure V.8 Diagramme de probabilité à quatre facteurs contrôlés pour Sidi Belkhei.	106
Figure V.9 Diagramme de probabilité à quatre facteurs contrôlés pour Hennaya.	106
Figure V.10 Diagramme de probabilité à quatre facteurs contrôlés pour Sidi Aissa.	107
Figure V.11 Diagramme de probabilité à quatre facteurs contrôlés pour Benskrane.	107
Figure V.12 Diagramme de probabilité à quatre facteurs contrôlés pour Aïn Youcef.	108
Figure V.13 Diagramme de probabilité à quatre facteurs contrôlés pour Pierre du chat.	108
Figure V.14 Carte des régimes hydrologiques le long du réseau hydrographique.	119
Figure V.15 Variation des débits moyens mensuels.	120
Figure V.16 Variation mensuelle du coefficient mensuel des débits (CMD).	120
Figure V.17 Variations des débits mensuels des stations hydrométriques.	124
Figure V.18 Évolution de l'écoulement avec les indices centrés réduits des débits moyens annuels (A) et des valeurs pondérées centrées et réduites des débits moyens annuels (B).	126
Figure V.19 Chroniques des débits moyens annuels. La ligne droite pointillée représente la tendance linéaire ajustée.	128

CHAPITRE II :

COLLECTE ET TRAITEMENT DES SERIES TEMPORELLES

Tableau II.1 Liste de stations pluviométriques retenues.	24
Tableau II.2 Détection des anomalies annuelles des stations par la méthode de Bois.	33
Tableau II. 3 Test de la normalité des différentes stations pluviométriques annuelles.	44

CHAPITRE III :

EVOLUTION TEMPORELLE ET SPATIALE DES SERIES PLUVIOMETRIQUES ANNUELLES ET SAISONNIERES

Tableau III.1 Classification de la sécheresse en rapport avec la valeur de l'indice standardisé des précipitations (SPI).	48
Tableau III.2 Statistiques descriptives des séries d'observations à l'échelle annuelle.	53

CHAPITRE IV :

ANALYSE DES TESTS DE RUPTURE DANS LES SERIES DE PLUIE ANNUELLE ET SAISONNIERE

Tableau IV.1 Risque d'erreur des tests d'hypothèses	67
Tableau IV.2 Résultats du test de corrélation sur le rang.	76
Tableau IV.3 Résultats du test de Mann-Kendall, du test de Spearman et de la pente de Sen appliqués sur les totaux pluviométriques annuels.	78
Tableau IV.4 Résultats de segmentation d'Hubert et test Pettitt appliqués aux séries pluviométriques annuelles.	80
Tableau IV.5 Résultats du test de Lee et Heghinian appliqués aux séries pluviométriques annuelles.	81
Tableau IV.6 Résultats du test de Mann-Kendall, du test de Spearman et de la pente de Sen appliqués aux pluies d'automne.	86
Tableau IV.7 Résultats du test de Mann-Kendall, du test de Spearman et de la pente de Sen appliqués aux pluies d'hiver.	87
Tableau IV.8 Résultats du test de Mann-Kendall, du test de Spearman et de la pente de Sen appliqués aux pluies de printemps.	88

CHAPITRE V:

ÉVOLUTION DU REGIME HYDROLOGIQUE ET DETECTION DE RUPTURE

Tableau V.1 Liste de stations hydrométriques retenues.	95
Tableau V.2 Statistiques descriptives des séries hydrométriques à l'échelle annuelle.	99
Tableau V.3 Statistiques descriptives des séries hydrométriques à l'échelle annuelle (1985-2005).	103
Tableau V.4 Les débits moyens annuels fréquentiels en (m ³ /s).	109
Tableau V.5 Bilans moyens interannuels de l'écoulement aux différentes stations, débits	112

spécifiques et lames d'eau écoulées.

Tableau V.6 Statistiques descriptives des séries hydrométriques à l'échelle mensuelle.	115
Tableau V.7 Paramètre de la tendance linéaire.	127
Tableau V.8 Résultats de tests de Pettitt et segmentation d'Hubert.	131
Tableau V.9 Résultats de tests de Buishand et la méthode bayésienne de Lee et Heghinian.	132
Tableau V.10 Résultats du test de Mann-Kendall, du test de Spearman et de la pente de Sen appliqués sur les débits moyens annuels.	133
Tableau V.11 Potentialités en eau de surface dans le bassin versant de la Tafna.	137
Tableau V.12 Résultats du test de Pettitt appliqués sur les débits annuels.	137
Tableau V.13 Résultats de la méthode des indices centrés réduits des débits et des apports annuels	138

Tableau A1. Liste de toutes les stations pluviométriques du bassin versant du Tafna.

Nb	Station	Nombre d'observation	%
1	Maghnia	31	66,0
2	Beni Ouassine	41	87,2
3	Beni Boussaid	11	23,4
4	Sebdou	45	95,7
5	Beni Bahdel Bge	47	100
6	Khemis Ould	43	91,5
7	Smala Sidi	46	97,9
8	Merchiche	45	95,7
9	Hammam	45	95,7
10	Sabra	46	97,9
11	M'lilia Hennaya	26	55,3
12	Zaouia Ben Amar	20	42,6
13	Djebel Chouachi	20	42,6
14	Chouly	46	97,9
15	Meurbah	42	89,4
16	Ouled Mimoun	33	70,2
17	Sidi Gourari	24	51,1
18	Sidi Herriz	24	51,1
19	Sidi Bounakhla	24	51,1
20	Izdihar Bge	17	36,2
21	Mefrouch Bge	44	93,6
22	Bensekran	35	74,5
23	Lalla Setti	42	89,4
24	Tlemcen	43	91,5
25	Pierre du Chat	45	95,7

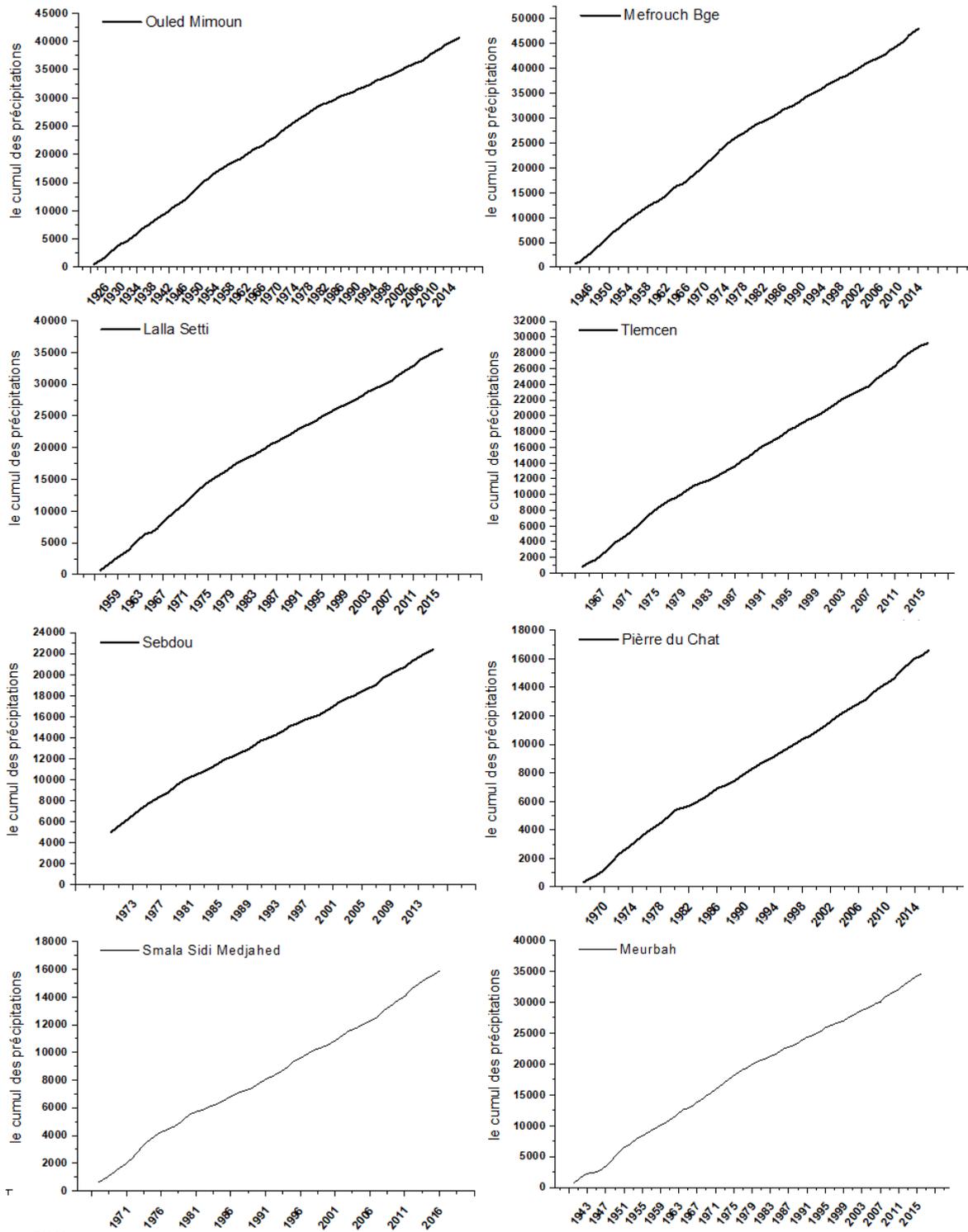


Figure A1. Application de la méthode de simple cumul aux séries pluviométriques annuelles.

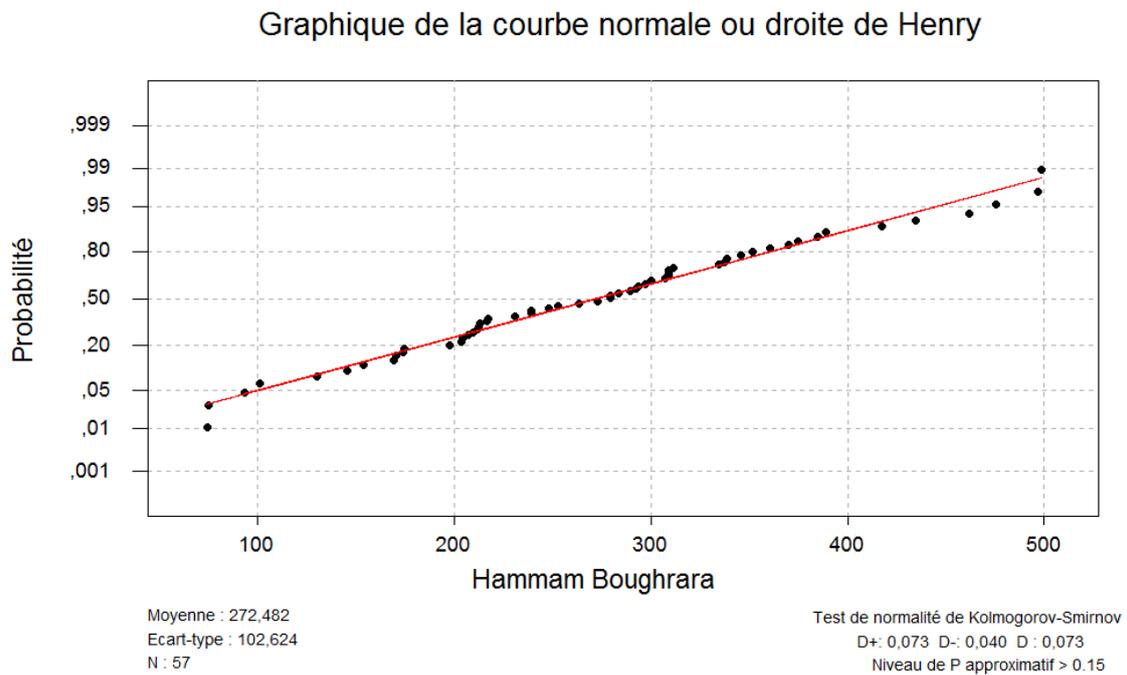


Figure A2. Ajustement à une loi normale de la série pluviométrique de Hammam Boughrara
(Droite de Henry)

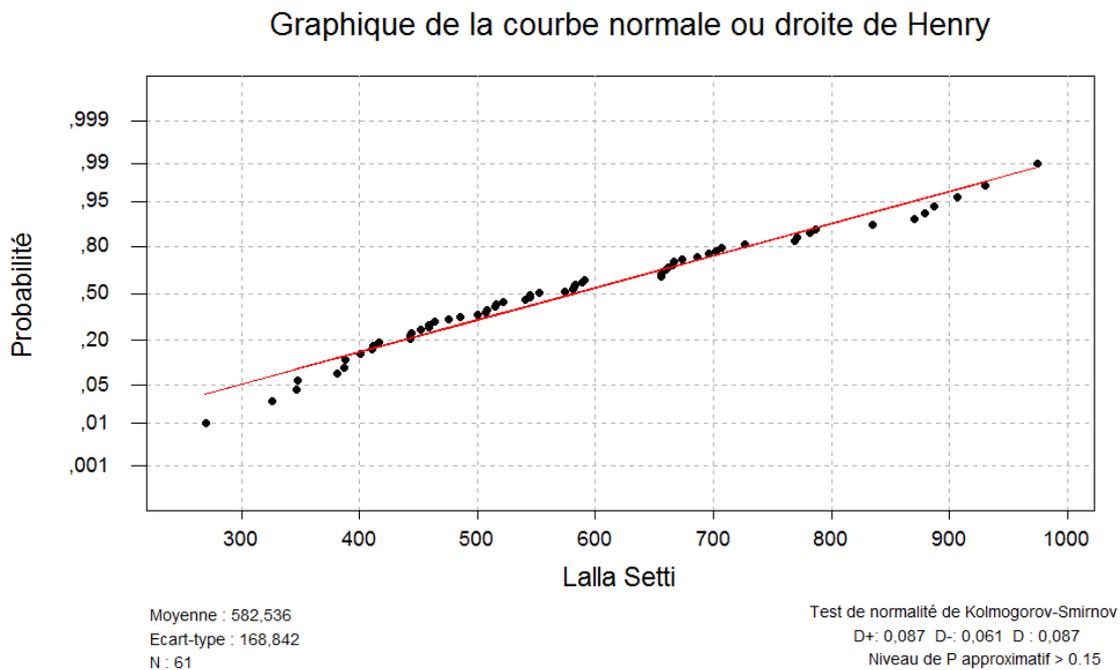


Figure A3. Ajustement à une loi normale de la série pluviométrique de Lalla Setti
(Droite de Henry)

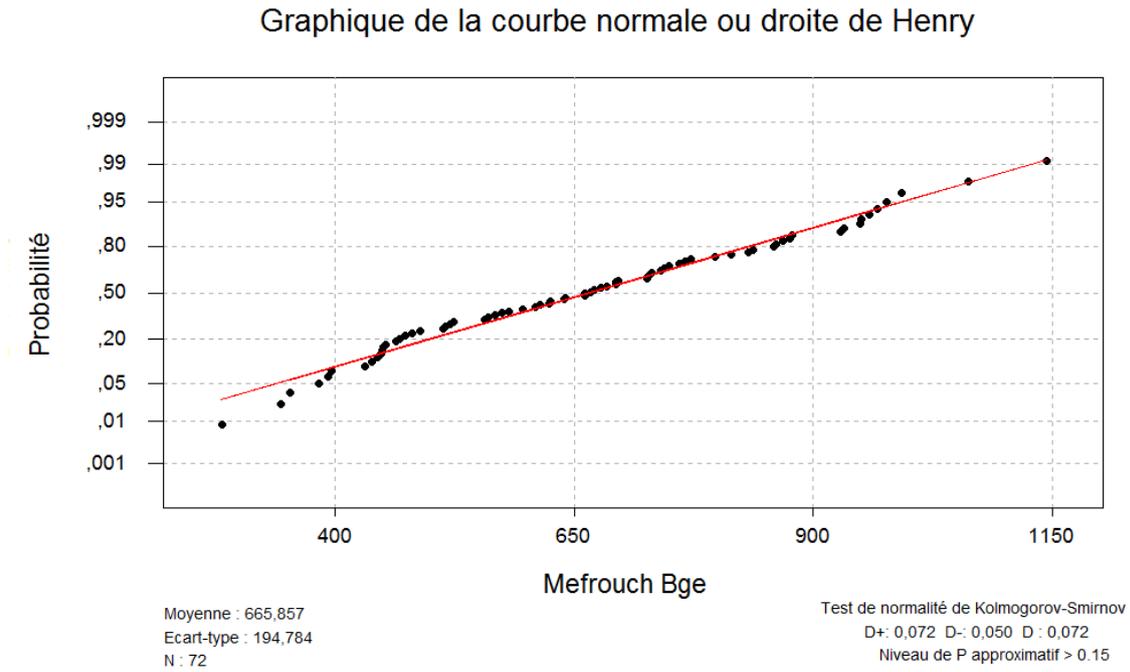


Figure A4. Ajustement à une loi normale de la série pluviométrique de Mefrouch Bge
(Droite de Henry)

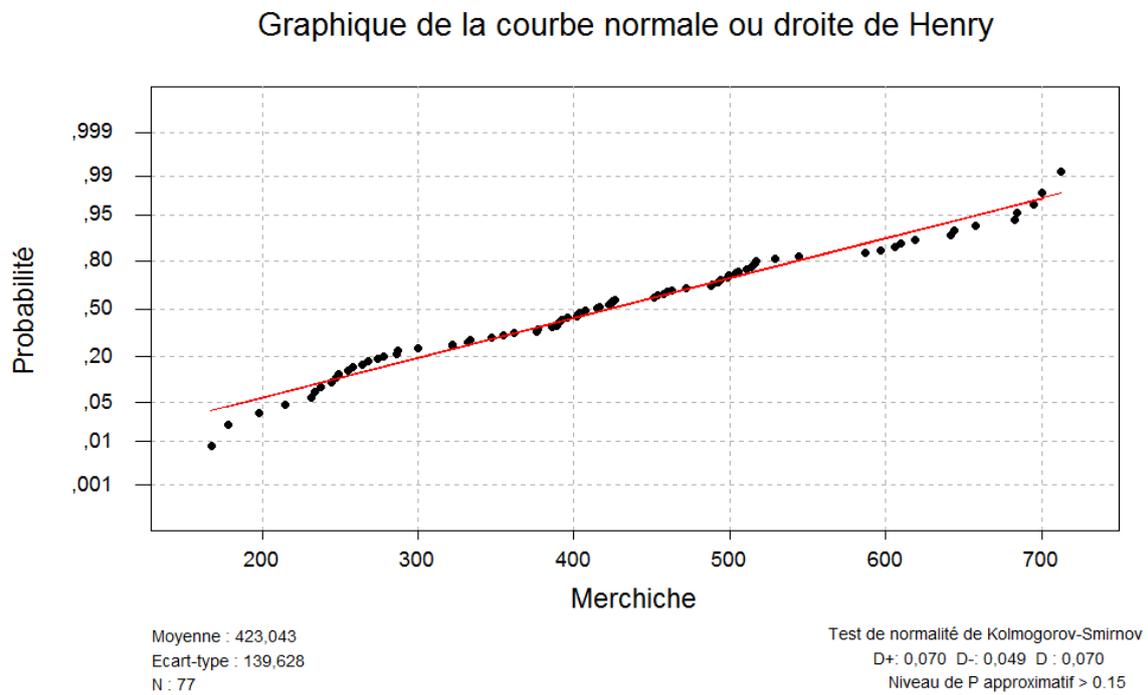


Figure A5. Ajustement à une loi normale de la série pluviométrique de Merchiche
(Droite de Henry)

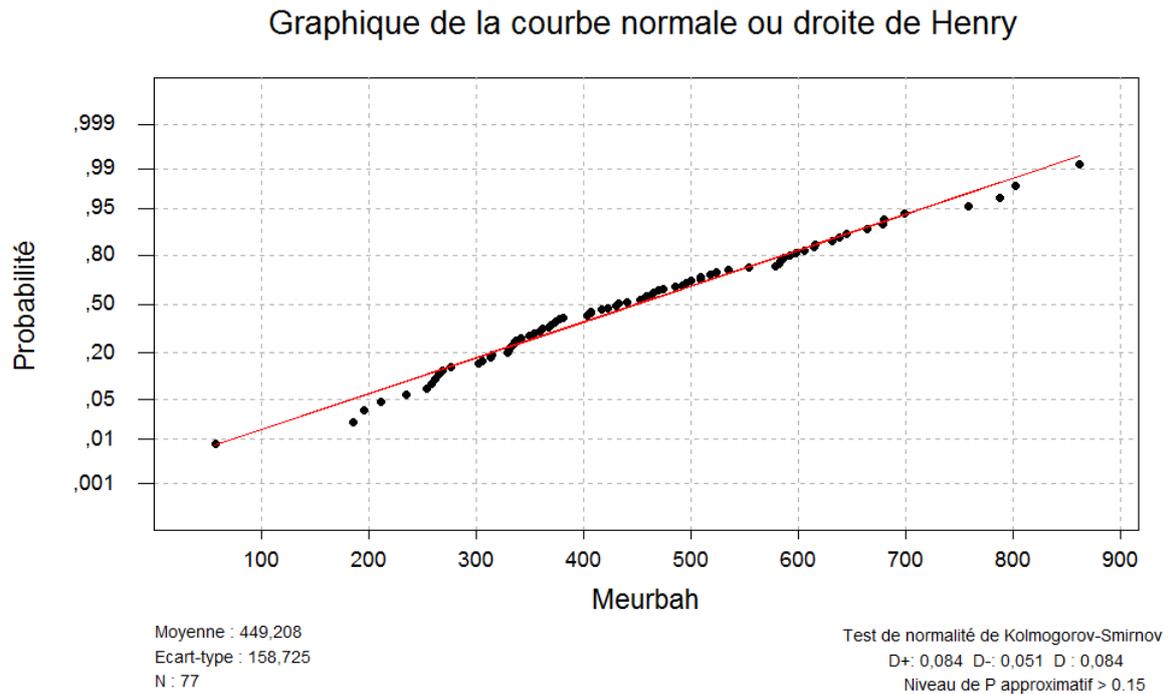


Figure A6. Ajustement à une loi normale de la série pluviométrique de Meurbah
(Droite de Henry)

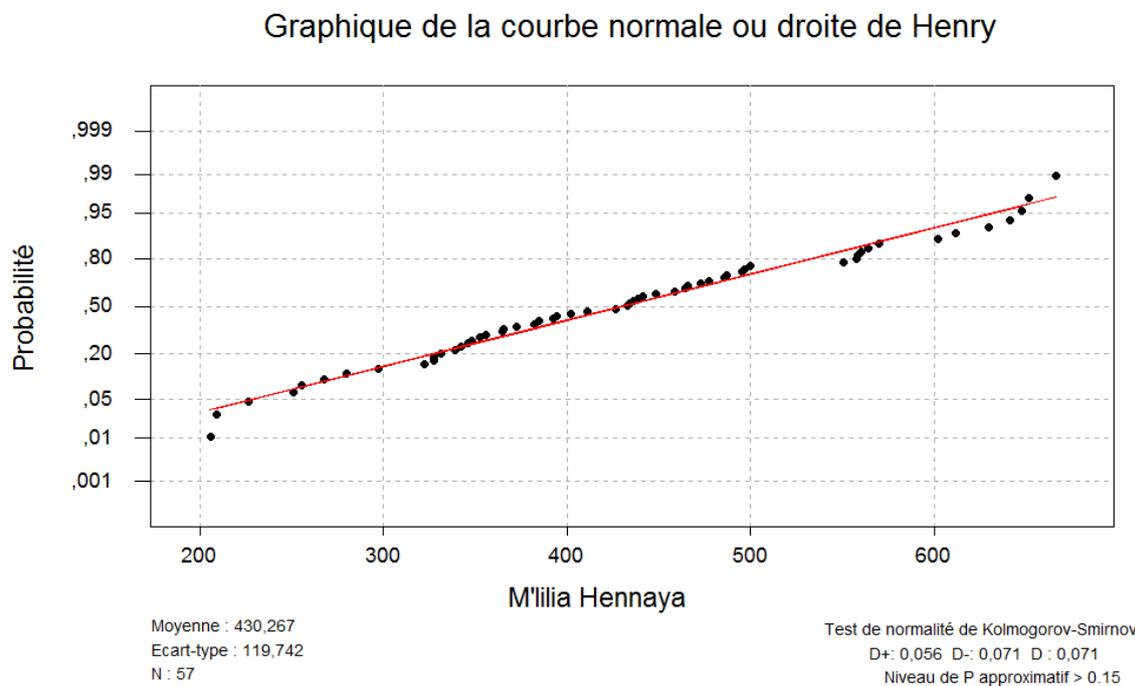


Figure A7. Ajustement à une loi normale de la série pluviométrique de M'lilia Hennaya
(Droite de Henry)

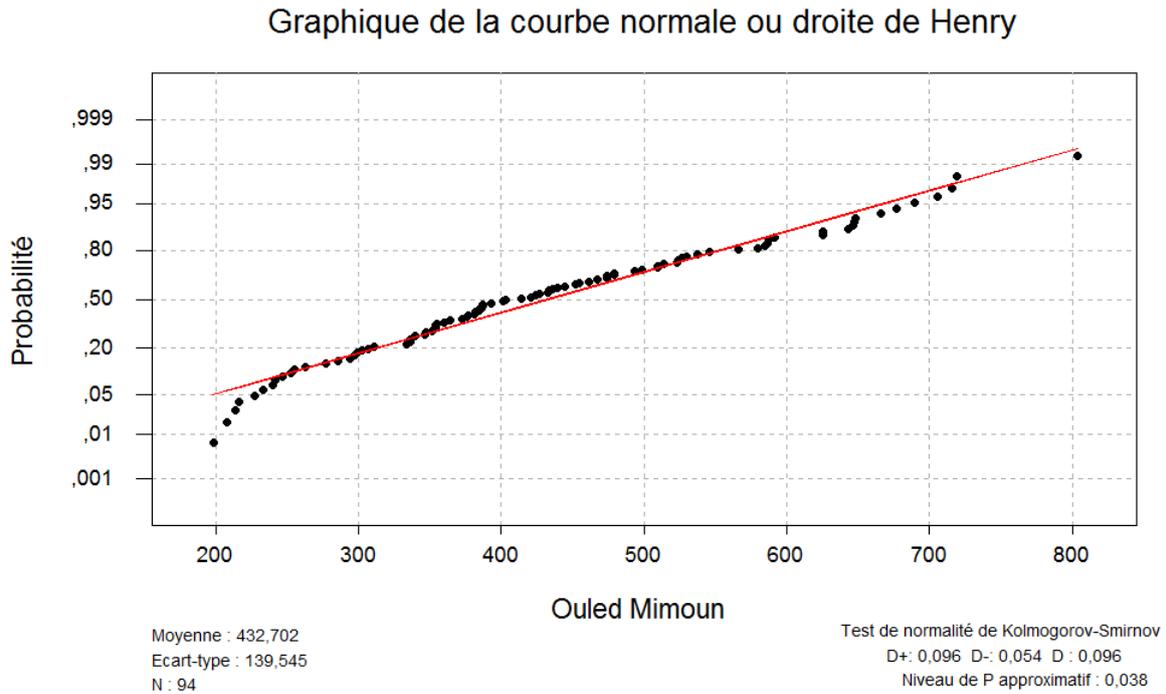


Figure A8. Ajustement à une loi normale de la série pluviométrique d'Ouled Mimoun
(Droite de Henry)

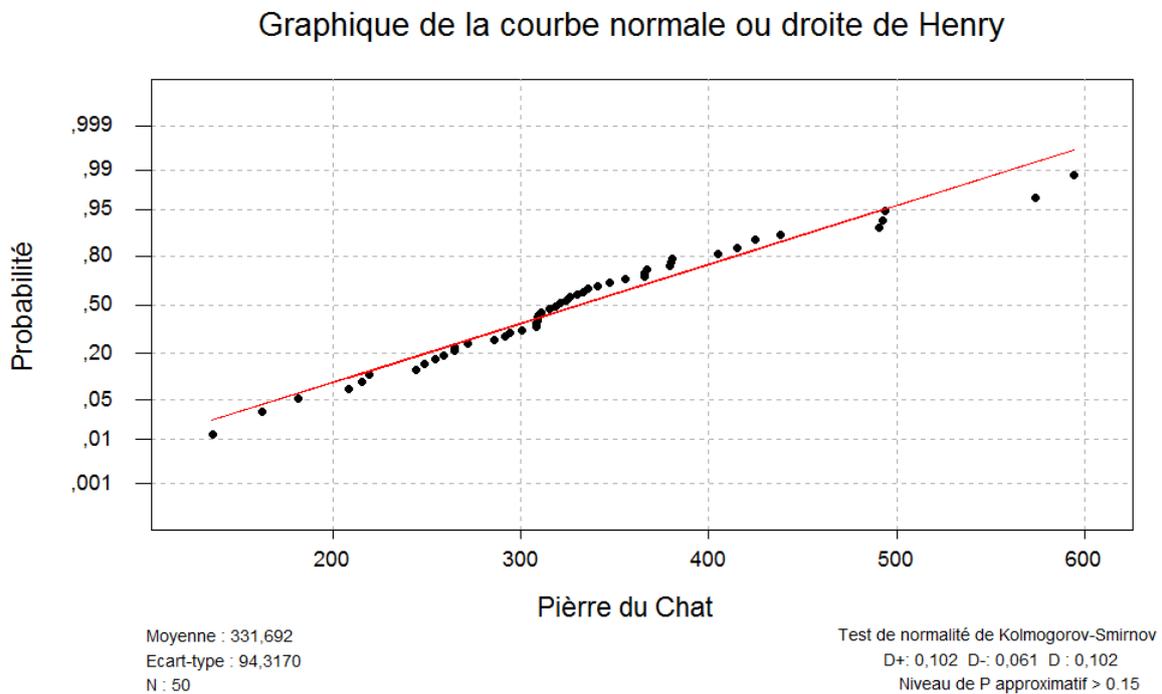


Figure A9. Ajustement à une loi normale de la série pluviométrique de Pierre du Chat
(Droite de Henry)

