

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En: **Hydraulique**

Option: **Hydraulique urbaine**

Présenté par :

AZZOUZ Souheyla Nouara

MESLI Siham

Thème

**Application des indices de sécheresse dans le bassin versant de la
basse Mekerra (région de Sidi Bel Abbas)**

Soutenu publiquement, le / / , devant le jury composé de :

M. GHENIM. A. N	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mme. BABA HAMED. K	Professeur	Univ. Tlemcen	Encadreur
M. BOUANANI. A	Professeur	Univ. Tlemcen	Co-encadreur
Mme. DJEDID. H	Maître de conférences B	Univ. Tlemcen	Examinatrice

2019-2020

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier **Allah** le tout puissant, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Au second lieu, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre chère encadreur Professeur **BABA HAMED Kamila**, pour son suivi et pour son énorme soutien qu'elle n'a cessé de nous prodiguer tout au long de la période de ce mémoire. Ses conseils pertinents avec écoute, amabilité ont permis à notre travail d'aboutir et de voir le jour.

Nous tenons à adresser nos expressions de remerciements et de respect les plus distinguées à notre co-encadreur Professeur **BOUANANI Abderrazak**, pour toute sa gentillesse, pour ses précieux conseils et pour sa patience avec nous.

Nous adressons aussi nos remerciements à madame **DJEDID Hayet**, Maitre de conférences à l'université de Tlemcen pour l'intérêt qu'elle a porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et l'enrichir par ses propositions.

Nous remercions vivement le Professeur **GHENIM Abderrahmane Nekkache** pour avoir accepté la rude tâche d'être Président de notre jury. Nous en sommes très honorées.

Nos remerciements s'étendent également à tous nos enseignants (es) du Département d'Hydraulique de l'Université de Tlemcen durant nos années d'études.

Enfin, nous remercions tous ceux qui nous ont aidé à accomplir notre travail, de près comme de loin.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail accompagné d'un profond
amour :*

*À ma famille qui m'a élevé avec une éducation digne.
Son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui.*

*À Souheyla, ma chère amie avant d'être mon binôme,
pour ce qu'elle a fait pour la réussite de ce mémoire.*

À tous mes chers collègues et amis.

*À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que
ce travail soit possible.*

Et à tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

Siham

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail et ma profonde gratitude,

A la mémoire de mon Père,

vous avez toujours été pour moi un exemple du père respectueux, honnête, je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité, ta compréhension... Ton soutien fut une lumière durant tout mon parcours.

A ma mère,

À qui je dois la réussite, pour l'éducation qu'elle m'a prodiguée, avec tous les moyens et au prix de tous les sacrifices qu'elle a consentis à mon égard, pour le sens du devoir qu'elle m'a enseigné depuis mon enfance.

*Je dédie ce travail en témoignage de ma profonde affection et de mon attachement indéfectible, à mon frère **Zeríabe** et mes sœurs **Hanane** et **Chaymaae**.*

*A mes aimables amis qui m'ont accompagné durant mon Chemin d'études, mon binôme **Síham** et ma meilleure amie **Mebrak Sarah**.*

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

Souheyla

Résumé

La sécheresse est un phénomène mondial très préoccupant qui a suscité l'attention de plusieurs chercheurs afin de la caractériser et éviter les catastrophes naturelles ayant marqué la vie des populations.

Le travail consiste en l'évaluation de la sécheresse dans la région de Sidi Bel Abbès appartenant au sous bassin de la basse Mekerra situé au Nord-ouest algérien à climat semi-aride.

Cette région est caractérisée par une forte irrégularité climatique, une sécheresse parfois prononcée qui pourra avoir un impact certain sur les écoulements.

Le présent travail a permis de :

- Mettre en évidence la variabilité climatique,
- D'évaluer la sécheresse par l'utilisation de divers indices statistiques (SPI, DI, PN, CZI, MCZI, RAI...) à l'aide du logiciel MDM qui servent à quantifier sa sévérité.

Les résultats de ces traitements statistiques appliqués sur une série de données pluviométriques (1977/1978-2018/2019) à des échelles de temps différentes ont mis en évidence une augmentation significative de la fréquence de la sécheresse et de sa sévérité pendant les décennies 80 et 90, tandis que la période entre 2007/2008 et 2013/2014 est la moins vulnérable.

Face à ce phénomène complexe, l'utilisation des indicateurs de sécheresse est considérée comme un outil essentiel et nécessaire à la prise de décision à long terme.

Mots clés: Mekerra, Sidi Bel Abbès, variabilité, sécheresse, indices de sécheresse, programme MDM.

ملخص

إن الجفاف ظاهرة عالمية مثيرة للقلق الشديد، وقد اجتذبت اهتمام العديد من الباحثين بغية وصفها وتفادي الكوارث الطبيعية التي اتسمت بها حياة الناس. يتألف العمل من تقييم الجفاف في منطقة سيدي بلعباس التي تنتمي إلى الحوض الفرعي مقرة السفلى الواقعة في شمال غرب الجزائر والتي تتمتع بمناخ شبه قاحل. تتسم هذه المنطقة بتدبب مناخي قوي، وجفاف يكون حاداً أحياناً وقد يكون له أثر معين على التدفقات. وقد مكن العمل الحالي من:

- إبراز تقلب المناخ،
 - تقييم الجفاف بالاعتماد على مؤشرات إحصائية مختلفة (SPI، DI، PN، CZI، MCZI، RAI...) باستخدام برنامج MDM الذي يعمل على تحديد مدى خطورته.
- قد أظهرت نتائج هذه العلاجات الإحصائية المطبقة على سلسلة من بيانات سقوط الأمطار (1977/1978-2018/2019) على نطاقات زمنية مختلفة زيادة كبيرة في وتيرة الجفاف وشدته خلال الثمانينات والتسعينات، في حين أن الفترة ما بين عامي 2007/2008 و 2013/2014 هي الأقل تعرضاً للمخاطر. وفي مواجهة هذه الظاهرة المعقدة، يعتبر استخدام مؤشرات الجفاف أداة أساسية وضرورية لأخذ الإجراءات على المدى الطويل.

الكلمات المفتاحية: مقرة، سيدي بلعباس، التباين، الجفاف، مؤشرات الجفاف، برنامج MDM.

Abstract

Drought is a very worrying global phenomenon that has attracted the attention of several researchers in order to characterize it and avoid the natural disasters that have marked the people's life.

The work consists in the assessment of the drought in the region of Sidi Bel Abbes belonging to the sub-basin of the lower Mekerra located in the North-West of Algeria with semi-arid climate.

This region is characterized by a strong climatic irregularity and sometimes a pronounced drought which can have an impact on flows.

The present work has made it possible to:

- Highlight the climate variability,
- To evaluate the drought by the use of various statistical indices (SPI, DI, PN, CZI, MCZI, RAI...) using the software MDM which serve to quantify its severity.

The results of these statistical treatments applied to a series of rainfall data (1977/1978-2018/2019) at different time scales have shown a significant increase in drought frequency and severity during the 1980s and 1990s, while the period between 2007/2008 and 2013/2014 is the least vulnerable.

Faced with this complex phenomenon, the use of drought indicators is considered as an essential and necessary tool for long-term decision-making.

Keywords: Mekerra, Sidi Bel Abbes, variability, drought, drought indices, MDM software.

Table des matières

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Table des matières	
Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Recherche bibliographique.....	3-12
I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition de la climatologie.....	3
I.3. Climat.....	3
I.3.1. Définition du climat.....	3
I.3.2. Climat en Algérie.....	3
I.4. Définition du système climatique.....	4
I.5. Définition de la variabilité climatique.....	4
I.6. Définition du changement climatique.....	5
I.7. Définition des variables utilisées dans l'étude.....	5
I.7.1. Définition des précipitations.....	5
I.7.2. Définition de la température.....	5
I.8. Sécheresse.....	5
I.8.1. Définition de la sécheresse.....	6
I.8.2. Sécheresse en Algérie.....	6
I.8.3. Types de sécheresse.....	7
I.8.3.1. Sécheresse météorologique.....	7
I.8.3.2. Sécheresse agricole.....	7
I.8.3.3. Sécheresse hydrologique.....	7
I.8.3.4. Sécheresse socioéconomique.....	8
I.8.4. Relations entre les différents types de sécheresse.....	8
I.8.5. Causes et conséquences de la sécheresse.....	9
I.8.5.1. Causes de la sécheresse.....	9
I.8.5.1.a. Insuffisance des précipitations.....	9
I.8.5.1.b. Causes humaines.....	9
I.8.5.1.c. Assèchement du flux d'eau de surface.....	9
I.8.5.1.d. Réchauffement climatique.....	9
I.8.5.2. Conséquences de la sécheresse.....	9
I.8.6. Impact de la sécheresse.....	10
I.8.7. Mesures mises en place en cas de sécheresse.....	11
I.8.8. Changement climatique et la sécheresse.....	12
I.9. Conclusion.....	12
Chapitre II : Présentation de la zone d'étude.....	13-31
II.1. Introduction.....	13
II.2. Présentation de la zone d'étude.....	13
II.2.1. Présentation du bassin versant de l'Oued Mekerra.....	13
II.2.2. Situation géographique du sous bassin versant de la basse Mekerra.....	14

II.3. Caractéristiques morphométriques.....	15
II.3.1. Caractéristiques géométriques.....	15
II.3.1.1. Superficie.....	15
II.3.1.2. Périmètre.....	16
II.3.1.3. Longueur du thalweg (Lt).....	16
II.3.2. Caractéristique de forme.....	16
II.3.2.1. Indice de compacité de Gravelius (Kc).....	16
II.3.2.2. Rectangle équivalent.....	16
II.3.2.3. Facteur de forme.....	17
II.3.2.4. Coefficient de circularité.....	17
II.3.3. Courbe hypsométrique.....	18
II.3.3.1. Altitudes caractéristiques.....	19
II.3.3.1.a. Altitude moyenne du bassin versant (H_{moy}).....	19
II.3.3.1.b. Altitude médiane du bassin versant (H_{med}).....	19
II.3.3.1.c. Altitude minimale du bassin versant (H_{min}).....	19
II.3.3.1.d. Altitude maximale du bassin versant (H_{max}).....	19
II.3.4. Indices de pente.....	19
II.3.4.1. Indice de pente global (I_g).....	19
II.3.4.2. Indice de pente moyenne (I_m).....	20
II.3.4.3. Indice de pente de ROCHE (I_p).....	20
II.3.5. Dénivelée (D).....	20
II.3.6. Dénivelée spécifique (D_s).....	21
II.3.7. Classification du bassin versant de la Mekerra.....	21
II.3.8. Rayon de circularité.....	22
II.4. Étude du réseau hydrographique.....	22
II.4.1. Rapport de confluence (R_c).....	23
II.4.2. Rapport des longueurs (R_L).....	24
II.4.3. Fréquence des cours d'eau.....	24
II.4.4. Densité de drainage (D_d).....	25
II.4.5. Coefficient de torrencialité.....	25
II.4.6. Temps de concentration.....	25
II.5. Ressources en eau.....	26
II.5.1. Ressources en eau superficielles.....	26
II.5.2. Ressources en eau souterraines.....	26
II.6. Contexte géologique.....	27
II.7. Contexte hydrogéologique.....	27
II.8. Étude du sol.....	28
II.9. Aspect climatologique.....	28
II.9.1. Évapotranspiration.....	29
II.9.2. Vent.....	29
II.10. Conclusion.....	30
Chapitre III : Climatologie.....	32-54
III.1. Introduction.....	32
III.2. Analyse des séries de précipitations et de températures.....	32
III.2.1. Analyse des précipitations.....	32
III.2.1.1. Variation annuelle des précipitations.....	32
III.2.1.1.a. Coefficient d'immodération (CI).....	34
III.2.1.1.b. Répartition des variations des précipitations annuelles.....	34
III.2.1.2. Variation des précipitations moyennes mensuelles.....	34

III.2.1.3. Variation des précipitations moyennes saisonnières.....	35
III.2.2. Analyse des températures.....	36
III.2.2.1. Variations des températures moyennes annuelles.....	36
III.2.2.1.a. Répartition des variations moyennes annuelles des températures.....	37
III.2.2.2. Variation des températures moyennes mensuelles.....	38
III.2.2.3. Variation des températures moyennes saisonnières.....	39
III.3. Analyse du climat.....	40
III.3.1. Diagramme pluviothermique de Gaussen et Bagnouls.....	40
III.3.2. Indice climatique : Indice d'aridité de De Martonne.....	40
III.3.2.1. Indice d'aridité annuel de De Martonne.....	41
III.3.2.2. Indice d'aridité mensuel de De. Martonne.....	42
III.4. Analyse statistique de la série des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019).....	42
III.4.1. Application de la loi normale (loi de Gauss) à la série des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbas pour la période 1977/1978-2018/2019.....	43
III.4.1.1. Test graphique.....	45
III.4.1.2. Test numérique : Test de Khi carré (χ^2).....	45
III.4.2. Application de la loi Log-normale à la série des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019).....	46
III.4.2.1. Test graphique.....	47
III.4.2.2. Test numérique : Test de Khi carré χ^2	48
III.4.3. Comparaison entre les résultats de la loi normale et la loi Log-normale.....	49
III.5. Bilan hydrologique.....	49
III.5.1. Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP).....	49
III.5.2. Estimation du ruissellement (R).....	50
III.5.3. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR).....	51
III.5.4. Estimation de la réserve utile (RFU).....	51
III.5.5. Bilan simplifié selon Thornthwaite.....	51
III.5.6. Estimation de l'infiltration (I).....	52
III.5.7. Estimation de l'écoulement (Q).....	53
III.6. Conclusion.....	53

Chapitre IV : Détermination des ruptures dans les séries des

précipitations et des températures.....	55-127
IV.1. Introduction.....	55
IV.2. Présentation du logiciel Khronostat.....	55
IV.3. Méthode d'analyse de série chronologique.....	55
IV.3.1. Tests de vérification du caractère aléatoire.....	56
IV.3.1.1. Calcul de l'autocorrélogramme et de son intervalle de confiance.....	56
IV.3.1.2. Test de corrélation sur le rang.....	56
IV.3.2. Tests de détection de rupture.....	57
IV.3.2.1. Test de Buishand et ellipse de Bois.....	57
IV.3.2.2. Méthode non paramétrique de Pettitt.....	58
IV.3.2.3. Méthode bayésienne de Lee et Heghinian.....	58
IV.3.2.4. Segmentation d'Hubert.....	59
IV.4. Résultats et discussions.....	60
IV.4.1. Analyse des précipitations annuelles.....	60
IV.4.1.1. Tests de vérification du caractère aléatoire.....	60

IV.4.1.1.a. Calcul de l'autocorrélogramme et son intervalle de confiance.....	60
IV.4.1.1.b. Test de corrélation sur le rang.....	61
IV.4.1.2. Tests de détection de rupture.....	62
IV.4.1.2.a. Test de Buishand et ellipse de Bois.....	62
IV.4.1.2.b. Méthode non paramétrique de Pettitt.....	62
IV.4.1.2.c. Méthode bayésienne de Lee et Heghinian.....	63
IV.4.1.2.d. Segmentation d'Hubert.....	64
IV.4.2. Analyse des précipitations mensuelles.....	64
IV.4.2.1. Tests de vérification du caractère aléatoire.....	64
IV.4.2.1.a. Calcul de l'autocorrélogramme et de son intervalle de confiance....	64
IV.4.2.1.b. Test de corrélation sur le rang.....	69
IV.4.2.2. Tests de détection de rupture.....	71
IV.4.2.2.a. Test de Buishand et ellipse de Bois.....	71
IV.4.2.2.b. Méthode non paramétrique de Pettitt.....	75
IV.4.2.2.c. Méthode bayésienne de Lee et Heghinian.....	77
IV.4.2.2.d. Segmentation d'Hubert.....	79
IV.4.3. Analyse des précipitations saisonnières.....	81
IV.4.3.1. Tests de vérification du caractère aléatoire.....	81
IV.4.3.1.a. Calcul de l'autocorrélogramme et son intervalle de confiance.....	81
IV.4.3.1.b. Test de corrélation sur le rang.....	83
IV.4.3.2. Tests de détection de rupture.....	84
IV.4.3.2.a. Test de Buishand et ellipse de Bois.....	84
IV.4.3.2.b. Méthode non paramétrique de Pettitt.....	86
IV.4.3.2.c. Méthode bayésienne de Lee et Heghinian.....	87
IV.4.3.2.d. Segmentation d'Hubert.....	88
IV.4.4. Analyse des températures moyennes annuelles.....	89
IV.4.4.1. Tests de vérification du caractère aléatoire.....	89
IV.4.4.1.a. Calcul de l'autocorrélogramme et son intervalle de confiance.....	89
IV.4.4.1.b. Test de corrélation sur le rang.....	91
IV.4.4.2. Tests de détection de rupture.....	91
IV.4.4.2.a. Test de Buishand et ellipse de Bois.....	91
IV.4.4.2.b. Méthode non paramétrique de Pettitt.....	92
IV.4.4.2.c. Méthode bayésienne de Lee et Heghinian.....	93
IV.4.4.2.d. Segmentation d'Hubert.....	93
IV.4.5. Analyse des températures moyennes mensuelles.....	94
IV.4.5.1. Tests de vérification du caractère aléatoire.....	94
IV.4.5.1.a. Calcul de l'autocorrélogramme et de son intervalle de confiance....	94
IV.4.5.1.b. Test de corrélation sur le rang.....	98
IV.4.5.2. Tests de détection de rupture.....	101
IV.4.5.2.a. Test de Buishand et ellipse de Bois.....	101
IV.4.5.2.b. Méthode non paramétrique de Pettitt.....	105
IV.4.5.2.c. Méthode bayésienne de Lee et Heghinian.....	108
IV.4.5.2.d. Segmentation d'Hubert.....	110
IV.4.6. Analyse des températures moyennes saisonnières.....	111
IV.4.6.1. Tests de vérification du caractère aléatoire.....	111
IV.4.6.1.a. Calcul de l'autocorrélogramme et de son intervalle de confiance....	111
IV.4.6.1.b. Test de corrélation sur le rang.....	112
IV.4.6.2. Tests de détection de rupture.....	113
IV.4.6.2.a. Test de Buishand et ellipse de Bois.....	113
IV.4.6.2.b. Méthode non paramétrique de Pettitt.....	115

IV.4.6.2.c. Méthode bayésienne de Lee et Heghinian.....	116
IV.4.6.2.d. Segmentation d'Hubert.....	117
IV.4.7. Calcul des variations moyennes.....	118
IV.4.7.1. Pour les précipitations.....	118
IV.4.7.1.a. À l'échelle annuelle.....	118
IV.4.7.1.b. À l'échelle mensuelle.....	118
IV.4.7.1.c. À l'échelle saisonnière.....	120
IV.4.7.2. Pour les températures moyennes.....	121
IV.4.7.2.a. À l'échelle annuelle.....	121
IV.4.7.2.b. À l'échelle mensuelle.....	121
IV.4.7.2.c. À l'échelle saisonnière.....	125
IV.5. Conclusion.....	127
Chapitre V : Indices de sécheresse.....	128-139
V.1. Introduction.....	128
V.2. Logiciel MDM.....	128
V.3. Indice standardisé des précipitations (SPI).....	129
V.3.1. Définition.....	129
V.3.2. Méthode de calcul.....	129
V.3.2.1. Distribution Gamma.....	130
V.3.2.2. Formule.....	130
V.3.3. Classification des valeurs (SPI).....	131
V.3.4. Avantages de méthode SPI.....	131
V.3.5. Inconvénients de méthode SPI.....	131
V.3.6. Indice SPI sur 1 mois.....	132
V.3.7. Indice SPI sur 3 mois.....	132
V.3.8. Indice SPI sur 6 mois.....	132
V.3.9. Indice SPI sur 9 mois.....	133
V.3.10. Indice SPI sur 12 mois jusqu'à 24 mois.....	133
V.4. Rapport à la normal (PN).....	133
V.5. Décile index (DI).....	134
V.6. China-Z Index (CZI) et Modified China-Z Index (MCZI).....	135
V.6.1. Différence entre CZI (China-Z Index) et MCZI (Modified CZI).....	136
V.7. Z-Score Index (ZSI).....	137
V.8. Rainfall Anomaly Index (RAI).....	137
V.9. Effective Drought Index (EDI).....	138
Chapitre VI : Résultats et discussion.....	140-264
VI.1. Introduction.....	140
VI.2. Calcul du SPI (Indice standardisé des précipitations).....	140
VI.2.1. À l'échelle annuelle.....	140
VI.2.2. À l'échelle mensuelle.....	142
VI.2.3. À l'échelle de 3 mois.....	150
VI.2.4. À l'échelle de 6 mois.....	158
VI.2.5. À l'échelle de 9 mois.....	166
VI.2.6. À l'échelle de 12 mois.....	174
VI.2.7. À l'échelle de 18 mois.....	182
VI.2.8. À l'échelle de 24 mois.....	189
VI.2.9. À l'échelle de 48 mois.....	197

VI.3. Calcul du PN (Indice du pourcentage des précipitations normale).....	205
VI.3.1. À l'échelle annuelle.....	205
VI.3.2. À l'échelle mensuelle.....	207
VI.3.3. À l'échelle saisonnière.....	216
VI.4. Calcul du DI (Indice décile).....	219
VI.4.1. À l'échelle annuelle.....	219
VI.4.2. À l'échelle mensuelle.....	221
VI.4.3. À l'échelle saisonnière.....	228
VI.5. Calcul du CZI (Indice Z chinois).....	231
VI.5.1. Calcul du MCZI (Indice Z chinois modifié).....	239
VI.6. Calcul du RAI (Indice d'anomalie de pluviosité).....	247
VI.7. Calcul du Z-Score.....	254
VI.7.1. À l'échelle annuelle.....	254
VI.7.2. À l'échelle mensuelle.....	256
VI.8. Conclusion.....	263
Conclusion générale.....	265
Références bibliographiques.....	267
Webographie.....	271
Annexes.....	272