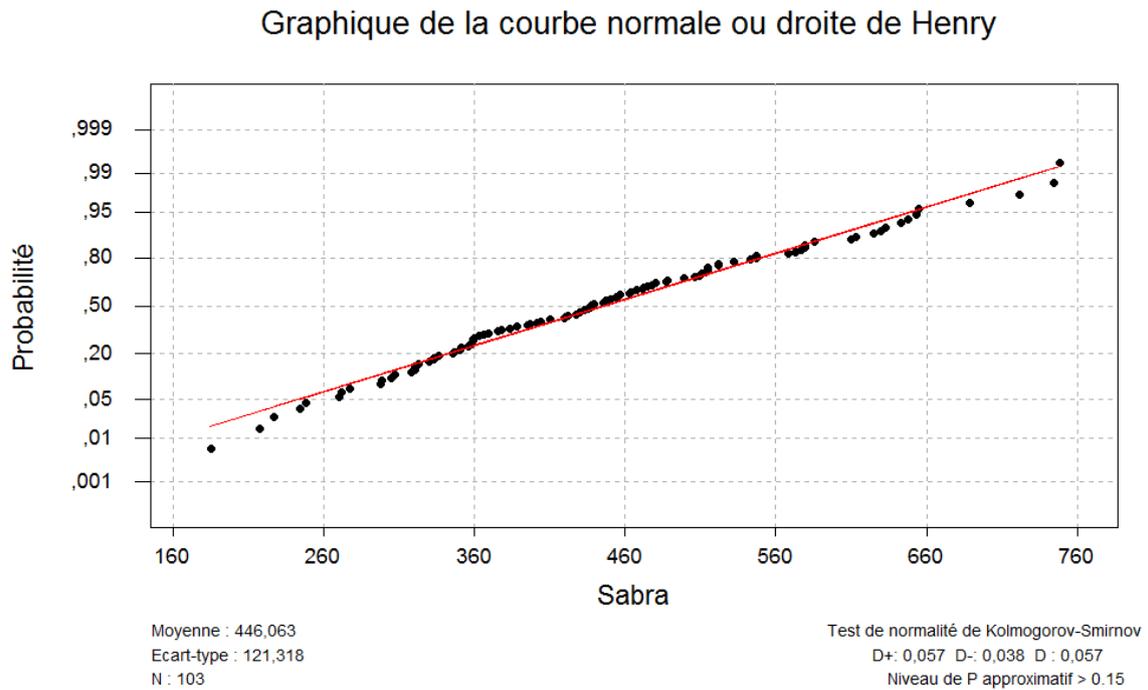


Figure A10. Ajustement à une loi normale de la série pluviométrique de Sabra
(Droite de Henry)

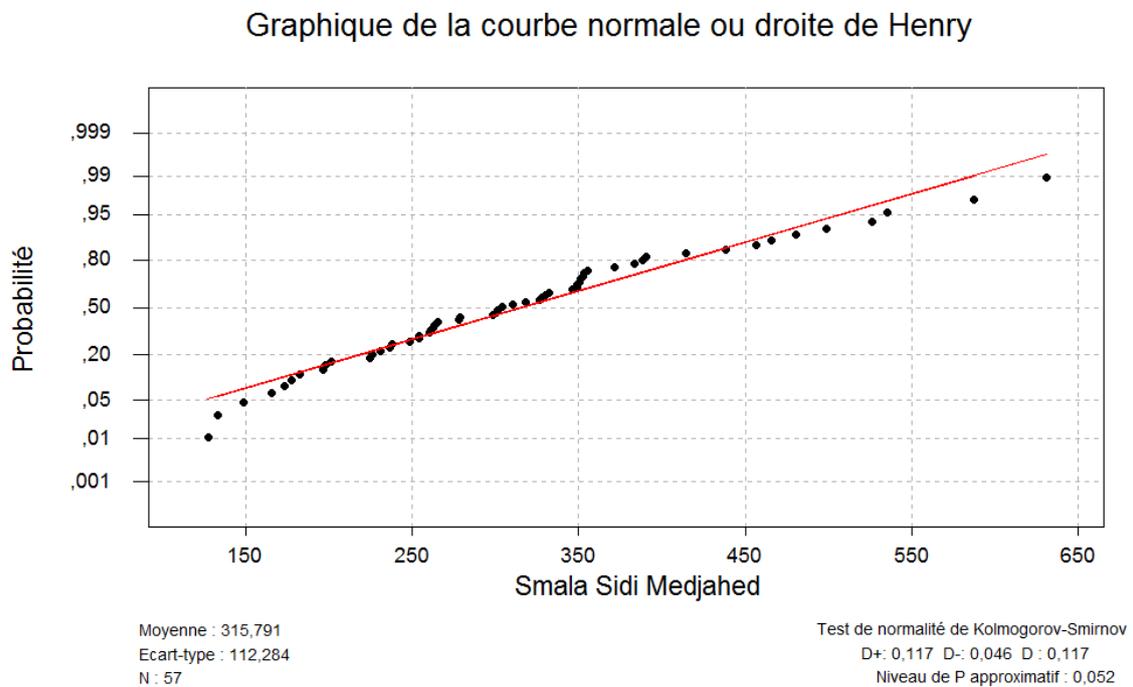


Figure A11. Ajustement à une loi normale de la série pluviométrique de Beni Bahdel
(Droite de Henry)

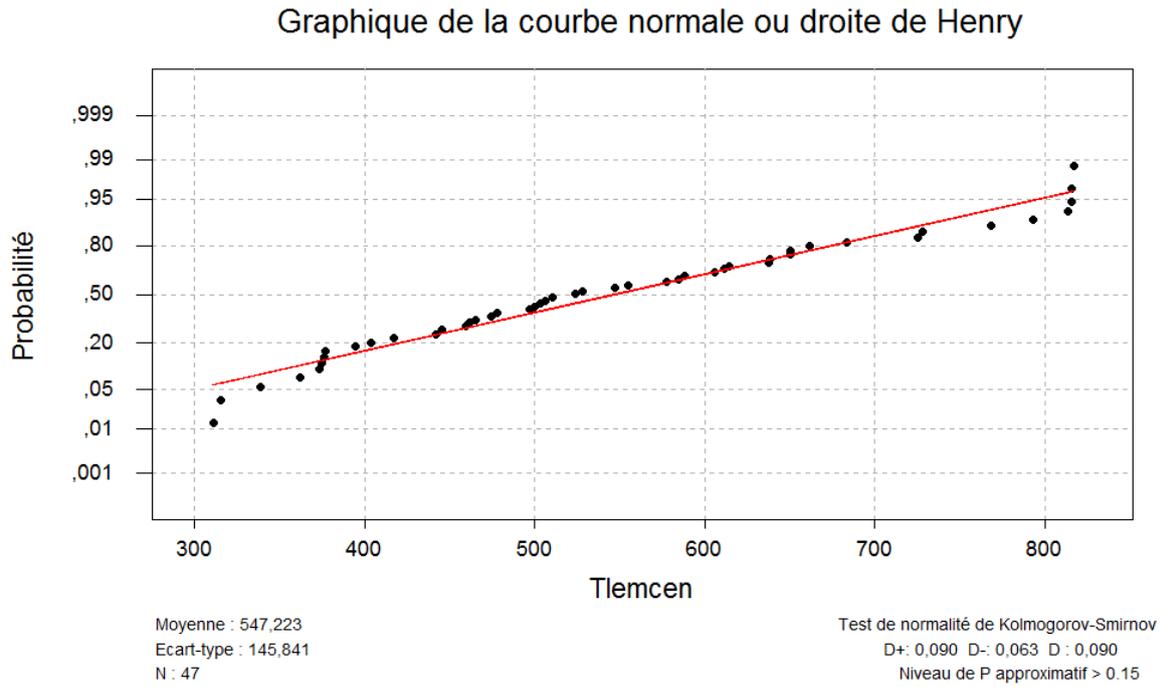


Figure A12. Ajustement à une loi normale de la série pluviométrique de Beni Bahdel
(Droite de Henry)

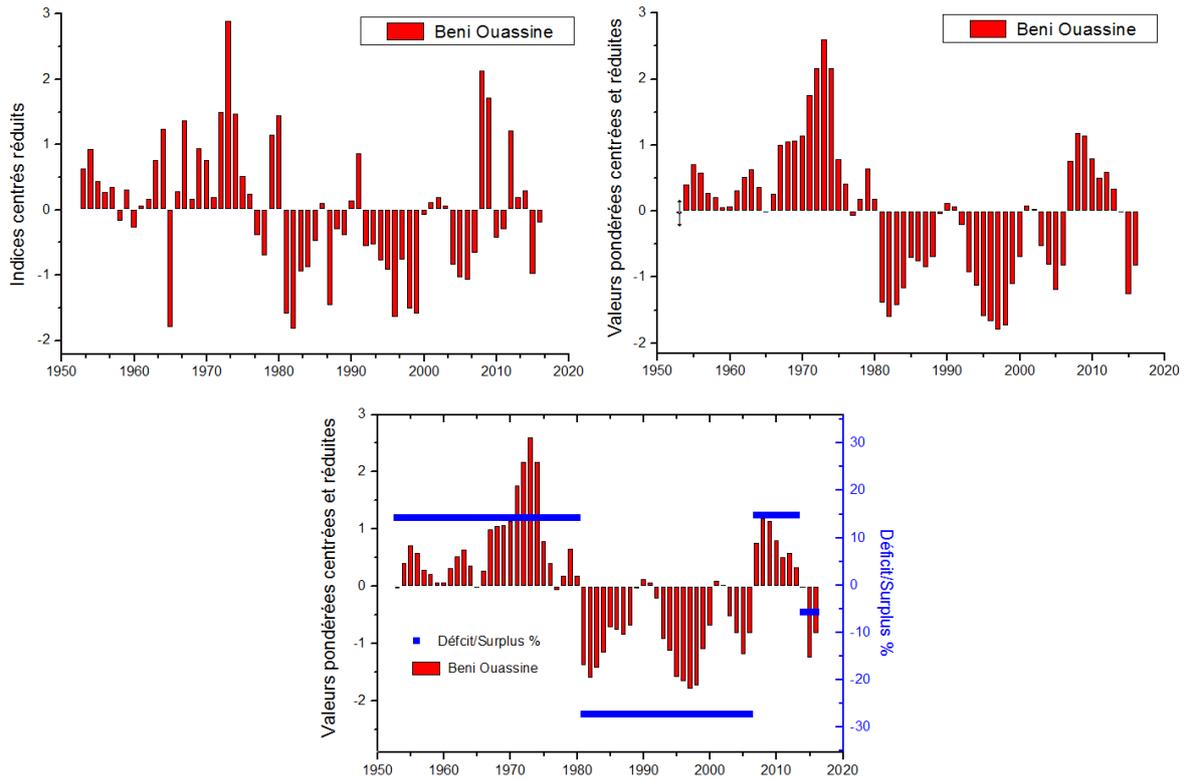


Figure B1. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies annuelles.

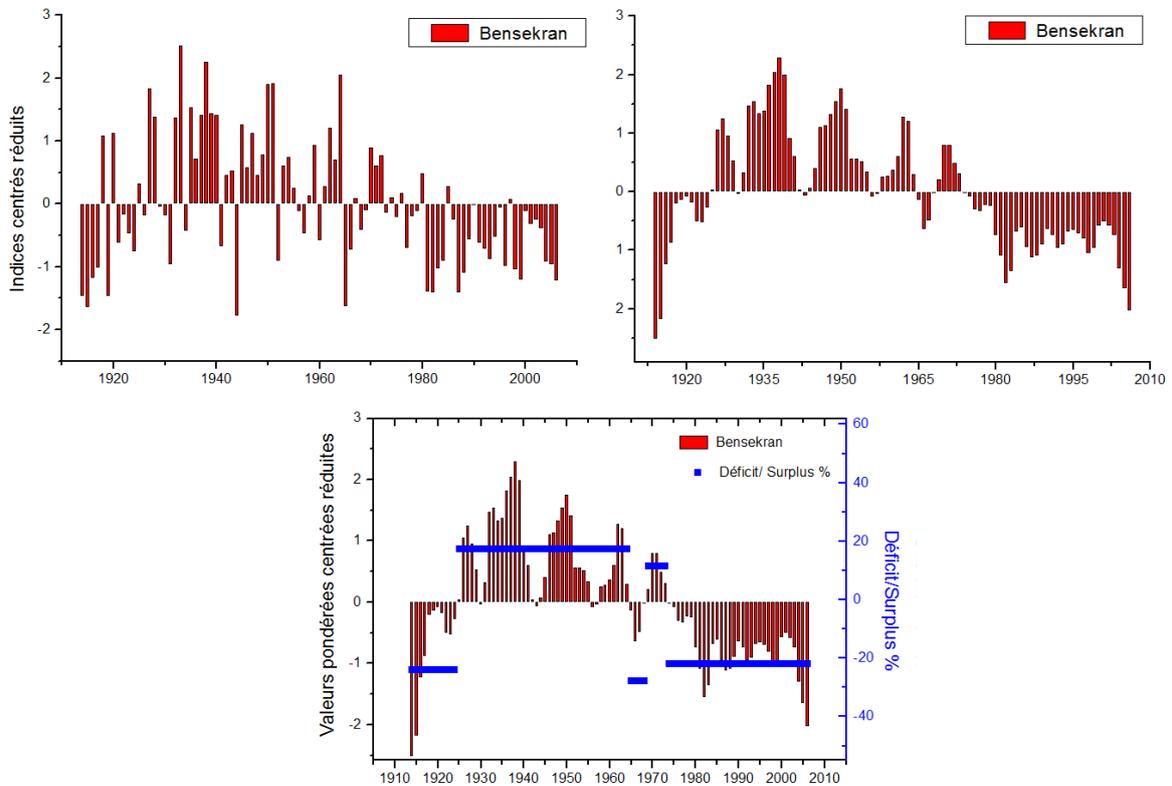


Figure B2. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies annuelles.

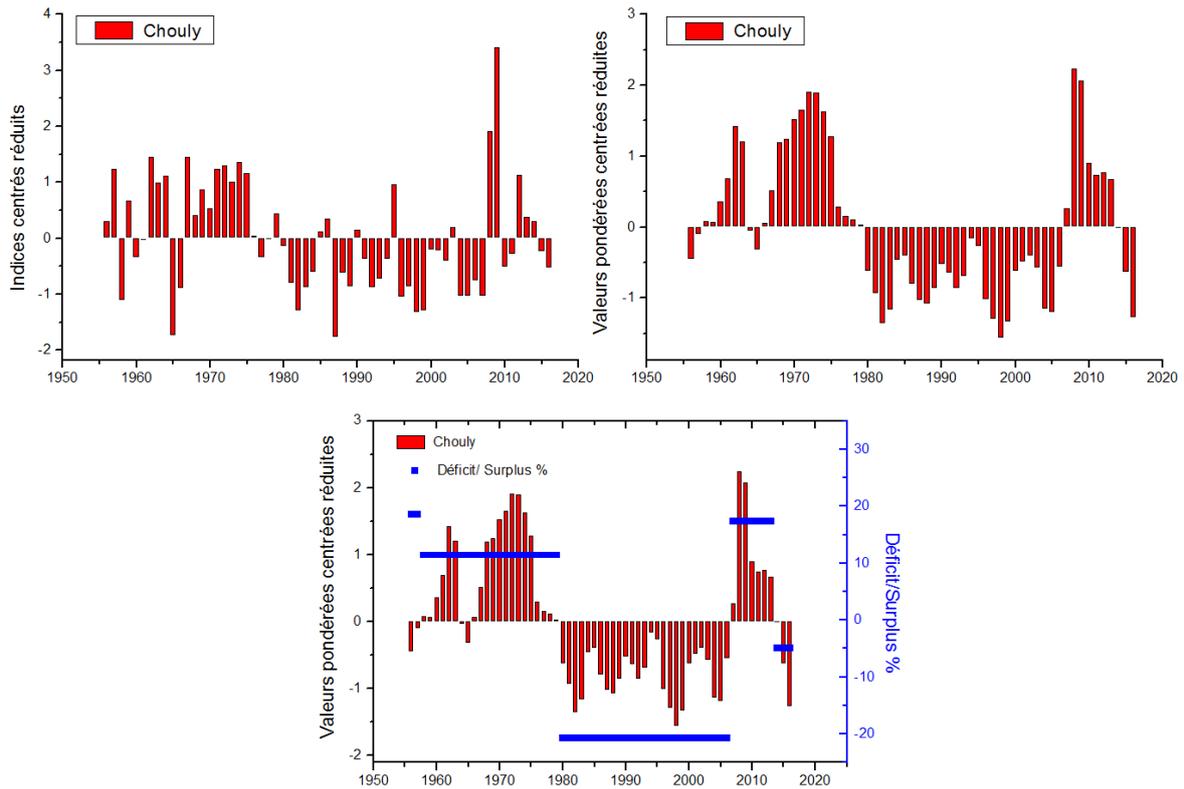


Figure B3. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies annuelles.

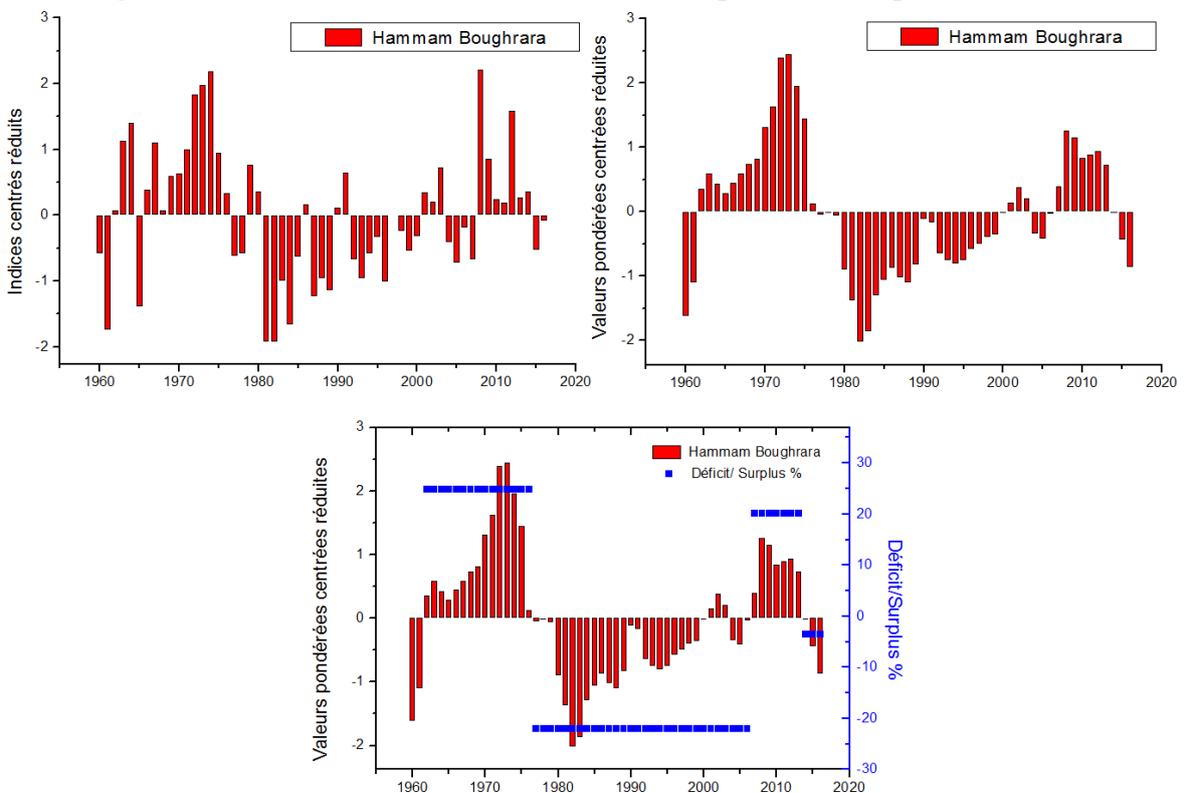


Figure B4. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies annuelles.

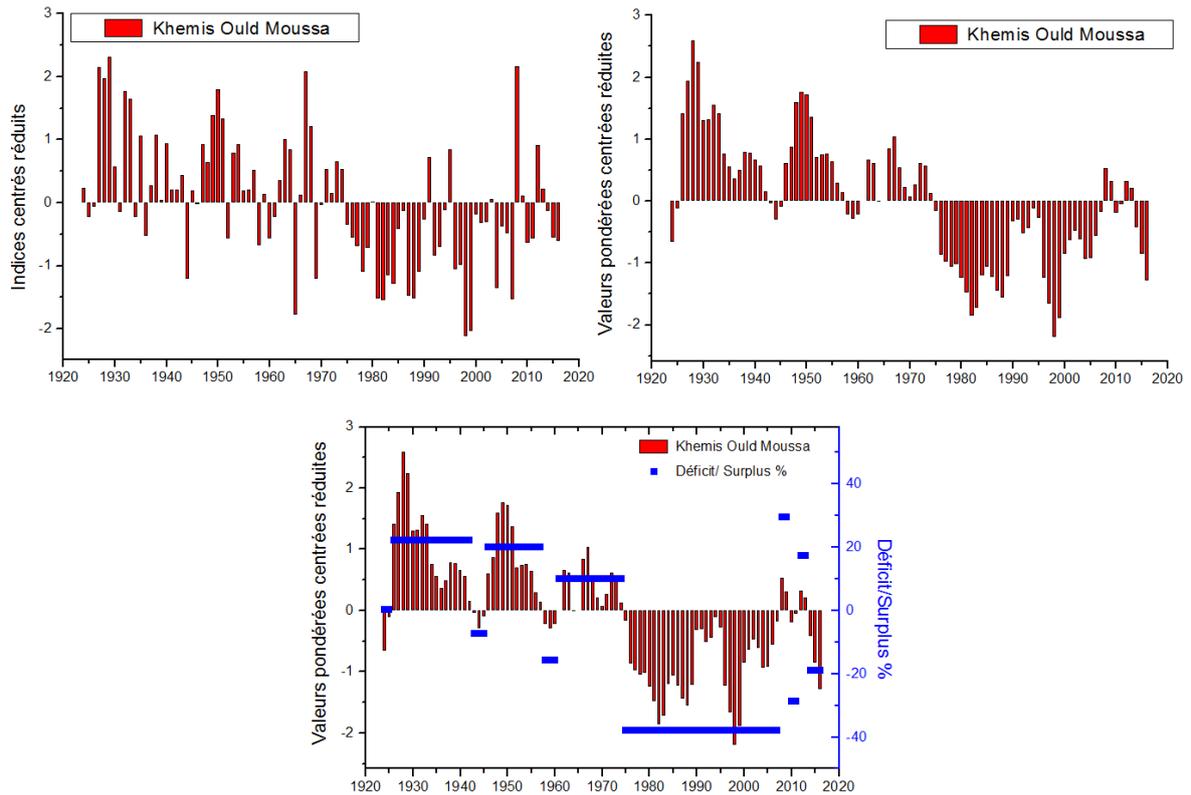


Figure B5. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies annuelles.

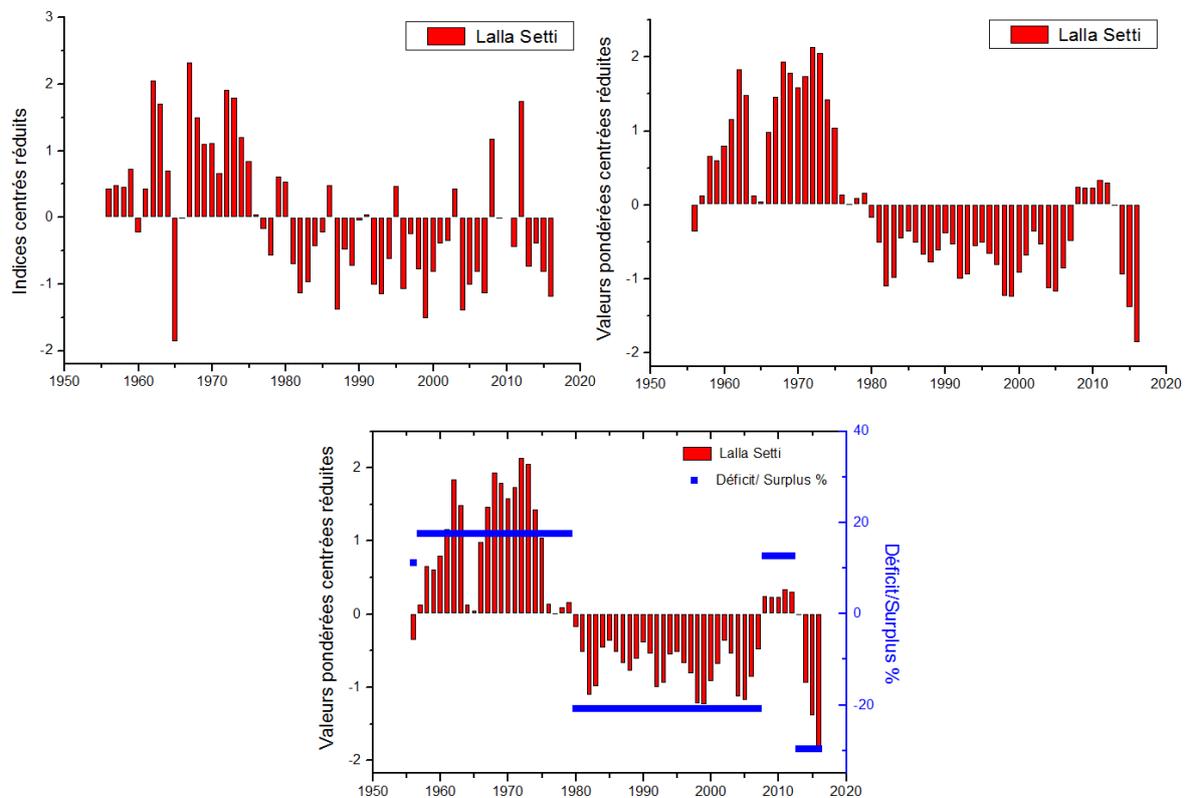


Figure B6. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies annuelles.

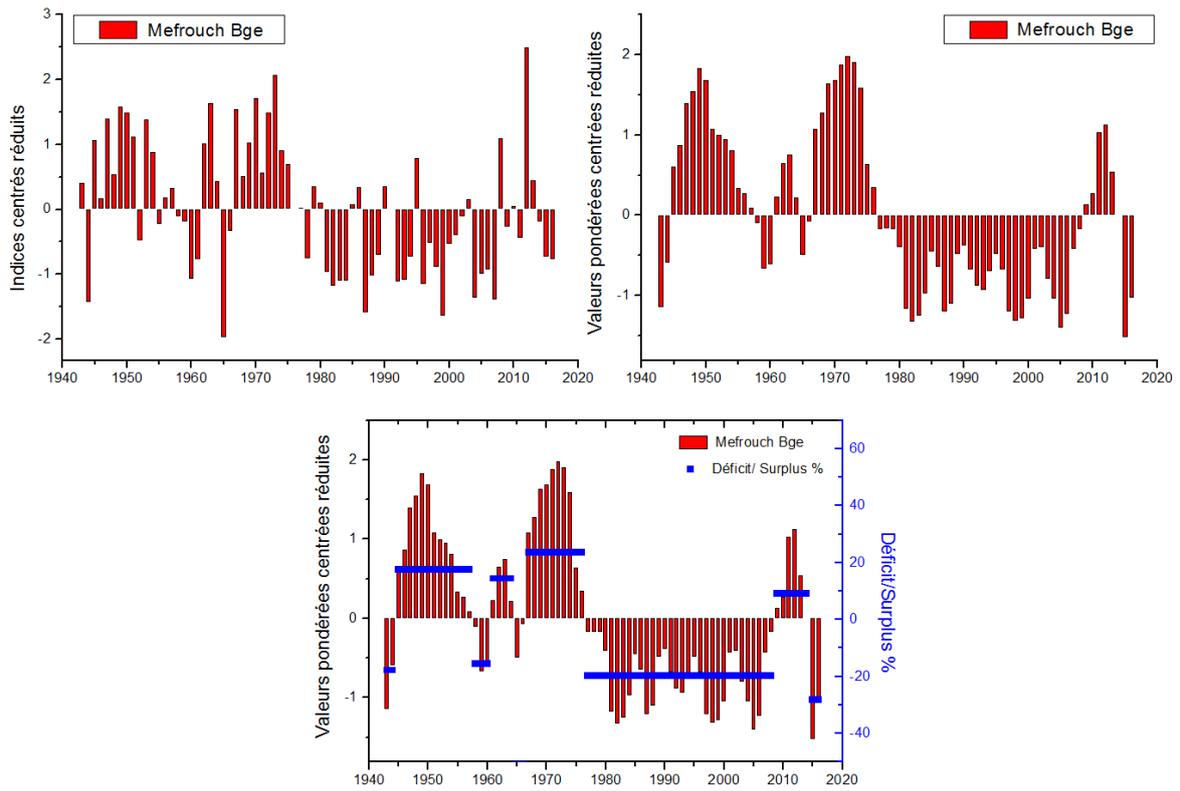


Figure B7. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies annuelles.

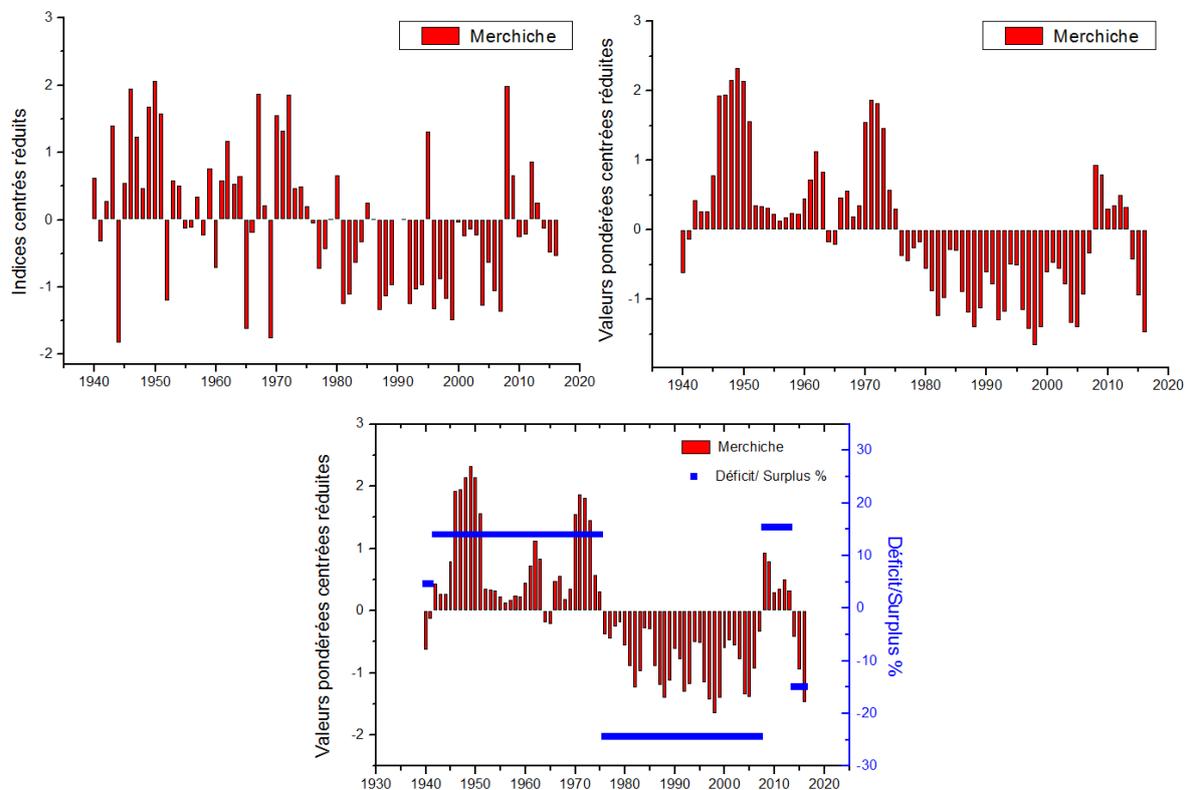


Figure B8. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies annuelles.

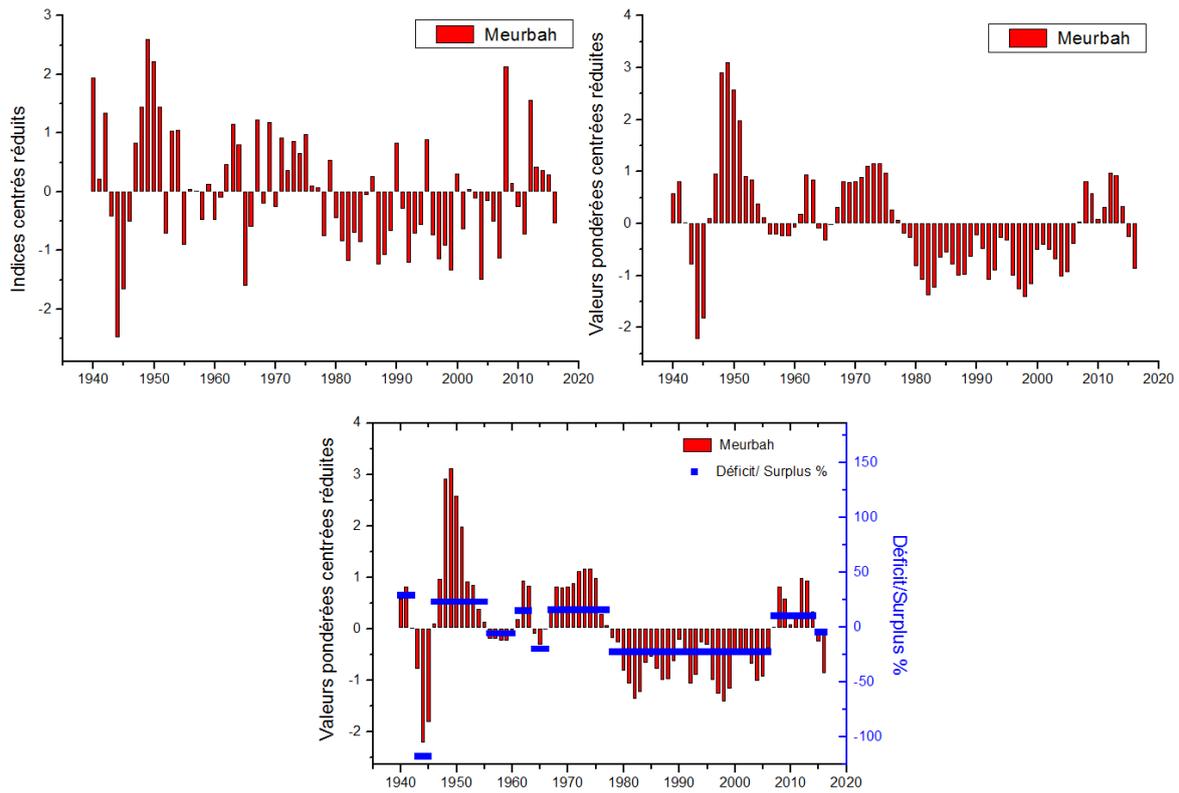


Figure B9. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies annuelles.

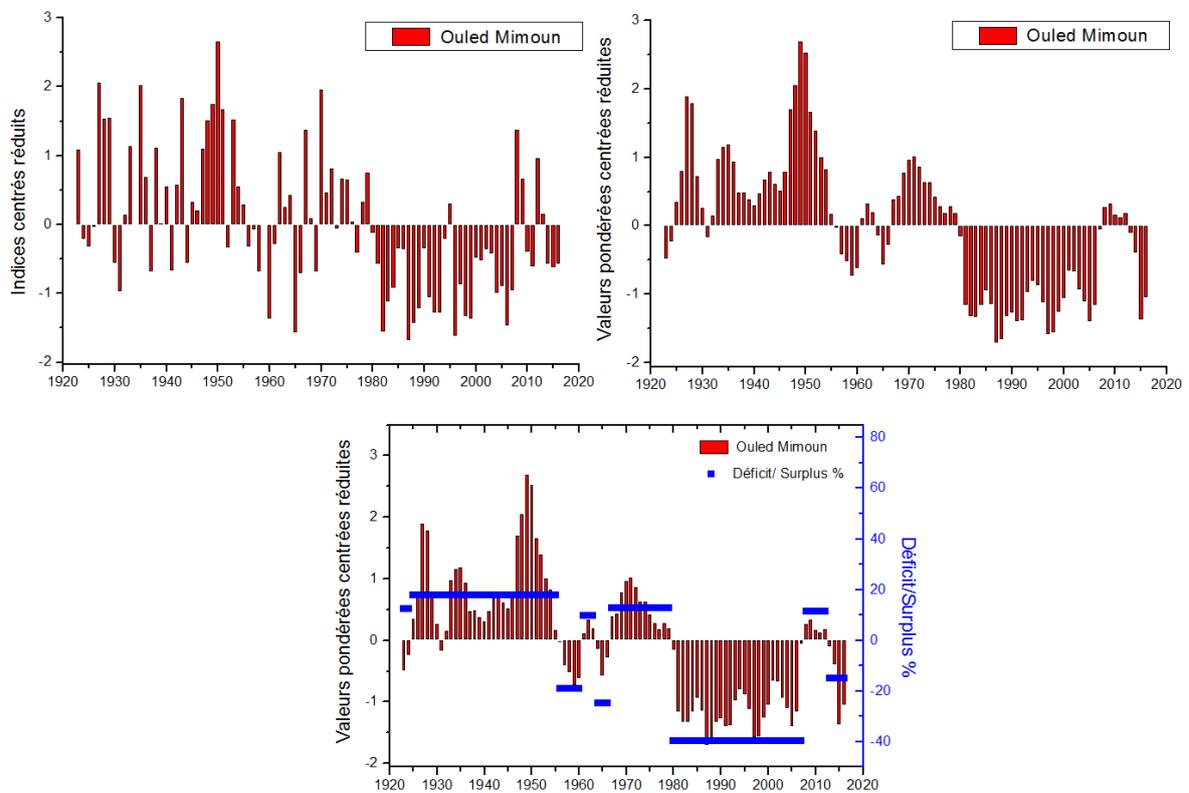


Figure B10. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies annuelles.

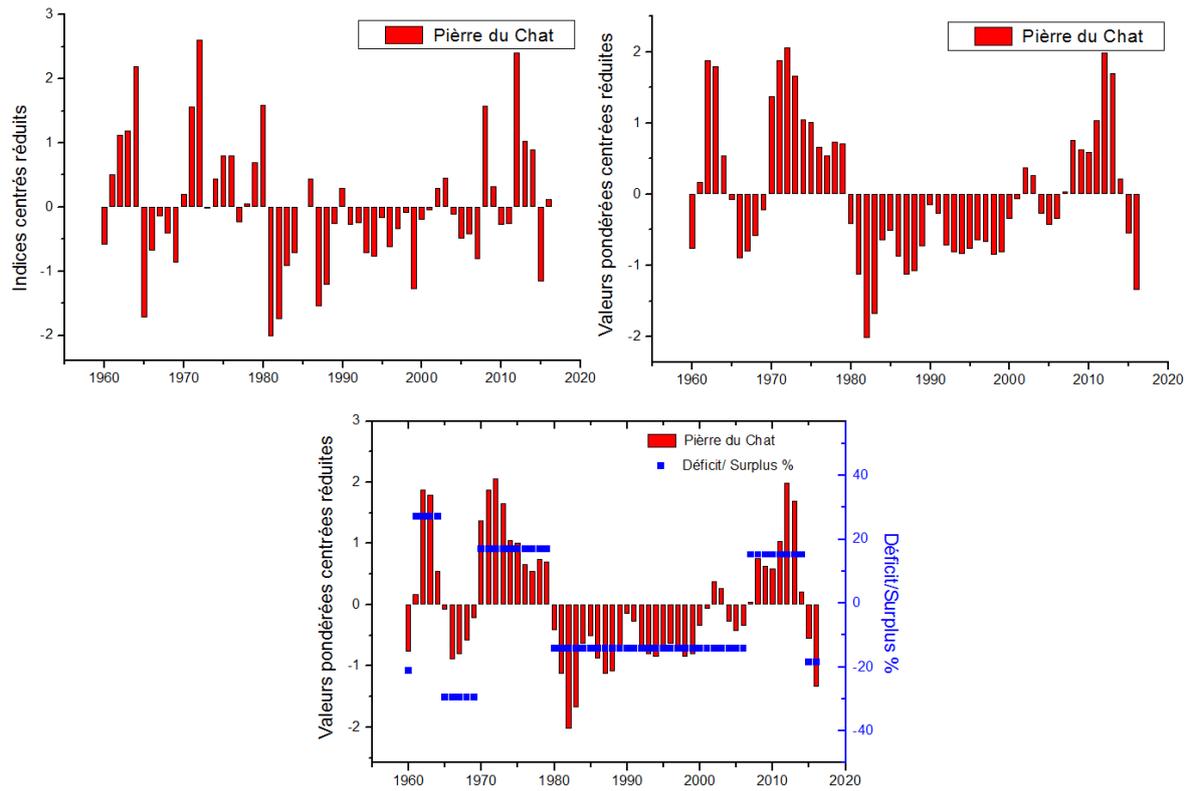


Figure B11. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies annuelles.

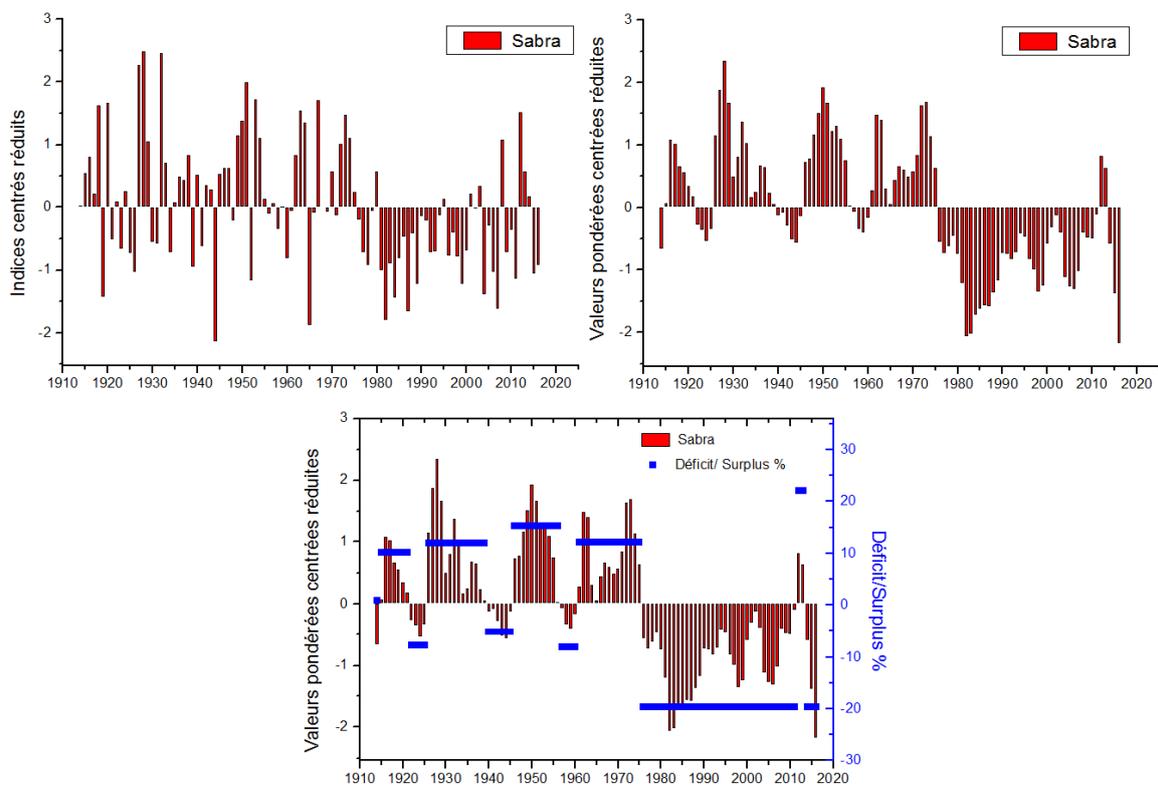


Figure B12. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies annuelles.

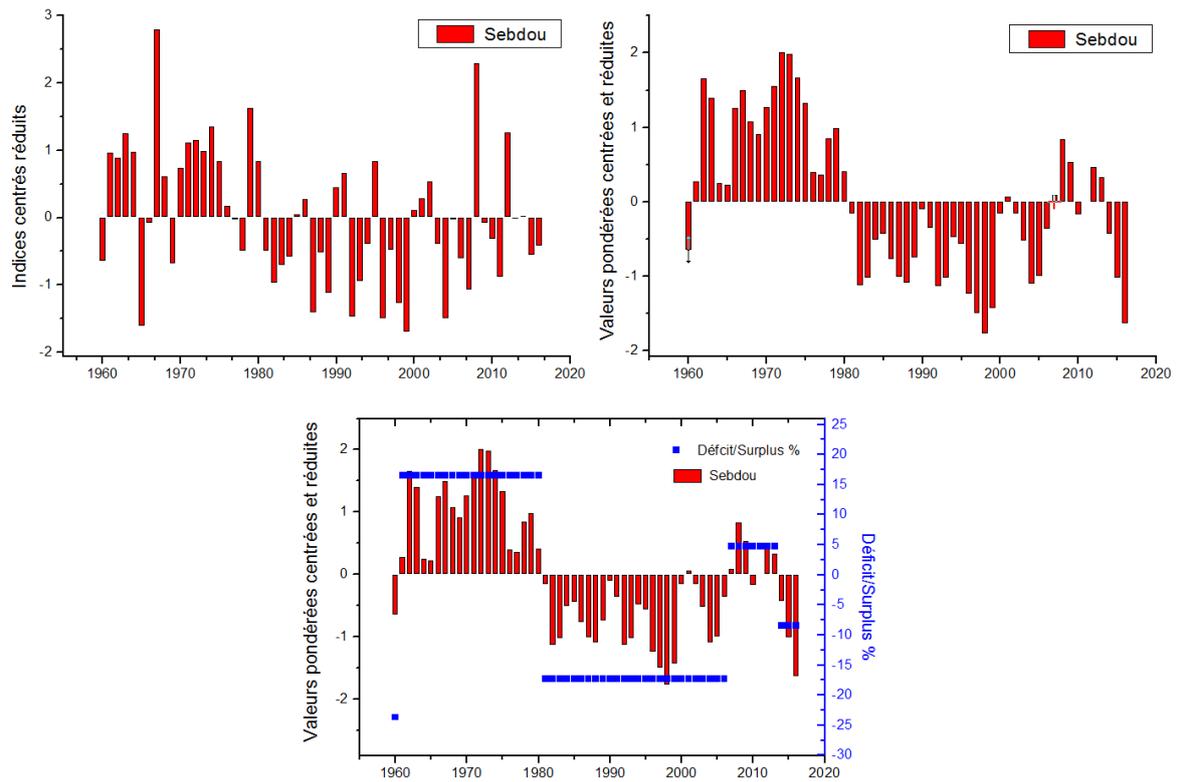


Figure B13. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies annuelles.

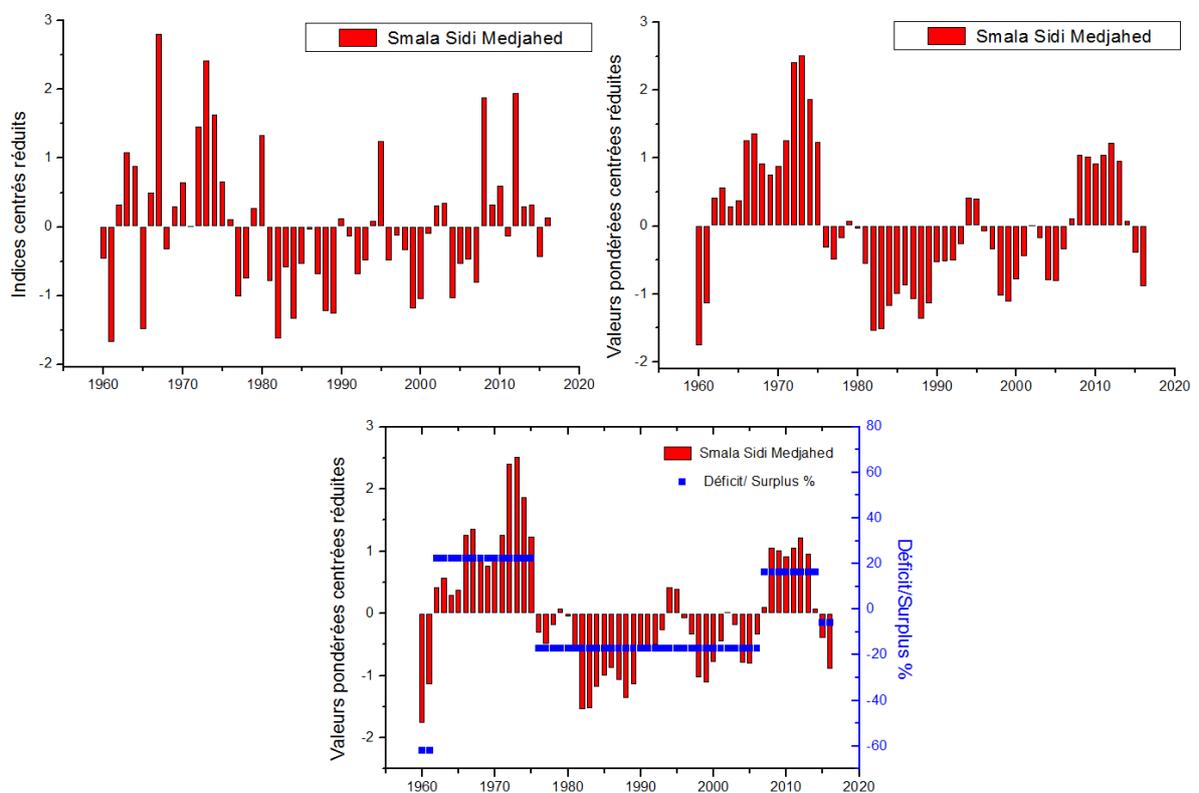


Figure B14. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies annuelles.

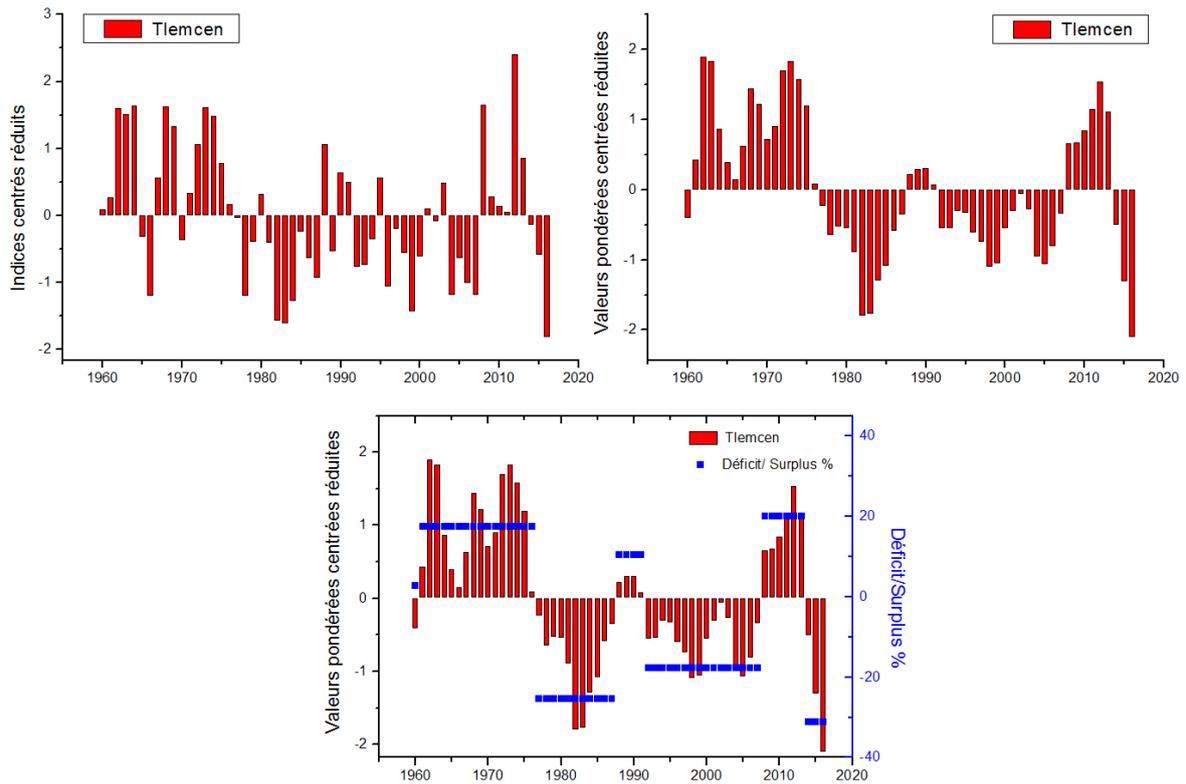


Figure B15. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies annuelles.

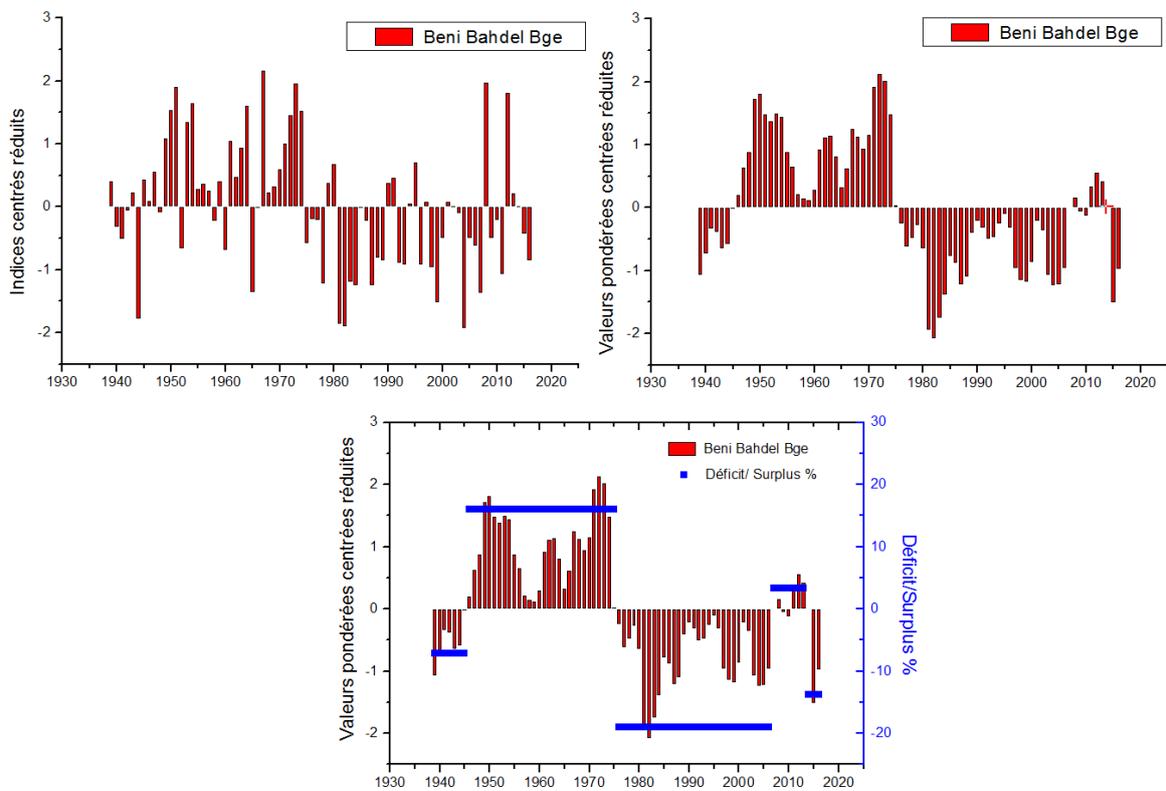


Figure B16. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies annuelles.

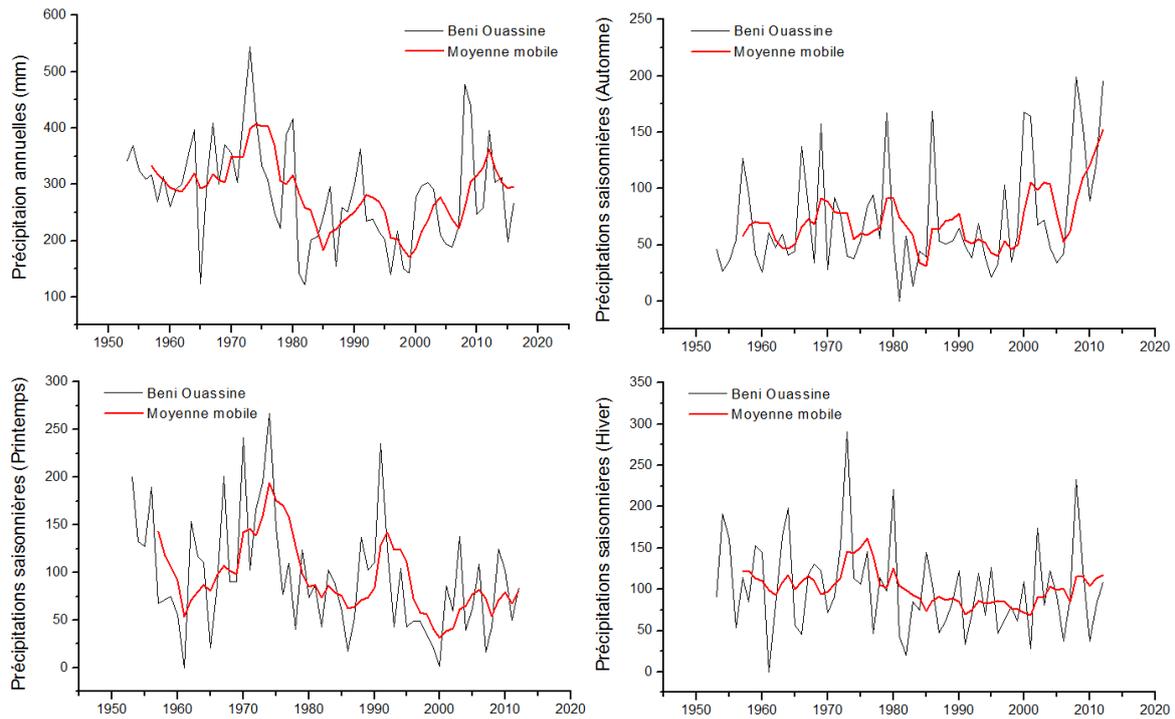


Figure B17. Évolution des totaux annuels et saisonniers de la station de Beni Ouassine.

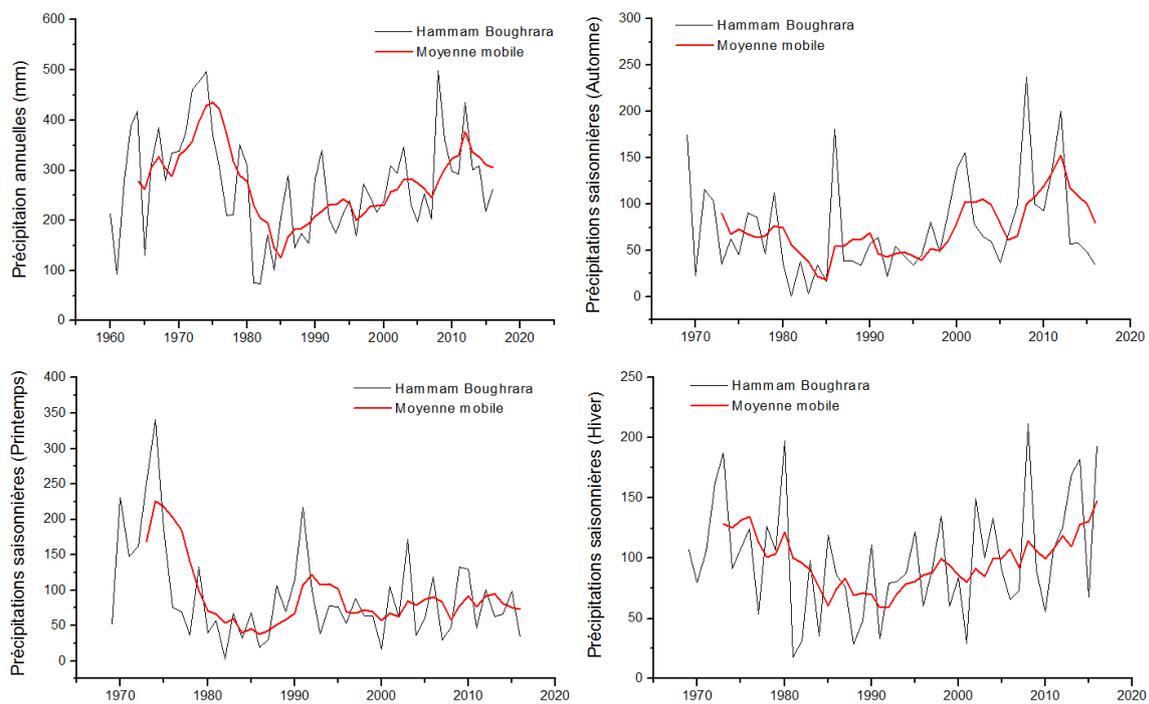


Figure B18. Évolution des totaux annuels et saisonniers de la station de Hammam Boughrara.

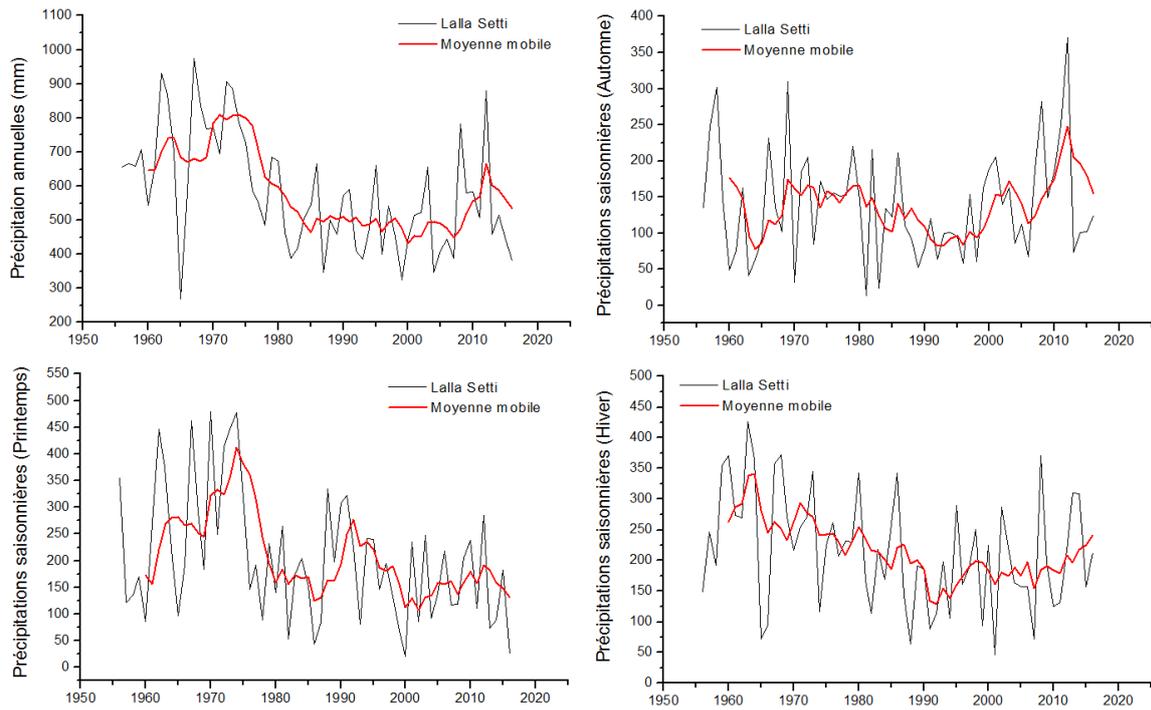


Figure B19. Évolution des totaux annuels et saisonniers de la station de Lalla Setti.