Liste des abréviations

ACP : Analyse en composantes principales

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques

BSh : Climat semi-aride chaud

BSk : Climat semi-aride froid

BWh : Climat désertique chaud

BWk : Climat désertique froid

CCNUCC : Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques

CI : Coefficient d'immodération

Csa : Climat méditerranéen chaud

C_T : Coefficient de torrencialité

C_v : Coefficient de variation

CZI : Indice Z chinois

Da : Déficit agricole

D_a : Densité de drainage

DI : Indice décile

EDI : Indice de sécheresse effectif

ETP : Évapotranspiration potentielle

ETR : Évapotranspiration réelle

F_s : Fréquence des cours d'eau

I : Indice d'aridité de De. Martonne

I_g : Indice de pente global

I_m : Indice de pente moyen

I_p : Indice de pente de ROCHE

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

K_c : Coefficient de Gravelius

L_t : Longueur du thalweg

MCZI : Indice Z chinois modifié

MDM : Surveillance météorologique de la sécheresse

MSE : Maison des Sciences de l'Eau

NOAA : Administration Nationale des Océans et de l'Atmosphère des États-Unis

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

O.R.S.T.O.M : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-mer

\bar{P} : Moyenne des précipitations annuelles

PN : Indice du pourcentage des précipitations normale

R² : Coefficient de détermination

RAI : Indice d'anomalie de pluviosité

R_c : Rapport de confluence

R_{ci} : Coefficient de circularité

R_f : Facteur de forme

RFU : Réserve utile

R_L : Rapport des longueurs

SPI : Indice standardisé des précipitations

T_c : Temps de concentration

V : Variance

ZSI : Indice Z-Score

ΔR : Variation de réserves

χ^2 : Khi carré

μ : Variable réduite de Gauss

σ : Écart type

Liste des figures

N°	Intitulé de la figure	Page
Chapitre I		
I.1	Carte du climat en Algérie selon la classification de Köppen	4
I.2	Relations entre les différents types de sécheresse	8
I.3	Types de sécheresse, manifestations dans le temps et leurs impacts	11
Chapitre II		
II.1	Situation du bassin versant de la Macta	14
II.2	Situation géographique de la zone d'étude sous bassin de la basse Mekerra	15
II.3	Courbe hypsométrique du bassin versant de la basse Mekerra	18
II.4	Réseau hydrographique de la basse Mekerra	23
II.5	Carte hydrogéologique de la plaine de Sidi Bel Abbes	28
II.6	Évolution spatiale de l'évapotranspiration réelle	29
Chapitre III		
III.1	Variation des précipitations annuelles à la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	33
III.2	Répartition des années humides et sèches à la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	34
III.3	Variation des précipitations moyennes mensuelles à la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	35
III.4	Variation des précipitations moyennes saisonnières à la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	36
III.5	Variation des températures moyennes annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	37
III.6	Répartition des variations moyennes annuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	38
III.7	Variation des températures moyennes mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	39
III.8	Variation des températures moyennes saisonnières de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	39
III.9	Diagramme pluviothermique de Gaussen et Bagnouls de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	40
III.10	Abaque de De Martonne à la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	41
III.11	Ajustement graphique à la loi de Gauss des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	45
III.12	Ajustement à la loi normale des Logs des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	48
Chapitre IV		
IV.1	Calcul de l'autocorrélogramme et son intervalle de confiance pour les variations annuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	60
IV.2	Autocorrélogramme pour les variations annuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	61
IV.3	Résultats du test de corrélation sur le rang pour les variations annuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	61

IV.4	Résultats du test de Buishand pour les variations annuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)	62
IV.5	Ellipse de Bois pour les variations annuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)	62
IV.6	Résultats du test de Pettitt pour les variations annuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)	63
IV.7	Évolution de la variable U du test de Pettitt pour les variations annuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)	63
IV.8	Résultats de la méthode bayésienne de Lee et Heghinian pour les variations annuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)	63
IV.9	Densité de probabilité a posteriori de la position d'un changement de précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)	63
IV.10	Segmentation d'Hubert pour les variations annuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)	64
IV.11	Calcul de l'autocorrélogramme et son intervalle de confiance pour les variations mensuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)	67
IV.12	Autocorrélogrammes des variations mensuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)	69
IV.13	Résultats du test de corrélation sur le rang pour les variations mensuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)	71
IV.14	Résultats du test de Buishand sur les variations mensuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)	73
IV.15	Ellipses de Bois pour les variations mensuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)	75
IV.16	Résultats du test de Pettitt sur les variations mensuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)	77
IV.17	Densité de probabilité a posteriori de la position d'un changement des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)	79
IV.18	Segmentation d'Hubert sur les variations mensuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)	81
IV.19	Calcul de l'autocorrélogramme et son intervalle de confiance pour les variations saisonnières des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)	82
IV.20	Autocorrélogrammes des variations saisonnières des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)	83
IV.21	Résultats du test de corrélation sur le rang pour les variations saisonnières des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)	84
IV.22	Résultats du test de Buishand pour les variations saisonnières des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)	85
IV.23	Ellipses de Bois pour les variations saisonnières des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)	86
IV.24	Résultats du test de Pettitt pour les variations saisonnières des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)	87
IV.25	Densité de probabilité à posteriori de la position d'un changement de précipitations saisonnières de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)	88

IV.26	Segmentation d'Hubert pour les variations saisonnières des précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	89
IV.27	Calcul de l'autocorrélogramme et de son intervalle de confiance pour les variations moyennes annuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	90
IV.28	Autocorrélogramme des variations moyennes annuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	90
IV.29	Résultats du test de corrélation sur le rang pour les variations moyennes annuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	91
IV.30	Résultats du test de Buishand sur les variations moyennes annuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	92
IV.31	Ellipse de Bois pour les variations moyennes annuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	92
IV.32	Résultats du test de Pettitt sur les variations moyennes annuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	92
IV.33	Évolution de la variable U du test de Pettitt sur les variations moyennes annuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	92
IV.34	Résultats de la méthode bayésienne de Lee et Heghinian sur les variations moyennes annuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	93
IV.35	Densité de probabilité à posteriori de la position d'un changement de températures moyennes annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	93
IV.36	Segmentation d'Hubert pour les variations moyennes annuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	94
IV.37	Calcul de l'autocorrélogramme et de son intervalle de confiance pour les variations moyennes mensuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	96
IV.38	Autocorrélogrammes des variations moyennes mensuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	98
IV.39	Résultats du test de corrélation sur le rang pour les variations moyennes mensuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	100
IV.40	Résultats du test de Buishand sur les variations moyennes mensuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	103
IV.41	Ellipses de Bois pour les variations moyennes mensuelles des températures à la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	105
IV.42	Résultats du test de Pettitt pour les variations moyennes mensuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	107
IV.43	Densité de probabilité à posteriori de la position d'un changement de températures moyennes mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	110
IV.44	Calcul de l'autocorrélogramme et des intervalles de confiance pour les variations moyennes saisonnières des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	111
IV.45	Autocorrélogrammes pour les variations moyennes saisonnières des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	112

IV.46	Résultats du test de corrélation sur le rang pour les variations moyennes saisonnières des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	113
IV.47	Résultats du test de Buishand pour les variations moyennes saisonnières des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	114
IV.48	Ellipses de Bois pour les variations moyennes saisonnières des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	115
IV.49	Résultats du test de Pettitt pour les variations moyennes saisonnières des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	116
IV.50	Densité de probabilité a posteriori de la position d'un changement de températures moyennes saisonnières de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	117
Chapitre VI		
VI.1	Évolution du SPI pour la série des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	141
VI.2	Répartition du SPI pour la série des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	141
VI.3	Évolution du SPI pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	146
VI.4	Répartition du SPI pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	149
VI.5	Évolution du SPI à l'échelle de 3 mois pour la série des précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	154
VI.6	Répartition du SPI à l'échelle de 3 mois pour la série de précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	157
VI.7	Évolution du SPI à l'échelle de 6 mois pour la série des précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	162
VI.8	Répartition du SPI à l'échelle de 6 mois pour la série des précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	165
VI.9	Évolution du SPI à l'échelle de 9 mois pour la série de précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	170
VI.10	Répartition du SPI-9 pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	173
VI.11	Évolution du SPI à l'échelle de 12 mois pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	178
VI.12	Répartition du SPI à l'échelle de 12 mois pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	181
VI.13	Évolution du SPI à l'échelle de 18 mois pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	185
VI.14	Répartition du SPI à l'échelle de 18 mois pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	188
VI.15	Évolution du SPI à l'échelle de 24 mois pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	193
VI.16	Répartition du SPI à l'échelle de 24 mois pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	196
VI.17	Évolution du SPI à l'échelle de 48 mois pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	201
VI.18	Répartition du SPI à l'échelle de 48 mois pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	204

VI.19	Évolution du PN pour la série des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	206
VI.20	Répartition du PN pour la série des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	206
VI.21	Évolution du PN pour la série de précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	212
VI.22	Répartition du PN pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	215
VI.23	Évolution du PN pour la série de précipitations saisonnières de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	217
VI.24	Répartition du PN pour la série de précipitations saisonnières de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	218
VI.25	Évolution du DI pour la série de précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	220
VI.26	Répartition du DI pour la série des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	220
VI.27	Évolution du DI pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	224
VI.28	Répartition du DI pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	227
VI.29	Évolution du DI pour la série de précipitations saisonnières à la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	229
VI.30	Répartition du DI pour la série des précipitations saisonnières à la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	230
VI.31	Évolution du CZI pour la série des précipitations mensuelles à la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	235
VI.32	Répartition du CZI pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	238
VI.33	Évolution du MCZI pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	243
VI.34	Répartition du MCZI pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	246
VI.35	Évolution du RAI pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	250
VI.36	Répartition du RAI pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	253
VI.37	Évolution du Z-Score pour la série de précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	255
VI.38	Répartition du Z-Score pour la série des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	255
VI.39	Évolution du Z-Score pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	260
VI.40	Répartition du Z-Score pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	263

Liste des tableaux

N°	Intitulé du tableau	Page
Chapitre II		
II.1	Caractéristique de forme du bassin de la basse Mekerra	17
II.2	Classement des altitudes selon la superficie du bassin versant de la Mekerra	18
II.3	Hauteurs caractéristiques du bassin versant de la basse Mekerra	19
II.4	Différents indices de pentes du bassin versant de la basse Mekerra	20
II.5	Classification du relief selon O.R.S.T.O.M	20
II.6	Classification du relief selon la dénivelée spécifique	21
II.7	Dénivelée, dénivelée spécifique et la classe du relief du bassin versant de la basse Mekerra	21
II.8	Classification des bassins versants selon leur superficie	22
II.9	Paramètres morphométriques du bassin de Mekerra	23
II.10	Rapport de confluence du bassin de la basse Mekerra	24
II.11	Rapport des longueurs du bassin de la basse Mekerra	24
II.12	Barrages exploités par la wilaya de Sidi Bel Abbes	26
II.13	Caractéristiques morphométriques du bassin de l'aval Mekerra	31
Chapitre III		
III.1	Totaux annuels des précipitations à la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	33
III.2	Variations des précipitations moyennes mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	35
III.3	Tableau des variations moyennes saisonnières des précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	35
III.4	Températures moyennes annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	36
III.5	Tableau des variations moyennes mensuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	38
III.6	Tableau des variations moyennes saisonnières des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	39
III.7	Tableau de la classification du climat de De Martonne	41
III.8	Classification du climat mensuel selon De Martonne de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	42
III.9	Paramètres de position et de dispersion pour les données de précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	43
III.10	Calcul de F et μ pour la série de précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	44
III.11	Résultats du test de Khi carré (χ^2)	46
III.12	Paramètres de position et de dispersion du logarithme décimal de la série des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	46
III.13	Calcul de F et μ pour la série du logarithme décimal des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	47
III.14	Tableau de résultats de Khi carré (χ^2)	48
III.15	Comparaison entre les résultats de la loi normale et la loi Log-normale	49

III.16	Estimation de l'ETP mensuelle à la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	50
III.17	Estimation du ruissellement annuel à la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	51
III.18	Estimation de l'ETR annuelle à la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	51
III.19	Bilan de Thornthwaite à la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	52
III.20	Estimation de l'infiltration annuelle à la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	52
III.21	Estimation de Q annuel à la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	53
Chapitre IV		
IV.1	Ruptures détectées par la méthode bayésienne de Lee et Heghinian sur les variations mensuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	78
IV.2	Ruptures détectées par la méthode bayésienne de Lee et Heghinian pour les variations moyennes saisonnières des précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	87
IV.3	Ruptures détectées par les ellipses de Bois sur les variations moyennes mensuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	101
IV.4	Ruptures détectées et les probabilités de dépassement par le test de Pettitt pour les variations moyennes mensuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	105
IV.5	Ruptures détectées par la méthode bayésienne de Lee et Heghinian pour les variations moyennes mensuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	108
IV.6	Ruptures détectées et ses segments d'Hubert pour les variations moyennes mensuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	110
IV.7	Ruptures détectées par les ellipses de Bois pour les variations moyennes saisonnières des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	114
IV.8	Ruptures détectées par la méthode bayésienne de Lee et Heghinian pour les variations moyennes saisonnières des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	116
IV.9	Ruptures détectées et ses segments d'Hubert pour les variations moyennes saisonnières des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	117
IV.10	Variations moyennes pour les précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	118
IV.11	Variations moyennes pour les précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	119
IV.12	Variations moyennes pour les précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	120
IV.13	Variations moyennes pour les températures moyennes annuelles des de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	121
IV.14	Variations moyennes pour les températures mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	122

IV.15	Variations moyennes pour les températures moyennes saisonnières de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)	125
Chapitre V		
V.1	Classification des sécheresses selon les valeurs du SPI	131
V.2	Classification des sécheresses selon les valeurs du PN	134
V.3	Classification des sécheresses selon les valeurs du DI	135
V.4	Classification des sécheresses selon les valeurs de CZI et MCZI	136
V.5	Classification des sécheresses selon les valeurs du ZSI	137
V.6	Classification des sécheresses selon les valeurs du RAI	138
V.7	Classification des sécheresses selon les valeurs d'EDI	139
Chapitre VI		
VI.1	Résultats de calcul du SPI annuel pour la série des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	140
VI.2	Résultats de calcul du SPI mensuel pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	142
VI.3	SPI maximaux et minimaux pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	143
VI.4	Résultats de calcul du SPI-3 mois pour la série des précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	150
VI.5	SPI maximaux et minimaux à l'échelle de 3 mois pour la série de précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	151
VI.6	Résultats de calcul du SPI-6 mois pour la série des précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	158
VI.7	SPI maximaux et minimaux à l'échelle de 6 mois pour la série des précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	159
VI.8	Résultats de calcul du SPI-9 mois pour la série des précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	166
VI.9	Valeurs de SPI-9 maximaux et minimaux pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	167
VI.10	Résultats de calcul du SPI-12 mois pour la série des précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	174
VI.11	Résultats de calcul du SPI-18 mois pour la série des précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	182
VI.12	Résultats de calcul du SPI-24 mois pour la série des précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	189
VI.13	Valeurs minimales du SPI-24 pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	190
VI.14	Résultats de calcul du SPI-48 mois pour la série des précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	197
VI.15	Résultats de calcul du PN annuel pour la série des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	205
VI.16	Résultats de calcul du PN mensuel pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	207
VI.17	Résultats de calcul du PN saisonnier pour la série des précipitations saisonnières de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	216
VI.18	Résultats de calcul du DI annuel pour la série des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	219
VI.19	Résultats de calcul du DI mensuel pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	221

VI.20	Résultats de calcul du DI saisonnier pour la série des précipitations saisonnières de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	228
VI.21	Résultats de calcul du CZI pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	231
VI.22	CZI maximaux et minimaux pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	232
VI.23	Résultats de calcul du MCZI pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	239
VI.24	Résultats de calcul du RAI pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	247
VI.25	Résultats de calcul du Z-Score annuel pour la série des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	254
VI.26	Résultats de calcul du Z-Score mensuel pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)	256

Introduction
générale

Au cours du dernier siècle, l'Afrique a subi une des plus fortes variations de la pluviométrie observées à l'échelle du globe. De ce fait la sécheresse a toujours été présente dans l'histoire des pays du Maghreb, ce qui a fait l'objet d'études de plusieurs chercheurs. L'Algérie a connu dans le passé des périodes d'intenses sécheresses, comme ce fut le cas au début du 20^{ème} siècle, entre 1910 et 1940. La région Nord-ouest de l'Algérie en particulier, a souffert d'une péjoration pluviométrique récurrente et persistante, aux conséquences souvent dramatiques sur les conditions de vie de la population, notamment rurale (Tatar et al., 2015).

De part, sa situation au Nord-ouest algérien le bassin versant de l'aval Mekerra d'une superficie de 1195 Km² est pris comme cas d'étude dans ce master. Le bassin comprend une importante nappe alluviale occupant la plaine agricole de Sidi Bel Abbes. Le cours d'eau de la Mekerra abrite deux barrages ; le premier au niveau d'oued Sarno qui connaît non seulement une difficulté pour son remplissage mais aussi un envasement partiel, le deuxième est le barrage Ecréteur de Tabia récemment mis en eau et dont le rôle principal est la protection de la ville de Sidi Bel Abbes en aval. En effet, la région a connu plusieurs inondations au cours de son histoire récente qui ont mené les autorités à opter pour ce type de barrage afin de ralentir la vitesse du courant et ralentir le déversement des eaux de crues sur les agglomérations en amont et sur la ville de Sidi Bel Abbes. Aussi, la variabilité importante du climat et le caractère très aléatoire de la pluviométrie de la région du bassin de la Mekerra nous incite à proposer et réaliser une étude de la sécheresse (variabilité climatique) afin de mieux connaître l'ampleur et les caprices de ce phénomène et son impact sur la région.

L'objectif principal de ce travail consiste à la caractérisation de la sécheresse dans le bassin versant de la basse Mekerra. Cette étude est menée à l'aide du **logiciel MDM** qui calcule un ensemble d'indices à différentes échelles de temps et qui sont :

- L'indice standardisé des précipitations (SPI) conçu en 1993 par les chercheurs de l'université Nebraska au Colorado (USA) et recommandé depuis 2009 de l'organisation mondiale de la météorologie,
- Le rapport à la normal (PN) créé par Gibbs et Maher en 1967 et décrit par Willeke et al (1994),
- Le décile des précipitations (DI),
- Le China-Z Index (CZI) et le CZI modifié (MCZI) établis par Ju et al en 1997,
- Le Rainfall Anomaly Index (RAI),
- L'indice de sécheresse effectif (EDI) qui a été élaboré à l'origine par Byun et Wilhite (1999).

Ces indices ont pour but de suivre les conditions de sécheresse, ainsi que les changements climatiques. Cette étude est basée sur les données pluviométriques mensuelles enregistrées durant la période 1978/1979–2018/2019, à la station de Sidi Bel Abbes (code 110305).

Notre travail est structuré en six chapitres accompagnés d'une introduction et d'une conclusion générale.

Dans l'introduction générale nous avons exposé la problématique, les objectifs et la méthodologie adoptée dans cette étude.

Introduction générale

Le premier chapitre : comprend une recherche bibliographique sur la sécheresse en général et en Algérie. De plus les concepts explicatifs de ce phénomène (les types et les caractéristiques de la sécheresse).

Le deuxième chapitre : englobe une présentation générale du bassin versant de l'aval Mekerra (situation géographique, climat, ressources en eaux, relief, sol, géologie et hydrologie).

Le troisième chapitre : traite de l'étude climatique de la région ayant pour but de mieux comprendre les caractéristiques climatiques et d'établir le bilan hydrologique.

Le quatrième chapitre : l'analyse de la variabilité climatique particulièrement pluviométrique par les techniques de détection des ruptures et des tendances dans les séries pluviométriques.

Le cinquième chapitre : décrit en détails les méthodes de détermination des indices de sécheresse utilisées et la démarche appliquée.

Le dernier chapitre : est consacré à la discussion des résultats obtenus et la caractérisation de la sécheresse où nous exposons les résultats de l'application des indices utilisés.

Une conclusion générale expose une synthèse des résultats trouvés lors de notre étude et des recommandations.

Chapitre I

Recherche

bibliographique

I.1. Introduction

La sécheresse est un phénomène naturel qui fait partie de la dynamique et l'évolution du climat. Sa notion est relative, mais sa principale caractéristique est la décroissance des disponibilités des ressources en eau, à cause du manque de pluie durant la période humide. Elle entraîne de graves déséquilibres hydrologiques du fonctionnement d'un bassin versant. En fonction de sa durée, elle se propage par son intensité dans le temps et dans l'espace (Chloé, 2013).

Ce chapitre rassemble tous les termes utilisés dans ce travail, à savoir, quelques définitions en relation avec la climatologie et la sécheresse dans plusieurs domaines, ainsi que son impact.

I.2. Définition de la climatologie

La climatologie est l'étude du climat, du fonctionnement du système climatique, de ses variations, de ses extrêmes et de ses influences sur une variété d'activités, y compris (OMM, 2018).

I.3. Climat

I.3.1. Définition du climat

Selon l'Office Mondial de Météorologie (OMM), le climat, au sens étroit, peut être défini comme les conditions météorologiques moyennes pour un lieu et une période donnés. Le climat peut être décrit en termes de descriptions statistiques des tendances centrales et de la variabilité des éléments pertinents tels que la température, les précipitations, la pression atmosphérique, l'humidité et les vents, ou par des combinaisons d'éléments, tels que les types et les phénomènes météorologiques, qui sont typiques d'un lieu ou d'une région, ou de la terre dans son ensemble, pendant une période donnée. Outre le fait d'être traité comme une entité statistique, le climat peut également être étudié comme un facteur déterminant, une ressource et un danger pour les activités humaines (OMM, 2018).

I.3.2. Climat en Algérie

Depuis le siècle dernier, plusieurs travaux sur la pluviométrie en Algérie ont été menés, mais la plupart sont basés sur le calcul de valeurs moyennes et l'analyse de surface de quelques sites. Ce n'est qu'en 1946 que les recherches de Seltzer sur le climat de l'Algérie ont établi une analyse détaillée des précipitations.

Le climat de l'Algérie est varié vu son étendue, la partie nord a un climat méditerranéen (classé Csa, selon la classification de Köppen), tandis que le reste du pays est principalement désertique (classé comme BWh et BWk selon Köppen). Cependant, entre ces deux principaux types de climat, il existe un climat de transition, en particulier un climat semi-aride (la classification climatique de Köppen est BSk et BSh à l'Est), où la sécheresse ne se limite pas à la saison estivale mais peut être parfois observée toute l'année avec l'influence du climat méditerranéen et des montagnes, continentales (fig.I.1).

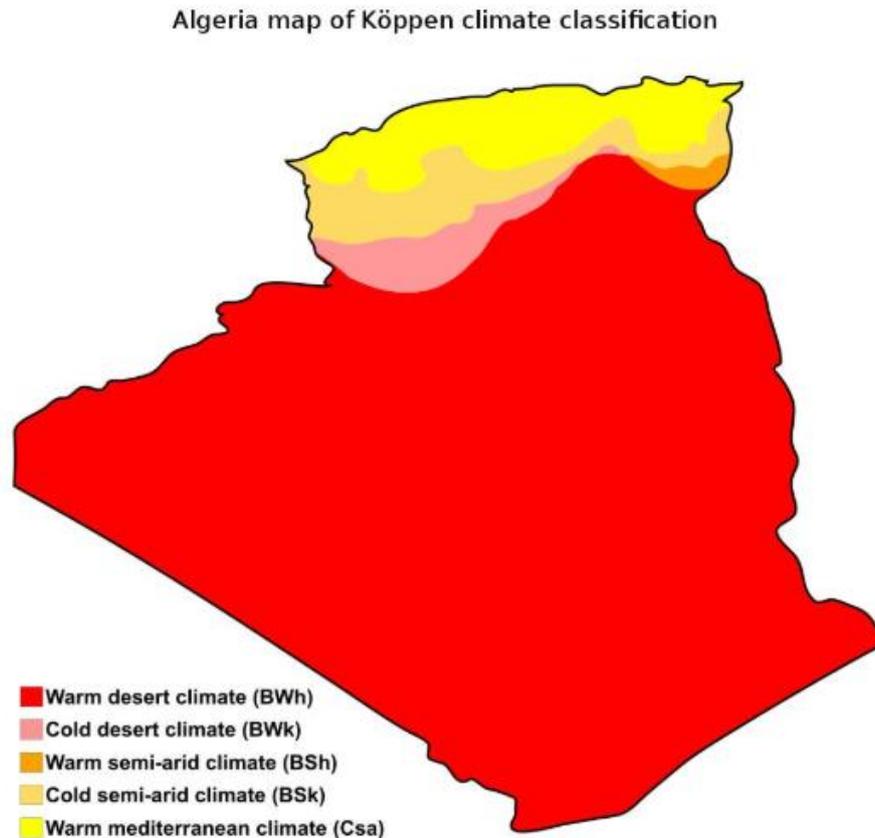


Figure I.1 : Carte du climat en Algérie selon la classification de Köppen [1]

I.4. Définition du système climatique

Selon OMM, le système climatique est un système extrêmement complexe composé de cinq éléments principaux : l'atmosphère, l'hydrosphère, la cryosphère, la surface terrestre et la biosphère ainsi que les interactions entre ces éléments. Le système climatique évolue dans le temps sous l'influence de sa propre dynamique interne et en raison de forçages externes tels que les éruptions volcaniques, les variations solaires et les forçages induits par l'homme comme la modification de la composition de l'atmosphère et le changement d'utilisation des terres. [2]

I.5. Définition de la variabilité climatique

D'après OMM, ce terme désigne les variations de l'état moyen et d'autres statistiques (telles que les écarts types, l'apparition d'extrêmes, etc.) du climat à toutes les échelles temporelles et spatiales au-delà de celles des événements météorologiques individuels. Le terme est souvent utilisé pour désigner les écarts des statistiques climatiques sur une période donnée (par exemple un mois, une saison ou une année) par rapport aux statistiques à long terme relatives à la période civile correspondante. Dans ce sens, la variabilité climatique est mesurée par ces écarts, que l'on appelle généralement des anomalies. La variabilité peut être due à des processus internes naturels au sein du système climatique (variabilité interne), ou à des variations du forçage externe naturel ou anthropique (variabilité externe). [2]

I.6. Définition du changement climatique

Le changement climatique, en revanche, se réfère à un changement systématique dans les propriétés statistiques du climat (par exemple, la moyenne et la variance) sur une période prolongée (par exemple, des décennies à des siècles), comme le montre une tendance à la hausse ou à la baisse, par exemple, des valeurs extrêmes des précipitations (OMM, 2018).

Le changement climatique peut être dû à des processus internes naturels ou à des forçages externes, ou à des changements anthropiques persistants dans la composition de l'atmosphère ou dans l'utilisation des terres. Notons que la Convention-cadre sur les changements climatiques (CCNUCC), dans son article 1, définit le "changement climatique" comme : "un changement de climat qui est attribué directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui s'ajoute à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables". La CCNUCC établit donc une distinction entre le "changement climatique" attribuable aux activités humaines qui modifient la composition de l'atmosphère et la "variabilité du climat" attribuable à des causes naturelles.[2]

I.7. Définition des variables utilisées dans l'étude

I.7.1. Définition des précipitations

Du point de vue hydrologique, les précipitations sont les apports d'eau parvenant au sol sous forme liquide (pluie ou rosée) ou solide (neige ou grêle) en provenance directe ou indirecte de la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique. Elles constituent l'unique alimentation de la partie terrestre du cycle de l'eau. [3]

I.7.2. Définition de la température

L'OMM (1992) définit la température de l'air comme "la température indiquée par un thermomètre exposé à l'air en un lieu à l'abri du rayonnement solaire direct" (OMM, 2008).

C'est la température moyenne de l'air mesurée par un thermomètre, déposé à l'air en évitant le rayonnement solaire direct, cette mesure est faite pendant une période donnée, généralement un jour, un mois ou une année.

I.8. Sécheresse

Des épisodes de sécheresse peuvent toucher n'importe quel pays qui réunit les conditions climatiques suivantes : baisses des précipitations pendant une certaine durée accompagnée de températures élevées. Certaines zones sont plus vulnérables que d'autres et seules les zones polaires et subpolaires sont épargnées par la sécheresse car elles sont entièrement recouvertes de glace. Parmi les zones les plus touchées par des périodes de sécheresse, on compte les zones tropicales et subtropicales situées au niveau des tropiques du Cancer et du Capricorne. Ce sont en effet les zones qui ont le climat le plus chaud et sec. Les sécheresses les plus marquantes de ces dernières années concernent le Sahel, la Corne de l'Afrique, le Mexique, le Nord-Est (NE) du Brésil, certaines zones de Chine, d'Inde et de

Russie, ainsi que l'Europe du Sud-Est (SE). Et c'est dans les zones arides que l'on trouve les pays les plus vulnérables comme l'Afrique et l'Asie occidentale. [4]

I.8.1. Définition de la sécheresse

D'après la définition de l'OMM : La sécheresse est une période prolongée d'absence de précipitations qui peut survenir n'importe où sur la planète. Il s'agit d'un phénomène à évolution lente, aggravé par des facteurs tels que la pauvreté et l'utilisation inadéquate des terres. La sécheresse ne sera pas déclarée de la même façon selon les pays et leur climat, par exemple :

- En France, on parlera de "sécheresse absolue" lorsqu'il n'y aura pas eu de pluie, pendant 15 jours consécutifs au minimum,
- Aux Etats-Unis, si une zone étendue reçoit seulement 30% de précipitations ou moins que d'habitude pendant au moins 21 jours, alors on parlera de sécheresse,
- En Australie, lorsque qu'un terrain reçoit moins de 10% de précipitations par rapport à la moyenne annuelle, il est déclaré en état de sécheresse,
- En Inde, il faut que les précipitations annuelles soient inférieures à 75% des normales saisonnières.

La sécheresse ne doit pas être confondue avec l'aridité. En effet, une région aride peut connaître des épisodes de sécheresse. Le manque de pluie sera une caractéristique permanente du climat de la zone aride. Il s'agit généralement de régions où la pluie est rare et les températures sont élevées. Elle sera donc un phénomène ponctuel sur une zone.

I.8.2. Sécheresse en Algérie

Le Nord-ouest de l'Algérie a connu de nombreuses sécheresses au cours de son histoire, de tailles différentes. Certaines ont parfois un impact significatif sur les conditions, la vie de la population, mais les plus graves et durables sont ces deux dernières décennies. Les précipitations au cours des dernières décennies ont été inférieures à environ 12% dans la région centrale, 13% dans la région orientale et 20% dans la région occidentale. Ces valeurs montrent que l'Ouest de l'Algérie est la zone la plus gravement touchée. Cette sécheresse a eu un impact négatif sur le débit du lit des oueds, le niveau des eaux souterraines et le volume d'eau au niveau des barrages.

Un nombre important de travaux ont traité la sécheresse en Algérie. Nous citerons ci-dessous, des exemples dans ce contexte.

- **(Kettab et al., 2004) :** Étude de la sécheresse dans les zones côtières de l'Algérie à partir de 08 stations météorologiques (Ghazaouat, Oran, Arzew, Alger, Chleff, Skikda, Annaba et El kala) de 1954 à 2001. La méthode utilisée consiste à estimer la sécheresse par les modèles Jack Nife et Bootstrap. L'utilisation de ces simulations peut illustrer clairement la séquence temporelle des précipitations sur l'échelle de temps. On y distingue 2 périodes : la période humide continue de 1954 à 1986 et la période sèche correspondant à la décennie (1990-2000). Selon ces deux auteurs, le déficit des précipitations dans la région ouest (en particulier Oran, Ghazaouat et Arzew) sont

particulièrement visibles. Les précipitations dans les régions du centre et de l'Ouest sont inférieures à 50% de la moyenne au durant la période (1987-2001), tandis qu'à l'Est cette diminution n'est que de 30%.

- **(Meddi H. & Meddi M., 2007)** : L'étude faite concerne le Nord-ouest de l'Algérie. La méthode employée est le modèle numérique PLUVIA, qui a permis de construire des cartes de la répartition spatiale des précipitations mensuelles (carte des pluies pour les mois de Janvier, Mars et Novembre). Les résultats obtenus montrent que les précipitations mensuelles augmentent du Sud vers le Nord et d'Ouest vers l'Est.
- **(Dechemi et al., 1994)** : Réalisation d'une étude de débit mensuel moyen simulé dans une zone semi-aride (Beni-Bahdel) par analyse des composantes principales (A.C.P), dont l'objectif réside en une meilleure gestion des ressources en eau.

I.8.3. Types de sécheresse

La sécheresse est l'une des catastrophes naturelles qui ont marqué profondément la vie des populations à travers les âges. Elle n'a pas de définition universelle, il y a autant de définitions de la sécheresse qu'il y a d'utilisation de l'eau : la sécheresse est en effet un déficit de disponibilité en eau par rapport à une situation considérée comme normale pour une période donnée, une région déterminée et des usages spécifiques. Nous distinguons selon Bootsma et al. (1996), quatre grands types de sécheresse : météorologique, agricole, hydrologique et socioéconomique.

I.8.3.1. Sécheresse météorologique

Ce type de sécheresse survient lorsque les conditions météorologiques sèches l'emportent sur les autres conditions climatiques. Elle est grandement déterminée par l'absence générale d'humidité dans l'atmosphère, par exemple, le manque de précipitations et la présence d'autres conditions météorologiques comme les températures élevées et les vents secs. La sécheresse météorologique est un signe de pénurie d'eau si les conditions demeurent constantes pendant une longue période. Ce type de sécheresse peut également être de courte durée, ce qui signifie qu'il peut commencer et se terminer dans une courte période. [5]

I.8.3.2. Sécheresse agricole

Elle se caractérise par un déficit en eau dans les sols d'une profondeur maximale de 2 mètres, qui a un impact sur le développement de la végétation. Ce type de sécheresse va dépendre des précipitations reçues sur la zone, ainsi que de l'évapotranspiration des plantes. Cette sécheresse sera donc sensible au climat environnant, soit l'humidité, les précipitations, la température ambiante, le vent mais aussi le sol et les plantes. [6]

I.8.3.3. Sécheresse hydrologique

Ce genre de sécheresse apparaît lorsque l'approvisionnement en eau est manifestement faible, surtout dans les rivières et les lacs naturels, les réservoirs, les cours d'eau et les niveaux d'eau souterraine. Les sécheresses hydrologiques surviennent après des mois de sécheresses météorologiques. Les sécheresses hydrologiques découlent de la diminution des

précipitations, de la dépendance excessive à l'égard de ces sources d'eau pour l'agriculture, des besoins énergétiques et d'autres besoins. Contrairement aux sécheresses météorologiques, les sécheresses hydrologiques n'ont pas lieu en même temps. Cette réduction de la quantité et de la qualité des eaux de surface résulte d'un effet direct de la sécheresse météorologique. [5]

I.8.3.4. Sécheresse socioéconomique

Ce type de sécheresse est lié à la demande et à l'offre. La fourniture de biens et services spécifiques, par exemple l'eau potable, la nourriture et l'énergie, est affectée ou menacée par les changements hydrologiques et météorologiques. [5]

I.8.4. Relations entre les différents types de sécheresse

Les relations réciproques entre ces différents types de sécheresse sont illustrées sur la figure I.2. Les sécheresses de type agricole, hydrologique ou socioéconomique sont décalées dans le temps par rapport aux sécheresses de type météorologique, parce que les effets produits dans ces secteurs sont liés à l'approvisionnement en eau de surface et en eau souterraine. De plus, si la sécheresse persiste pendant un certain laps de temps, elle se transforme en une sécheresse de type agricole, hydrologique et socioéconomique, avec ses effets connexes.

La sécheresse a pour conséquence non seulement de réduire les apports d'eau permettant de réalimenter les sources d'approvisionnement en eau de surface et en eau souterraine, mais aussi d'augmenter considérablement la demande concernant ces ressources (Kallis, 2008).

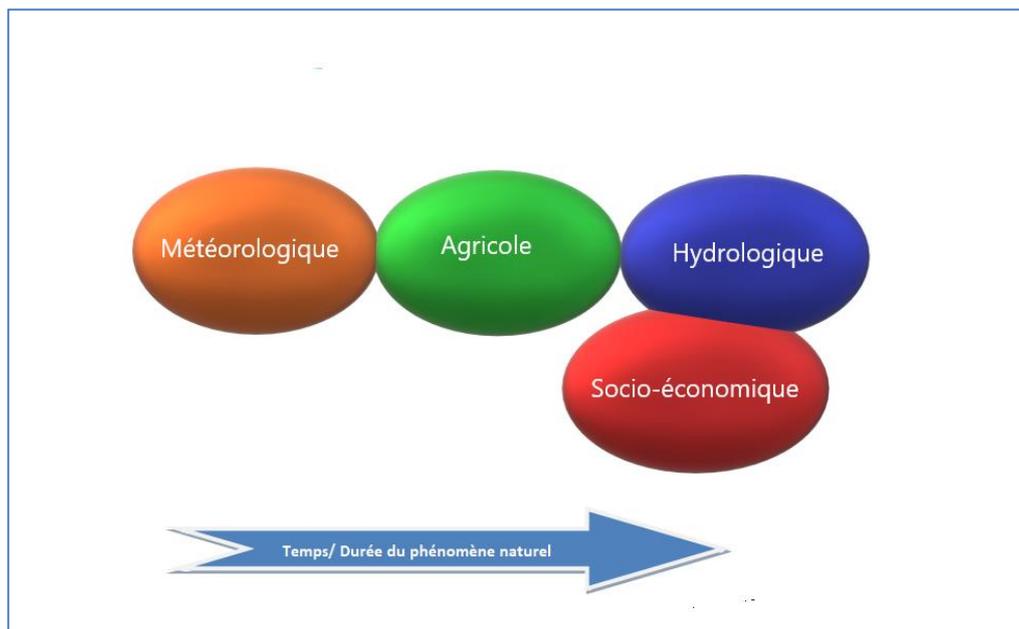


Figure I.2 : Relations entre les différents types de sécheresse
(Centre National de Lutte contre la Sécheresse, Université du Nebraska-Lincoln, U.S.A.)

I.8.5. Causes et conséquences de la sécheresse

I.8.5.1. Causes de la sécheresse

I.8.5.1.a. Insuffisance des précipitations

Dans les régions arides et semi arides, la sécheresse est annoncée lorsqu'une région traverse de longues périodes sans pluie, surtout pendant plus d'une saison.

I.8.5.1.b. Causes humaines

Les activités humaines jouent un rôle relativement important dans la gestion du cycle de l'eau, telles que la déforestation, la construction et l'agriculture. En outre, les cultures ne sont pas toujours adaptées au territoire et aux conditions climatiques locales, de sorte qu'elles vont épuiser la ressource en eau tout en nécessitant une importante irrigation, comme l'illustre le maïs qui est parfois cultivé dans des zones bien trop sèches et donc inadaptées qui ont un impact négatif sur le cycle de l'eau. Les arbres et la couverture végétale sont essentiels au cycle de l'eau car ils aident à limiter l'évaporation, stockent l'eau et attirent les précipitations.[5]

I.8.5.1.c. Assèchement du flux d'eau de surface

Les lacs, les rivières et les ruisseaux sont les principaux fournisseurs d'eaux de surface en aval dans diverses régions géographiques du Monde. Pendant les saisons extrêmement chaudes où en raison de certaines activités humaines, les surfaces d'eau libres peuvent s'assécher en aval, ce qui contribue à la sécheresse signifiante ainsi que la demande en eau devient supérieure à l'eau disponible. Les systèmes d'irrigation et les barrages hydroélectriques font partie des activités humaines susceptibles de réduire considérablement la quantité d'eau s'écoulant en aval vers d'autres zones. [5]

I.8.5.1.d. Réchauffement climatique

Les actions humaines ont contribué à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, entraînant ainsi une augmentation continue des températures moyennes de la planète. En conséquence, les niveaux d'évaporation et d'évapotranspiration ont augmenté et les températures plus élevées ont entraîné des incendies de forêt et prolongé les périodes de sécheresse. [5]

I.8.5.2. Conséquences de la sécheresse

Les principales conséquences de la sécheresse sur :

- **La population** : la santé des enfants et des personnes âgées est très fragile et sensible aux fortes chaleurs car ils n'ont pas de réflexes ou ne veulent pas boire pour lutter contre la déshydratation et provoquer la mort,
- **La faune** : tout comme la population, le manque d'eau affectera les poissons dans l'eau et les animaux qui boivent au point d'abreuvement,

- **Les forêts** : la sécheresse rendra les arbres plus secs et plus déshydratés, ce qui peut entraîner la mort des arbres. De plus, une végétation très sèche sera propice au feu,
- **L'agriculture** : en raison d'un approvisionnement en eau insuffisant, l'irrigation des cultures a été affectée par la sécheresse,
- **Les sols** : en Automne, les sols secs qui doivent encore être hydratés ne pourront plus absorber les précipitations, provoquant des inondations et des glissements de terrain,
- **Les réserves d'eau potable** : en raison des faibles niveaux d'eau des rivières, des ruisseaux et des eaux souterraines, l'approvisionnement et l'évacuation de l'eau domestique ne peuvent pas être effectués correctement. Dans certaines zones rurales, l'eau est rationnée ou coupée,
- **La production d'électricité** : l'eau est utilisée pour refroidir certaines centrales nucléaires, donc lors des sécheresses et des vagues de chaleur, lorsque la demande d'électricité augmente, elles s'arrêtent : climatiseurs, ventilateurs, réfrigérateurs,
- **Le tourisme** : changements dans la qualité des eaux de baignade (turbidité, croissance des algues, cyanobactéries), côte d'eau insuffisante, accès difficile à la plage, activités nautiques et aquatiques réduites ou annulées.

Les conséquences de la sécheresse peuvent perdurer longtemps après le retour des pluies comme denrées alimentaires rares et chères, ressources en eau peu abondantes, sols érodés et bétail affaibli, sans parler des conflits juridiques et sociaux qui peuvent persister des années. Les sécheresses sont souvent suivies d'inondations de grande ampleur qui surprennent les populations au moment où elles sont les plus vulnérables, entraînant un surcroît de souffrances. [6]

I.8.6. Impact de la sécheresse

La sécheresse assèche les sols et altère le bon développement de la faune et de la flore. Ainsi, les incendies sont souvent nombreux en période de sécheresse, et vont émettre des gaz nocifs qui vont polluer l'atmosphère et accentuer l'effet de serre. Avec le changement climatique planétaire, les phénomènes de sécheresse sont de plus en plus récurrents, il est donc important de savoir comment gérer les réserves dans ce cas et surtout, comment s'adapter à un climat qui change extrêmement vite [6]. De plus, elle a un impact majeur sur la sécurité alimentaire, la santé, les déplacements de population et les migrations selon les estimations, les épisodes de sécheresse seraient les catastrophes les plus coûteuses qui soient : les dommages qu'ils causent oscillent chaque année entre 6 et 8 milliards de dollars, et aucune autre calamité naturelle ne touche autant de personnes. Depuis 1900, ils ont fait plus de 11 millions de victimes, et 2 milliards de personnes en ont subi les conséquences (OMM, 2020).