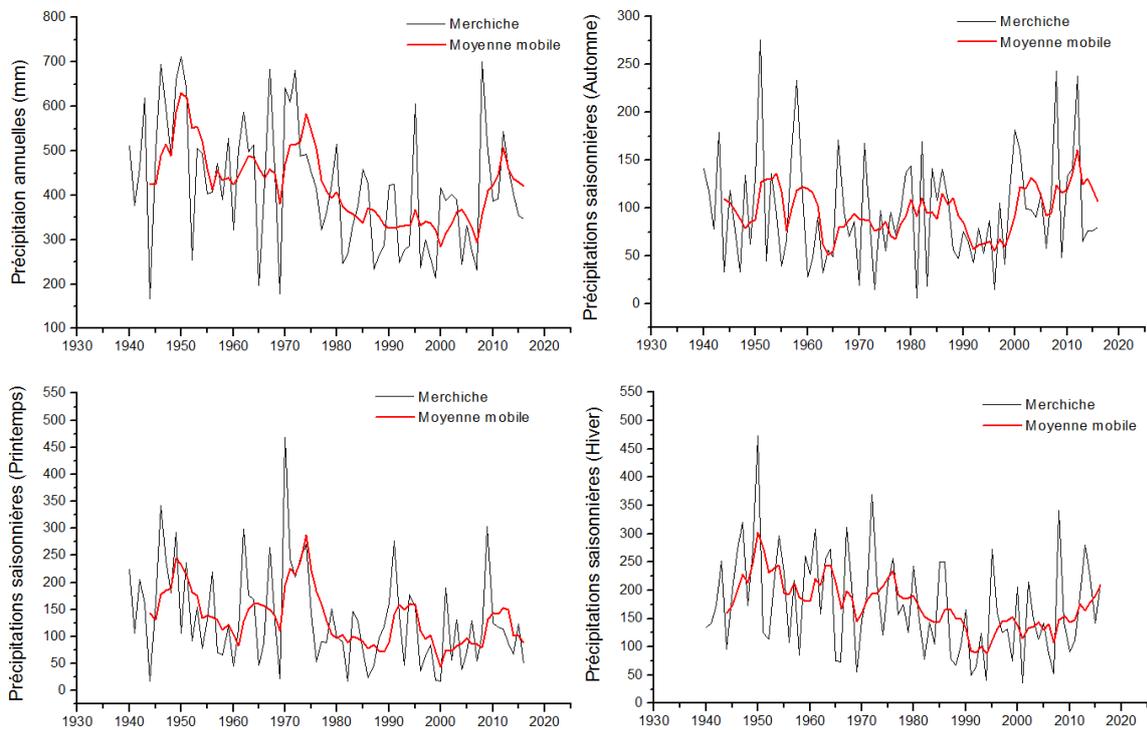


Figure B20. Évolution des totaux annuels et saisonniers de la station de Merchiche.

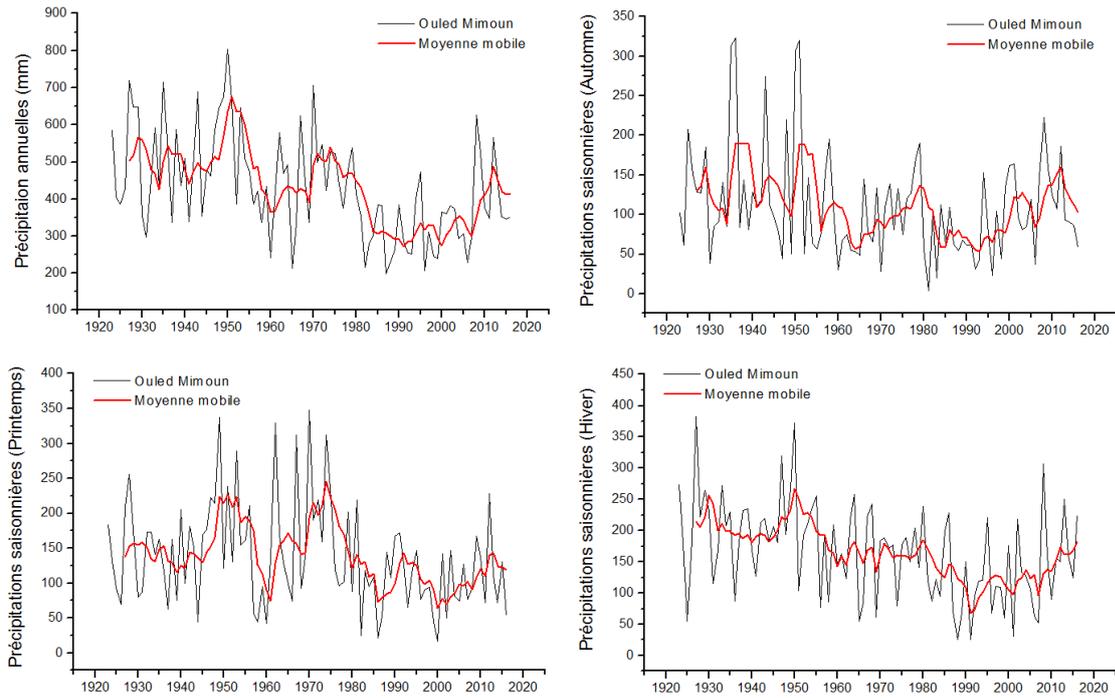


Figure B21. Évolution des totaux annuels et saisonniers de la station d'Ouled Mimoun.

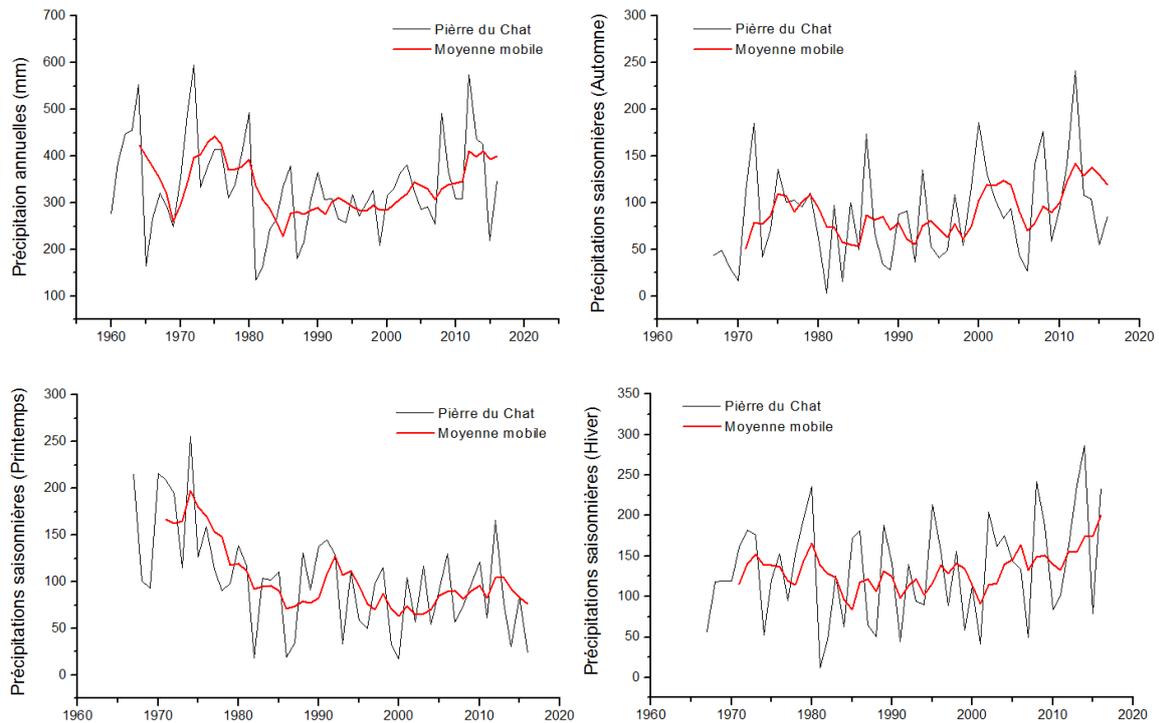


Figure B22. Évolution des totaux annuels et saisonniers de la station de Pierre du Chat.

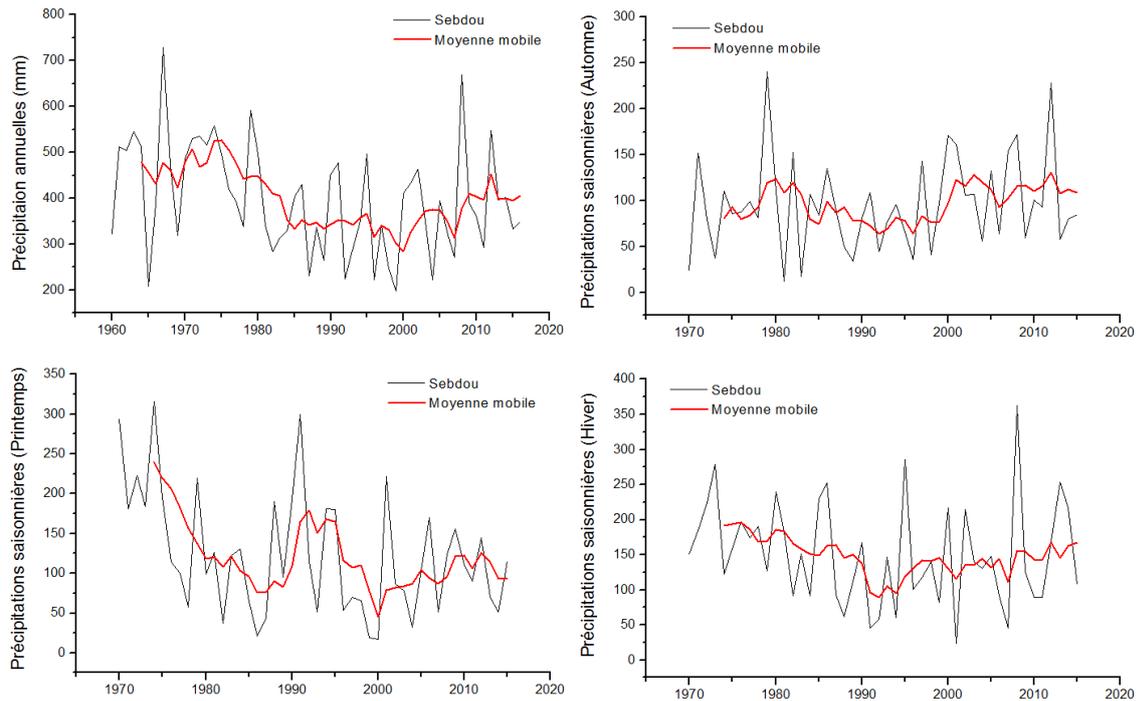


Figure B23. Évolution des totaux annuels et saisonniers de la station de Seb dou.

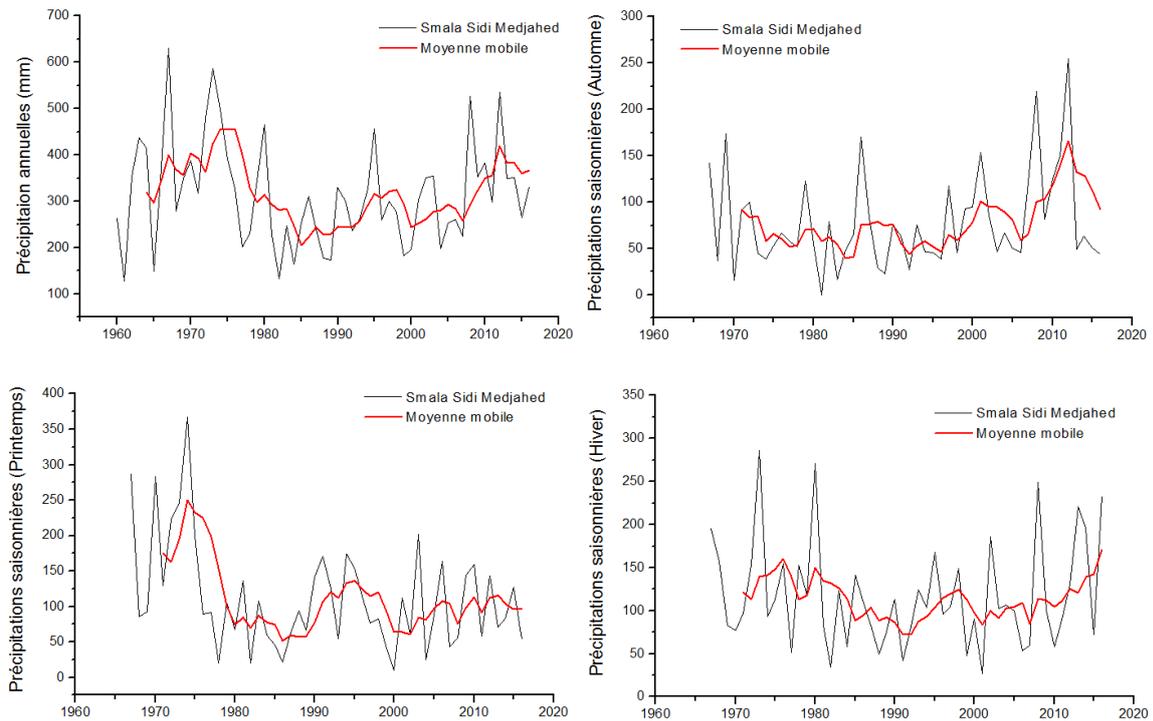


Figure B24. Évolution des totaux annuels et saisonniers de la station de Smala Sidi Medjahed.

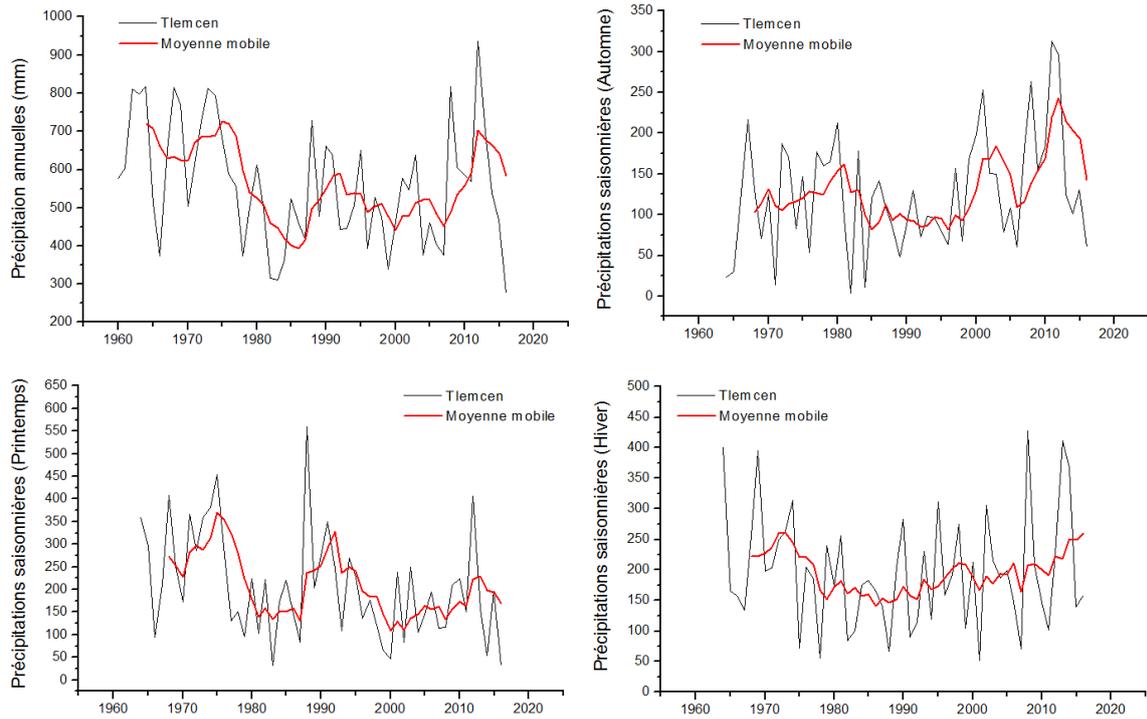


Figure B25. Évolution des totaux annuels et saisonniers de la station de Tlemcen.

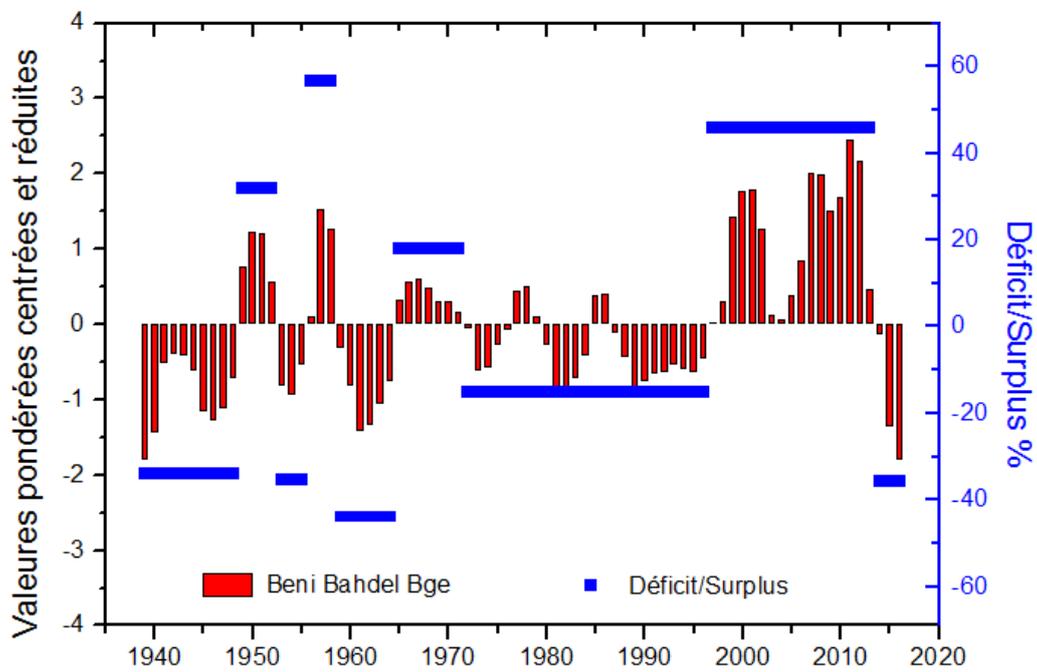


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'automne.

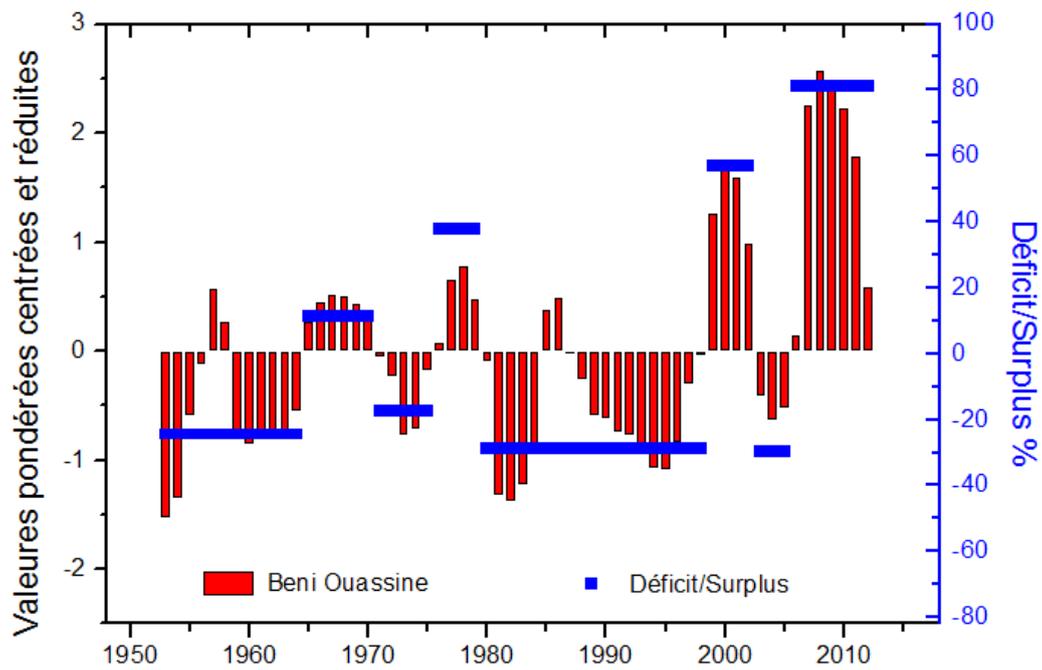


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'automne.

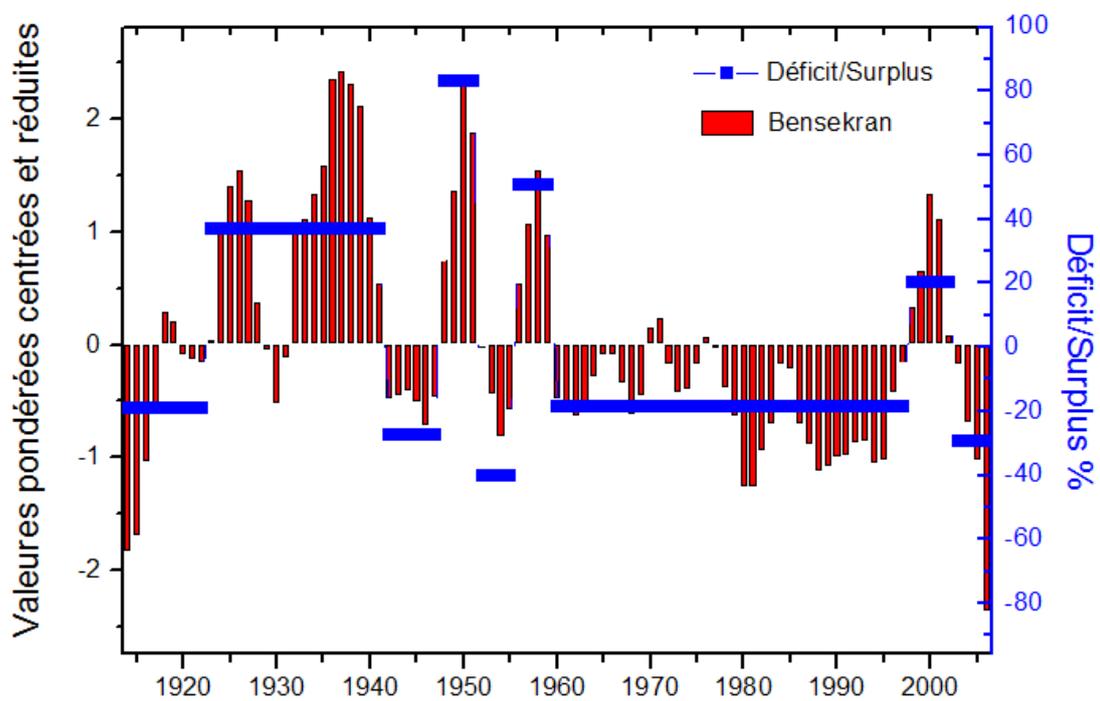


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'automne.

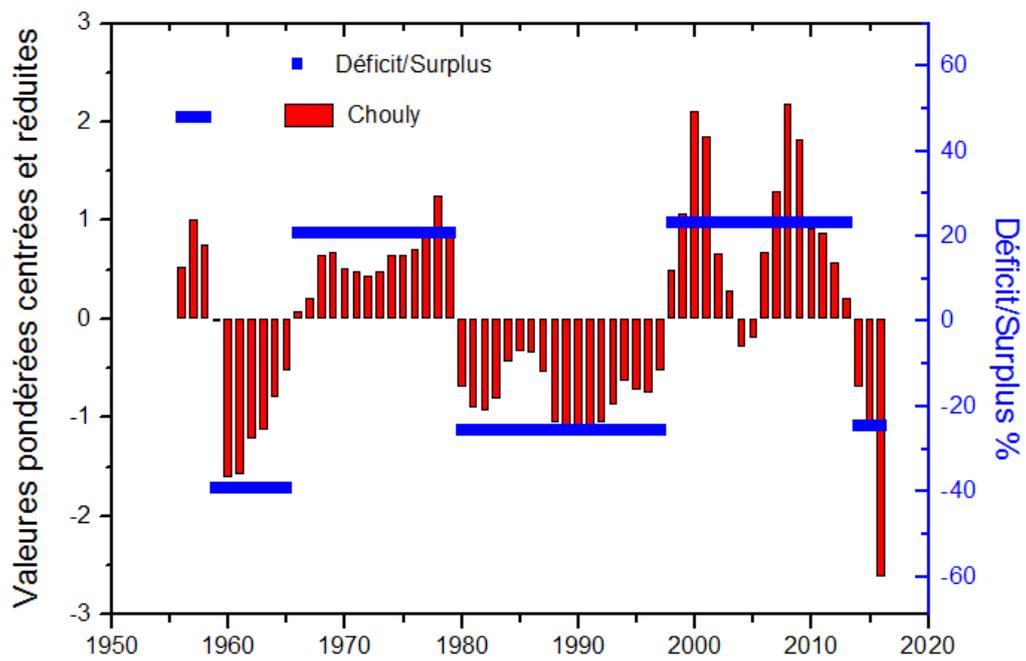


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'automne.

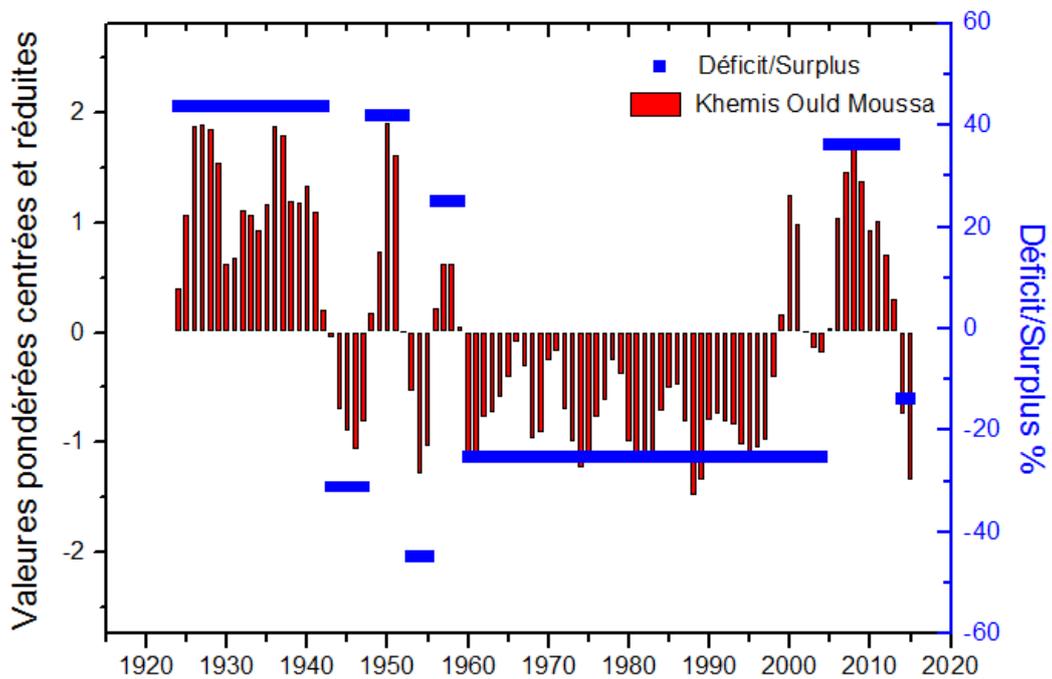


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'automne.

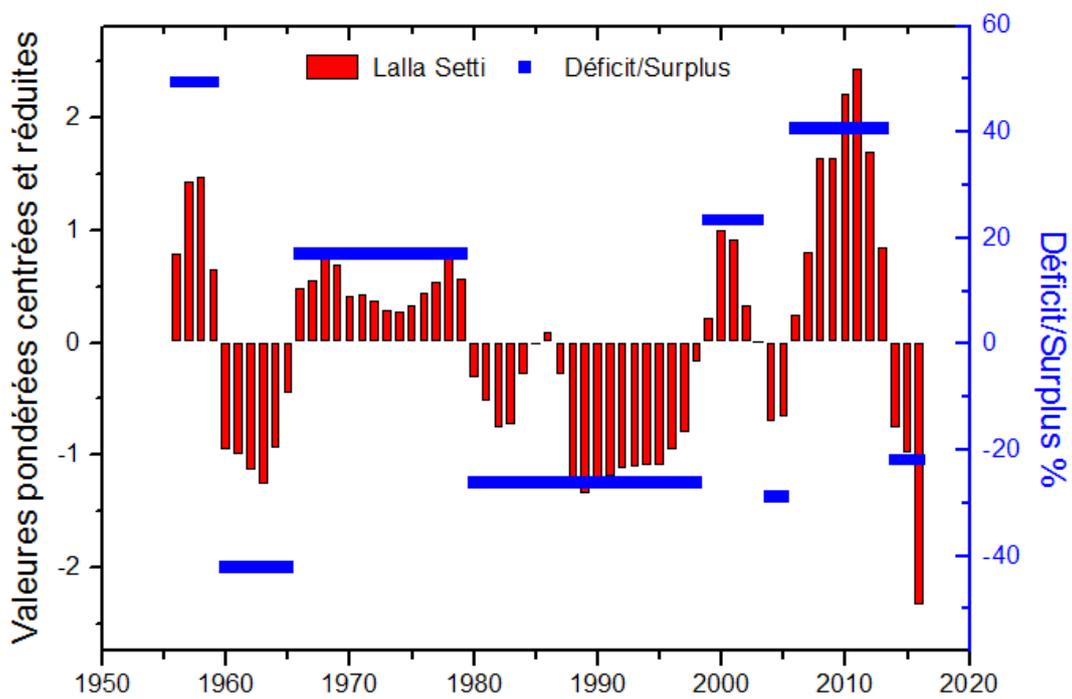


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'automne.