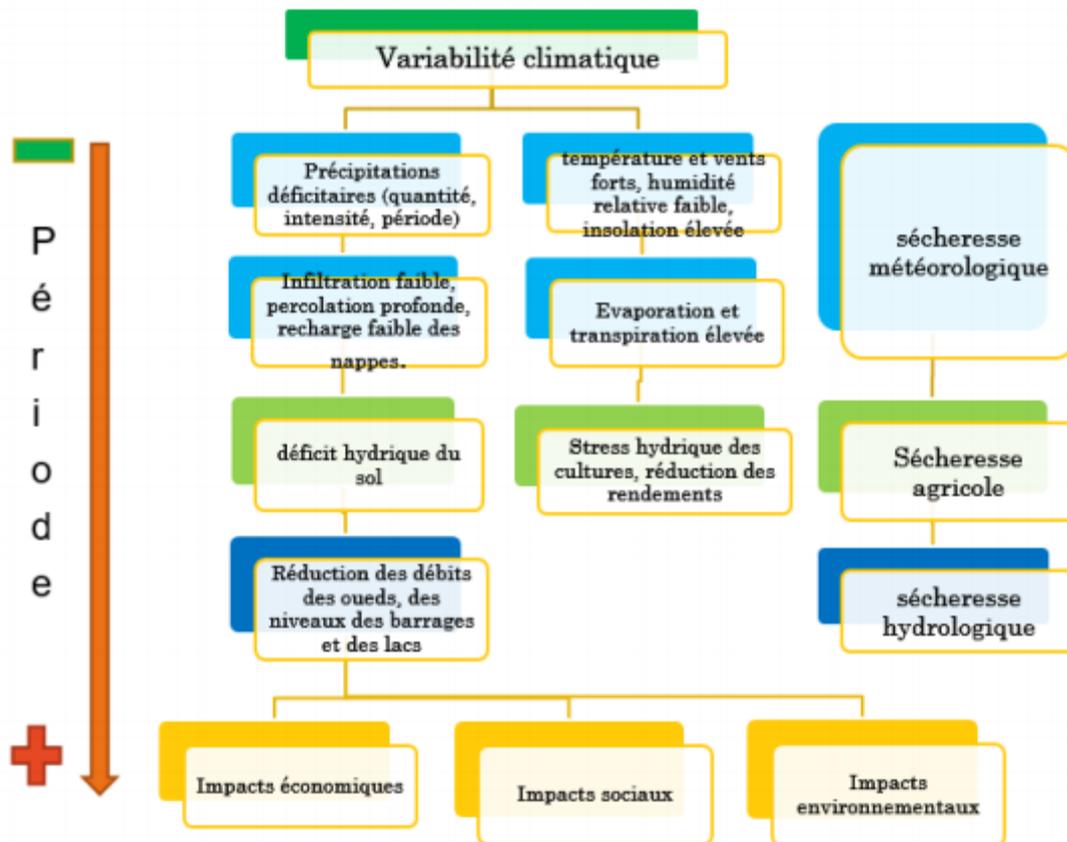


Figure I.3 : Types de sécheresse, manifestations dans le temps et leurs impacts (National Drought Mitigation Center, 2005)

I.8.7. Mesures mises en place en cas de sécheresse

Les risques encourus en cas de sécheresse sont principalement le manque d'eau pour la population, l'agriculture, la faune et la flore environnante. Ainsi, pour lutter contre ces risques, quelques mesures peuvent être mises en place :

- Constructions de puits, aqueducs ou barrages,
- Transvasements de provisions d'eau pour augmenter l'offre de ressources existantes,
- Épurations des eaux usées, exploitation adaptée des aquifères,
- Dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres continentales,
- Augmentation artificielle des précipitations (relargage de différents aérosols dans les nuages afin de condenser la vapeur d'eau en eau liquide disponible pour avoir plus de gouttes de pluie),
- Protection des lacs de barrage contre l'évaporation.

Quelques mesures d'exploitation durable :

- Adaptation des cultures et pratiques agricoles afin de diminuer leur consommation en eau, y compris dans le jardin et potager,
- Optimisation de l'usage de l'eau en zone urbaine,

- Éducation environnementale, communication et prévention pour un usage rationnel de l'eau chez les particuliers.

I.8.8. Changement climatique et la sécheresse

Les prévisions sur les changements climatiques ne sont pas exactes suffisamment spécifique spatio-temporellement pour les relier quantitativement aux mesures de la sécheresse. Cependant, il existe suffisamment de preuves pour suggérer que la sécheresse augmentera au cours des prochaines décennies comme un problème, globalement et surtout dans certaines régions semi-arides, enneigées et alimentées par les glaciers, lié au changement climatique ou à la variabilité climatique multi-décennale naturelle (Kallis, 2008).

I.9. Conclusion

Ce bref aperçu sur le phénomène de sécheresse a mis le point sur l'ampleur de la sécheresse qui représente toujours une menace majeure pour les ressources en eau et leur fréquence de répétition.

Chapitre II

Présentation

de la zone

d'étude

II.1. Introduction

La bonne connaissance du milieu physique (zone d'étude) est un moyen d'aide à la compréhension du phénomène étudié et à l'interprétation des résultats obtenus. Ce chapitre est une synthèse des caractéristiques géographiques, morphométriques, géologiques, hydrogéologiques et climatiques, du bassin versant de la basse Mekerra inspirée des études antérieures.

II.2. Présentation de la zone d'étude**II.2.1. Présentation du bassin versant de l'Oued Mekerra**

Le bassin versant d'Oued Mekerra fait partie du grand bassin versant de la Macta qui est situé au Nord-ouest de l'Algérie (fig.II.1). Il est compris entre la latitude 34°31' et 35°21' N et la longitude 1°16' et 0°58' E. Il prend le nom de son Oued principal et couvre une superficie dépassant 3000 Km².

L'Oued Mekerra sillonne la plaine de Sidi Bel Abbas du Sud au Nord sur une distance d'environ 119 Km, avec un réseau hydrographique embryonnaire et dont le lit du cours principal a été creusé dans un vaste dépôt lacustre du Pliocène (Otmane et al., 2019). De l'amont vers l'aval, l'Oued Mekerra est traversé par les villes suivantes: Ras El Ma, Sidi Ali Ben Youb, Tabia, Boukhanifis, Sidi Khaled et Sidi Bel Abbas.

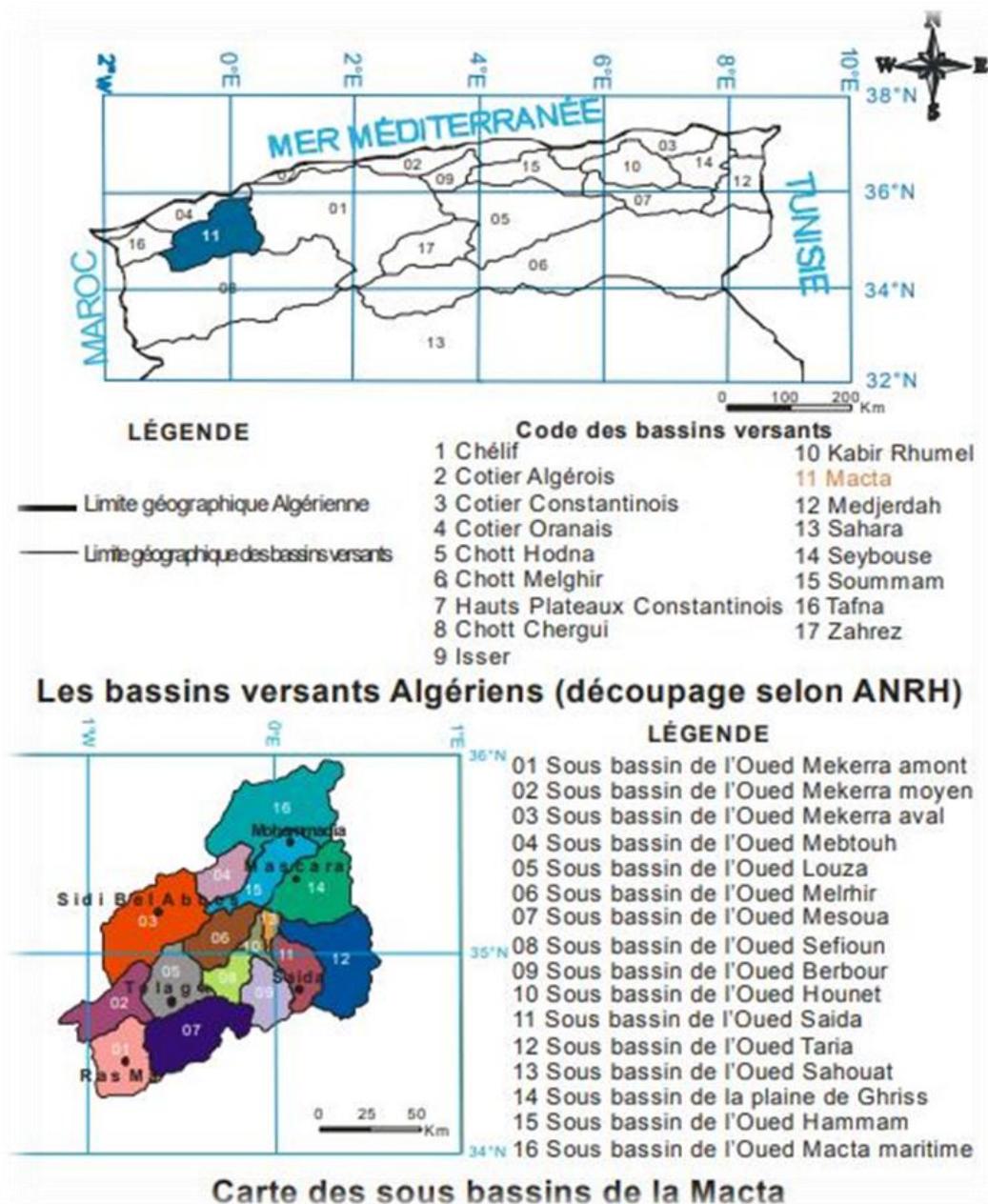


Figure II.1 : Situation du bassin versant de la Macta (Otmene, 2015)

II.2.2. Situation géographique du sous bassin versant de la basse Mekerra

Notre étude porte sur le sous bassin versant de l'aval Mekerra (Basse Mekerra) qui se situe entre les latitudes Nord 34°53' et 35°22' et les longitudes Ouest 0°94' et 0°22' (fig.II.2). Géographiquement, la région d'étude est limitée par les monts de Tessala au Nord, le massif tabulaire de Tlemcen et Saïda au Sud, le bassin de l'oued Isser à l'Ouest et les Monts de Béni Chougrane et Bouhanifia à l'Est (Otmene et al., 2019).

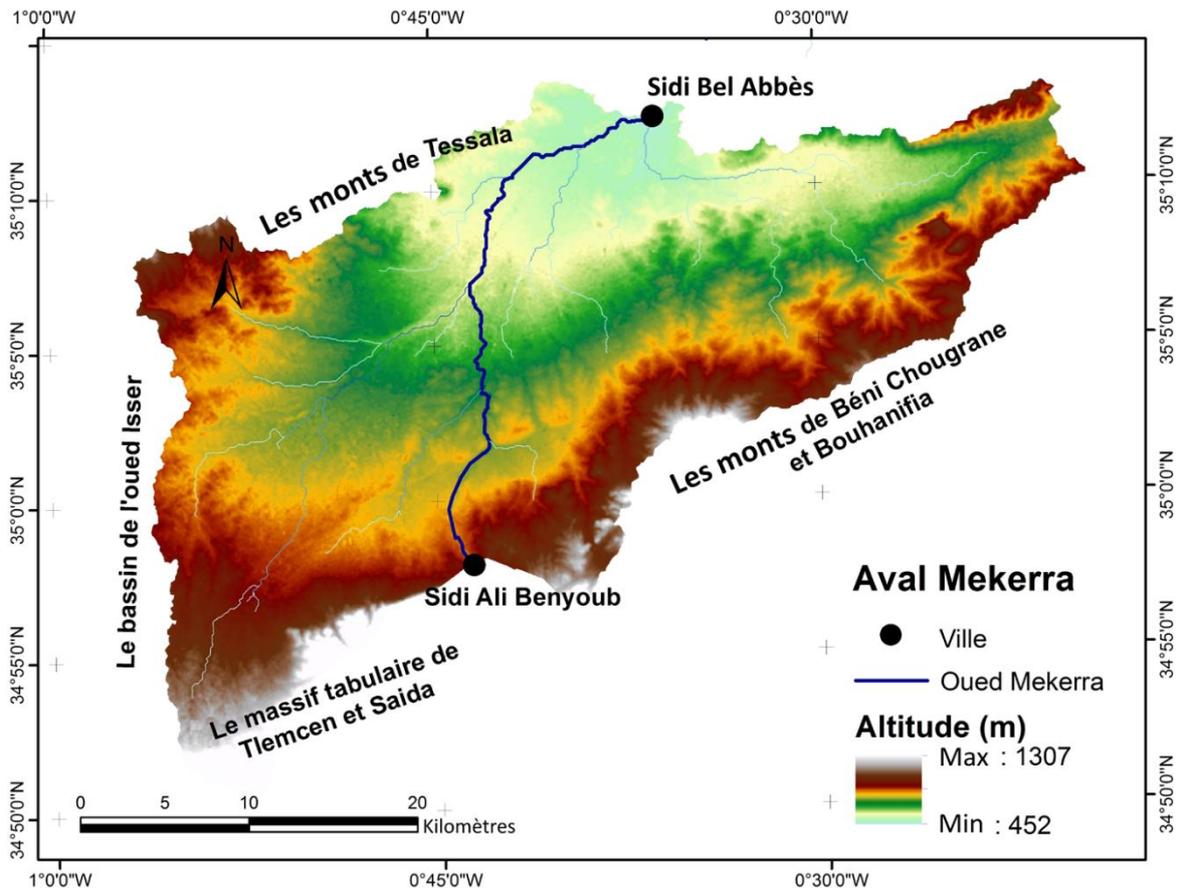


Figure II.2 : Situation géographique de la zone d'étude sous bassin de la basse Mekerra (Otmane et al., 2019)

II.3. Caractéristiques morphométriques

L'utilisation des caractéristiques morphométriques a pour but la quantification des paramètres physiques du bassin versant.

II.3.1. Caractéristiques géométriques

L'oued Mekerra traverse le bassin aval de Mekerra du Sud au Nord sur environ 34 kilomètres, formant un réseau hydrologique embryonnaire composé de nombreux affluents, généralement représentés par des cours d'eau temporaires. L'oued est alimenté par les précipitations et les ressources naturelles (affleurement du niveau des eaux souterraines), dont la plus importante est Ain-Skhouna.

II.3.1.1. Superficie

Sur la base des quatre cartes d'état-major, la superficie du bassin est mesurée à l'aide du logiciel MapInfo 7.0.

$$A = 1195 \text{ Km}^2$$

II.3.1.2. Périmètre

Le périmètre du bassin versant est obtenu directement à l'aide de MapInfo 7.0.

$$P = 228,40 \text{ Km}$$

II.3.1.3. Longueur du thalweg (Lt)

La longueur du cours d'eau principal est une grandeur très utilisée dans les calculs hydrologiques, c'est la distance mesurée le long du cours d'eau principal du bassin, à partir de l'exutoire de ce dernier.

$$L_t = 34 \text{ Km}$$

II.3.2. Caractéristique de forme

Il existe différents indices morphologiques permettant de caractériser le milieu, mais aussi de comparer les bassins versants entre eux. Citons à titre d'exemple, l'indice de compacité de Gravelius K_c (1914).

II.3.2.1. Indice de compacité de Gravelius (K_c)

La caractéristique de forme la plus utilisée est le « coefficient K_c de Gravelius ». Il se définit comme le rapport du périmètre du bassin versant au périmètre du cercle. Il est proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire, et supérieur à 1 lorsque le bassin est de forme allongée (appelée aussi coefficient de compacité).

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (\text{II. 1})$$

avec :

P : Périmètre du bassin versant (Km),

A : Surface du bassin versant (Km²).

Selon le coefficient de Gravelius ($K_c = 1,85$), le bassin versant de l'aval Mekerra est de forme allongée orientée Sud Ouest/ Nord Est.

II.3.2.2. Rectangle équivalent

Le concept de rectangle équivalent proposé par Roche (1963) est un concept introduit il y a quelques années, pour pouvoir comparer facilement des bassins entre eux du point de vue de l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement.

Le bassin versant rectangulaire résulte d'une transformation géométrique du bassin réel dans laquelle on conserve la même superficie, le même périmètre (ou le même coefficient de compacité) et donc par conséquent la même répartition hypsométrique. Les courbes de niveau deviennent des droites parallèles aux petits côtés du rectangle (Talatizi, 2014).

$$p = 2(1 + L) = \frac{K_c \sqrt{A}}{0,28} \quad (\text{II.2})$$

avec :

$A = L * l$,

L : Longueur du rectangle équivalent (Km),

l : Largeur du rectangle équivalent (Km).

➤ Longueur (L)

$$L = \frac{K_c \sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right] \quad (\text{II.3})$$

$L = 102,5 \text{ Km}$

➤ Largeur (l)

$$l = \frac{K_c \sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right] \quad (\text{II.4})$$

$l = 11,65 \text{ Km}$

Le bassin versant de la basse Mekerra est de forme allongée, qu'on peut représenter par un rectangle équivalent de longueur $L = 102,5 \text{ Km}$ et de largeur $l = 11,65 \text{ Km}$.

Tableau II.1 : Caractéristique de forme du bassin de la basse Mekerra

Bassin	Superficie (Km ²)	Périmètre (Km)	Kc	Rectangle équivalent	
				Longueur (Km)	Largeur (Km)
Basse Mekerra	1195	228,4	1,85	102,5	11,65

II.3.2.3. Facteur de forme

$$R_f = A / L^2 \quad (\text{II.5})$$

avec :

A : Surface du bassin versant (Km²),

L : Longueur du bassin versant entre l'embouchure et le point le plus éloigné (Km).

$R_f = 0,113$

II.3.2.4. Coefficient de circularité

D'après (Miller, 1959), la circularité d'un bassin versant est le rapport entre l'aire du bassin versant et l'aire d'un cercle ayant le même périmètre que ce dernier :

$$R_{ci} = 4 A \pi / p^2 \quad (\text{II.6})$$

Si la valeur du coefficient R_{ci} s'approche de 1, alors la forme est quasi circulaire et la pente est faible.

Dans notre cas, $R_{ci} = 0,287$

II.3.3. Courbe hypsométrique

Le relief est souvent caractérisé par la courbe hypsométrique du bassin, on porte une altitude donnée en abscisse et en ordonnée la surface du bassin pour laquelle chaque point est à un coté au moins égal à cette altitude. La courbe hypsométrique s'établit en planimétrant les surfaces, et en cumulant les aires situées entre chaque deux courbes successives, on obtient un histogramme de fréquences d'altitudes et la courbe hypsométrique.

Tableau II.2 : Classement des altitudes selon la superficie du bassin versant de la Mekerra

Élévation des courbes de niveau (m)	Altitude	Surface partielle	Surface (%)	Surface cumulée	Surface cumulée (%)
1000-1100	1050	7,61	0,64	7,61	0,64
900-1000	950	16,12	1,35	23,73	1,99
800-900	850	33,07	2,77	56,8	4,75
700-800	750	141,59	11,85	198,39	16,6
600-700	650	438,2	36,67	636,59	53,27
500-600	550	454,11	38	1090,7	91,27
450-500	475	104,3	8,73	1195	100

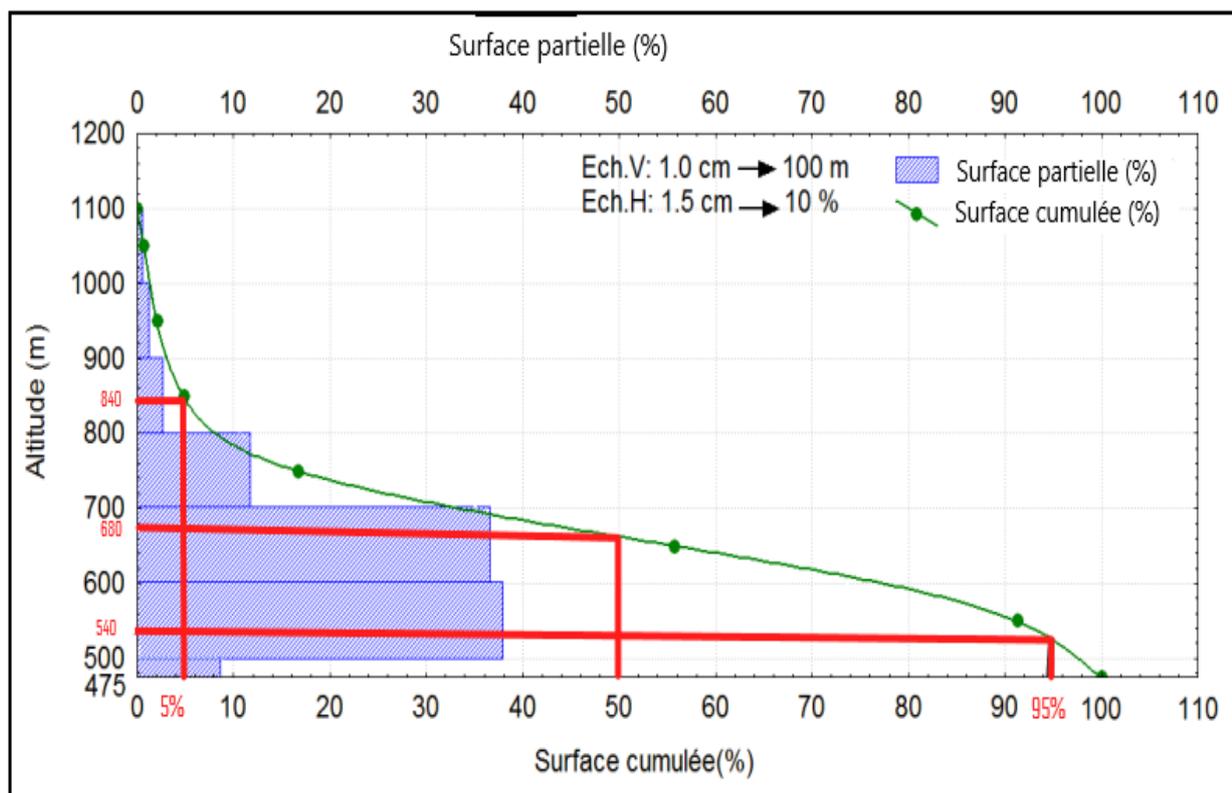


Figure II.3 : Courbe hypsométrique du bassin versant de la basse Mekerra

II.3.3.1. Altitudes caractéristiques

II.3.3.1.a. Altitude moyenne du bassin versant (H_{moy})

L'altitude moyenne se calcule par la formule suivante :

$$H_{moy} = \frac{\sum h_i * S_i}{S} [m] \quad (II. 7)$$

avec :

S_i : Surface partielle entre deux courbes de niveau (Km^2),

h_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau consécutives (m),

S : Superficie du bassin versant (Km^2)

H_{moy} : Altitude moyenne du bassin (m).

II.3.3.1.b. Altitude médiane du bassin versant (H_{med})

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique, cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin concerné présente une pente régulière.

II.3.3.1.c. Altitude minimale du bassin versant (H_{min})

L'altitude minimale correspond l'altitude la plus basse qui est près de l'exutoire.

II.3.3.1.d. Altitude maximale du bassin versant (H_{max})

L'altitude maximale correspond à l'altitude la plus élevée dans le bassin versant.

Les hauteurs caractéristiques sont mentionnées dans le tableau II.3.

Tableau II.3 : Hauteurs caractéristiques du bassin versant de la basse Mekerra

Bassin versant de la basse Mekerra	Hauteurs caractéristiques			
	H_{max} (m)	H_{moy} (m)	H_{min} (m)	H_{med} (m)
	1100	620,7	450	680

II.3.4. Indices de pente

II.3.4.1. Indice de pente global (I_g)

L'indice de pente global se calcule par la formule suivante :

$$I_g = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L} \quad (II. 8)$$

avec :

L : Longueur du rectangle équivalent (Km),

$H_{5\%}$ et $H_{95\%}$: Altitudes en m, correspondent aux fréquences respectivement 5% et 95% de la surface du bassin versant, qui sont déduites à partir de la courbe hypsométrique.

II.3.4.2. Indice de pente moyenne (Im)

L'indice de pente moyenne est le rapport de la dénivelée sur la longueur du rectangle équivalent.

$$I_m = \frac{\Delta H}{L} = \frac{(H_{\max} - H_{\min})}{L} [\%] \quad (\text{II. 9})$$

II.3.4.3. Indice de pente de ROCHE (Ip)

C'est la moyenne de la racine carrée des pentes mesurées sur le rectangle équivalent et pondérée par les surfaces, donné par la formule suivante :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n \sqrt{S_i * D_i} [\%] \quad (\text{II. 10})$$

avec :

L : Longueur du rectangle équivalent (m),

D_i : Différence entre deux altitudes du rectangle équivalent (m),

S_i : Superficie partielle en (%) comprise entre deux altitudes.

Les valeurs de ces indices de pente sont mentionnées dans le tableau II.4.

Tableau II.4 : Différents indices de pentes du bassin versant de la basse Mekerra

Bassin versant de la basse Mekerra	Ig (m/Km)	Im (%)	Ip (%)
	0,0029	0,63	2,08

D'après la classification d'O.R.S.T.O.M « Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer » (tab.II.5), le bassin de l'aval Mekerra se caractérise par un relief faible.

Tableau II.5 : Classification du relief selon O.R.S.T.O.M

Type de relief	Classification	Ig (m/Km)
R1	Relief très faible	Ig < 0,002
R2	Relief faible	0,002 < Ig < 0,005
R3	Relief assez faible	0,005 < Ig < 0,01
R4	Relief modéré	0,01 < Ig < 0,02
R5	Relief assez fort	0,02 < Ig < 0,05
R6	Relief fort	0,05 < Ig < 0,1
R7	Relief très fort	0,1 < Ig

II.3.5. Dénivelée (D)

Elle est calculée par la formule suivante :

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} [\text{m}] \quad (\text{II.11})$$

II.3.6. Dénivelée spécifique (D_s)

Elle est calculée par la relation suivante :

$$D_s = I_g * \sqrt{S} = \frac{D}{L} * \sqrt{S} \text{ [m]} \quad (\text{II. 12})$$

avec :

I_g : Indice de pente global (m/Km),

D : Dénivelée (m),

L : Longueur du rectangle équivalent (Km),

S : Surface du bassin versant (Km²).

II.3.7. Classification du bassin versant de la Mekerra

Le tableau II.6 représente la classification du relief de l'O.R.S.T.O.M selon la dénivelée spécifique.

Tableau II.6 : Classification du relief selon la dénivelée spécifique (O.R.S.T.O.M)

Classes de relief	État du relief	D_s (m)
R1	Relief très faible	$D_s < 10$
R2	Relief faible	$10 < D_s < 20$
R3	Relief assez faible	$25 < D_s < 50$
R4	Relief modéré	$50 < D_s < 100$
R5	Relief assez fort	$100 < D_s < 250$
R6	Relief fort	$250 < D_s < 500$
R7	Relief très fort	$D_s > 500$

IRD (ex. O.R.S.T.O.M) : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer.

Tableau II.7 : Dénivelée, dénivelée spécifique et la classe du relief du bassin versant de la basse Mekerra

Bassin versant de la basse Mekerra	Dénivelée (m)	Dénivelée spécifique (m)	État du relief
	300	101,3	Relief assez fort

D'après la classification de l'O.R.S.T.O.M et les résultats mentionnés dans le tableau II.7, appliquée à notre bassin versant, nous déduisons que le bassin versant de la basse Mekerra est de l'ordre R5, donc l'état du relief est assez fort.

Nous pouvons aussi classer le bassin versant selon leur surface (tab.II.8) et suivant l'équation :

$$R_e = \frac{D}{L_m} = 1,128 \sqrt{\frac{A}{L_m}} \quad (\text{II. 13})$$

avec :

A : Surface du bassin versant (Km²),

L_m : Longueur du bassin versant entre l'embouchure et le point le plus éloigné (Km).

$$R_e = 4,48$$

Tableau II.8 : Classification des bassins versants selon leur superficie

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

Notre bassin est classé comme un grand bassin selon la classification de Schumm.

II.3.8. Rayon de circularité

$$R = \frac{4 A \pi}{P} \quad (\text{II. 14})$$

avec :

A : Surface du bassin versant (Km^2),

P : Périmètre du bassin versant (Km).

$$R = 65,7 \text{ Km}$$

II.4. Étude du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Le réseau hydrographique est sans doute une des caractéristiques les plus importantes du bassin. Son évolution est contrôlée par la conjugaison de plusieurs facteurs, à savoir :

- La nature des formations géologiques,
- La morphologie du bassin versant (pente du terrain).

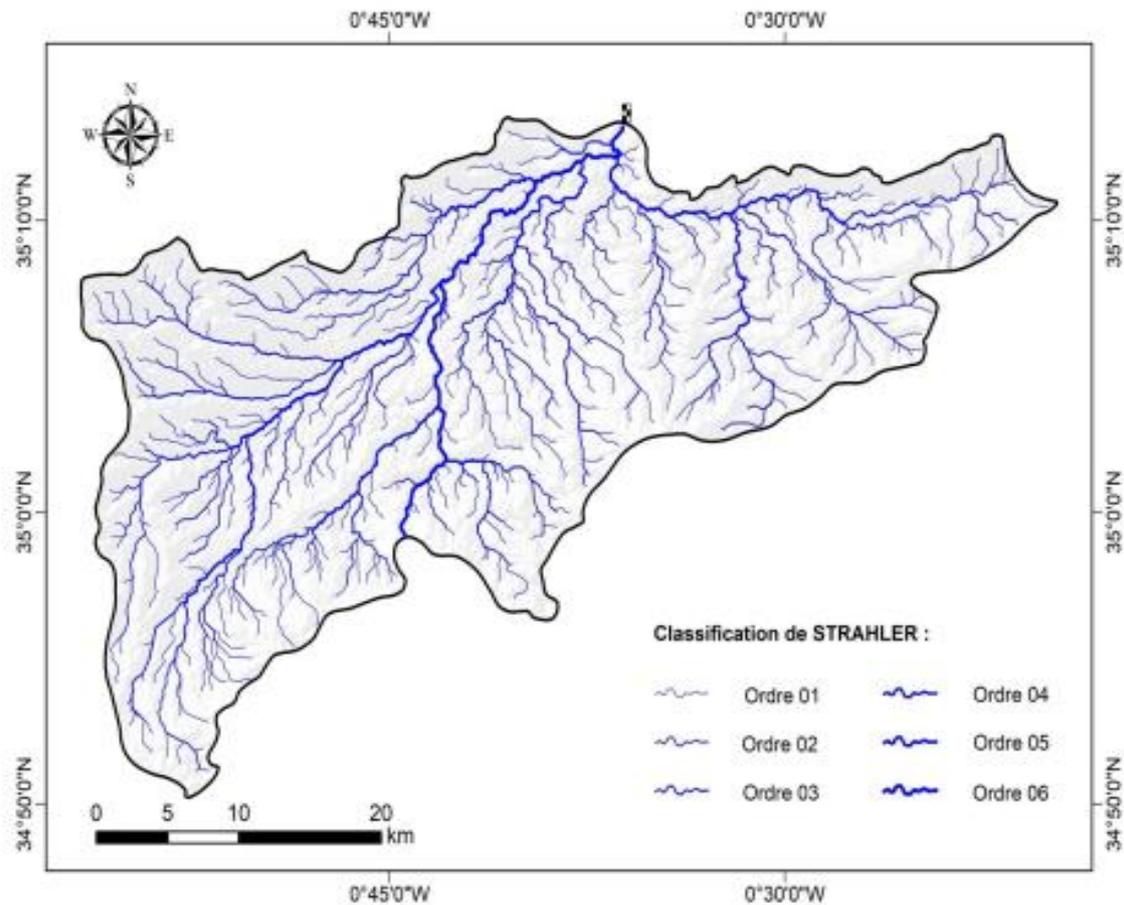


Figure II.4 : Réseau hydrographique de la basse Mekerra (Tachi, 2018)

Tableau II.9 : Paramètres morphométriques du bassin de Mekerra

Ordre (n)	Nombre des cours d'eau (N)	Rapport de confluence	Longueur des cours d'eau (Km)	Longueur moyenne (Km)	Rapport des longueurs
1	453	2,16	555,85	1,23	1,06
2	210	7	273,25	1,30	4,34
3	30	3,3	169,35	5,65	1,36
4	9	4,5	68,98	7,66	1,79
5	2	2	27,51	13,76	2,74
6	1	-	37,73	37,73	-

L'analyse du tableau II.9, montre que le bassin de la basse Mekerra est d'ordre 6 selon la classification de Schumm.

Les paramètres importants régissant le système hydrique du cours d'eau sont: le rapport de confluence (R_c), le rapport des longueurs (R_L) et la densité de drainage (D_d).

II.4.1. Rapport de confluence (R_c)

Il est défini par le rapport du nombre de thalwegs d'ordre n par celui d'ordre (n+1) :

$$R_c = N_n / N_{n+1} \quad (\text{II.15})$$

avec:

R_c : Rapport de confluence,

N_n : Nombre de cours d'eau d'ordre n ,

N_{n+1} : Nombre de cours d'eau d'ordre $n+1$.

Tableau II.10 : Rapport de confluence du bassin de la basse Mekerra

Ordre	1/2	2/3	3/4	4/5	5/6	Moyenne
Basse Mekerra	2,16	7	3,3	4,5	2	3,80

$$R_c = 3,80$$

Le rapport de confluence moyen $R_c = 3,80 < 5$, le réseau est de type Chêne (la ramification est bien développée avec un espacement régulier des confluences).

II.4.2. Rapport des longueurs (R_L)

Le rapport des longueurs est défini par l'équation :

$$R_L = L_{n+1}/L_n \quad (\text{II. 16})$$

avec:

L_n : Longueur du cours d'eau d'ordre n ,

L_{n+1} : Longueur du cours d'eau d'ordre $n+1$.

Tableau II.11 : Rapport des longueurs du bassin de la basse Mekerra

Ordre	1/2	2/3	3/4	4/5	5/6	Moyenne
Basse Mekerra	1,06	4,34	1,36	1,79	2,74	2,26

$$R_L = 2,26$$

II.4.3. Fréquence des cours d'eau

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

$$F_s = N/A \quad (\text{II. 17})$$

avec :

F_s : Fréquence des cours d'eau,

N : Nombre de thalwegs ($N = 705$),

A : Surface du bassin ($A = 1195 \text{ Km}^2$).

Pour notre bassin, la valeur de $F_s = 0,59$, ce qui correspond en moyenne au nombre du cours d'eau par Km^2 .

D'après cette valeur, nous remarquons que le bassin versant présente une fréquence très faible, ce qui traduit que le réseau hydrographique présente une hiérarchisation faible.

II.4.4. Densité de drainage (D_d)

La densité de drainage, définie par (Horton, 1945), est le rapport de la longueur totale du réseau hydrographique sur la surface du bassin versant (un terrain dont l'ensemble des eaux sont drainées par un même point) occupée :

$$D_d = \frac{\sum_{x=1}^4 L_x}{A} \quad (\text{II.18})$$

avec :

D_d : Densité de drainage (Km/Km²),

L_x : Longueur de cours (Km),

A : Surface du bassin versant (Km²).

$$D_d = 0,94 \text{ Km/Km}^2$$

La densité de drainage est de 0,94 Km/Km² ce qui signifie que le bassin est mal drainé.

II.4.5. Coefficient de torrentialité

Le coefficient de torrentialité est étroitement lié à la densité de drainage. Il donne une idée sur le comportement du réseau de drainage, c'est-à-dire comment l'eau provenant des cours d'eau d'ordre inférieur arrive à la rivière principale.

$$C_T = D_d * F_1 \quad (\text{II.19})$$

avec :

D_d : Densité de drainage (Km/Km²),

F_1 : Fréquence des thalwegs élémentaires, $F_1 = N_1 / A$ (avec N_1 : Nombre de cours d'eau d'ordre 1 dans notre cas = 453, $F_1 = 0,37$).

$$C_T = 0,35 \text{ Km/Km}^2$$

Le coefficient de torrentialité est de 0,35, ce qui signifie que les thalwegs d'ordre 1 apportent une capacité de drainage de 35% au cours d'eau principal et c'est une capacité très petite, ce qui veut dire que le bassin ne représente pas des caractéristiques morphométriques adaptées à l'écoulement, et qu'il est constitué par des formations perméables dont l'infiltration est importante.

II.4.6. Temps de concentration

C'est le temps que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée pour parvenir à l'exutoire, pour son calcul, nous faisons appel à la formule de Giandotti.

$$T_C = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{0,8 - \sqrt{H_{\text{moy}} - H_{\text{min}}}} \quad (\text{II.20})$$

avec :

T_C : Temps de concentration (heure),

A : Superficie du bassin (Km²),

L : Longueur du thalweg principal (Km),

H_{moy} : Altitude moyenne (m),

H_{min} : Altitude minimale (m).

$T_C = 18$ heures

Il faut donc 18h pour que la goutte la plus éloignée atteigne la sortie (l'exutoire de notre bassin).

II.5. Ressources en eau

II.5.1. Ressources en eau superficielles

La région de l'aval Mekerra vit une situation alarmante où l'eau est au centre des inquiétudes des autorités locales. Les eaux de surface de notre bassin sont très variables dans le temps et dans l'espace. Au Sud, où il pleut rarement, les apports en eau de surface sont très faibles et très irréguliers, alors que dans le Nord, ces apports sont plus importants et moins réguliers (Chadli, 2008).

Les eaux de surface concernent les eaux du barrage Sarno, du petit barrage d'écrêtement dans la commune de Tabia, de onze retenues collinaires et de six sources. Pour l'alimentation en eau potable, la wilaya de Sidi Bel Abbes reste tributaire des transferts d'eau des barrages extra wilaya (tab.II.12): barrage Sidi Abdelli, barrage Bouhanifia et barrage Cheurfa (Bennabi et al., 2012).

Il est à noter que :

- Presque toutes les ressources en eau superficielles sont mobilisées et régularisées au niveau des barrages des wilayas limitrophes (voisines) avec un volume de 120 Hm^3/an ,
- Les onze retenues collinaires totalisent un volume de 86 000 m^3/an destiné essentiellement à l'irrigation.

Tableau II.12 : Barrages exploités par la wilaya de Sidi Bel Abbes (Bennabi et al., 2012)

Barrage	Localisation du barrage	Capacité du barrage (Hm^3)	Volume disponible 2010-2011 (Hm^3)	Apport moyen annuel (Hm^3)
Sidi Abdelli	Tlemcen	110	82,77	61
Bouhanifia	Mascara	75	50,31	38,8
Chorfa	Mascara	70	28,11	30
Sarno	Sidi Bel Abbes	22	6	10

II.5.2. Ressources en eau souterraines

La nappe de la plaine de Sidi Bel Abbes est une nappe libre d'une superficie de 73 Km^2 contenue dans des terrains alluviaux à l'exception du chenal aquifère porté par des agglomérations entre Sidi Khaled et Sidi Bel Abbes où la nappe devient semi-captive, dont le potentiel annuel est estimé à plus de 27 millions de m^3 et dont la qualité est relativement

médiocre. La profondeur de cette nappe est de l'ordre de 15 à 30 m et est alimentée directement par la pluie à 60 Hm³/an, ainsi que par infiltration latérale et par les oueds en période de crue (Bennabi et al., 2012).

II.6. Contexte géologique

L'étude géologique permet de localiser l'extension des différentes couches et de préciser les relations existantes entre elles et particulièrement pour les terrains perméables. La plaine de Sidi Bel Abbas est une cuvette dont les reliefs de bordure sont géologiquement très diversifiés.

Sur la bordure nord, les monts de Tessala sont allongés en direction Sud Ouest/ Nord Est, très plissés à ossature crétacée et à recouvrement tertiaire très épais.

Sur la bordure sud, les monts de Tlemcen-Saïda sont formés presque totalement de matériaux jurassiques moyens et supérieurs et crétacés inférieurs et moyen. Compris entre deux môles granitiques, ce massif peu plastique du Mésozoïque est disloqué par deux systèmes de faille. Sur la bordure ouest, les collines de marnes helvétiques séparent les bassins versants de l'oued Isser et l'oued Mekerra. À l'Est, un prolongement des Béni Chougrane, par la série marneuse du Miocène de Bou Hanifia, atteint l'extrémité orientale de la plaine de Sidi Bel Abbas. Le centre de la plaine est une large cuvette à substratum uniforme argilo-marneux, gris et vert, daté du Miocène ou du Pliocène.

La plaine de Sidi Bel Abbas présente une cuvette remblayée par des dépôts plio-quaternaires provenant du démantèlement des terrains qui l'entourent (calcaires de l'Eocène, calcaires et dolomies du Purbeckien) (Yousfi, 2008).

II.7. Contexte hydrogéologique

La nappe superficielle de la plaine de Sidi Bel Abbas est très hétérogène du fait des nombreuses variations de faciès des terrains aquifères, qui entraînent des modifications de pente, d'écoulement, de réserve et de perméabilité. Elle représente une unité à écoulement convergent vers Sidi Bel Abbas caractérisé par une piézométrie relativement homogène. Elle est alimentée par infiltration directe saisonnière et par les nappes de bordure et drainée par des chenaux conglomératiques dans la zone axiale (Yousfi, 2008).

Elle est considérée, de point de vue hydrogéologique, comme la plus importante du NW algérien. Sa structure en cuvette à remplissage alluvionnaire quaternaire et plio-quaternaire lui permet d'être le siège d'un écoulement souterrain. Elle est limitée au Nord et à l'Est par des terrains post-crétacés, au Sud par des terrains jurassiques et crétacés (fig.II.5) (Otmane, 2015).

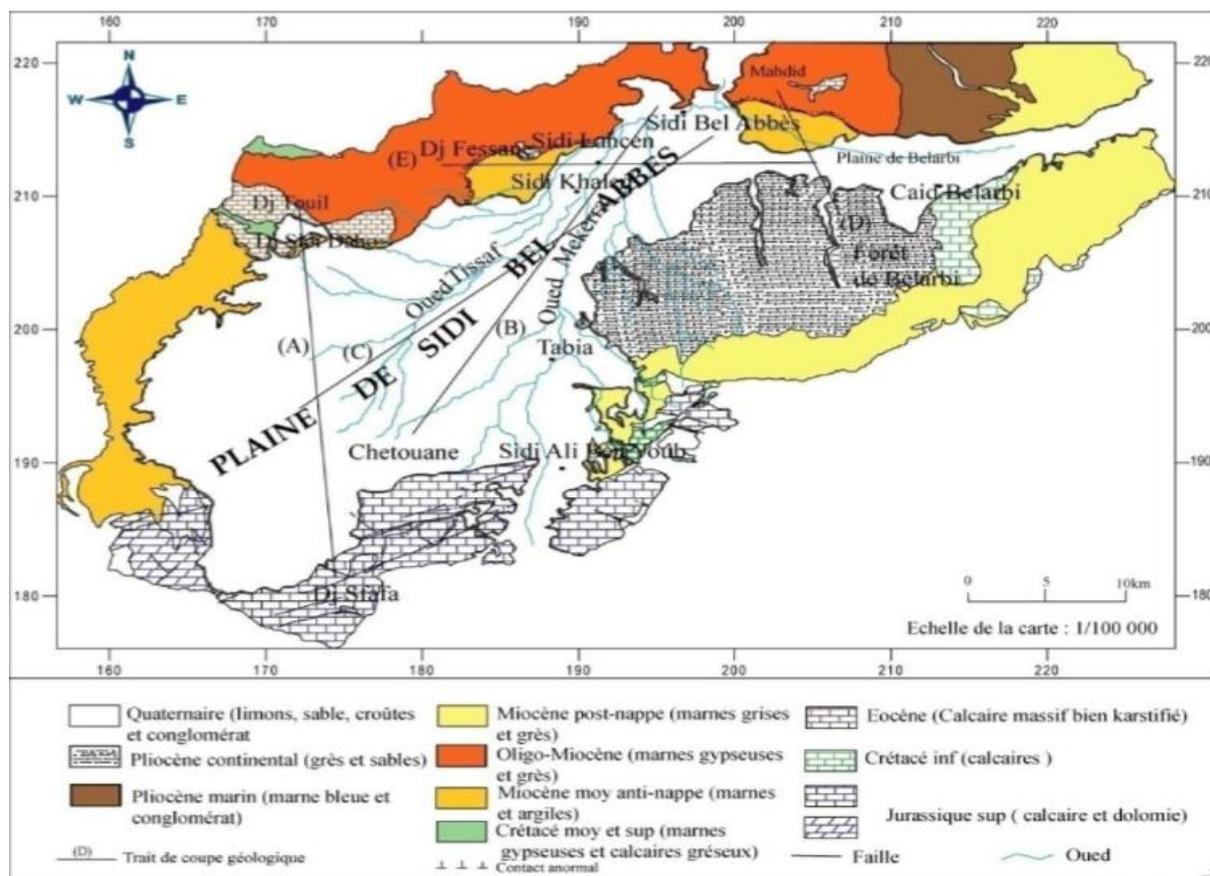


Figure II.5 : Carte hydrogéologique de la plaine de Sidi Bel Abbès (Otmane, 2015)

II.8. Étude du sol

Les Principaux types de sol rencontrés dans notre bassin sont : les sols alluviaux, les sols à croûte calcaire, les sols calcaires, les sols bruns rougeâtres.