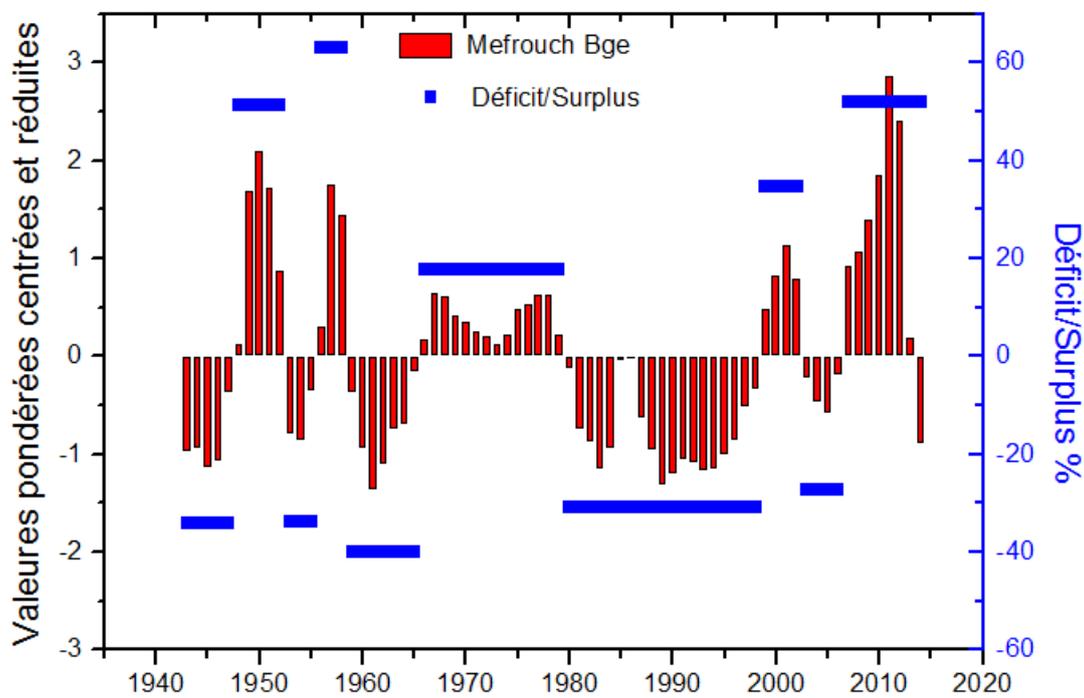


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'automne.

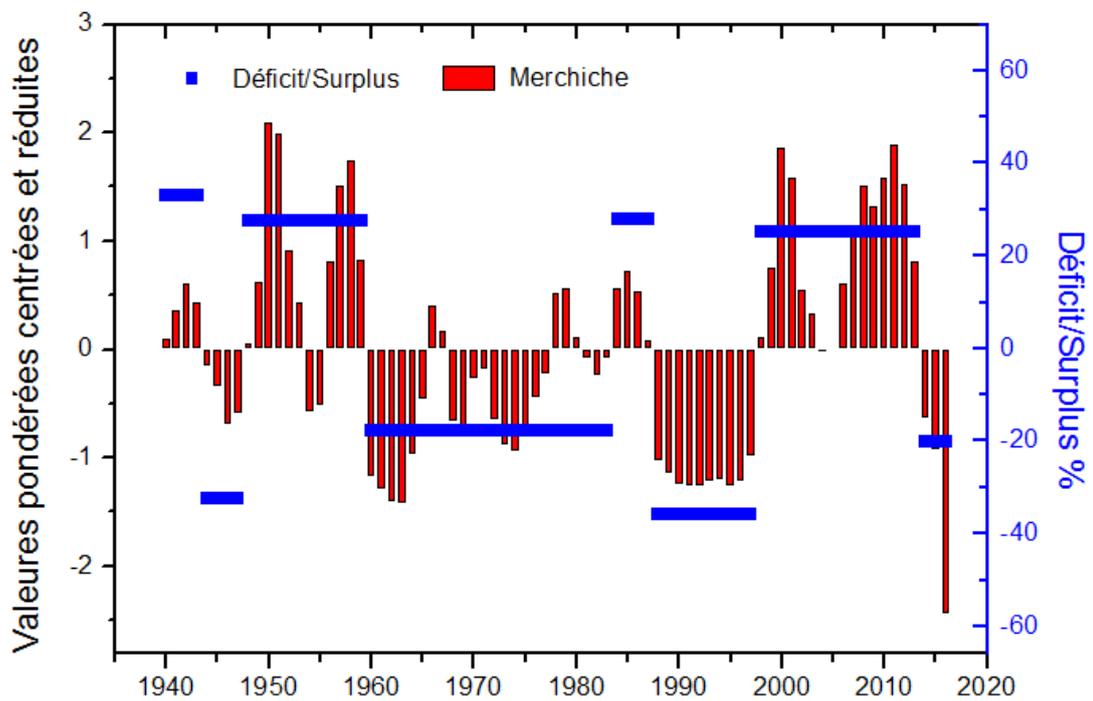


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'automne.

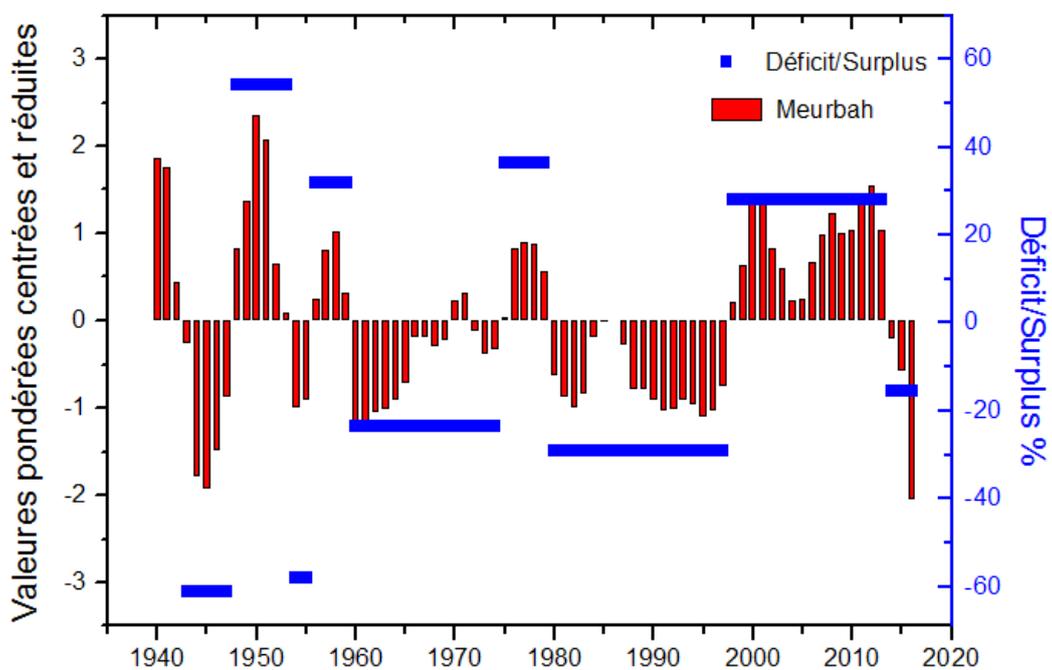


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'automne.

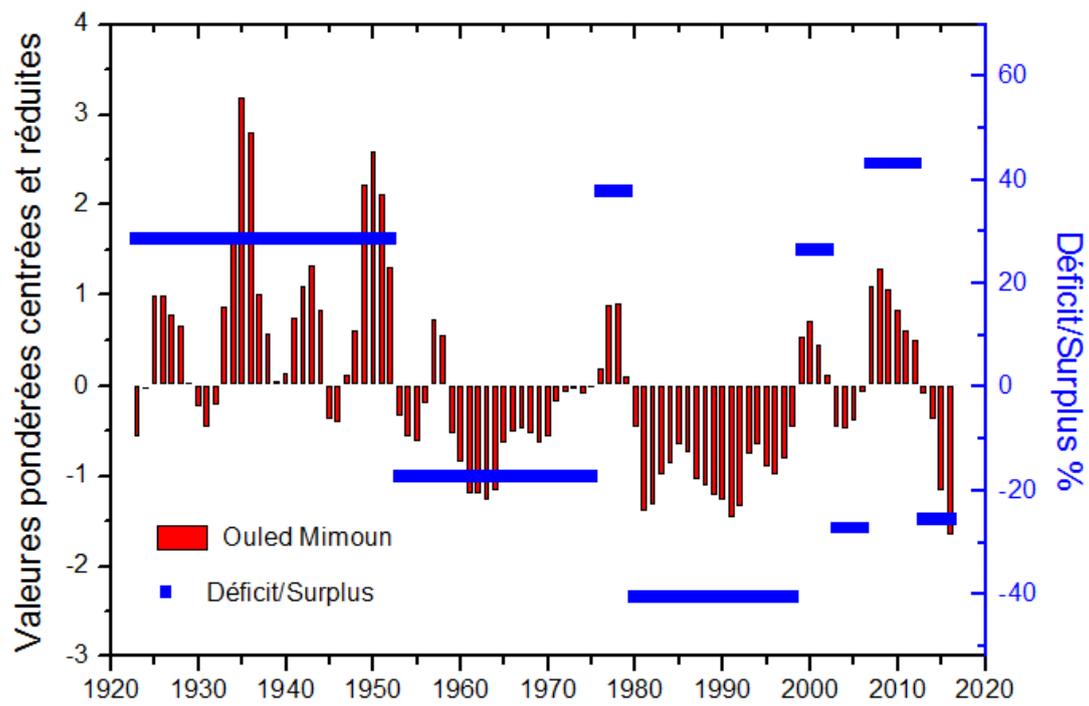


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'automne.

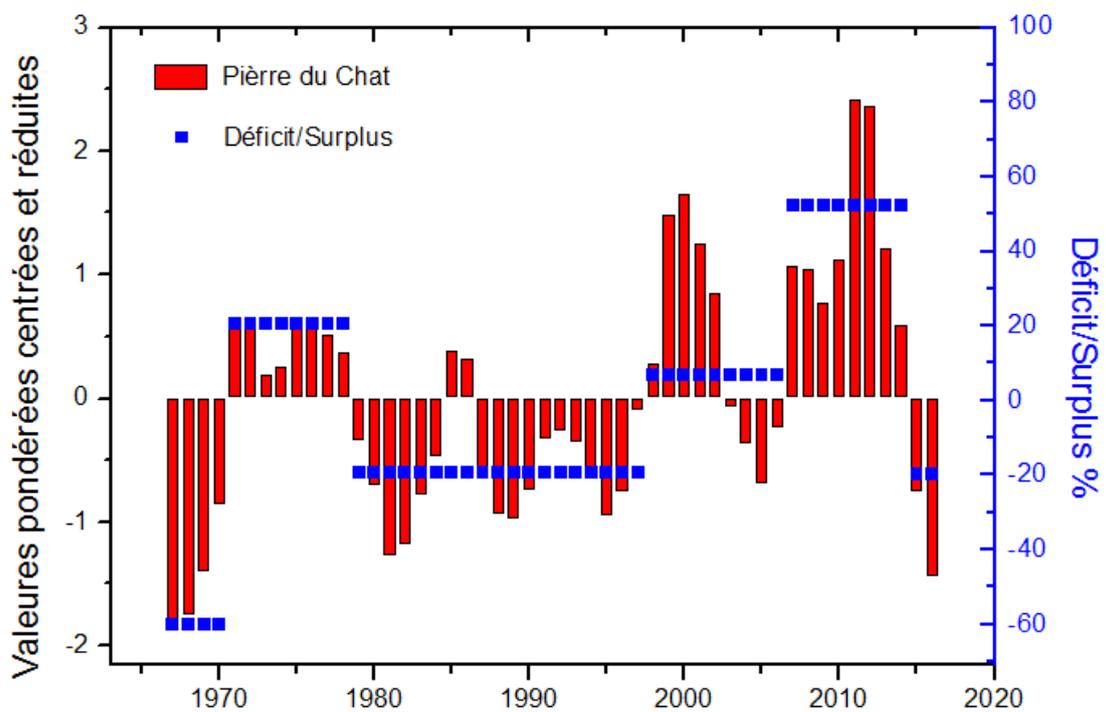


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'automne.

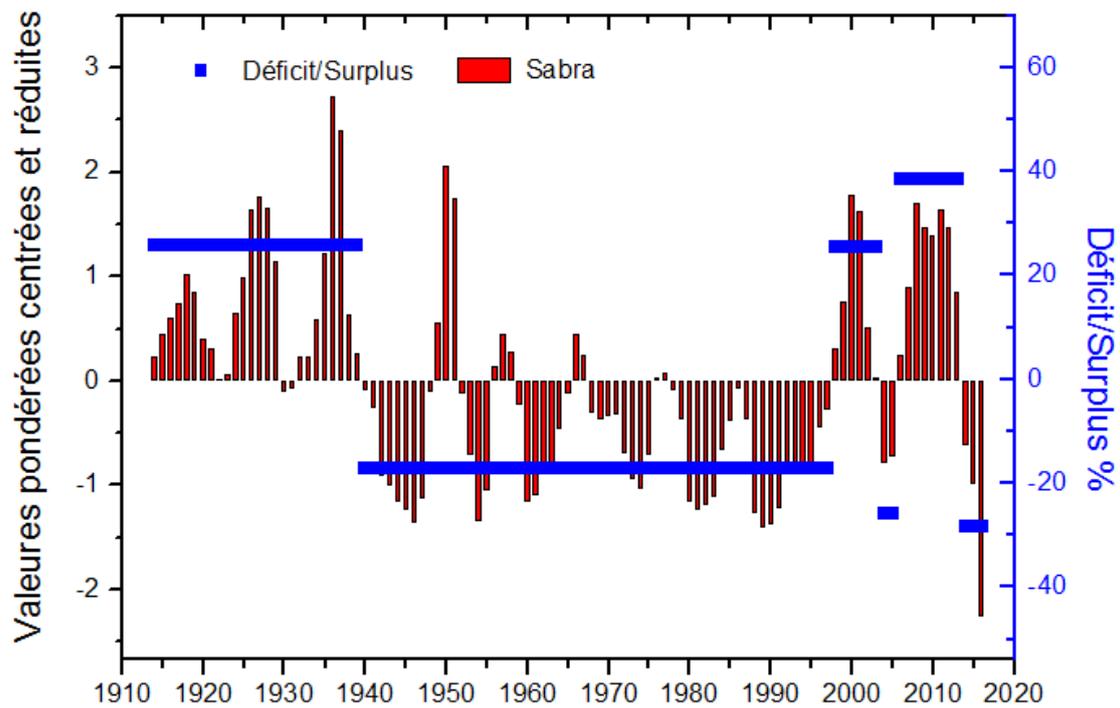


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'automne.

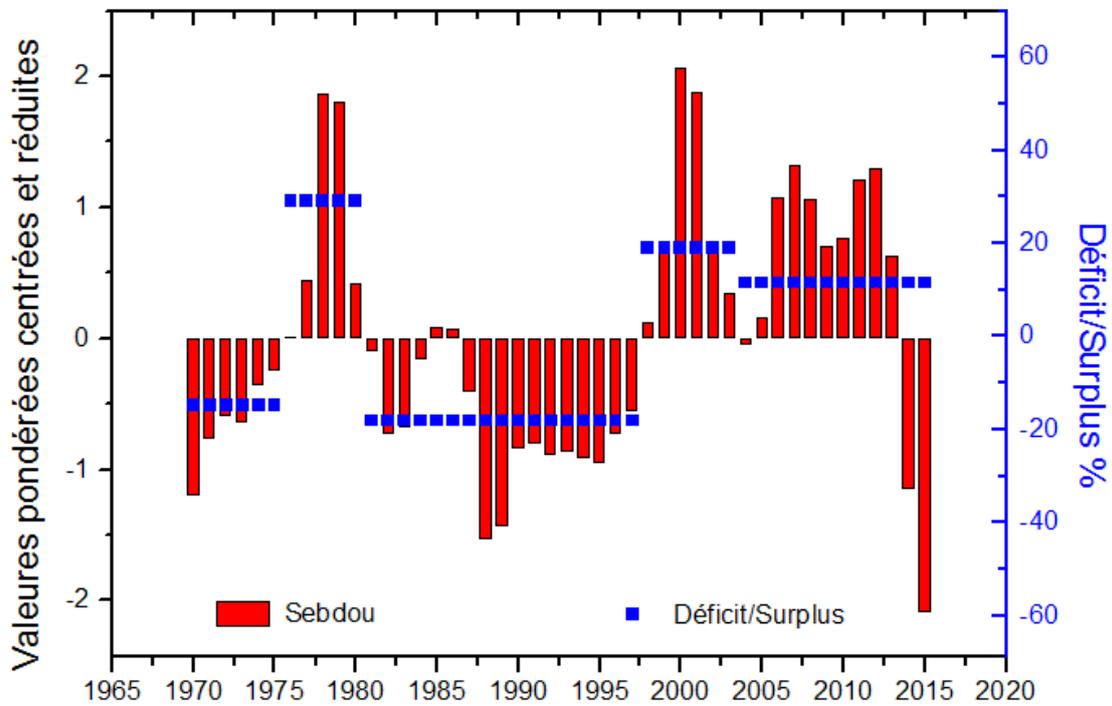


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'automne.

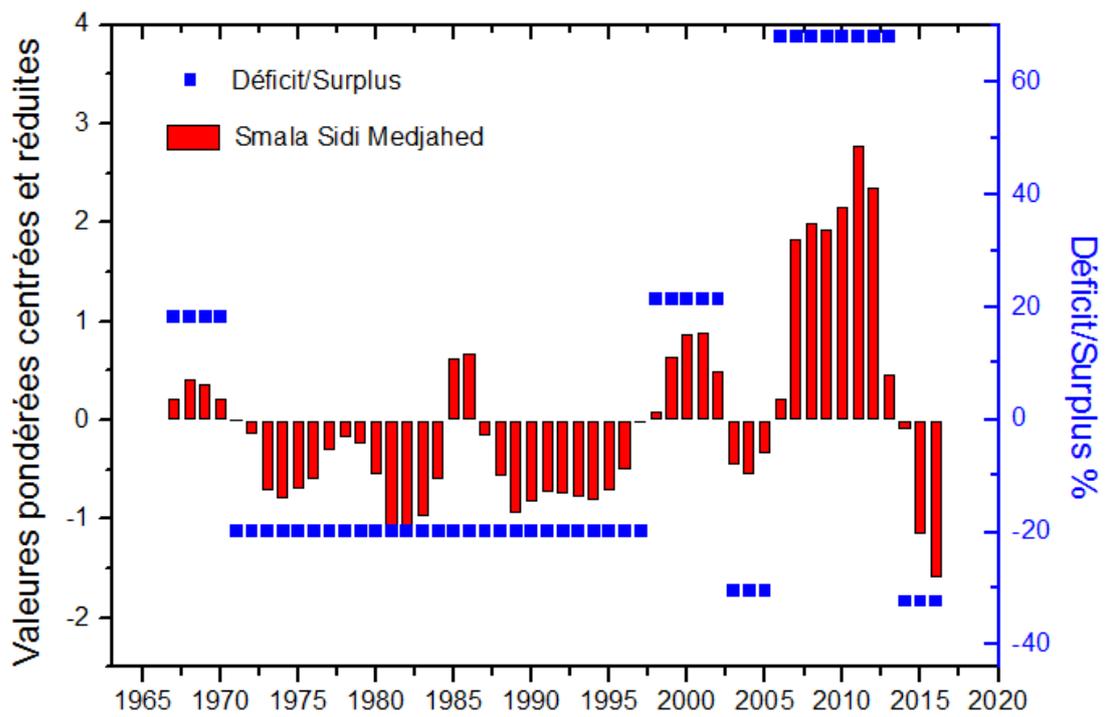


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'automne.

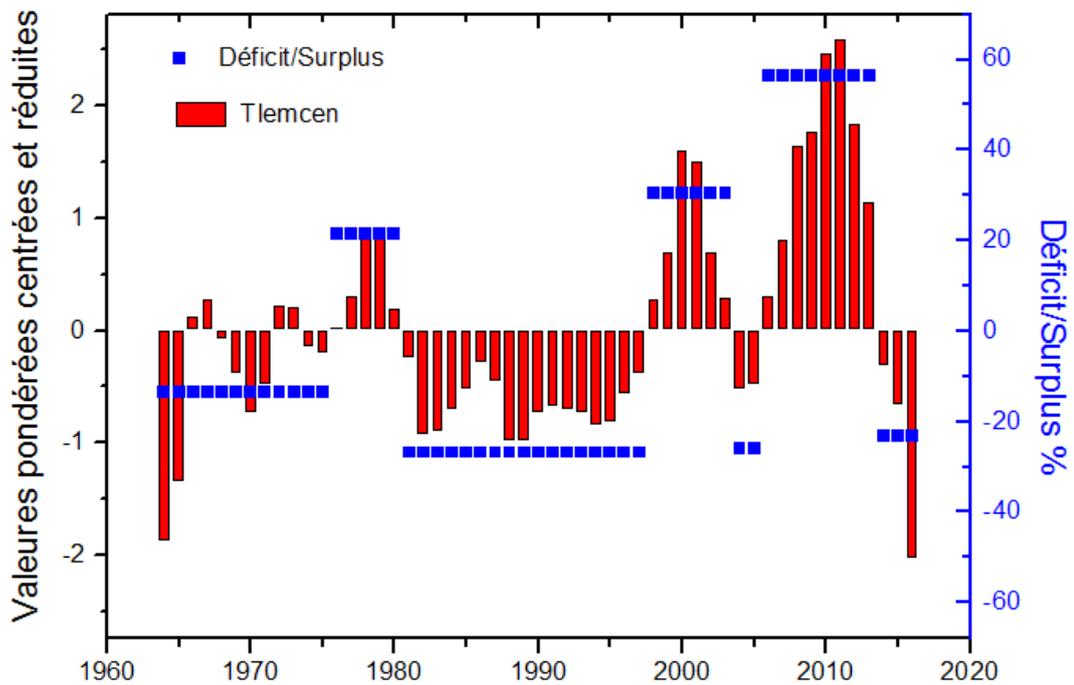


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'automne.

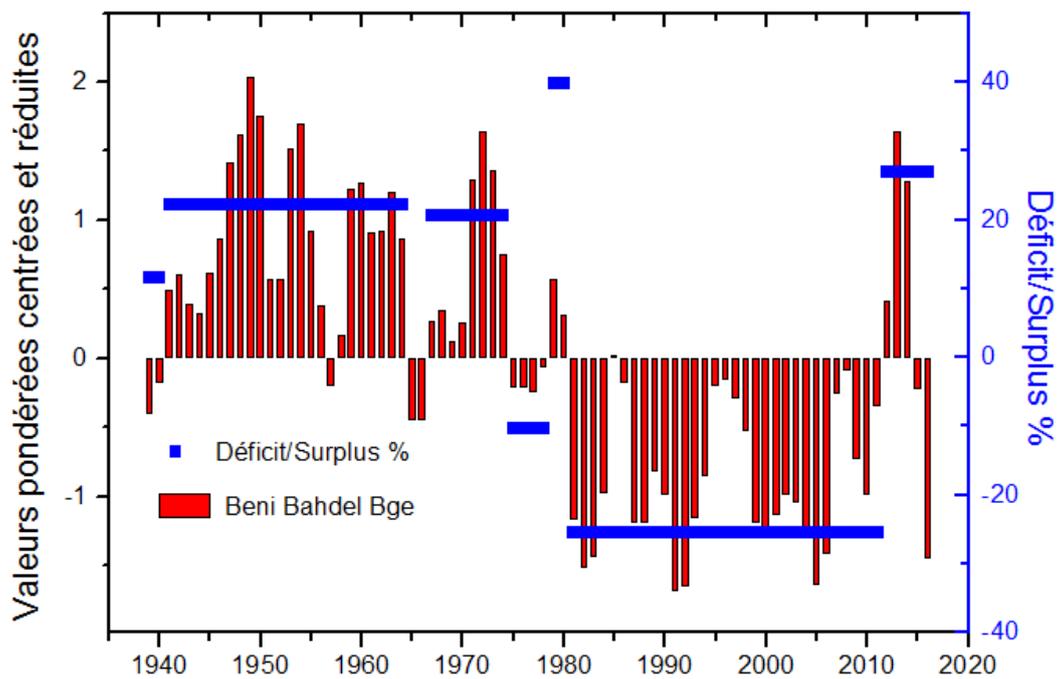


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'hiver.

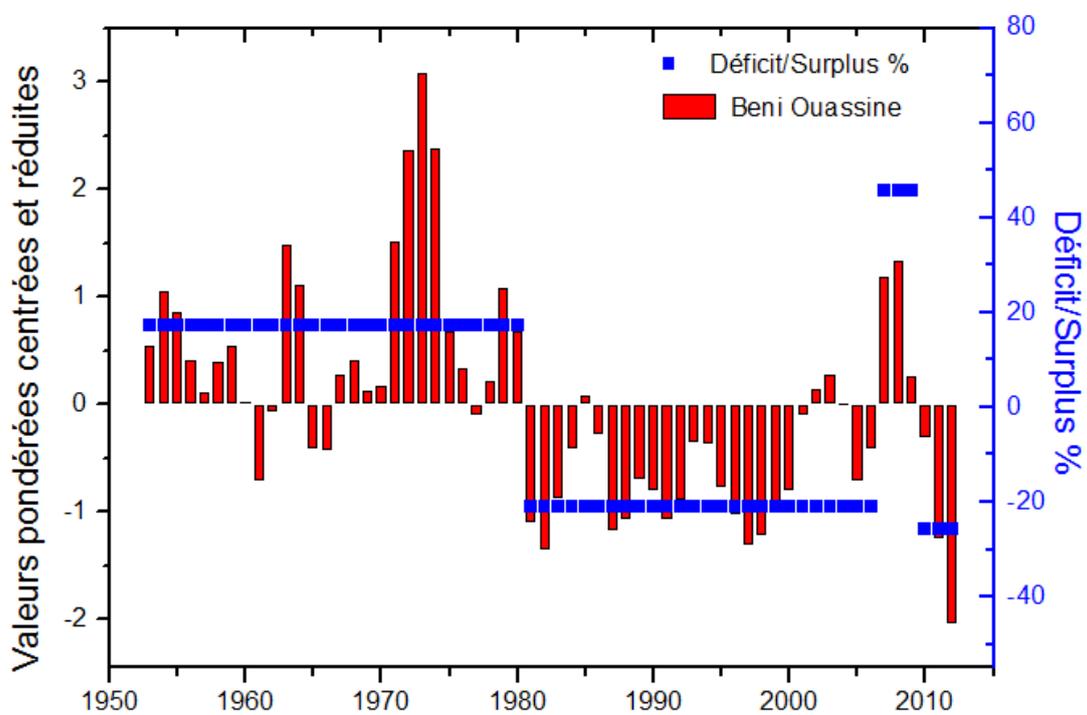


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'hiver.

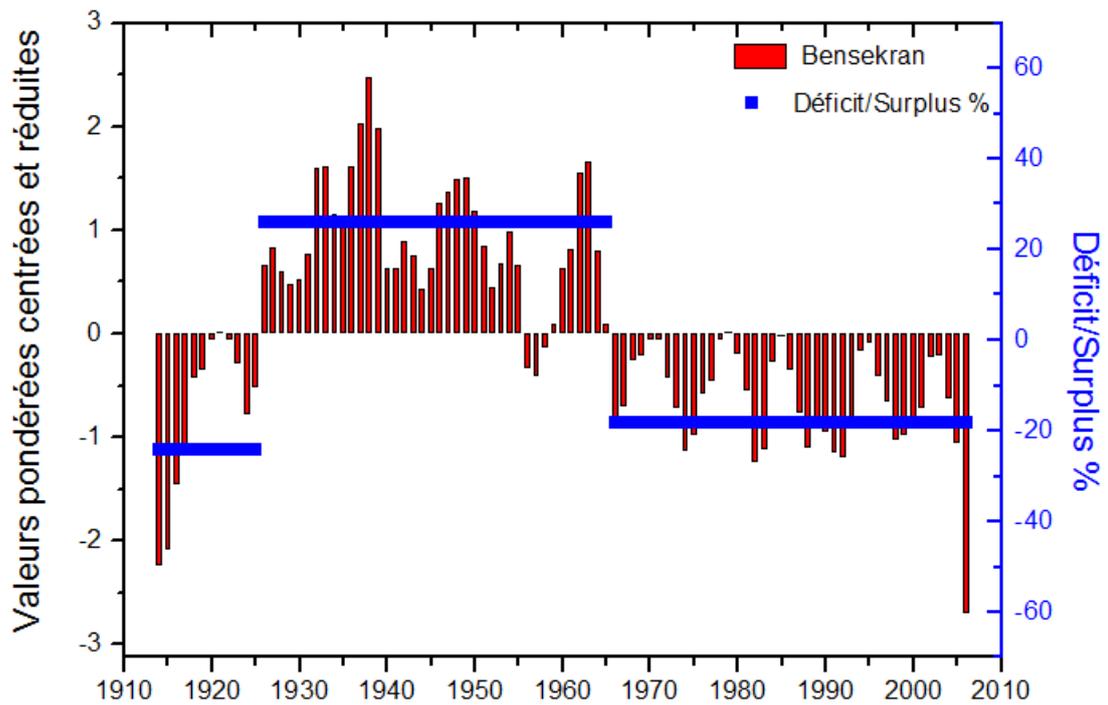


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'hiver.

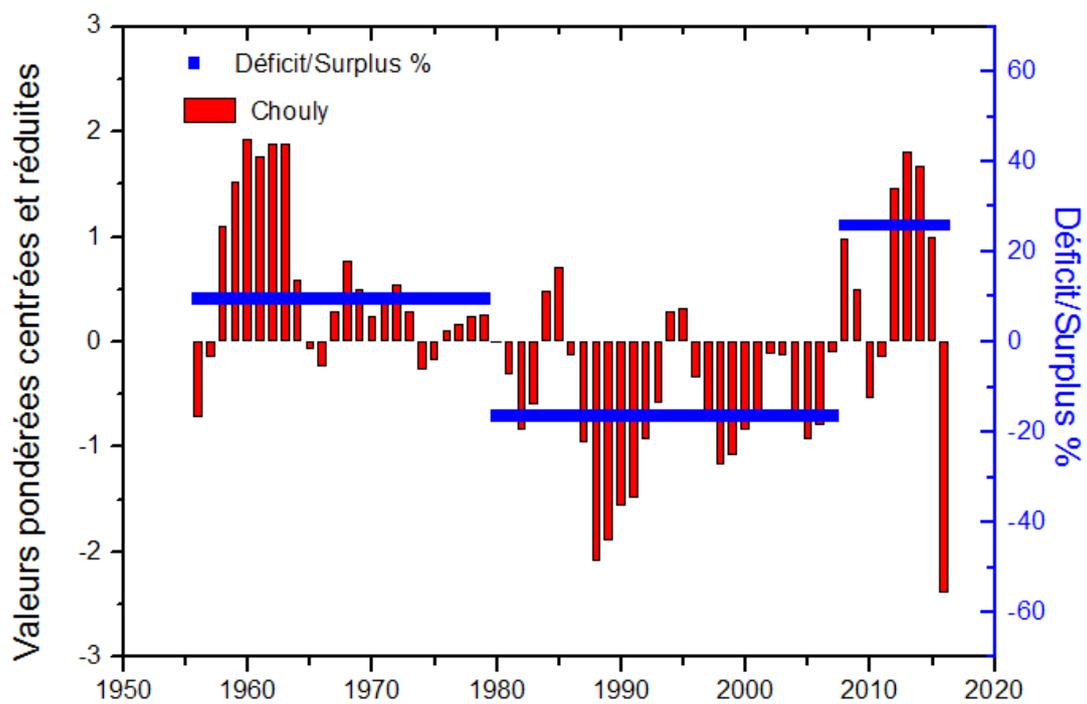


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'hiver.

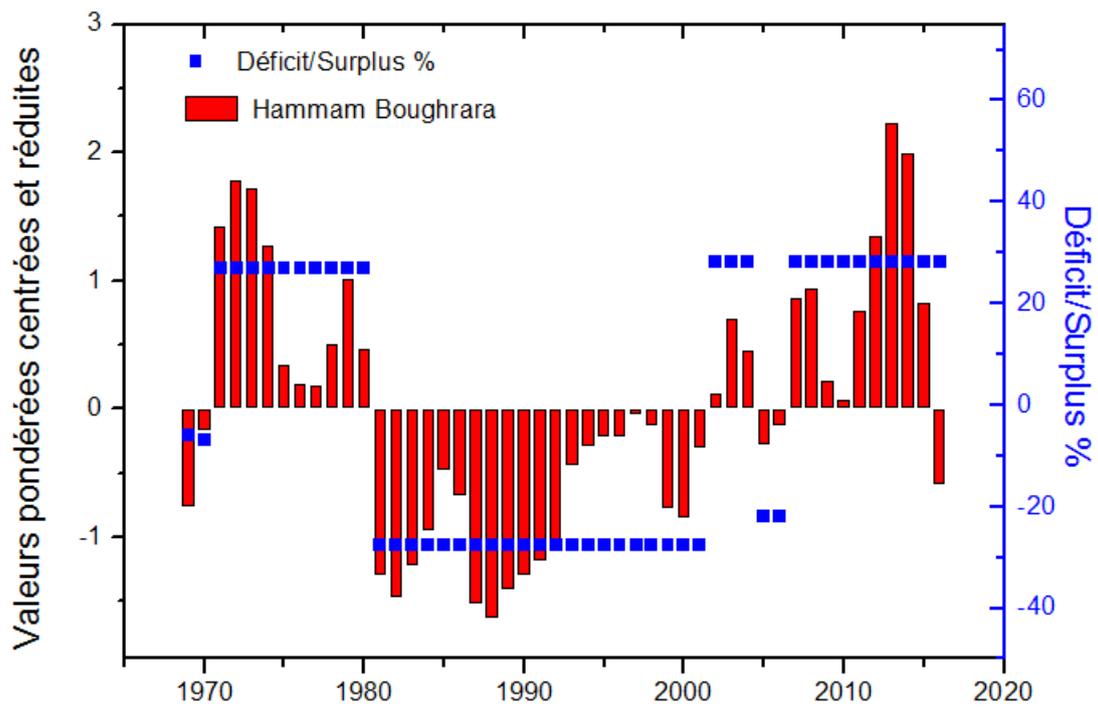


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'hiver.

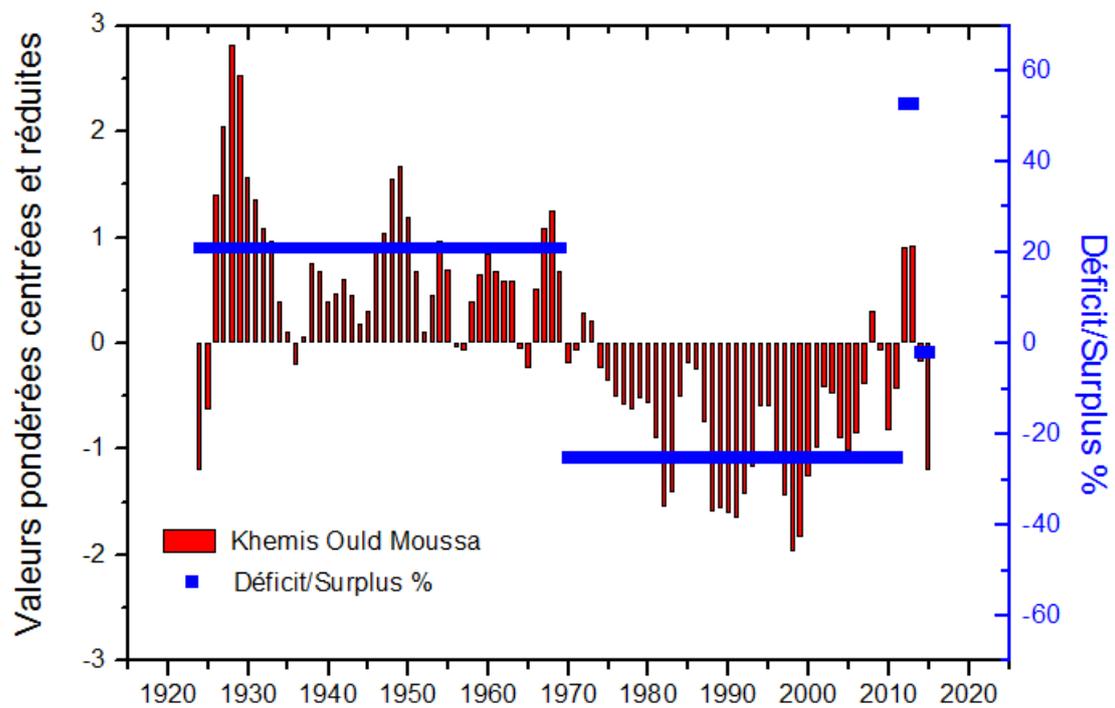


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'hiver.

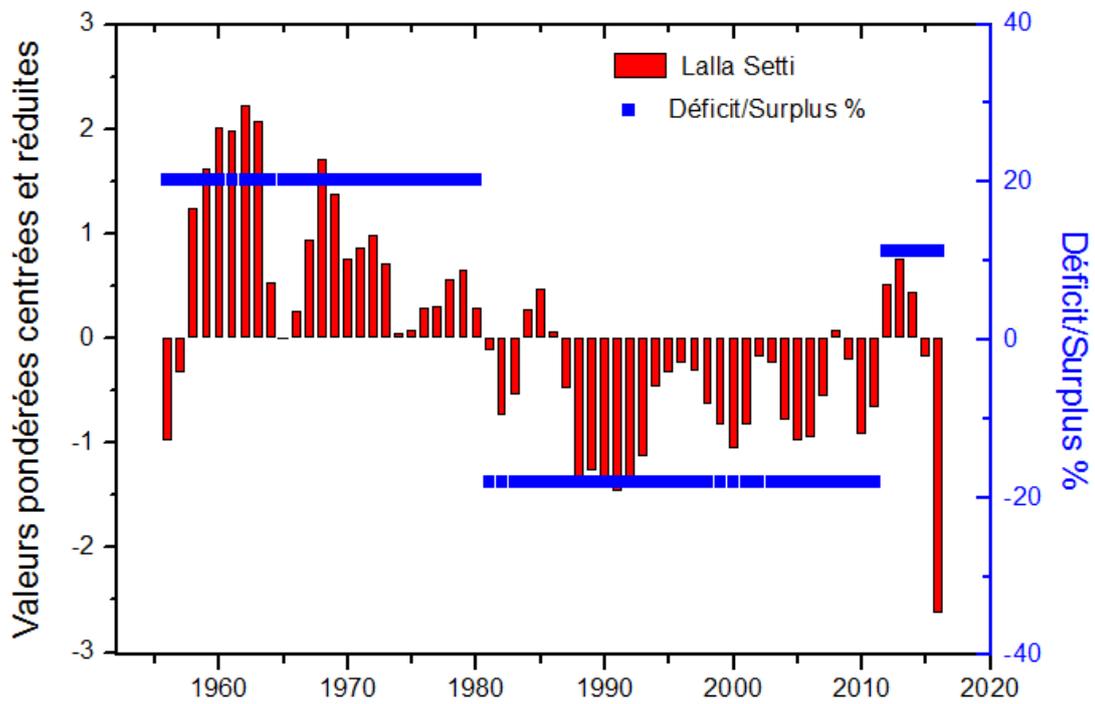


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'hiver.

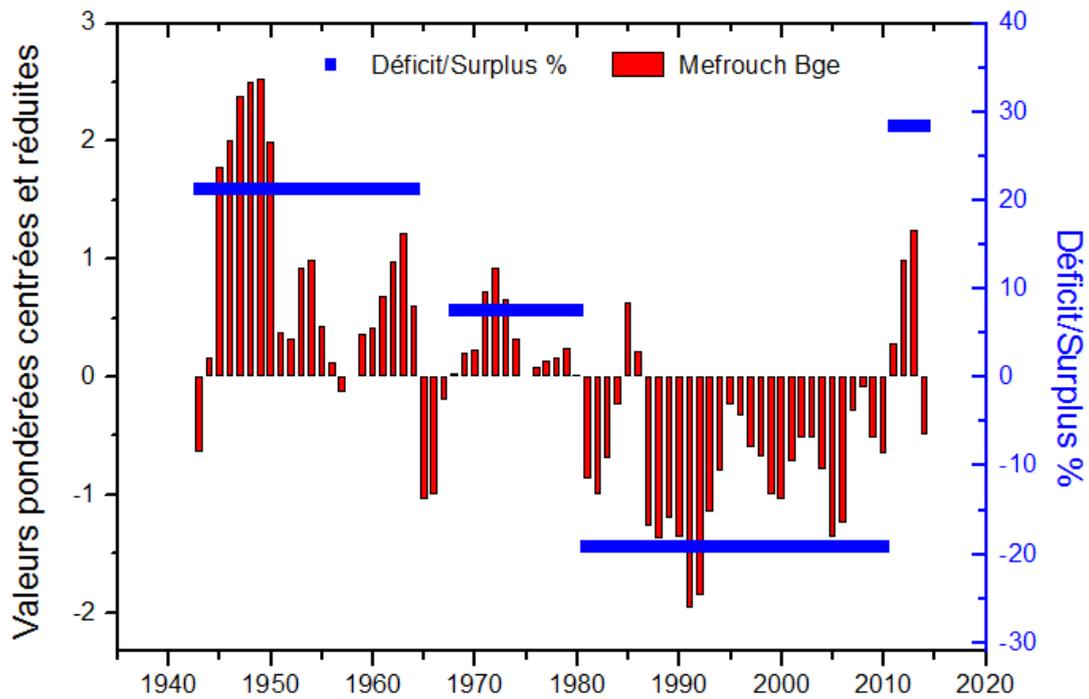


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'hiver.

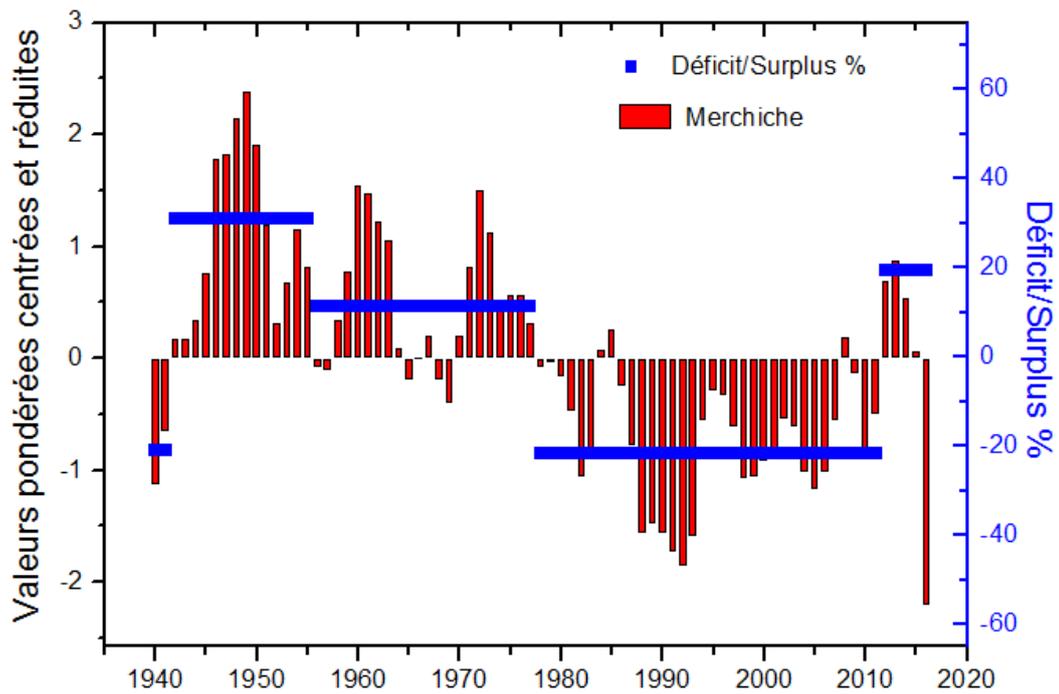


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'hiver.

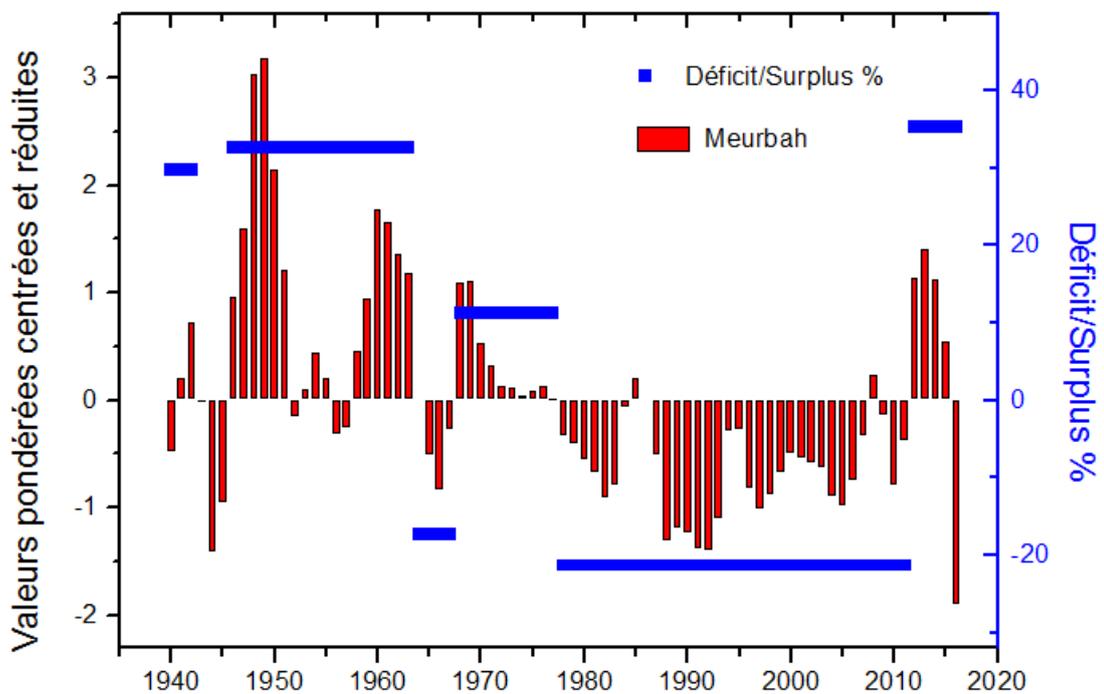


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'hiver.

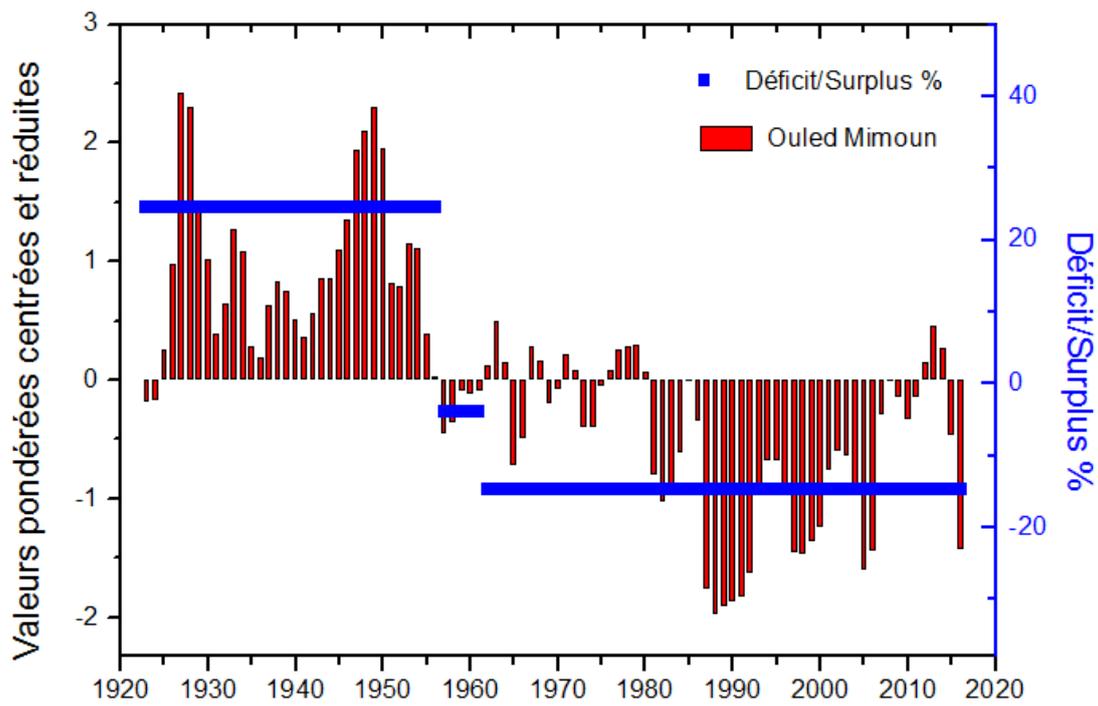


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d’hiver.

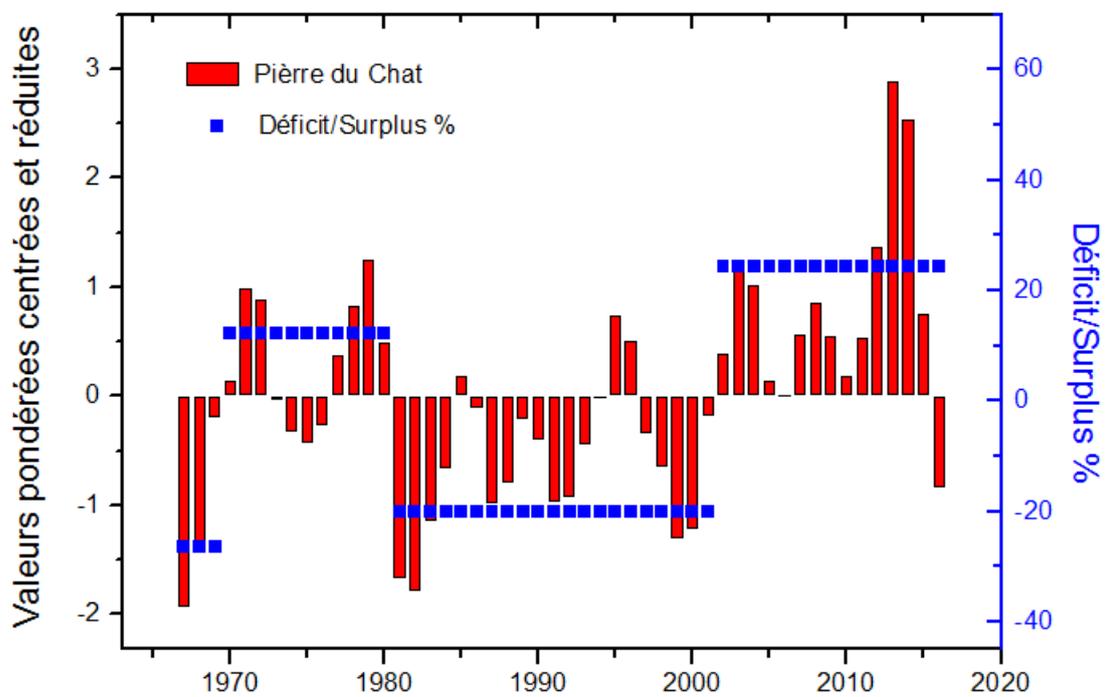


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d’hiver.

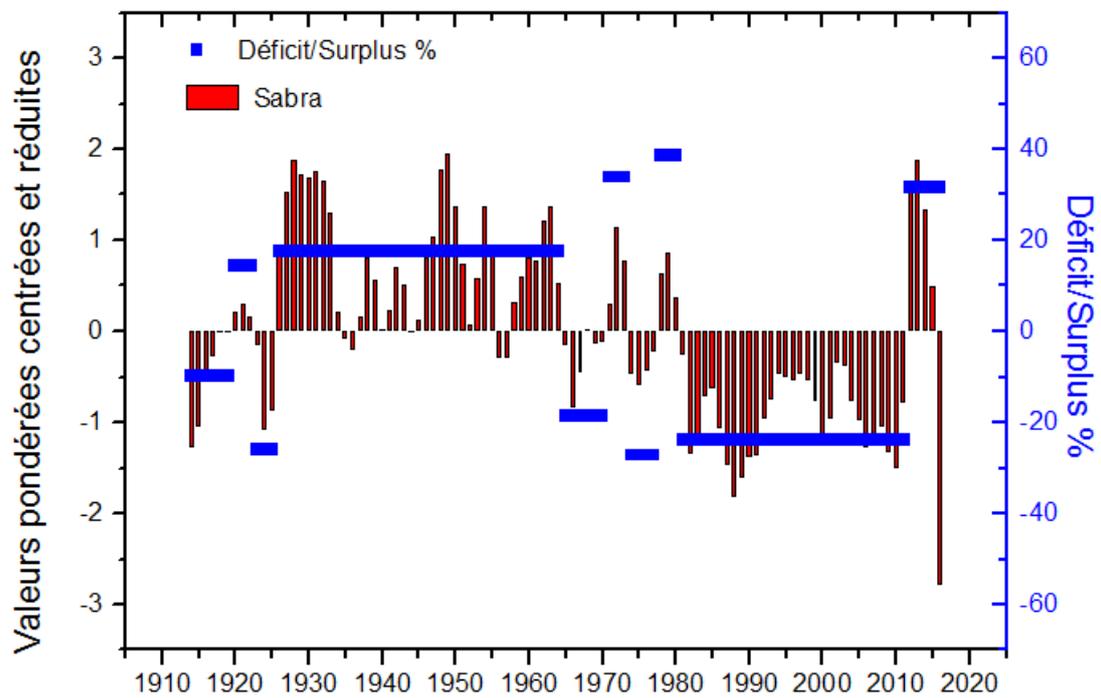


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'hiver.

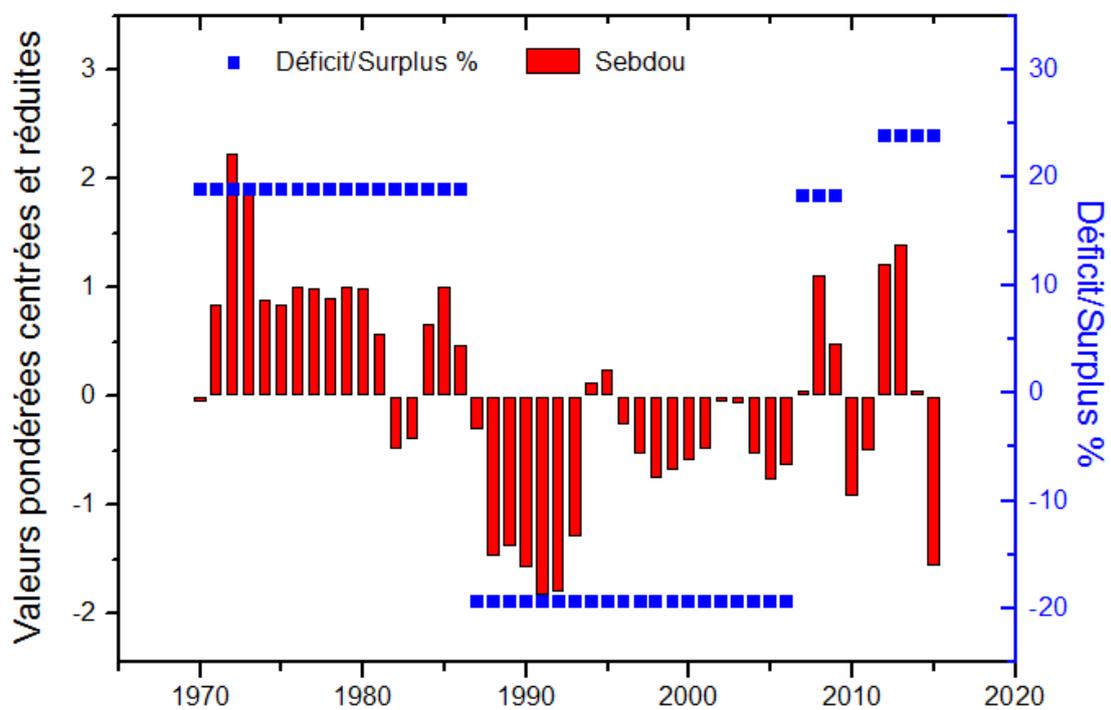


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'hiver.

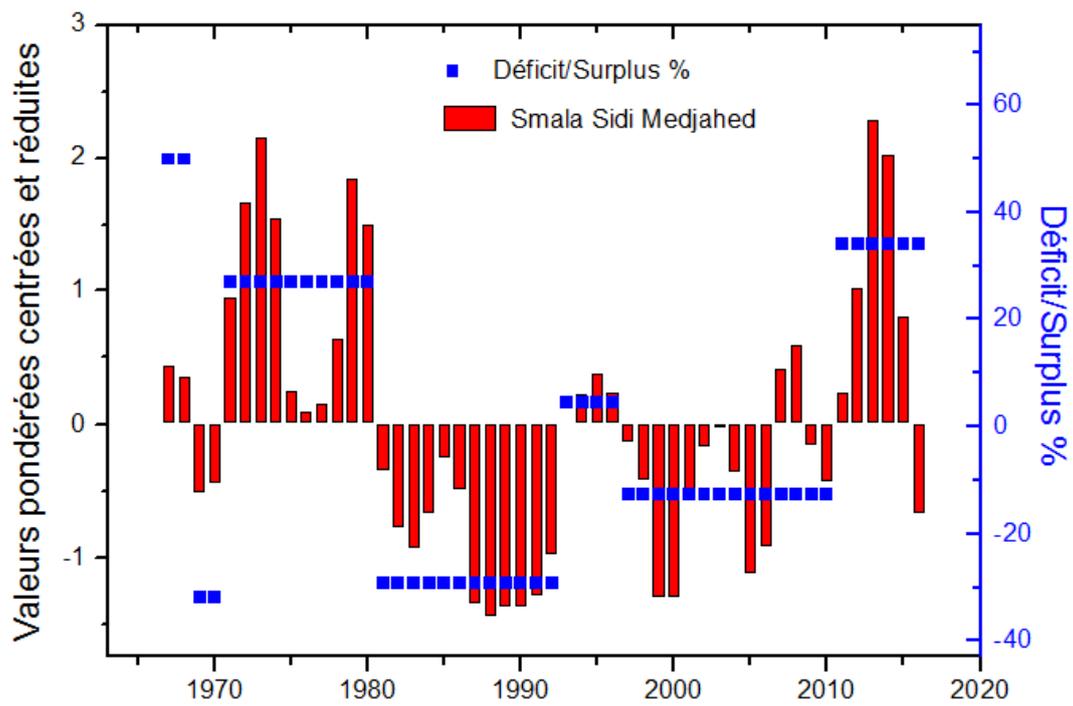


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'hiver.

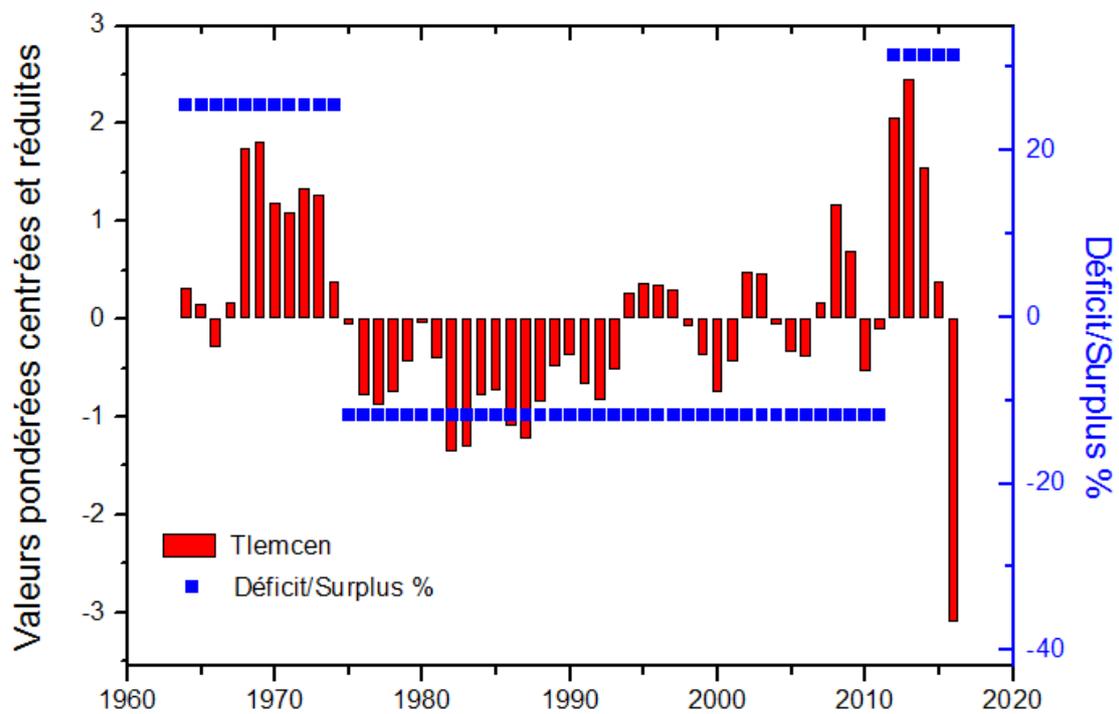


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies d'hiver.

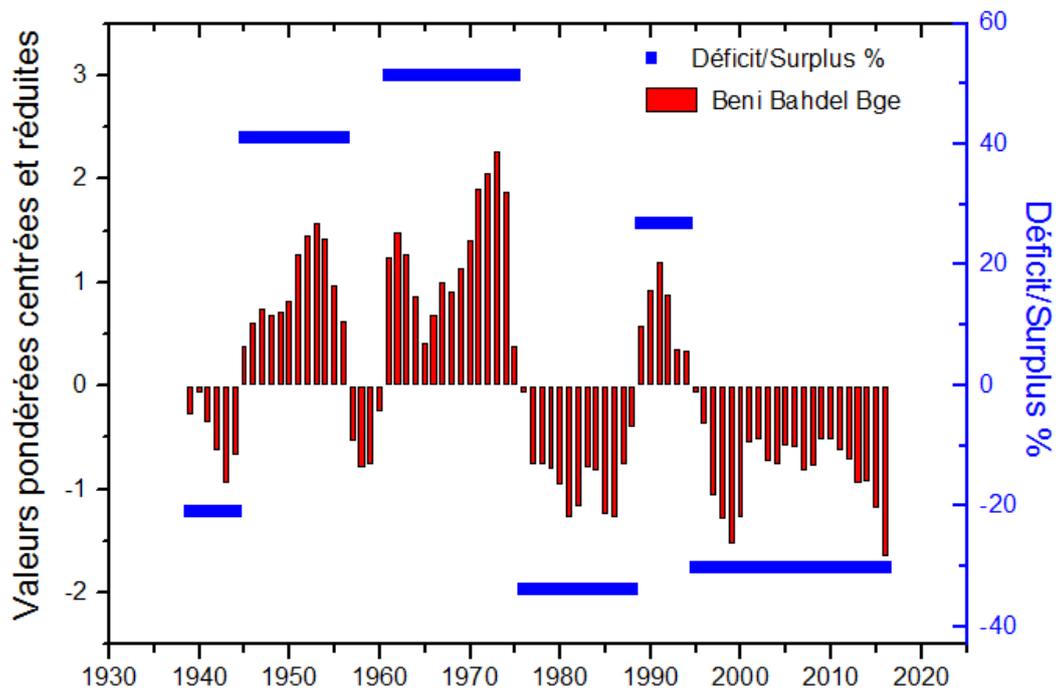


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies du printemps.