Seulement (20%) du bassin est couvert de forêts, principalement au niveau des massifs montagneux compris entre El Haçaïba et Mouley Slissen, ainsi que dans les zones collinaires non cultivables qui sont constituées essentiellement de pins d'Alep et de chênes verts (Mekki, 2017).

À l'amont de Ras El Ma, près de 80% du bassin versant mis en valeur est occupé par des cultures céréalières. Entre Ras El Ma et El Haçaïba, où l'Alfa couvrait par le passé des surfaces importantes, a été remplacée par des cultures céréalières. Entre Sidi Ali Benyoub et Sidi Bel Abbès, les cultures céréalières sont en général associées à des cultures secondaires types oliveraies (Hallouche, 2007).

II.9. Aspect climatologique

En général, le bassin de la basse Mekerra subit l'influence méditerranéenne au Nord et continentale au Sud où le climat est semi-aride, il est caractérisé par des Étés chauds et secs s'étendant d'Avril à Août, et un Hiver relativement doux et humide d'Octobre à Mars.

Les précipitations sont irrégulières, caractérisées par des pluies automnales intenses provoquant des inondations importantes.

Les précipitations considérées comme un facteur principal de l'alimentation des cours d'eau, ont une influence sur la variabilité des écoulements à toutes les échelles de temps, ce qui leur confère une importance capitale sur les effets des crues et les inondations produites dans cette région (Meddi et al., 2013).

II.9.1. Évapotranspiration

La distribution spatiale de l'évapotranspiration réelle (fig.II.6) présente des valeurs relativement élevées tout le long de l'oued Mekerra (73% à 80%), tandis que la moyenne de l'évapotranspiration sur tout le bassin est de 72% de la lame d'eau précipitée. Ceci peut être justifié par l'écoulement permanent de l'oued principal. Cependant, les sous-bassins de la ville de Sidi Bel Abbes montrent des valeurs faibles de l'évapotranspiration réelle à cause de la densité du tissu urbain et l'absence du couvert végétal ainsi que les plans d'eau (Otmame et al., 2019).

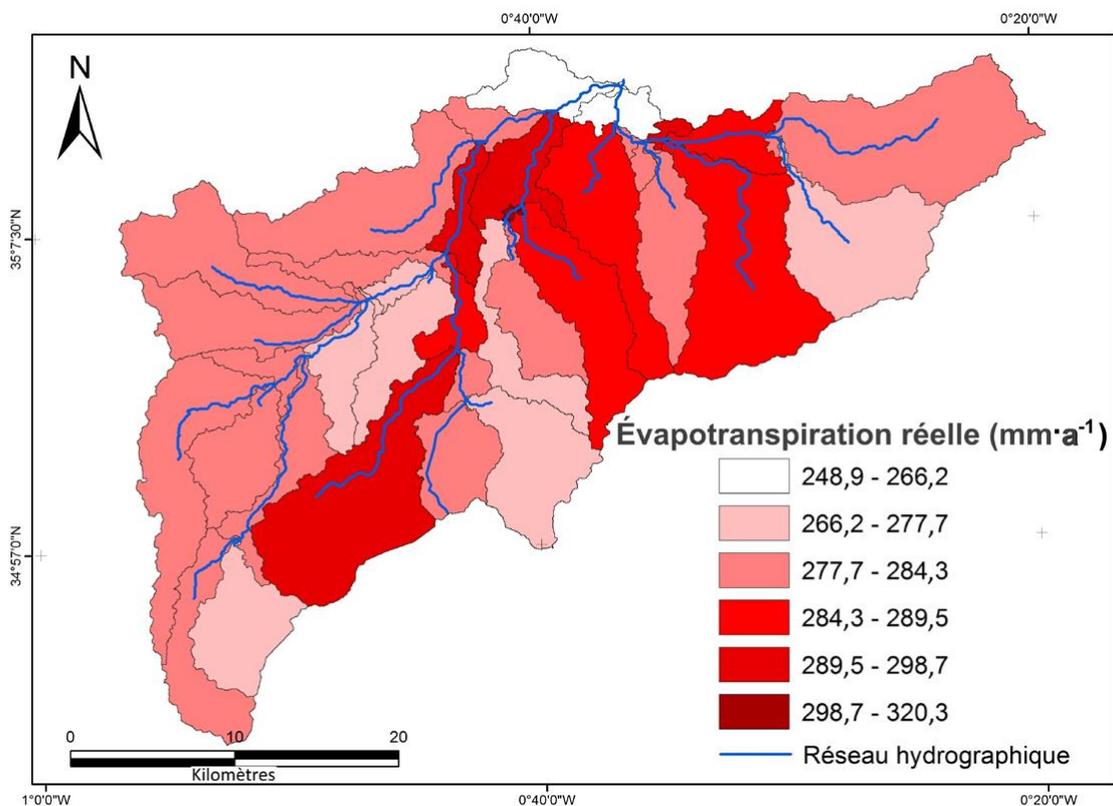


Figure II.6 : Évolution spatiale de l'évapotranspiration réelle (Otmame et al., 2019)

II.9.2. Vent

Les vents les plus fréquents et les plus dominants durant toute l'année pour cette région sont les vents du Sud (secs et chauds), et ceux du Nord-Ouest (secs et froids), leur vitesse est stable pendant toute l'année (Larbi, 2016).

II.10. Conclusion

Dans ce présent chapitre nous avons présenté la région d'étude dans son contexte général, où nous avons donné un aperçu sur les différentes caractéristiques morphométriques, géographiques, géologiques, hydrogéologiques et climatiques. Nous avons constaté que le bassin versant de l'aval Mekerra est un grand bassin de forme allongée orientée sud-ouest/nord-est avec une pente faible et un relief faible, un sol fragile et faible densité de drainage et un réseau de type chêne avec un climat est semi-aride. Le relief frontalier est géologiquement très diversifié, et pour le centre de notre zone, il y a un grand bassin d'argile uniforme, sous-sol gris et vert, les terres environnantes ont été démolies puis remblayées avec des sédiments quaternaires, les différents types de sols présents sont les sols alluviaux, calcaires et les sols bruns rougeâtres.

Nous avons résumé dans le tableau II.13, les caractéristiques morphométriques importantes du bassin versant étudié.

Tableau II.13 : Caractéristiques morphométriques du bassin de l'aval Mekerra

Caractéristiques	Symbole	Unités	Valeurs
Superficie	A	Km ²	1195
Périmètre	P	Km	228,4
Longueur du Rectangle équivalent	Leq	Km	102,5
Largeur du Rectangle équivalent	leq	Km	11,65
Altitudes caractéristiques	H _{min}	m	450
	H _{moy}	m	620,7
	H _{max}	m	1100
	H _{med}	m	680
	H _{50%}	m	680
	H _{95%}	m	540
	H _{5%}	m	840
Indice de compacité	Kc	/	1,85
Indice de pente global	Ig	m/Km	0,0029
Indice de pente de ROCHE	Ip	m/Km	2,08
Pente moyenne	I _m	%	0,63
Facteur de forme	R _f	/	0,113
Coefficient de circularité	R _{ci}	/	0,287
Élancement	Re	/	4,48
Rayon de circularité	R	Km	65,7
Densité de drainage	D _d	Km/Km ²	0,94
Rapport de longueur	R _L	/	2,26
Rapport de confluence	R _c	/	3,8
Fréquence des cours d'eau	F	/	0,59
Coefficient de torrentialité	C _T	/	0,35
Temps de concentration des eaux	T _c	Heure	18h
Type de bassin	/	/	Chêne, grand

Chapitre III

Climatologie

III.1. Introduction

Le climat a varié fortement au cours de l'histoire de la Terre sous l'influence de nombreux phénomènes astronomiques, géologiques, etc., et plus récemment sous l'effet des activités humaines (réchauffement climatique). L'évolution du climat au cours 20^{ème} siècle témoigne d'une augmentation des températures de $0.6 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ (Houghton et al 2001 *in* Auterives 2002).

Le climat varie incessamment à toutes les échelles de temps d'une façon irrégulière enchaînant des périodes plus ou moins longues chaudes et froides. La variabilité climatique se définit comme étant la variation de l'état moyen du climat à des échelles temporelles et spatiales. Autrement dit, c'est la variation naturelle intra et interannuelle du climat. Elle est une caractéristique inhérente du climat qui se manifeste par les différences entre les statistiques de long terme des éléments climatiques (pluie, température, humidité, durée des saisons) calculées pour des périodes différentes. La variabilité du climat est souvent perçue à travers l'irrégularité des paramètres climatiques dans leur évolution (Sankara, 2010).

L'objectif de ce chapitre est d'étudier le climat du bassin versant de la basse Mekerra situé. Cette étude sera abordée par l'analyse de la série des précipitations relative à la période 1977/1978 - 2018/2019 et celle des températures correspondant à la période 1989/1990 - 2018/2019. La différence de la période étudiée entre les précipitations et les températures est due à la non disponibilité des données de température entre 1977/1978 et 1988/1989. Ces données correspondent à la station de Sidi Bel Abbas (Code de la station : 110305 et les coordonnées : X: 194.25 Km, Y: 215.6 Km, Z: 485 m), collectées auprès de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H.).

III.2. Analyse des séries de précipitations et de températures

Cette analyse va permettre de mieux comprendre le comportement de ces deux variables dans le bassin versant de la basse Mekerra, pour différentes échelles de temps (annuelle, mensuelle et saisonnière).

III.2.1. Analyse des précipitations

III.2.1.1. Variation annuelle des précipitations

Les valeurs des précipitations annuelles enregistrées au niveau de la station de Sidi Bel Abbas pour le bassin versant de la basse Mekerra relatives à la période 1977/1978-2018/2019 sont mentionnées sur le tableau III.1.

D'après l'évolution interannuelle des précipitations (fig.III.1), nous remarquons que :

- La valeur minimale des précipitations annuelles enregistrée au niveau de la station de Sidi Bel Abbas est de 175,8 mm observée durant l'année 1995/1996,
- Durant la même période, cette station a enregistré une valeur maximale de 591 mm en 2007/2008,
- La moyenne est de 326,6 mm,

- Les valeurs de précipitations annuelles supérieures à la moyenne, désignent une période humide, et celles inférieures à la moyenne, une période sèche. Ainsi, on peut déceler une période globalement déficitaire de 1977/1978 à 2006/2007 suivie d'un retour aux précipitations excédentaires à partir de 2007/2008.

Tableau III.1 : Totaux annuels des précipitations à la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

Années	Précipitations (mm)	Années	Précipitations (mm)	Années	Précipitations (mm)
1977/1978	299,9	1991/1992	210,9	2005/2006	310,4
1978/1979	420,2	1992/1993	230,9	2006/2007	256,5
1979/1980	315,9	1993/1994	250,7	2007/2008	591,0
1980/1981	211,4	1994/1995	443,7	2008/2009	524,4
1981/1982	283,2	1995/1996	175,8	2009/2010	374,7
1982/1983	226,8	1996/1997	451,6	2010/2011	392,9
1983/1984	412,1	1997/1998	346,0	2011/2012	282,7
1984/1985	344,5	1998/1999	234,4	2012/2013	435,2
1985/1986	301,9	1999/2000	329,9	2013/2014	404,4
1986/1987	219,8	2000/2001	348,4	2014/2015	452,0
1987/1988	225,8	2001/2002	354,7	2015/2016	290,4
1988/1989	275,4	2002/2003	285,0	2016/2017	323,9
1989/1990	364,9	2003/2004	271,9	2017/2018	347,7
1990/1991	229,1	2004/2005	340,3	2018/2019	327,9

Source : A.N.R.H.

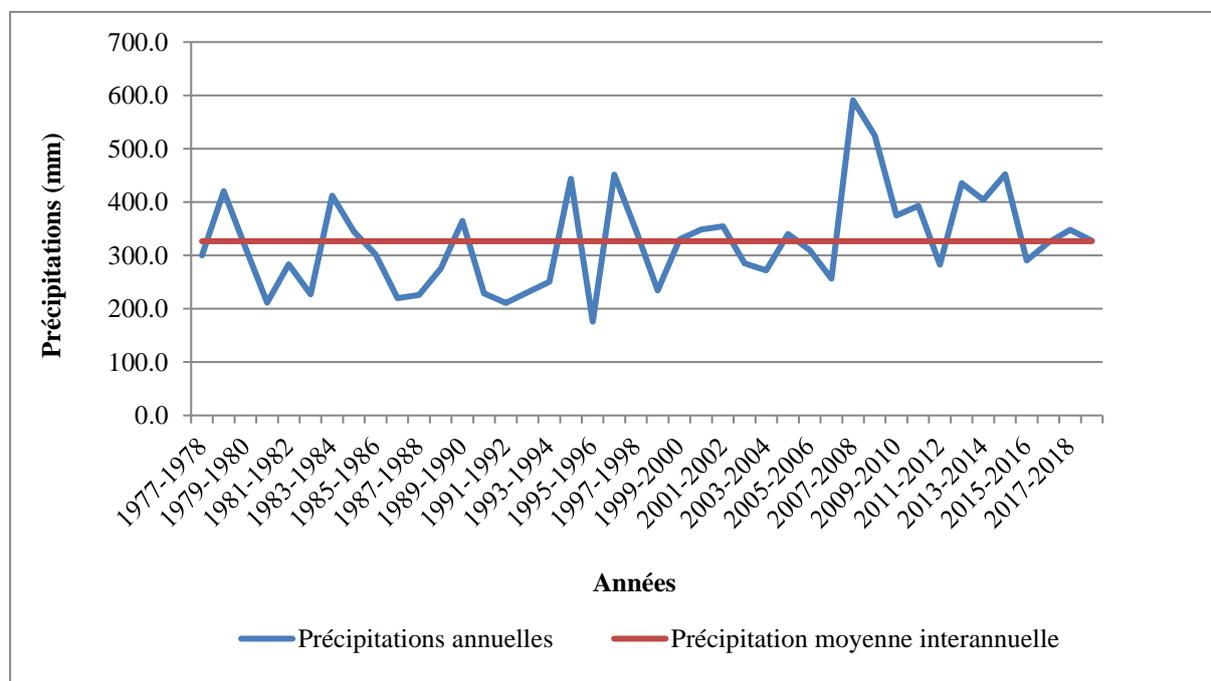


Figure III.1 : Variation des précipitations annuelles à la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

III.2.1.1.a. Coefficient d'immodération (CI)

Le coefficient d'immodération noté CI qui est en fait le rapport entre les précipitations annuelles les plus élevées (le maximum) et les précipitations annuelles les plus faibles (le minimum) enregistrées durant la série d'observation. Cet indice mesure l'amplitude maximale des fluctuations des précipitations à l'échelle annuelle. En d'autres mots, plus la valeur de CI est élevée, plus l'écart entre les précipitations maximales et les précipitations minimales est grand (Assani et al., 2015).

Dans notre cas, CI est égal à 3,36, mettant en évidence une certaine irrégularité des précipitations au niveau de Sidi Bel Abbes.

III.2.1.1.b. Répartition des variations des précipitations annuelles

Nous constatons d'après la figure III.2 que le pourcentage des années dont les précipitations annuelles sont supérieures à la moyenne est de 47,62%, et que le pourcentage de celles inférieures à la moyenne vaut 52,38%. Ces résultats nous montrent que le bassin versant de la basse Mekerra a connu une période relativement sèche (déficitaire) durant la période d'observation.

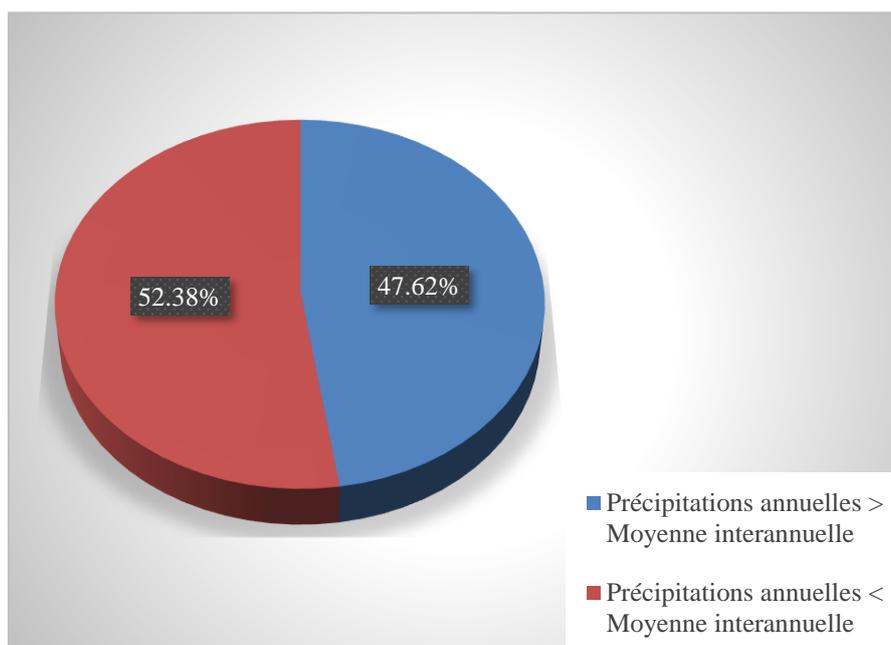


Figure III.2 : Répartition des années humides et sèches à la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

III.2.1.2. Variation des précipitations moyennes mensuelles

La variation des précipitations moyennes mensuelles enregistrées au niveau de la station de Sidi Bel Abbes durant la période 1977/1978-2018/2019 (tab.III.2) (fig.III.3), montre que :

- La plus forte pluviométrie est enregistrée au mois de Novembre avec 48,1 mm,
- La plus faible pluviométrie de 1,4 mm est enregistrée au mois de Juillet,

- La période relativement pluvieuse s'étend de Septembre à Mai avec des pluies moyennes mensuelles supérieures à 20 mm.

Tableau III.2 : Variations des précipitations moyennes mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
P (mm)	21.6	31.0	48.1	41.7	44.5	39.7	37.3	31.0	20.8	6.7	1.4	2.8

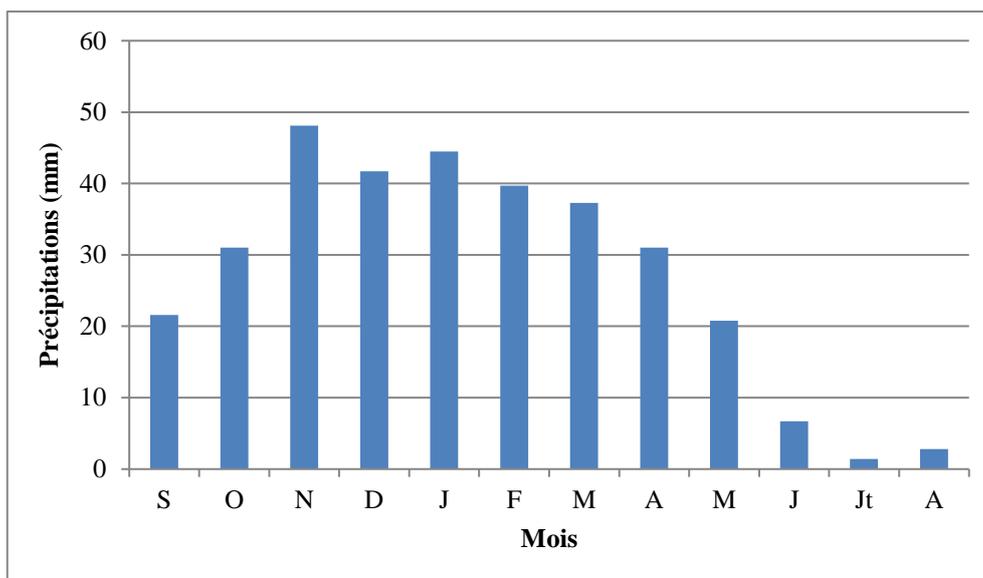


Figure III.3 : Variation des précipitations moyennes mensuelles à la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

III.2.1.3. Variation des précipitations moyennes saisonnières

Les données du tableau III.3 et l'examen de la figure III.4, indiquent que :

L'Hiver est relativement la saison la plus pluvieuse avec des précipitations moyennes saisonnières de 125,9 mm. Toutefois avec des totaux saisonniers moyens de 100,6 et 89,2 mm on peut considérer aussi l'Automne et le Printemps comme des saisons pluvieuses. Ceci nous permet de dire que dans la région de Sidi Bel Abbes, nous assistons à deux périodes l'une pluvieuse formée par l'Automne, l'Hiver et le Printemps et l'autre sèche représentée par l'Été avec 10,9 mm.