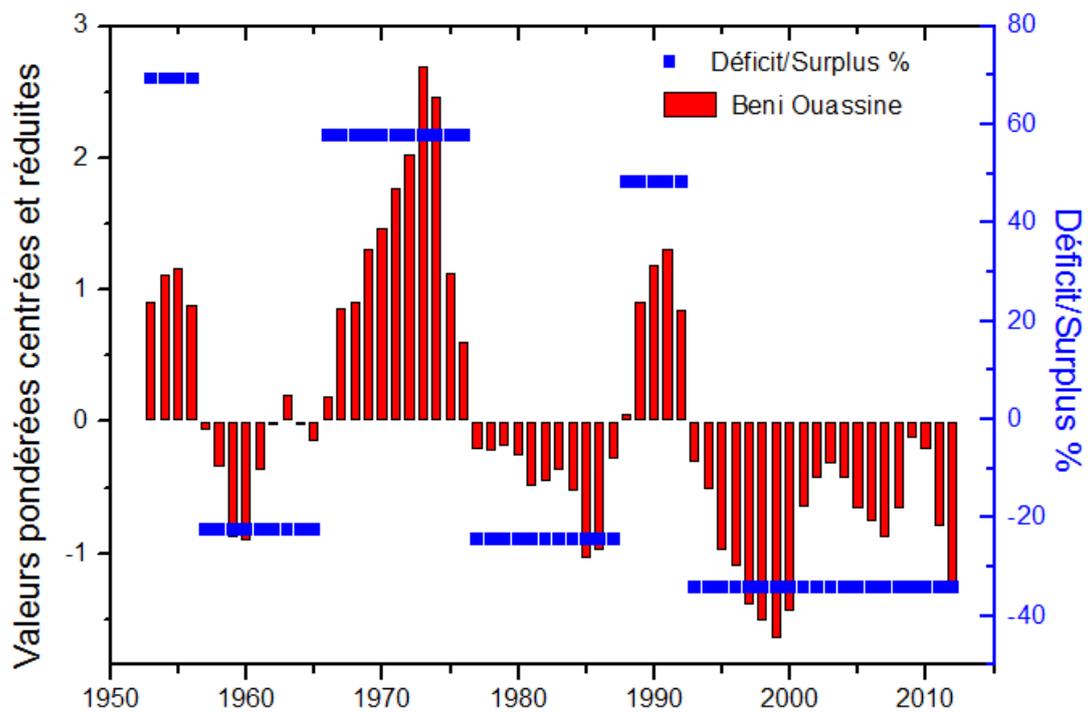


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies du printemps.

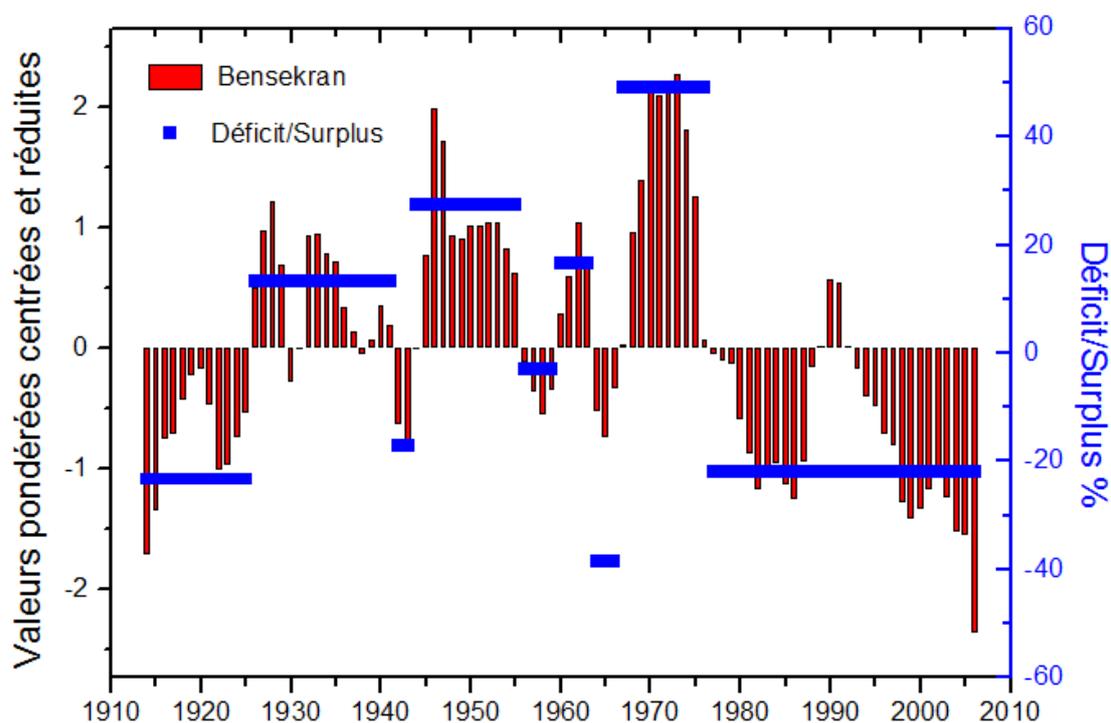


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies du printemps.

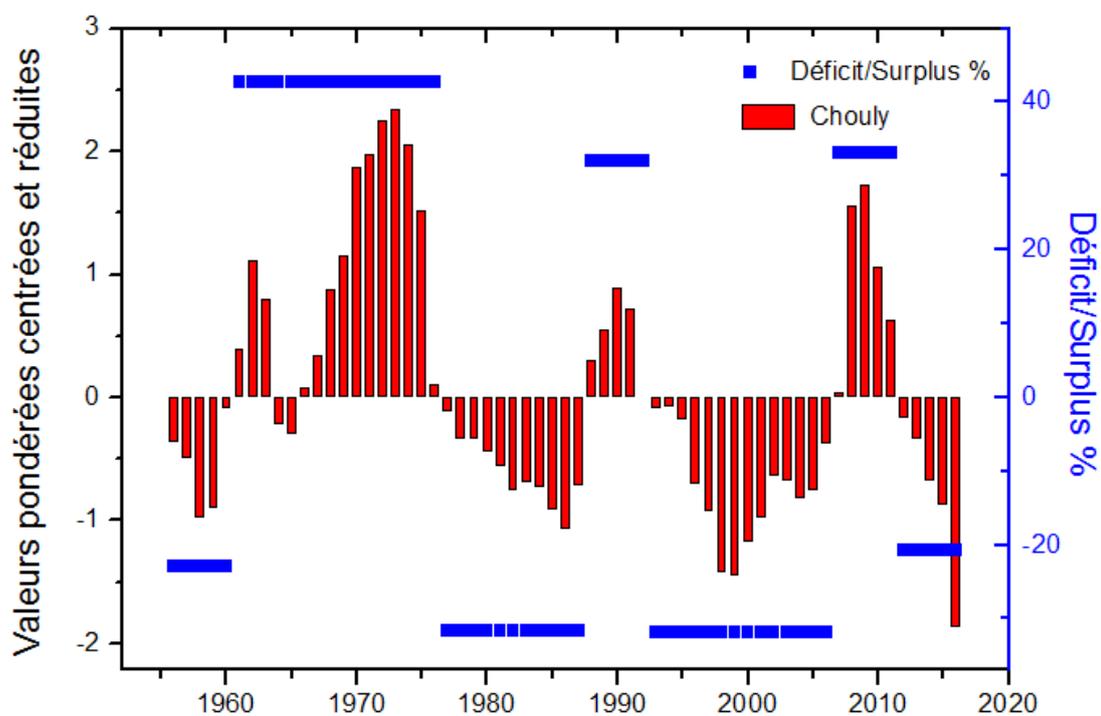


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies du printemps.

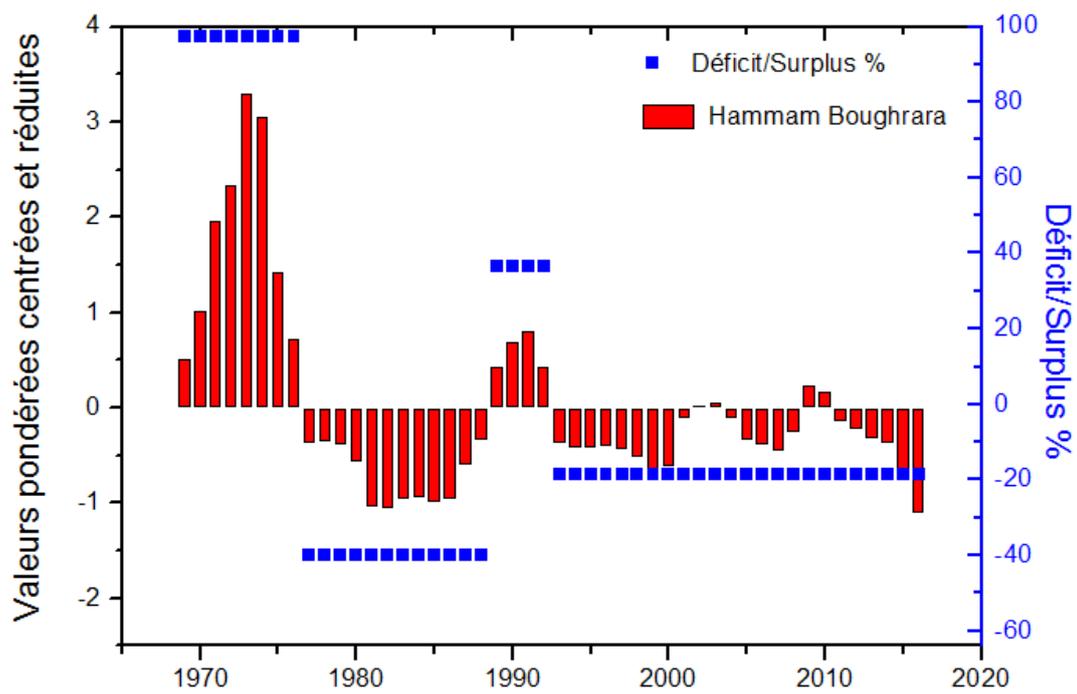


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies du printemps.

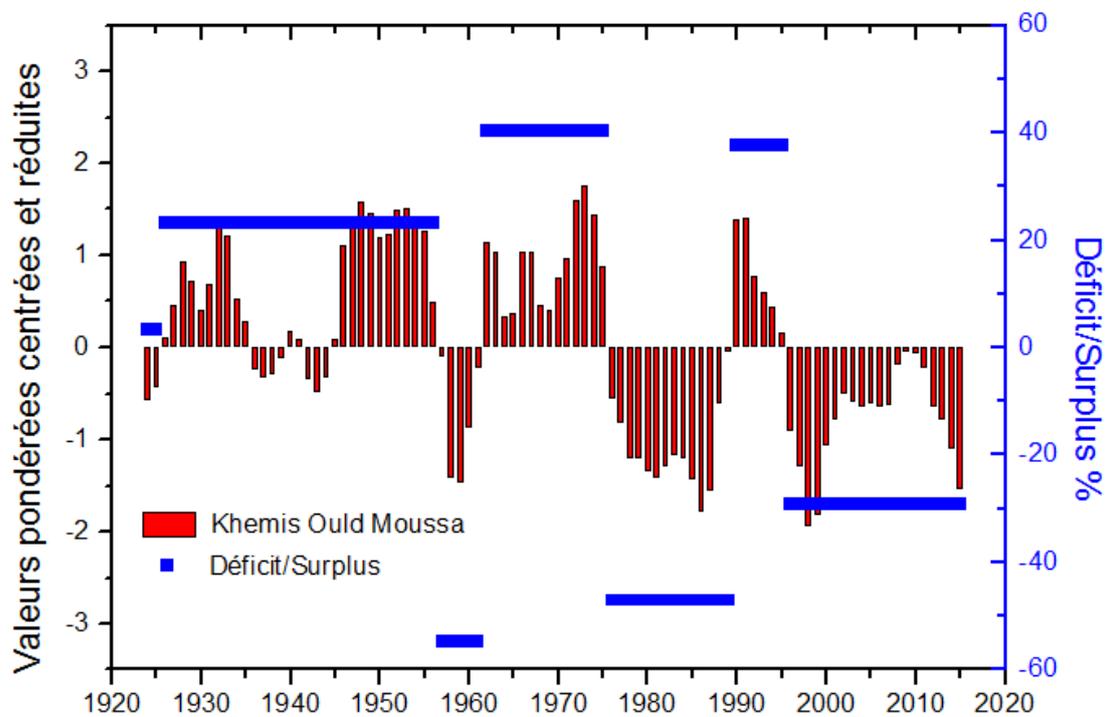


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies du printemps.

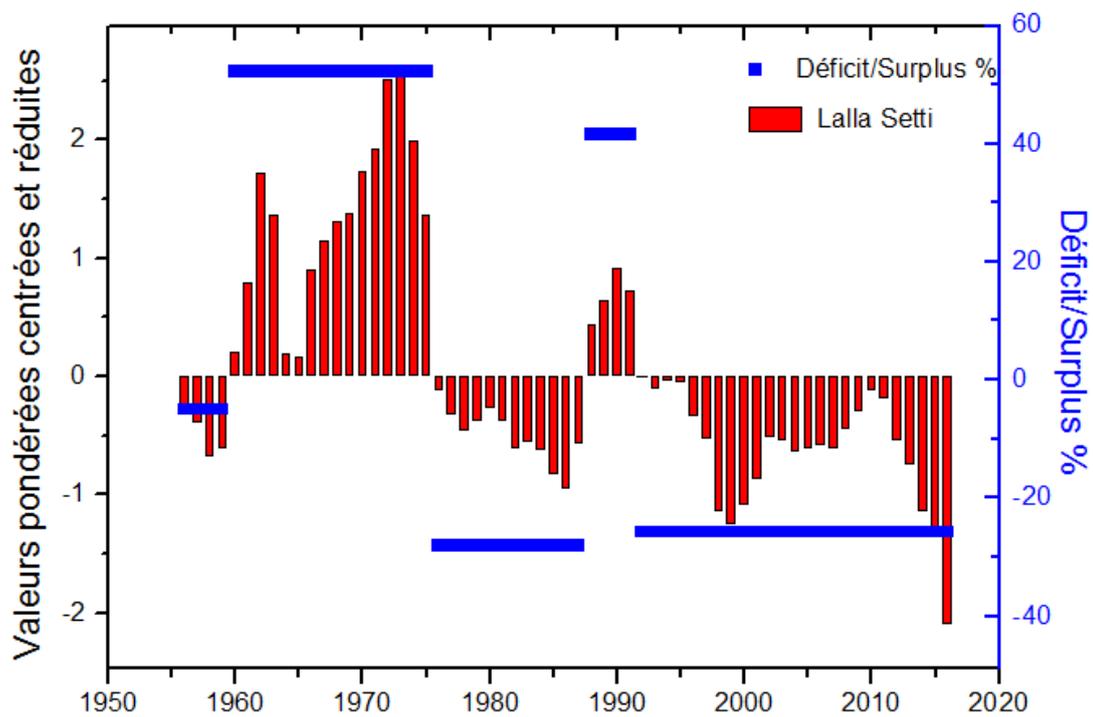


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies du printemps.

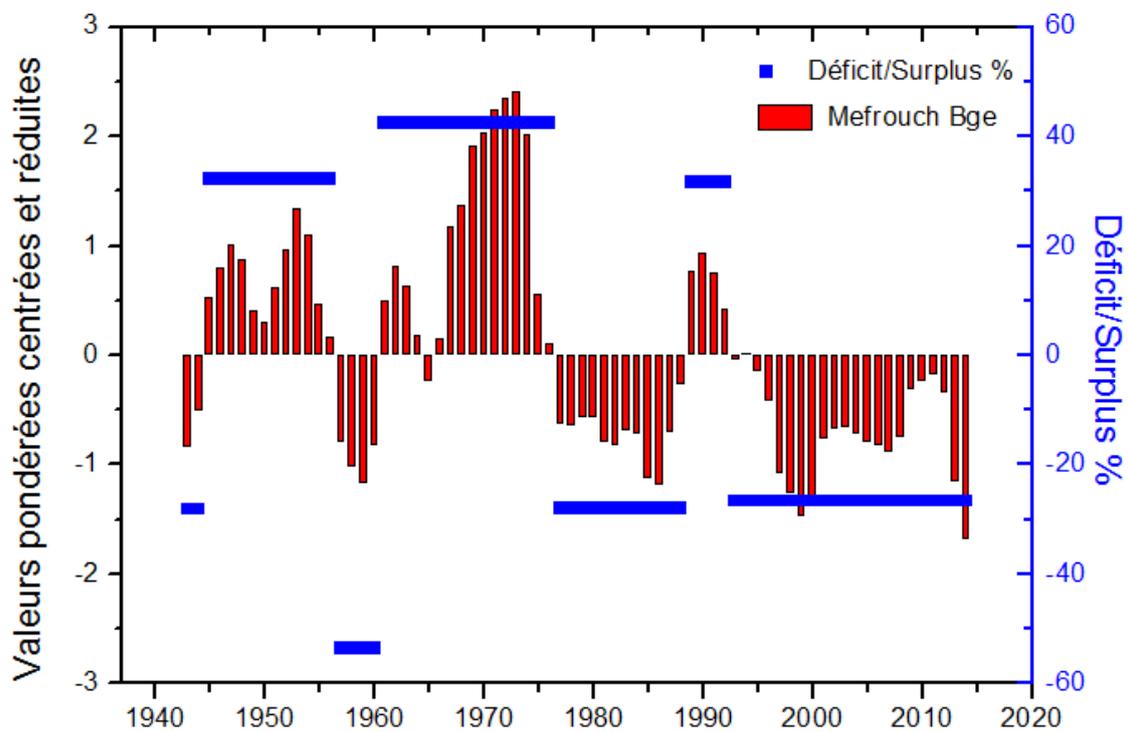


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies du printemps.

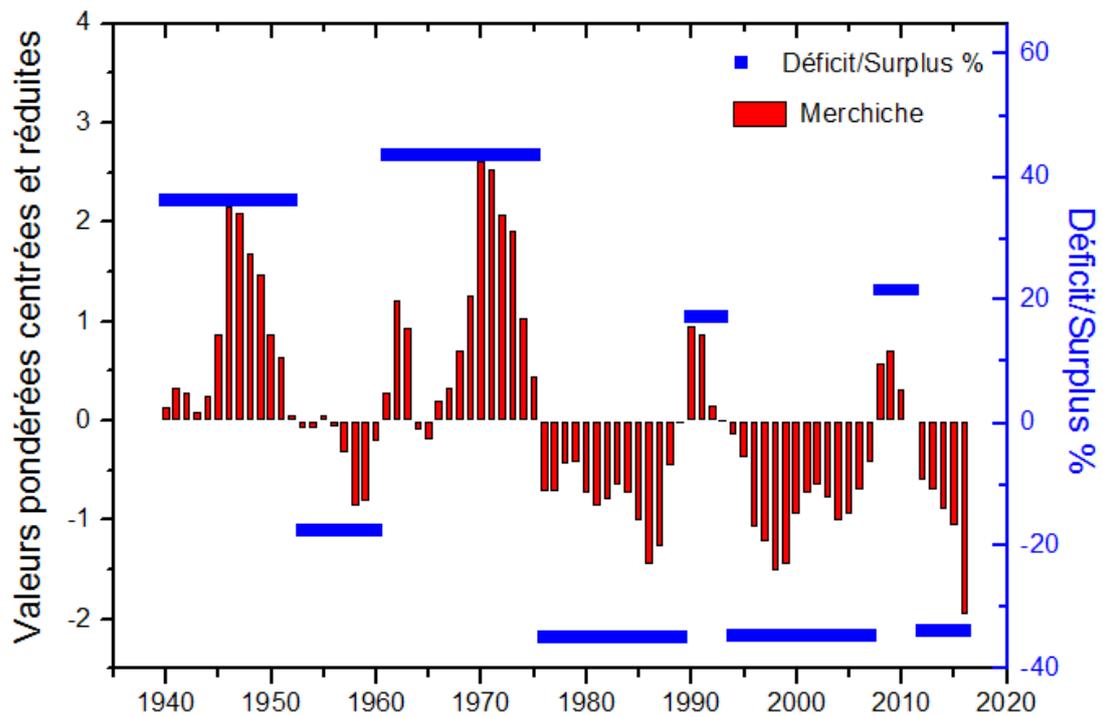


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies du printemps.

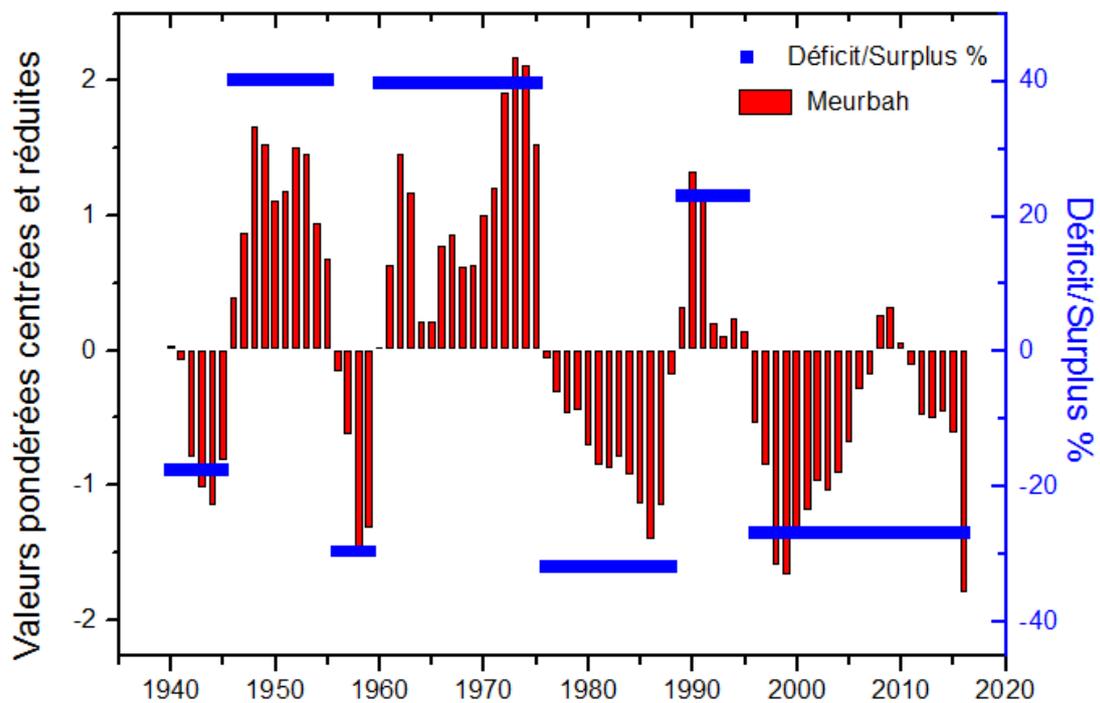


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies du printemps.

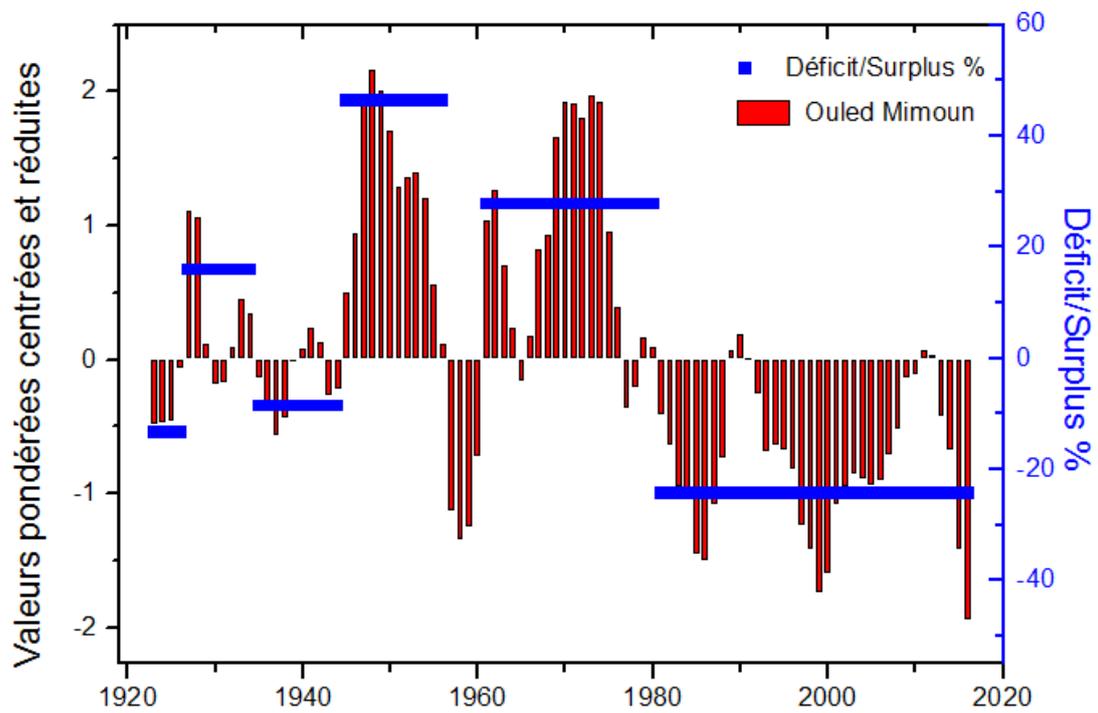


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies du printemps.

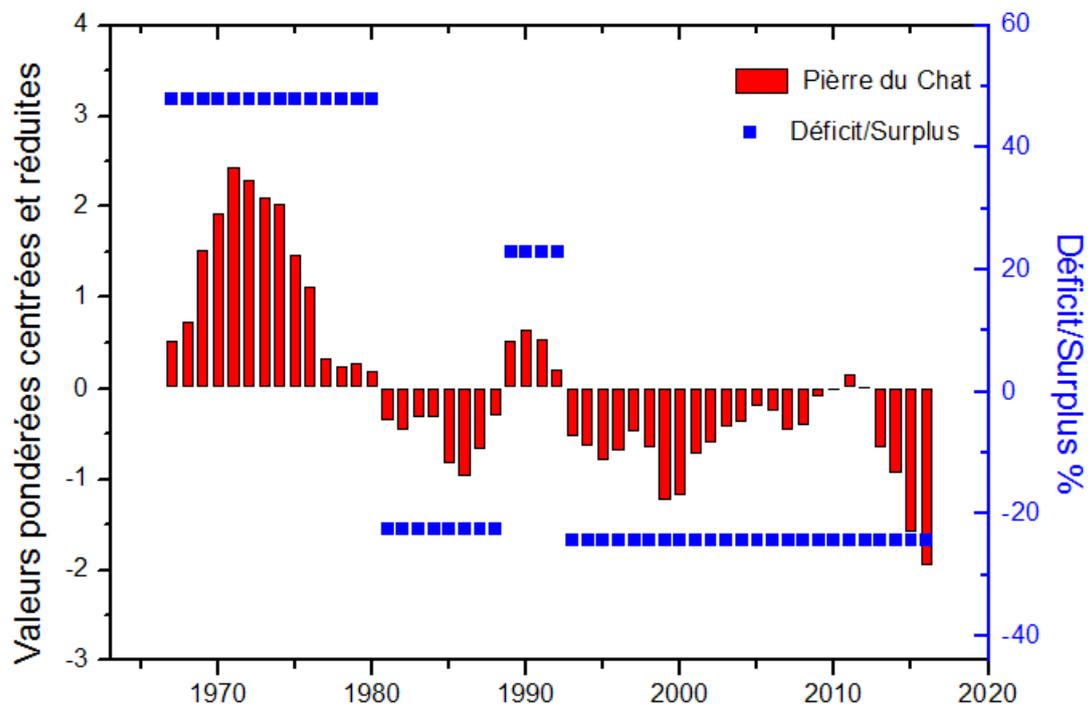


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies du printemps.

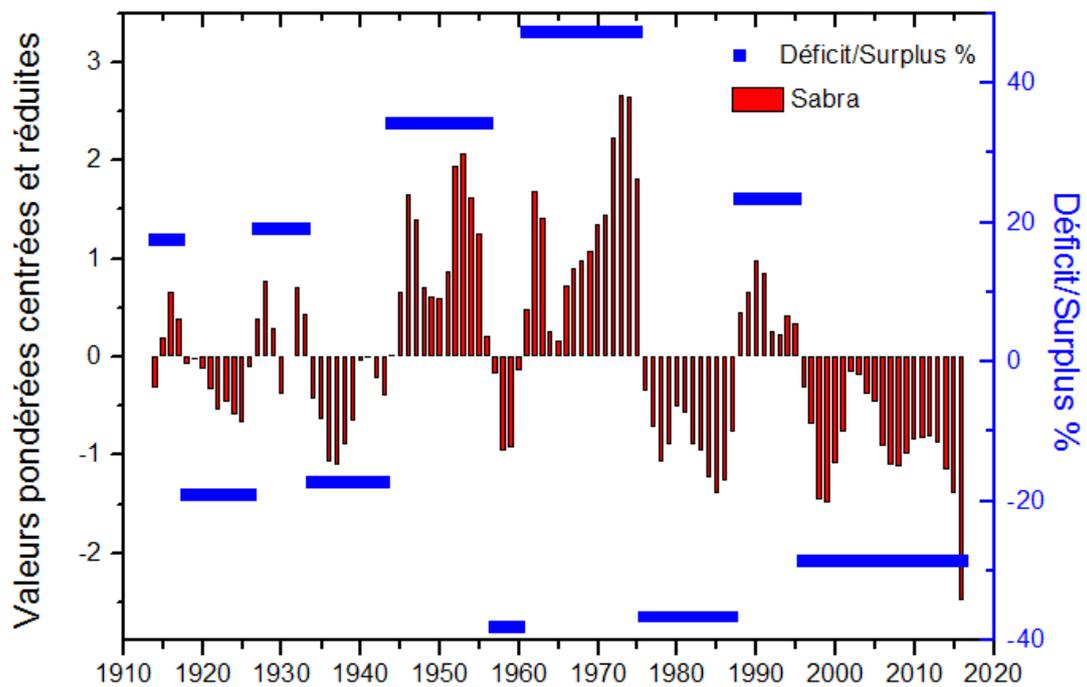


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies du printemps.