Tableau III.3 : Tableau des variations moyennes saisonnières des précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

Saisons	Précipitations (mm)
Automne	100,6
Hiver	125,9
Printemps	89,2
Été	10,9

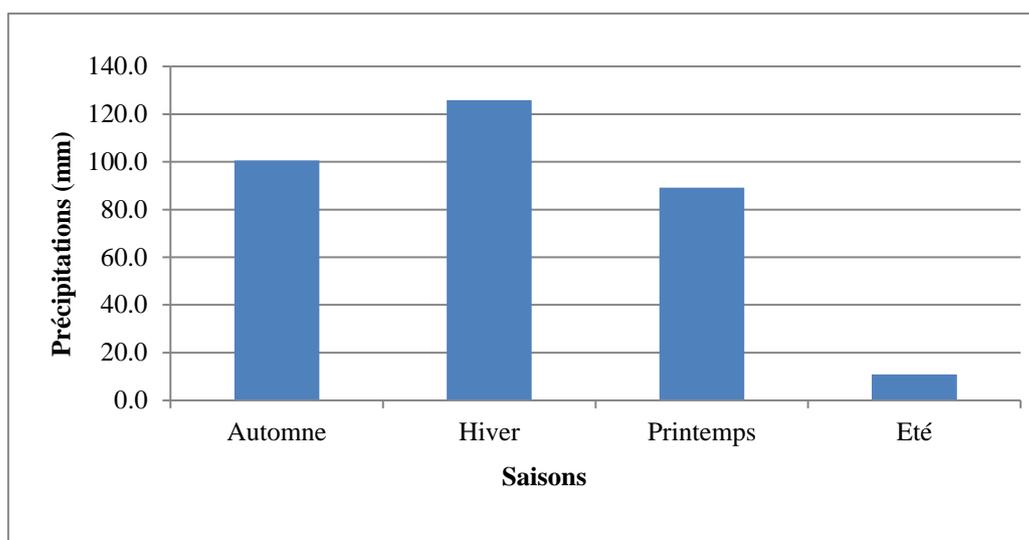


Figure III.4 : Variation des précipitations moyennes saisonnières à la station de Sidi Bel Abbès (1977/1978-2018/2019)

III.2.2. Analyse des températures

III.2.2.1. Variations des températures moyennes annuelles

Les données des températures moyennes annuelles (tab.III.4) nous ont permis de tracer l'évolution des températures durant la période 1989/1990-2018/2019 (fig.III.5) qui montre que :

- La température la plus basse enregistrée au niveau de la station de Sidi Bel Abbès pendant la période d'étude est de 15,1°C observée pendant l'année 1991/1992, alors que la plus élevée est de 20°C durant 2016/2017,
- La température a tendance à augmenter de l'ordre de 0,1°C au cours de la période étudiée,
- La moyenne interannuelle est de 17,6°C.

Tableau III.4 : Températures moyennes annuelles de la station de Sidi Bel Abbès (1989/1990-2018/2019)

Années	Températures (°C)	Années	Températures (°C)	Années	Températures (°C)
1989/1990	16,8	1999/2000	17,5	2009/2010	18,1
1990/1991	15,7	2000/2001	18,9	2010/2011	18,1
1991/1992	15,1	2001/2002	17,1	2011/2012	18,6
1992/1993	15,6	2002/2003	18,5	2012/2013	18,4
1993/1994	16,2	2003/2004	18,3	2013/2014	18,9
1994/1995	16,0	2004/2005	17,6	2014/2015	19,4
1995/1996	16,4	2005/2006	18,0	2015/2016	19,3
1996/1997	16,9	2006/2007	17,4	2016/2017	20,0
1997/1998	17,6	2007/2008	16,6	2017/2018	18,5
1998/1999	17,2	2008/2009	17,2	2018/2019	18,7

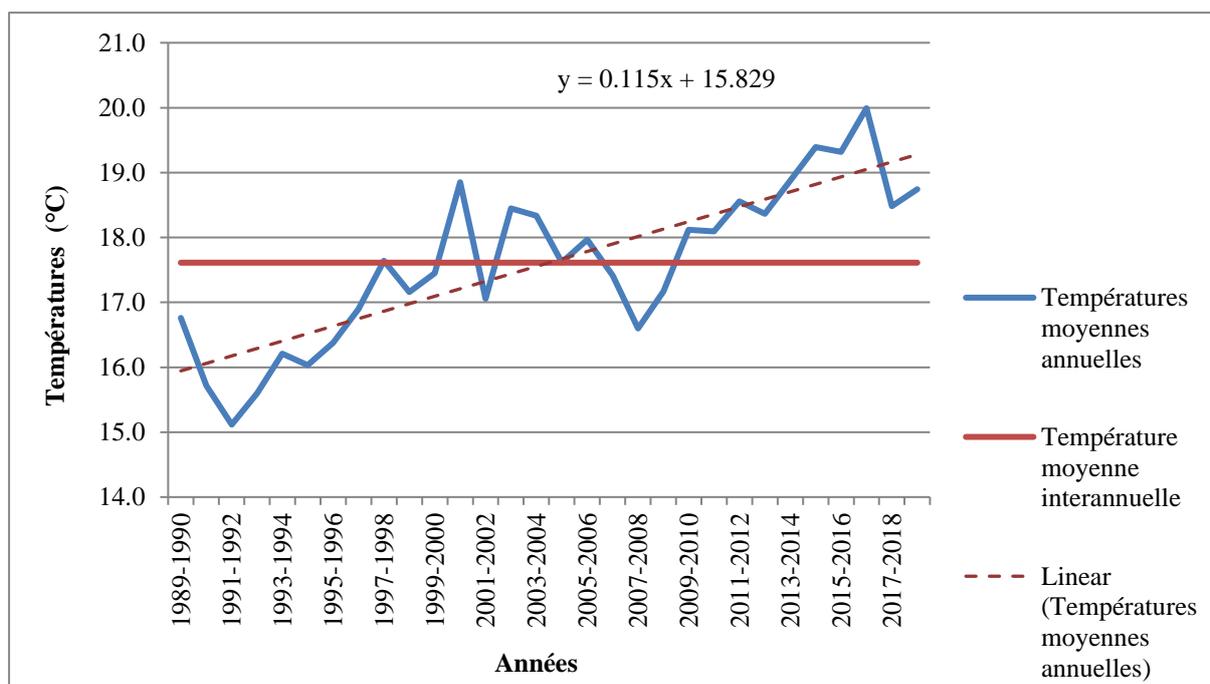


Figure III.5 : Variation des températures moyennes annuelles de la station de Sidi Bel Abbès (1989/1990-2018/2019)

III.2.2.1.a. Répartition des variations moyennes annuelles des températures

Nous constatons d'après la figure III.6 que les pourcentages du nombre d'années ayant enregistré des températures supérieures ou inférieures à la moyenne observée durant la période d'étude sont identiques (46,67%), par contre, le pourcentage de celles égales à la moyenne est très petit qui vaut 6,67%. Ces résultats nous permettent de dire qu'il n'y a pas vraiment une différence entre les années chaudes et les années plus froides au cours de la période étudiée (présence de cyclicité) avec une tendance vers la hausse ces dernières années.

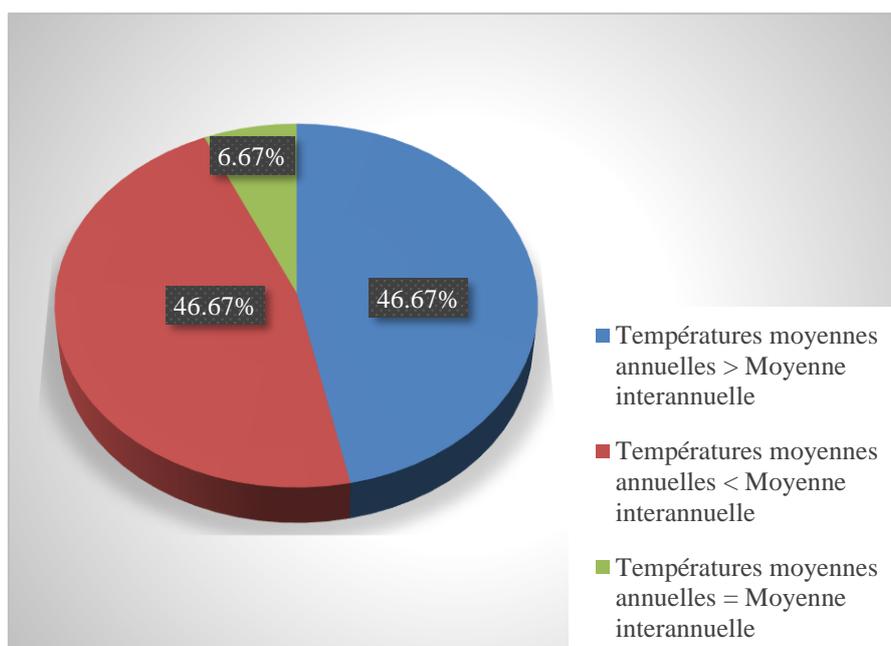


Figure III.6 : Répartition des variations moyennes annuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbès (1989/1990-2018/2019)

III.2.2.2. Variation des températures moyennes mensuelles

Les températures moyennes mensuelles à la station de Sidi Bel Abbès (tab.III.5 et fig.III.7) représentant l'évolution mensuelle des températures mettent en évidence que :

- Janvier est le mois le plus froid, avec une moyenne de 9,1°C et Juillet le mois le plus chaud avec 27,5°C.

Tableau III.5 : Tableau des variations moyennes mensuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbès (1989/1990-2018/2019)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
T (°C)	23.1	18.8	13.5	10.3	9.1	10.2	12.8	15.2	19.6	23.9	27.5	27.3

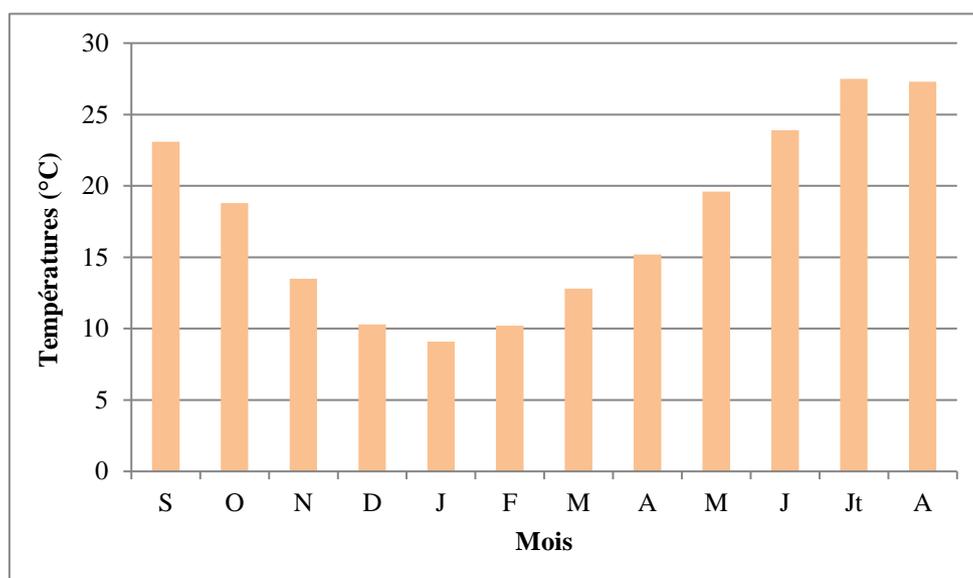


Figure III.7 : Variation des températures moyennes mensuelles de la station de Sidi Bel Abbès (1989/1990-2018/2019)

III.2.2.3. Variation des températures moyennes saisonnières

D'après le tableau III.6 et la figure III.8, nous constatons que :

- L'Hiver est la saison la plus froide, où il a été enregistré une température de 9,9°C durant la période 1989/1990-2018/2019,
- L'Été est la saison la plus chaude, il a été enregistré une température de 26,3°C.

Tableau III.6 : Tableau des variations moyennes saisonnières des températures de la station de Sidi Bel Abbès (1989/1990-2018/2019)

Saisons	Températures(°C)
Automne	18,5
Hiver	9,9
Printemps	15,9
Été	26,3

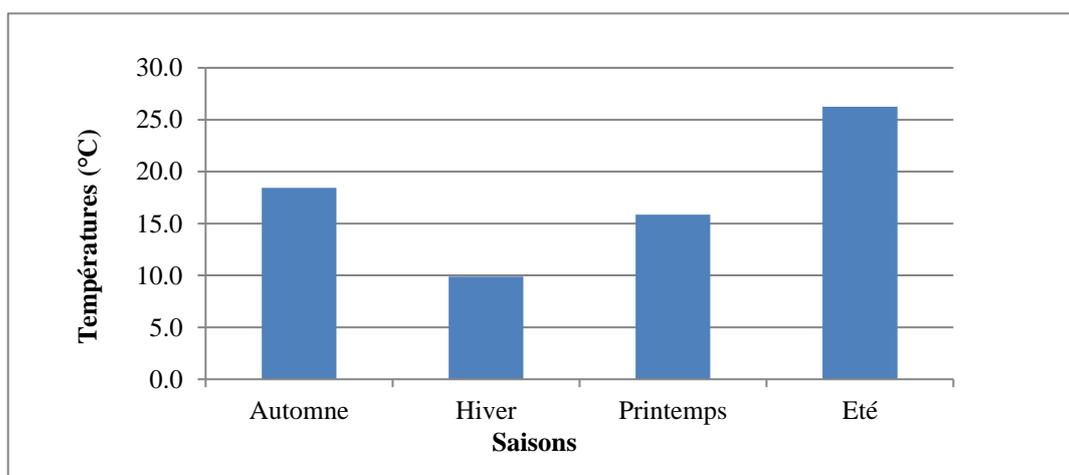


Figure III.8 : Variation des températures moyennes saisonnières de la station de Sidi Bel Abbès (1989/1990-2018/2019)

III.3. Analyse du climat

L'analyse climatique sert à identifier le type du climat du bassin versant de la basse Mekerra situé dans la région de Sidi Bel Abbes. Pour cela, nous avons utilisé le diagramme pluviothermique de Gaussen et Bagnouls, et l'indice d'aridité de De Martonne.

III.3.1. Diagramme pluviothermique de Gaussen et Bagnouls (1953)

Le diagramme pluviothermique a été établi par les botanistes Gaussen et Bagnouls en 1953. L'équation de ce diagramme est de la forme $P \geq 2T$, en effet, les précipitations et les températures moyennes mensuelles sont reportées sur l'axe des ordonnées, et les mois sur l'axe des abscisses, telles que, P est les précipitations moyennes mensuelles en millimètre (mm), et T les températures moyennes mensuelles en degrés Celsius (°C).

Ce diagramme permet de distinguer les mois secs quand $P < 2T$, et les mois humides quand $P > 2T$.

La figure III.9, fait ressortir :

- Une période humide qui s'étend de la mi – Octobre jusqu'à la mi – Avril,
- Une période sèche qui couvre les autres mois de l'année.

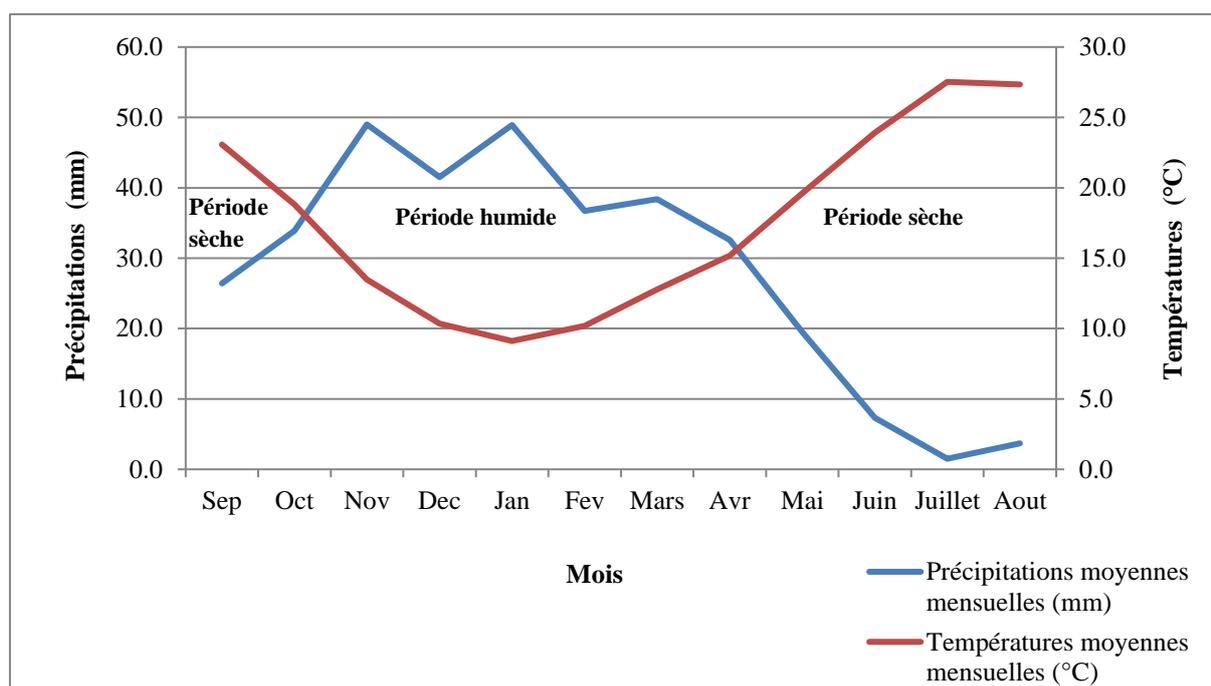


Figure III.9 : Diagramme pluviothermique de Gaussen et Bagnouls de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990–2018/2019)

III.3.2. Indice climatique : Indice d'aridité de De Martonne (1926)

L'indice d'aridité de De Martonne noté I est un indice climatique, qui a été établi par le géographe E. De Martonne en 1926. Cet indice permet de connaître le type du climat de la région étudiée.

Pour définir le type du climat, De Martonne a proposé la classification suivante :

Tableau III.7 : Tableau de la classification du climat de De Martonne

Valeurs de I	I < 5	5 < I < 7,5	7,5 < I < 10	10 < I < 20	20 < I < 30	I > 30
Type du climat	Hyperaride	Désertique	Steppique	Semi-aride	Tempéré	Humide

III.3.2.1. Indice d'aridité annuel de De Martonne

L'indice d'aridité annuel de De Martonne se calcule à partir du rapport de la hauteur moyenne des précipitations par la somme de 10 et la moyenne des températures. Le calcul de cet indice est fait par la formule suivante :

$$I = \frac{P}{T+10} \quad \text{(III. 1)}$$

avec :

I : Indice d'aridité annuel,

P : Précipitations moyennes annuelles (mm) = 339,4 mm (calculée pour la période 1989/1990–2018/2019)

T : Température moyenne annuelle (°C) = 17,6°C.

Dans notre étude, nous avons : **I = 12,3**

Nous trouvons que $10 < I < 20$, donc le climat est semi-aride, ce qui est confirmé par l'abaque de De Martonne (fig.III.10) ci-dessous :

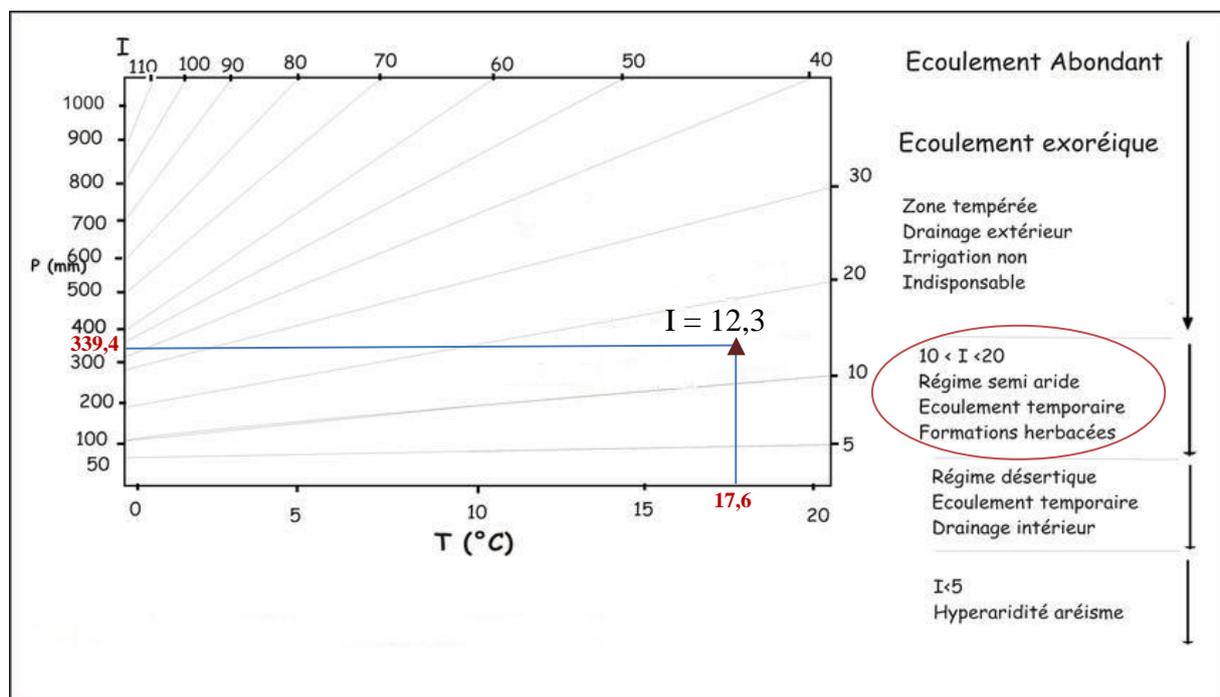


Figure III.10 : Abaque de De Martonne à la station de Sidi Bel Abbès (1989/1990-2018/2019)

III.3.2.2. Indice d'aridité mensuel de De. Martonne

L'indice d'aridité mensuel de De Martonne est donné par la formule suivante :

$$i = \frac{12 p}{t+10} \quad (\text{III. 2})$$

avec :

p : Précipitations moyennes mensuelles (mm),

t : températures moyennes mensuelles (°C),

i : Indice mensuel de De Martonne.