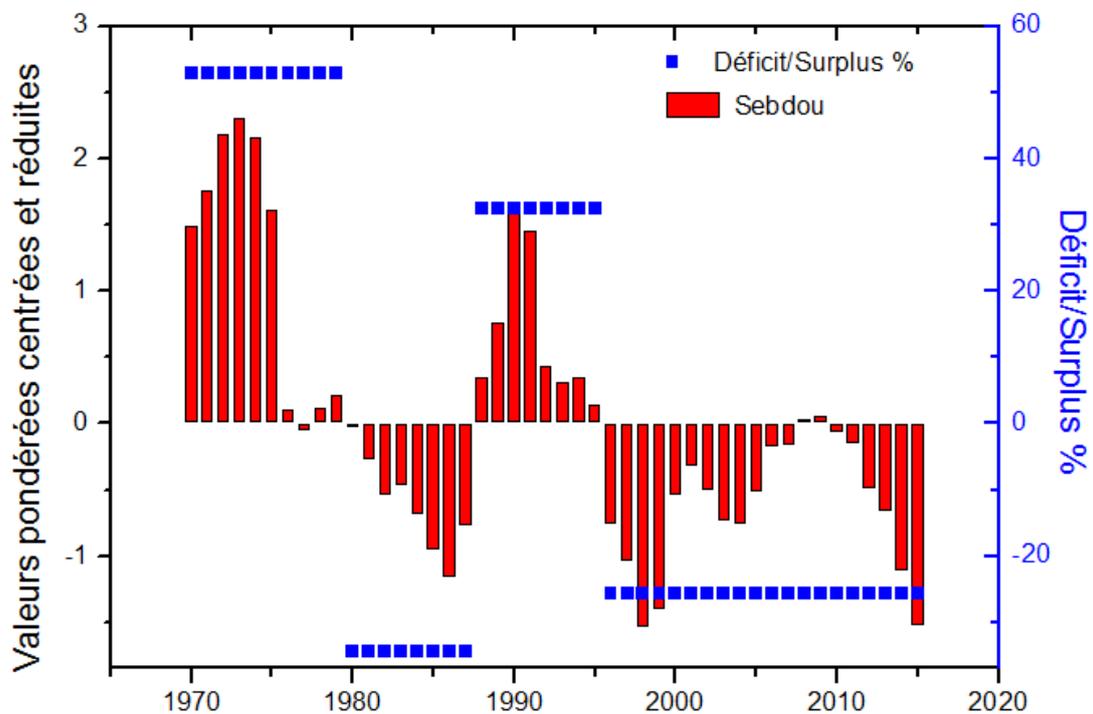


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies du printemps.

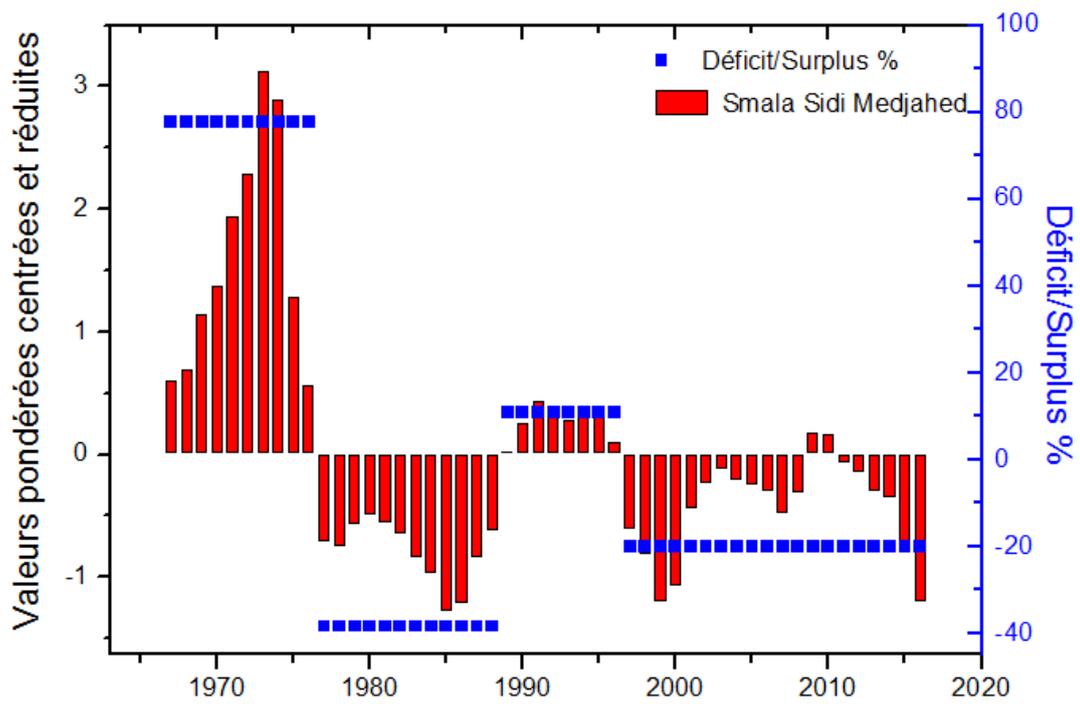


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies du printemps.

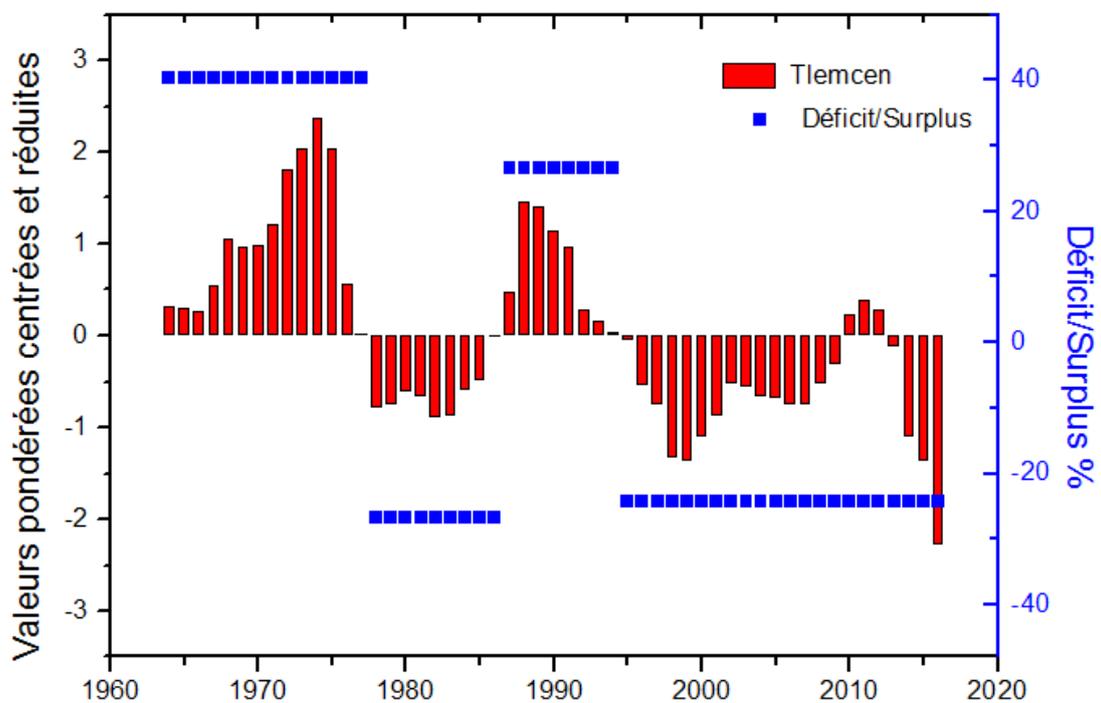


Figure B26. Évolution des indices centrés réduits pondérés des pluies du printemps.

Tableau C1. Résultats du test de corrélation sur le rang des pluies d'automne.

STATION	Date d'observation	H ₀	Rang Intervalle de confiance	U
Beni Ouassine	1953-2012	rejetée	90%	1,7858
Beni Bahdel Bge	1939-2016	rejetée	95%,90%	2,3169
Khemis Ould Moussa	1924-2015	Acceptée	99%,95%,90%	-1,194
Merchiche	1940-1996	Acceptée	99%,95%,90%	0,3607
Hammam Boughrara	1969-2016	Acceptée	99%,95%,90%	1,6354
Sabra	1914-2016	Acceptée	99%,95%,90%	-1,268
Chouly	1956-2016	Acceptée	99%,95%,90%	0,4356
Meurbah	1940-2016	Acceptée	99%,95%,90%	0,6685
Ouled Mimoun	1923-2016	Acceptée	99%,95%,90%	-1,4078
Mefrouch Bge	1943-2014	Acceptée	99%,95%,90%	0,9722
Bensekran	1914-2006	Acceptée	99%,95%,90%	-1,4536
Lalla Setti	1956-2016	Acceptée	99%,95%,90%	0,0996
Pierre du Chat	1967-2016	rejetée	90%	1,7148
Sebdou	1975-2015	Acceptée	99%,95%,90%	0,8805
Smala Sidi Medjahed	1967-2016	Acceptée	99%,95%,90%	1,2296
Tlemcen	1964-2010	Acceptée	99%,95%,90%	1,4574

Tableau C2. Résultats du test de corrélation sur le rang des pluies d'hiver.

STATION	Date d'observation	H ₀	Rang Intervalle de confiance	U
Beni Ouassine	1953-2012	Acceptée	99%,95%,90%	-1,5052
Beni Bahdel Bge	1939-2016	rejetée	95%,90%	-2,524
Khemis Ould Moussa	1924-2015	rejetée	99%,95%,90%	-3,8315
Merchiche	1940-1996	rejetée	95%,90%	-2,3135
Hammam Boughrara	1969-2016	Acceptée	99%,95%,90%	0,6577
Sabra	1914-2016	rejetée	95%,90%	-1,9975
Chouly	1956-2016	Acceptée	99%,95%,90%	-1,0579
Meurbah	1940-2016	Acceptée	99%,95%,90%	-1,4251
Ouled Mimoun	1923-2016	rejetée	99%,95%,90%	-3,7856
Mefrouch Bge	1943-2014	rejetée	95%,90%	-2,2848
Bensekran	1914-2006	rejetée	95%,90%	-2,1771
Lalla Setti	1956-2016	rejetée	95%,90%	-2,5265
Pierre du Chat	1967-2016	Acceptée	99%,95%,90%	1,3802
Sebdou	1975-2015	Acceptée	99%,95%,90%	-1,4108
Smala Sidi Medjahed	1967-2016	Acceptée	99%,95%,90%	-0,3764
Tlemcen	1964-2010	Acceptée	99%,95%,90%	-0,3068

Tableau C3. Résultats du test de corrélation sur le rang des pluies du printemps.

STATION	Date d'observation	H ₀	Rang Intervalle de confiance	U
Beni Ouassine	1953-2012	rejetée	99%,95%,90%	-2,6022
Beni Bahdel Bge	1939-2016	rejetée	95%,90%	-2,4636
Khemis Ould Moussa	1924-2015	rejetée	99%,95%,90%	-2,6915
Merchiche	1940-1996	rejetée	99%,95%,90%	-2,7533
Hammam Boughrara	1969-2016	Acceptée	99%,95%,90%	-1,4221
Sabra	1914-2016	Acceptée	99%,95%,90%	-1,4846
Chouly	1956-2016	Acceptée	99%,95%,90%	-1,618
Meurbah	1940-2016	rejetée	95%,90%	-2,076
Ouled Mimoun	1923-2016	rejetée	99%,95%,90%	-2,662
Mefrouch Bge	1943-2014	rejetée	95%,90%	-2,489
Bensekran	1914-2006	Acceptée	99%,95%,90%	-1,1815
Lalla Setti	1956-2016	rejetée	99%,95%,90%	-2,7256
Pierre du Chat	1967-2016	rejetée	99%,95%,90%	-3,1201
Sebdou	1975-2015	rejetée	95%,90%	-2,244
Smala Sidi Medjahed	1967-2016	rejetée	90%	-1,6646
Tlemcen	1964-2010	rejetée	99%,95%,90%	-2,7308

Tableau C4. Résultats du test de corrélation sur le rang des pluies d'été.

STATION	Date d'observation	H ₀	Rang Intervalle de confiance	U
Beni Ouassine	1953-2012	Acceptée	99%,95%,90%	-1,4031
Beni Bahdel Bge	1939-2016	Acceptée	99%,95%,90%	0,0992
Khemis Ould Moussa	1924-2015	rejetée	99%,95%,90%	-3,076
Merchiche	1940-1996	Acceptée	99%,95%,90%	0,2551
Hammam Boughrara	1969-2016	Acceptée	99%,95%,90%	1,1021
Sabra	1914-2016	rejetée	99%,95%,90%	-3,0234
Chouly	1956-2016	rejetée	90%	-1,8046
Meurbah	1940-2016	Acceptée	99%,95%,90%	0,6949
Ouled Mimoun	1923-2016	Acceptée	99%,95%,90%	-1,0681
Mefrouch Bge	1943-2014	Acceptée	99%,95%,90%	-0,7389
Bensekran	1914-2006	rejetée	95%,90%	-2,3165
Lalla Setti	1956-2016	rejetée	99%,95%,90%	-2,9746
Pierre du Chat	1967-2016	Acceptée	99%,95%,90%	0,3597
Sebdou	1975-2015	Acceptée	99%,95%,90%	0,8048
Smala Sidi Medjahed	1967-2016	Acceptée	99%,95%,90%	1,4806
Tlemcen	1964-2010	Acceptée	99%,95%,90%	-1,2887

Tableau C5. Résultats de tests de Pettitt et segmentation d'Hubert des pluies d'automnes.

STATION	Date d'observation	Pettitt					Hubert						
		Année de rupture	Probabilité associée	Moy 1	Moy 2	R (%)	Année de rupture	Moy 1	Moy 2	R (%)	Moy 3	R (%)	Moy 4
Beni Ouassine	1953-2012	Pas de rupture					2006	64,5	146,7	127,3			
Beni Bahdel Bge	1939-2016	Pas de rupture					2011,2012	95,7	314,0	228,2	63,3	-79,8	
Khemis Ould Moussa	1924-2015	1941	5,54E-02	156,4	93,0	-40,5	1951,1999	140,6	75,8	-46,1	132,6	74,9	
Merchiche	1940-1996	Pas de rupture					Pas de rupture						
Hammam Boughrara	1969-2016	1996	3,81E-02	58,4	94,2	61,2	2007,2012	65,6	153,2	133,7	49,5	-67,7	
Sabra	1914-2016	1941	3,75E-02	132,1	94,4	-28,5	1950,1951	118,2	325,9	175,7	93,6	-71,3	
Chouly	1956-2016	Pas de rupture					Pas de rupture						
Meurbah	1940-2016	Pas de rupture					1941	242,0	105,9	-56,2			
Ouled Mimoun	1923-2016	Pas de rupture					1949,1951	132,6	313,3	136,2	94,7	-69,8	
Mefrouch Bge	1943-2014	Pas de rupture					1949,1951	115,8	363,9	214,3	142,2	-60,9	
Bensekran	1914-2006	Pas de rupture					1949,1951	118,1	253,0	114,2	92,6	-63,4	
Lalla Setti	1956-2016	Pas de rupture					Pas de rupture						
Pierre du Chat	1967-2016	Pas de rupture					Pas de rupture						
Sebdou	1975-2015	Pas de rupture					Pas de rupture						
Smala Sidi Medjahed	1967-2016	Pas de rupture					2006,2012	68,4	158,6	131,7	51,9	-67,3	
Tlemcen	1964-2010	Pas de rupture					2006,2012	113,8	232,6	104,5	104,0	-55,3	

Tableau C6. Résultats de tests de Pettitt et segmentation d'Hubert des pluies d'hiver.

STATION	Date d'observation	Pettitt					Hubert					
		Année de rupture	Probabilité associée	Moy 1	Moy 2	R (%)	Année de rupture	Moy 1	Moy 2	R (%)	Moy 3	R (%)
Beni Ouassine	1953-2012	Pas de rupture					Pas de rupture					
Beni Bahdel Bge	1939-2016	1973	1,52E-02	226,8	163,2	-28,0	1980	221,7	156,8	-29,3		
Khemis Ould Moussa	1924-2015	1973	5,25E-04	264,8	168,7	-36,3	1968	270,5	171,5	-36,6		
Merchiche	1940-1996	1980	1,99E-02	202,9	143,4	-29,3	1949,195	203,7	473,0	132,2	166,3	-64,9
Hammam Bouhrara	1969-2016	Pas de rupture					Pas de rupture					
Sabra	1914-2016	1964	3,79E-02	187,5	149,3	-20,4	1980	182,8	141,1	-22,8		
Chouly	1956-2016	Pas de rupture					Pas de rupture					
Meurbah	1940-2016	Pas de rupture					Pas de rupture					
Ouled Mimoun	1923-2016	1955	5,33E-04	211,2	142,2	-32,7	1955	211,2	142,2	-32,7		
Mefrouch Bge	1943-2014	1980	6,98E-02	289,0	223,2	-22,8	1950	365,2	244,5	-33,1		
Bensekran	1914-2006	1964	3,38E-03	213,8	150,4	-29,7	1925,1964	140,1	236,4	68,7	150,4	-36,4
Lalla Setti	1956-2016	1980	1,56E-02	260,6	186,3	-28,5	1980	260,6	186,3	-28,5		
Pièrre du Chat	1967-2016	Pas de rupture					Pas de rupture					
Sebdou	1975-2015	1986	9,43E-02	179,1	134,1	-25,1	Pas de rupture					
Smala Sidi Medjahed	1967-2016	Pas de rupture					Pas de rupture					
Tlemcen	1964-2010	Pas de rupture					Pas de rupture					

Tableau C7. Résultats de tests de Pettitt et segmentation d'Hubert des pluies du printemps.

STATION	Date d'observation	Pettitt					Hubert					
		Année de rupture	Probabilité associée	Moy 1	Moy 2	R (%)	Année de rupture	Moy 1	Moy 2	R (%)	Moy 3	R (%)
Beni Ouassine	1953-2012	1977	1,98E-02	123,8	76,1	-38,6	1969,1975	105,3	186,4	77,1	77,1	-58,7
Beni Bahdel Bge	1939-2016	1975	7,75E-03	199,7	122,5	-38,7	1975	199,7	122,5	-38,7		
Khemis Ould Moussa	1924-2015	1975	7,19E-04	203,4	126,7	-37,7	1975	203,4	126,7	-37,7		
Merchiche	1940-1996	1975	8,05E-03	170,7	101,7	-40,4	1969,1975	152,2	263,1	72,8	101,7	-61,3
Hammam Boughrara	1969-2016	Pas de rupture					1969,1975	52,1	219,6	321,5	73,6	-66,5
Sabra	1914-2016	1975	5,12E-02	180,2	125,2	-30,5	1969,1975	168,7	287,0	70,1	125,2	-56,4
Chouly	1956-2016	Pas de rupture					Pas de rupture					
Meurbah	1940-2016	1975	2,47E-02	175,1	114,5	-34,6	1975	175,1	114,5	-34,6		
Ouled Mimoun	1923-2016	1981	2,95E-03	159,9	101,4	-36,6	1969,1975	152,4	241,2	58,3	106,6	-55,8
Mefrouch Bge	1943-2014	1975	7,30E-03	300,0	189,4	-36,9	1966,1975	256,3	416,5	62,5	189,4	-54,5
Bensekran	1914-2006	1980	7,58E-02	144,6	98,5	-31,9	1969,1975	137,1	228,3	66,5	103,3	-54,7
Lalla Setti	1956-2016	1975	1,60E-02	289,5	164,7	-43,1	1966,1975	224,4	369,0	64,4	164,7	-55,4
Pierre du Chat	1967-2016	1981	1,23E-02	149,4	82,5	-44,8	1976	168,4	86,1	-48,9		
Sebdou	1975-2015	Pas de rupture					1975	232,2	106,9	-53,9		
Smala Sidi Medjahed	1967-2016	1975	6,00E-02	212,6	90,7	-57,3	1975	212,6	90,7	-57,3		
Tlemcen	1964-2010	1976	1,85E-02	302,6	176,1	-41,8	1976	302,6	176,1	-41,8		

Tableau C8. Résultats de tests de Pettitt et segmentation d'Hubert des pluies d'été.

STATION	Date d'observation	Pettitt					Hubert							
		Année de rupture	Probabilité associée	Moy 1	Moy 2	R (%)	Année de rupture	Moy 1	Moy 2	R (%)	Moy 3	R (%)	Moy 4	R (%)
Beni Ouassine	1953-2012	1973	1,31E-02	18,6	8,1	-56,4	1979,198	15,9	67,0	321,6	6,6	-90,1		
Beni Bahdel Bge	1939-2016	Pas de rupture					1994,1995	17,2	96,0	457,6	15,1	-84,3		
Khemis Ould Moussa	1924-2015	1968	5,51E-04	24,1	13,3	-44,6	1939,1994,1995	33,6	15,1	-55,1	145,8	867,2	9,9	-93,2
Merchiche	1940-1996	Pas de rupture					Pas de rupture							
Hammam Boughrara	1969-2016	Pas de rupture					Pas de rupture							
Sabra	1914-2016	1968	1,10E-03	19,7	9,3	-52,9	1915,1917	15,7	81,3	418,2	13,5	-83,4		
Chouly	1956-2016	1975	6,26E-02	30,7	16,8	-45,3	1968	34,3	17,9	-48,0				
Meurbah	1940-2016	Pas de rupture					Pas de rupture							
Ouled Mimoun	1923-2016	Pas de rupture					Pas de rupture							
Mefrouch Bge	1943-2014	Pas de rupture					Pas de rupture							
Bensekran	1914-2006	1968	2,79E-02	17,1	8,2	-52,1	1961,1964	15,3	54,0	252,5	8,4	-84,4		
Lalla Setti	1956-2016	1976	7,05E-03	31,5	15,2	-51,8	1968	38,2	16,1	-57,7				
Pierre du Chat	1967-2016	Pas de rupture					Pas de rupture							
Sebdou	1975-2015	Pas de rupture					Pas de rupture							
Smala Sidi Medjahed	1967-2016	Pas de rupture					Pas de rupture							
Tlemcen	1964-2010	Pas de rupture					Pas de rupture							

Tableau C9. Résultats du test de Lee et Heghinian et Buishand appliqués aux pluies d'automne.

STATION	Date d'observation	Buishand					Lee et Heghinian				
		Année de rupture	(U) Statistique de Buishand	Moy 1	Moy 2	R (%)	Année de rupture	Densité de probabilité	Moy 1	Moy 2	R (%)
Beni Ouassine*	1953-2012	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Beni Bahdel Bge	1939-2016	1996	-128,4782	85,6	129,2	50,9	1998	0,0972	86,2	132,3	53,5
Khemis Ould Moussa	1924-2015	1951	83,9311	140,6	90,0	-36,0	1941	0,1988	156,4	93,0	-40,5
Merchiche	1940-1996	Pas de rupture					1998	0,0442	90,6	118,8	31,1
Hammam Boughrara	1969-2016	1998	-53,4169	58,8	97,5	65,8	1998	0,1263	58,8	97,5	65,8
Sabra	1914-2016	1938	229,484	136,2	94,6	-30,6	1938	0,1444	136,2	94,6	-30,6
Chouly	1956-2016	Pas de rupture					1958	0,0741	156,9	103,5	-34,0
Meurbah	1940-2016	Pas de rupture					1941	0,2553	242,0	105,9	-56,2
Ouled Mimoun	1923-2016	1951	100,9715	145,1	94,7	-34,7	1951	0,1623	145,1	94,7	-34,7
Mefrouch Bge	1943-2014	Pas de rupture					2006	0,0867	136,3	221,6	62,6
Bensekran	1914-2006	1959	7,1164	122,8	89,4	-27,2	1917	0,0443	48,5	108,5	123,9
Lalla Setti	1956-2016	Pas de rupture					1958	0,1373	228,5	134,7	-41,0
Pierre du Chat	1967-2016	1998	-364,8565	74,6	110,8	48,6	1998	0,083	74,6	110,8	48,6
Sebdou	1975-2015	Pas de rupture					1970	0,0945	24,9	97,6	291,2
Smala Sidi Medjahed	1967-2016	1996	-31,4872	64,6	97,9	51,4	2006	0,091	68,4	115,9	69,3
Tlemcen	1964-2010	1998	-703,6057	106,4	165,6	55,6	1998	0,1534	106,4	165,6	55,6

* Normalité non vérifiée la méthode de Buishand et Lee Heghinian n'ont pas été exécutées.

Tableau C10. Résultats du test de Lee et Heghinian et Buishand appliqués aux pluies d'hiver.

STATION	Date d'observation	Buishand					Lee et Heghinian				
		Année de rupture	(U) Statistique de Buishand	Moy 1	Moy 2	R (%)	Année de rupture	Densité de probabilité	Moy 1	Moy 2	R (%)
Beni Ouassine	1953-2012	Pas de rupture					1980	0,0912	120,0	86,8	-27,7
Beni Bahdel Bge	1939-2016	1980	834,2085	221,7	156,8	-29,3	1980	0,1254	221,7	156,8	-29,3
Khemis Ould Moussa	1924-2015	1973	991,1393	264,8	168,7	-36,3	1968	0,1235	270,5	171,5	-36,6
Merchiche	1940-1996	1980	928,7267	202,9	143,4	-29,3	1980	0,0737	202,9	143,4	-29,3
Hammam Boughrara	1969-2016	Pas de rupture					2012	0,1128	94,8	153,3	61,7
Sabra	1914-2016	1964	983,4728	187,5	149,3	-20,4	1980	0,078	182,8	141,1	-22,8
Chouly	1956-2016	Pas de rupture					1964	0,0841	229,9	166,3	-27,7
Meurbah	1940-2016	1978	239,9636	203,0	152,4	-24,9	1964	0,0478	218,1	158,8	-27,2
Ouled Mimoun	1923-2016	1955	1478,4702	211,2	142,2	-32,7	1955	0,2209	211,2	142,2	-32,7
Mefrouch Bge	1943-2014	1964	1203,7722	312,6	236,4	-24,4	1950	0,1371	365,2	244,5	-33,1
Bensekran	1914-2006	1964	1460,8613	213,8	150,4	-29,7	1964	0,2485	213,8	150,4	-29,7
Lalla Setti	1956-2016	1980	1046,3049	260,6	186,3	-28,5	1980	0,1184	260,6	186,3	-28,5
Pierre du Chat	1967-2016	Pas de rupture					2012	0,156	126,6	209,6	65,5
Sebdou	1975-2015	Pas de rupture					1986	0,0656	179,1	134,1	-25,1
Smala Sidi Medjahed	1967-2016	Pas de rupture					2015	0,0828	114,9	233,4	103,1
Tlemcen	1964-2010	Pas de rupture					1964	0,1045	400,3	194,3	-51,4

Tableau C11. Résultats du test de Lee et Heghinian et Buishand appliqués aux pluies du printemps.

STATION	Date d'observation	Buishand					Lee et Heghinian				
		Année de rupture	(U) Statistique de Buishand	Moy 1	Moy 2	R (%)	Année de rupture	Densité de probabilité	Moy 1	Moy 2	R (%)
Beni Ouassine	1953-2012	1977	377,7142	123,8	76,1	-38,6	1975	0,1016	126,5	77,1	-39,1
Beni Bahdel Bge	1939-2016	1975	10,3597	199,7	122,5	-38,7	1975	0,1554	199,7	122,5	-38,7
Khemis Ould Moussa	1924-2015	1975	1416,8654	203,4	126,7	-37,7	1975	0,2892	203,4	126,7	-37,7
Merchiche	1940-1996	1975	341,7719	170,7	101,7	-40,4	1975	0,2051	170,7	101,7	-40,4
Hammam Bouhrara	1969-2016	Pas de rupture					1975	0,3736	195,7	73,6	-62,4
Sabra	1914-2016	1975	373,4517	180,2	125,2	-30,5	1975	0,1029	180,2	125,2	-30,5
Chouly	1956-2016	1981	6,3271	180,0	128,6	-28,5	1976	0,0782	191,4	129,1	-32,6
Meurbah	1940-2016	1975	341,5721	175,1	114,5	-34,6	1975	0,1426	175,1	114,5	-34,6
Ouled Mimoun	1923-2016	1981	412,3701	159,9	101,4	-36,6	1981	0,2023	159,9	101,4	-36,6
Mefrouch Bge	1943-2014	1975	1414,2018	300,0	189,4	-36,9	1975	0,2449	300,0	189,4	-36,9
Bensekran	1914-2006	1975	880,2333	145,9	103,3	-29,2	1980	0,0794	144,6	98,5	-31,9
Lalla Setti	1956-2016	1975	698,8802	289,5	164,7	-43,1	1975	0,3469	289,5	164,7	-43,1
Pierre du Chat	1967-2016	1981	530,2979	149,4	82,5	-44,8	1976	0,3403	168,4	86,1	-48,9
Sebdou	1975-2015	1981	5,5949	175,9	104,7	-40,5	1975	0,2342	232,2	106,9	-53,9
Smala Sidi Medjahed	1967-2016	1977	6,878	190,3	90,7	-52,3	1975	0,3886	212,6	90,7	-57,3
Tlemcen	1964-2010	1976	6,3051	302,6	176,1	-41,8	1976	0,1904	302,6	176,1	-41,8

Tableau C12. Résultats du test de Lee et Heghinian et Buishand appliqués aux pluies d'été.

STATION	Date d'observation	Buishand					Lee et Heghinian				
		Année de rupture	(U) Statistique de Buishand	Moy 1	Moy 2	R (%)	Année de rupture	Densité de probabilité	Moy 1	Moy 2	R (%)
Beni Ouassine*	1953-2012	/					/				
Beni Bahdel Bge*	1939-2016	/					/				
Khemis Ould Moussa	1924-2015	1968	55,5793	24,1	13,3	-44,6	1939	0,1565	33,6	15,4	-54,0
Merchiche*	1940-1996	/					/				
Hammam Boughrara	1969-2016	Pas de rupture					1969	0,1181	0,0	7,2	
Sabra*	1914-2016	/					/				
Chouly	1956-2016	1975	73,3242	30,7	16,8	-45,3	1968	0,2129	34,3	17,9	-48,0
Meurbah	1940-2016	Pas de rupture					1941	0,1544	49,0	20,7	-57,8
Ouled Mimoun	1923-2016	Pas de rupture					1925	0,0377	29,2	16,1	-44,7
Mefrouch Bge	1943-2014	Pas de rupture					2012	0,0481	21,5	40,9	89,8
Bensekran	1914-2006	1968	31,6272	17,1	8,2	-52,1	1968	0,0802	17,1	8,2	-52,1
Lalla Setti	1956-2016	1976	56,6347	31,5	15,2	-51,8	1968	0,3029	38,2	16,1	-57,7
Pierre du Chat*	1967-2016	/					/				
Sebdou	1975-2015	Pas de rupture					2008	0,0693	20,0	33,0	64,9
Smala Sidi Medjahed*	1967-2016	/					/				
Tlemcen	1964-2010	Pas de rupture					1977	0,1057	28,7	15,8	-44,9

* Normalité non vérifiée la méthode de Buishand et Lee Heghinian n'ont pas été exécutées.