Nous présentons dans le tableau III.8, la classification du climat mensuel à la station de Sidi Bel Abbas selon l'indice mensuel de De Martonne pour la période 1989/1990-2018/2019.

Selon cette classification, on peut voir que la période humide s'étale de Novembre à Mars, limité par deux mois semi-arides d'Octobre et Avril. Dans le reste de l'année s'installe un climat chaud et sec.

Tableau III.8 : Classification du climat mensuel selon De Martonne de la station de Sidi Bel Abbas (1989/1990-2018/2019)

Mois	Précipitations (mm)	Températures (°C)	Indices mensuels	Type de climat
Septembre	26,4	23,1	9,58	Steppique
Octobre	33,9	18,8	14,13	Semi-aride
Novembre	49,0	13,5	25,04	Tempéré
Décembre	41,5	10,3	24,48	Tempéré
Janvier	48,9	9,1	30,70	Humide
Février	36,7	10,2	21,81	Tempéré
Mars	38,4	12,8	20,22	Tempéré
Avril	32,6	15,2	15,53	Semi-aride
Mai	19,5	19,6	7,91	Steppique
Juin	7,3	23,9	2,58	Hyperaride
Juillet	1,5	27,5	0,48	Hyperaride
Août	3,7	27,3	1,19	Hyperaride

III.4. Analyse statistique de la série des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

L'Analyse statistique a été réalisée sur la série des précipitations annuelles enregistrées au niveau de la station de Sidi Bel Abbas durant la période 1977/1978-2018/2019, afin de déterminer une loi de probabilité adéquate à notre série étudiée. Le logiciel utilisé pour cette analyse est XLSTAT.

XLSTAT est une suite logicielle développée par Addinsoft et commercialisée par Addinsoft et ses partenaires. Il s'agit d'une solution complète pour l'analyse des données et les statistiques avec Microsoft Excel. Au fil des ans, XLSTAT est devenu l'une des principales solutions pour la statistique et l'analyse multivariée, avec un nombre de méthodes très

important et des applications dans de très nombreux domaines. XLSTAT fonctionne avec Microsoft Excel sous Windows, Mac et sous Google Sheets et Microsoft Excel en ligne.

Sa mission est de rendre l'analyse des données et les statistiques accessibles à tous. De plus, il a une interface intuitive, en plus il utilise Excel comme une interface de récupération des données et d'affichage des résultats.

XLSTAT permet d'utiliser les techniques de :

- Statistique,
- Analyse de données,
- Modélisation sans quitter Microsoft Excel.

III.4.1. Application de la loi normale (loi de Gauss) à la série des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbes pour la période 1977/1978-2018/2019

Le tableau III.9 regroupe les paramètres de position et de dispersion les plus utilisés pour décrire la série de précipitations annuelles enregistrées au niveau de la station de Sidi Bel Abbes au cours de la période 1977/1978-2018/2019.

Tableau III.9 : Paramètres de position et de dispersion pour les données de précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

	Paramètre	Formule	Valeurs
Paramètre de position	Moyenne (mm)	$\bar{P} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i$	326,6
Paramètres de dispersion	Variance (mm ²)	$V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2$	7898,4
	Écart type (mm)	$\sigma = \sqrt{V}$	88,9
	Coefficient de variation	$C_v = \frac{\sigma}{\bar{P}}$	0,27

avec:

N : Effectif total de la série pluviométriques = 42,

P_i : Précipitations annuelles pour chaque année (mm).

C_v < 0,3, indique que la série des précipitations annuelles de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019) est peu dispersée autour de la moyenne, ce qui implique qu'il y a une certaine symétrie concernant la distribution de notre série étudiée. Donc la loi normale (loi de Gauss) est pratiquement applicable.

La loi de probabilité de la loi normale (loi de Gauss) est définie par la suite :

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\mu} e^{-\mu^2/2} d\mu \quad \text{d'où : } \mu = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \quad ; x \in] -\infty, +\infty[\quad (\text{III. 3})$$

μ : Variable réduite de Gauss.

Dans notre cas, nous savons que :

- x : Précipitations annuelles notées P ,
- \bar{x} : Moyenne des précipitations annuelles notée \bar{P} .

La fréquence au non dépassement est calculée par la formule suivante :

$$F(x) = \frac{i - 0,5}{N} \quad (\text{III. 4})$$

avec:

N : Effectif total de la série pluviométriques = 42,

i : Rang.

$$P = \sigma \mu + \bar{P} \rightarrow \text{équation de la droite d'Henry} \quad (\text{III. 5})$$

Tableau III.10 : Calcul de F et μ pour la série de précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

Années	P (mm)	Rang i	F = (i-0,5)/42	μ déterminée par la table de Gauss	Années	P (mm)	Rang i	F = (i-0,5)/42	μ déterminée par la table de Gauss
1977/1978	299,9	18	0,4167	-0,21	1998/1999	234,4	9	0,2024	-0,83
1978/1979	420,2	36	0,8452	1,02	1999/2000	329,9	24	0,5595	0,15
1979/1980	315,9	21	0,4881	-0,03	2000/2001	348,4	29	0,6786	0,46
1980/1981	211,4	3	0,0595	-1,56	2001/2002	354,7	30	0,7024	0,53
1981/1982	283,2	15	0,3452	-0,4	2002/2003	285	16	0,3690	-0,33
1982/1983	226,8	6	0,1310	-1,12	2003/2004	271,9	12	0,2738	-0,6
1983/1984	412,1	35	0,8214	0,92	2004/2005	340,3	25	0,5833	0,21
1984/1985	344,5	26	0,6071	0,27	2005/2006	310,4	20	0,4643	-0,09
1985/1986	301,9	19	0,4405	-0,15	2006/2007	256,5	11	0,2500	-0,67
1986/1987	219,8	4	0,0833	-1,38	2007/2008	591	42	0,9881	2,26
1987/1988	225,8	5	0,1071	-1,24	2008/2009	524,4	41	0,9643	1,8
1988/1989	275,4	13	0,2976	-0,53	2009/2010	374,7	32	0,7500	0,67
1989/1990	364,9	31	0,7262	0,6	2010/2011	392,9	33	0,7738	0,75
1990/1991	229,1	7	0,1548	-1,02	2011/2012	282,7	14	0,3214	-0,46
1991/1992	210,9	2	0,0357	-1,8	2012/2013	435,2	37	0,8690	1,12
1992/1993	230,9	8	0,1786	-0,92	2013/2014	404,4	34	0,7976	0,83
1993/1994	250,7	10	0,2262	-0,75	2014/2015	452	40	0,9405	1,56
1994/1995	443,7	38	0,8929	1,24	2015/2016	290,4	17	0,3929	-0,27
1995/1996	175,8	1	0,0119	-2,26	2016/2017	323,9	22	0,5119	0,03
1996/1997	451,6	39	0,9167	1,38	2017/2018	347,7	28	0,6548	0,4
1997/1998	346	27	0,6310	0,33	2018/2019	327,9	23	0,5357	0,09

Pour connaître si notre série étudiée suit la loi normale ou non, nous avons réalisé deux tests : un test graphique et un test numérique par application du logiciel statistique XLSTAT.

III.4.1.1. Test graphique

Le test graphique ou bien l'ajustement graphique est exprimé par un nuage de points de la série étudiée (en bleu), et par la droite d'Henry de la forme $y = ax + b$ (en noir), et aussi par des courbes qui sont des intervalles de confiance à 5% (en gris). Ce test est présenté par le graphe (fig.III.11), qui donne les précipitations annuelles qui sont en fonction de la variable réduite de Gauss μ :

D'après la figure III.11, nous voyons que :

- La droite d'Henry correspond à l'équation $P = 88,4 \mu + 326,7$, et le coefficient de détermination (R^2) vaut 0,957 qui est proche de 1, ce qui veut dire que nous avons une bonne corrélation,
- Tous les points sont pratiquement compris entre les intervalles de confiance à 95%, sauf les valeurs extrêmes que nous pouvons négliger, nous pouvons dire que ce test graphique est positif.

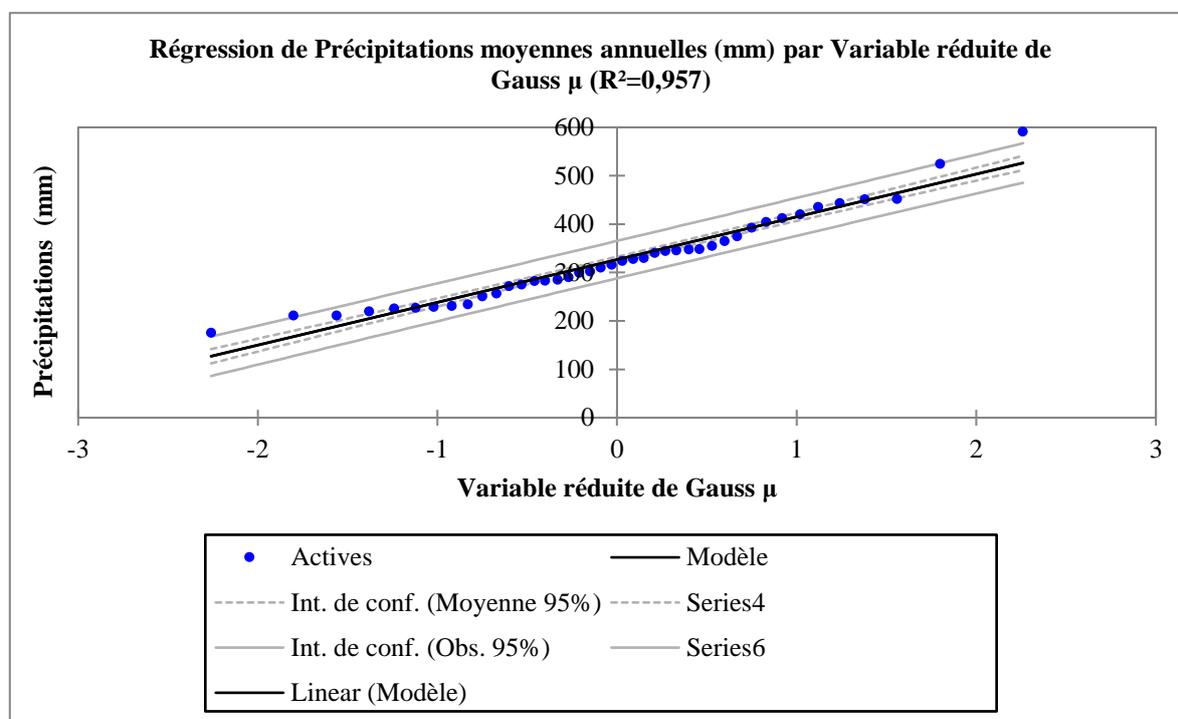


Figure III.11 : Ajustement graphique à la loi de Gauss des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

III.4.1.2. Test numérique : Test de Khi carré (χ^2)

Le tableau III.11 représente le résultat de Khi carré (χ^2) donné par le logiciel XLSTAT.

Tableau III.11 : Résultats du test de Khi carré (χ^2)

Paramètre	Symbole	Valeurs
Nombre de classe	k	10
Paramètre de la loi normale	p en fonction de \bar{P} et σ	2
Degré de liberté	$v = k-p-1$	7
Intervalle de confiance	α	5%
Khi carré calculé	χ^2 calculé	8,75
Khi carré tabulé	χ^2 tabulé	14,07

Le χ^2 calculé étant inférieur au χ^2 tabulé, le test numérique est positif.

D'après les deux tests graphique et numérique, l'ajustement de la série des précipitations annuelles enregistrées au niveau de la station de Sidi Bel Abbes pendant la période 1977/1978-2018/2019 à une loi normale est adéquat.

III.4.2. Application de la loi Log-normale à la série des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

Le tableau III.12, regroupe les paramètres de position et de dispersion les plus utilisés pour décrire la série du logarithme décimal des précipitations annuelles enregistrées au niveau de la station de Sidi Bel Abbes au cours de la période 1977/1978-2018/2019.

Tableau III.12 : Paramètres de position et de dispersion du logarithme décimal de la série des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

	Paramètre	Formule	Valeurs
Paramètre de position	Moyenne	$\overline{\text{Log}(P)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{Log}(P_i)$	2,4986
Paramètres de dispersion	Variance	$V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{Log}(P_i) - \overline{\text{Log}(P)})^2$	0,0134
	Écart type	$\sigma = \sqrt{V}$	0,1159
	Coefficient de variation	$C_v = \frac{\sigma}{\overline{\text{Log}(P)}}$	0,0464

Nous avons trouvé un $C_v < 0,3$, ce qui nous permet de dire que la série du logarithme décimal des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019) est peu dispersée autour de la moyenne, ce qui implique qu'il y a une certaine symétrie concernant la distribution de cette série étudiée. On peut ajuster la série de $\text{Log}P$ à une loi normale.

La loi de probabilité de la loi Log-normale est définie de la même façon que la loi normale, il faut juste permuter la variable x (dans notre cas P) par $\text{Log}(x)$ (dans notre cas $\text{Log}(P)$). Dans ce cas la droite d'Henry s'écrit comme suit :

$$\text{Log}(P) = \sigma_{\text{Log}(P)} \mu + \overline{\text{Log}(P)} \quad (\text{III. 6})$$

Tableau III.13 : Calcul de F et μ pour la série du logarithme décimal des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbès (1977/1978-2018/2019)

Années	Log(P)	Rang i	F = (i-0,5)/42	μ déterminée par la table de Gauss	Années	Log(P)	Rang i	F = (i-0,5)/42	μ déterminée par la table de Gauss
1977/1978	2,4770	18	0,4167	-0,21	1998/1999	2,3700	9	0,2024	-0,83
1978/1979	2,6235	36	0,8452	1,02	1999/2000	2,5184	24	0,5595	0,15
1979/1980	2,4995	21	0,4881	-0,03	2000/2001	2,5421	29	0,6786	0,46
1980/1981	2,3251	3	0,0595	-1,56	2001/2002	2,5499	30	0,7024	0,53
1981/1982	2,4521	15	0,3452	-0,4	2002/2003	2,4548	16	0,3690	-0,33
1982/1983	2,3556	6	0,1310	-1,12	2003/2004	2,4344	12	0,2738	-0,6
1983/1984	2,6150	35	0,8214	0,92	2004/2005	2,5319	25	0,5833	0,21
1984/1985	2,5372	26	0,6071	0,27	2005/2006	2,4919	20	0,4643	-0,09
1985/1986	2,4799	19	0,4405	-0,15	2006/2007	2,4091	11	0,2500	-0,67
1986/1987	2,3420	4	0,0833	-1,38	2007/2008	2,7716	42	0,9881	2,26
1987/1988	2,3537	5	0,1071	-1,24	2008/2009	2,7197	41	0,9643	1,8
1988/1989	2,4400	13	0,2976	-0,53	2009/2010	2,5737	32	0,7500	0,67
1989/1990	2,5622	31	0,7262	0,6	2010/2011	2,5943	33	0,7738	0,75
1990/1991	2,3600	7	0,1548	-1,02	2011/2012	2,4513	14	0,3214	-0,46
1991/1992	2,3241	2	0,0357	-1,8	2012/2013	2,6387	37	0,8690	1,12
1992/1993	2,3634	8	0,1786	-0,92	2013/2014	2,6068	34	0,7976	0,83
1993/1994	2,3992	10	0,2262	-0,75	2014/2015	2,6551	40	0,9405	1,56
1994/1995	2,6471	38	0,8929	1,24	2015/2016	2,4630	17	0,3929	-0,27
1995/1996	2,2450	1	0,0119	-2,26	2016/2017	2,5104	22	0,5119	0,03
1996/1997	2,6548	39	0,9167	1,38	2017/2018	2,5412	28	0,6548	0,4
1997/1998	2,5391	27	0,6310	0,33	2018/2019	2,5157	23	0,5357	0,09

Pour vérifier si notre série étudiée suit la loi Log-normale, nous faisons deux tests : un test graphique et un test numérique, qui sont fait par le logiciel XLSTAT.

III.4.2.1. Test graphique

Ce test est présenté par la figure III.12 donnant le logarithme décimal des précipitations annuelles en fonction de la variable réduite de Gauss μ :

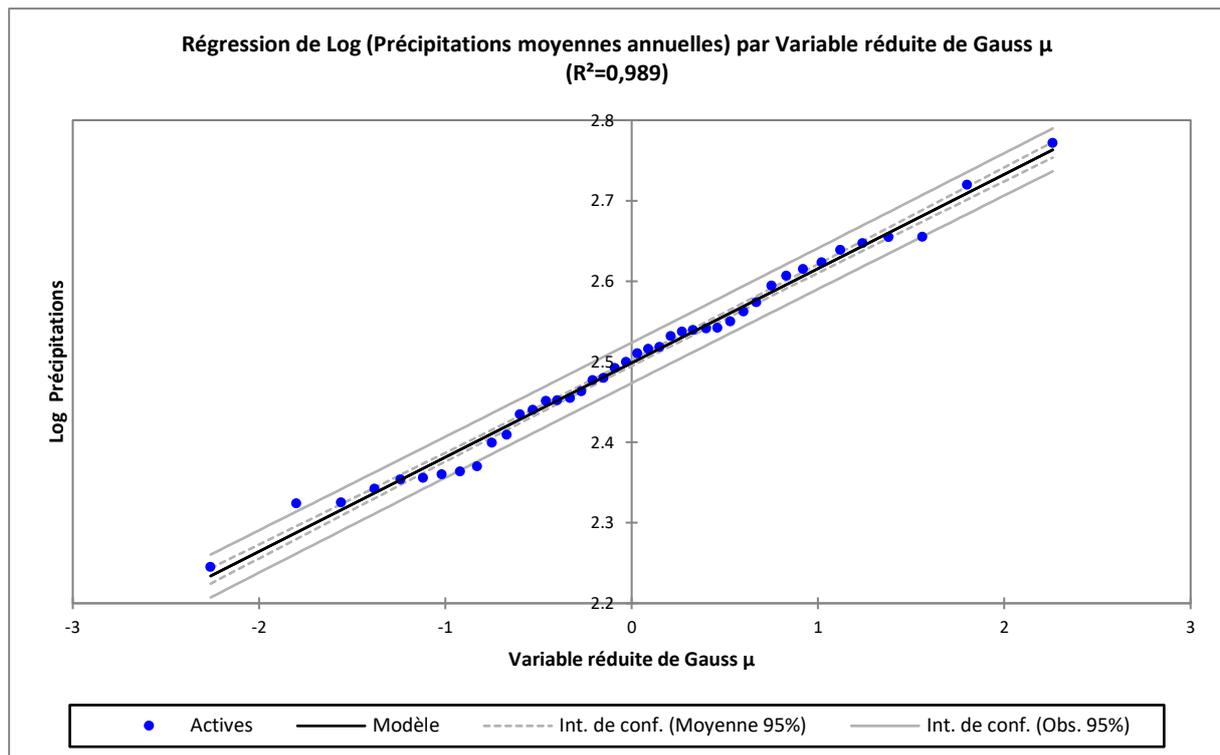


Figure III.12 : Ajustement à la loi normale des Logs des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

D'après la figure III.12, nous voyons que :

- La droite d'Henry correspond à l'équation $\text{Log}P = 0,1171 \mu_{\text{Log}P} + 2,4986$, et le coefficient de détermination (R^2) vaut 0,989 proche de 1, exprimant une bonne corrélation,
- Tous les points sont pratiquement compris entre les courbes enveloppes de l'intervalle de confiance à 95%, nous pouvons dire que ce test graphique est positif.

III.4.2.2. Test numérique : Test de Khi carré χ^2

Le tableau III.14 présente le résultat de Khi carré χ^2 donné par le logiciel XLSTAT.

Tableau III.14 : Tableau de résultats de Khi carré (χ^2)

Paramètre	Symbole	Valeurs
Nombre de classe	k	10
Paramètre de la loi Log-normale	p en fonction de $\overline{\text{Log}(P)}$ et σ	2
Degré de liberté	$\nu = k-p-1$	7
Intervalle de confiance	α	5%
Khi carré calculé	χ^2 calculé	14,06
Khi carré tabulé	χ^2 tabulé	14,07

D'après le tableau III.14, nous remarquons que χ^2 calculé < χ^2 tabulé, donc le test est positif.

En conclusion, la série du logarithme décimal des précipitations annuelles enregistrées au niveau de la station de Sidi Bel Abbes pendant la période 1977/1978-2018/2019 suit la loi normale, d'après le test graphique et le test numérique. Par conséquent la série des précipitations annuelle P suit une loi Log-normale.

III.4.3. Comparaison entre les résultats de la loi normale et la loi Log-normale

Les résultats du tableau III.15, montrent que la loi normale est la plus adéquate pour notre série étudiée, son χ^2 calculé est plus petit de celui de la loi Log-normale.

Tableau III.15 : Comparaison entre les résultats de la loi normale et la loi Log-normale

Loi	Coefficient de détermination (R^2)	Test graphique	Test numérique		Validation
			χ^2 calculé	χ^2 tabulé	
Normale	0,957	Positif	8,75	14,07	Acceptable
Log-normale	0,989	Positif	14,06	14,07	Acceptable

III.5. Bilan hydrologique

Le Glossaire International d'Hydrologie (GIH) donne pour le terme "bilan hydrologique" la définition suivante : " Bilan d'eau fondé sur le principe que, pendant un certain intervalle de temps, le total des apports à un bassin versant ou à une formation aquatique, doit être égal au total des sorties plus la variation, positive ou négative, du volume d'eau stocké dans le bassin ou la formation" . "L'équation de stockage", proposée comme synonyme, elle est définie comme "équation exprimant le bilan de stockage, qui met en jeu les entrées, les sorties et les variations de la réserve, dans une entité hydrologique quelconque pendant une certaine période". [7]

Donc la formule du bilan hydrologique généralement s'écrit sous la forme suivante :

$$P = ETR + R + I \pm \Delta R \quad (III.7)$$

avec:

- P : Hauteur des précipitations annuelles (mm),
- R : Ruissellement de surface annuel (mm),
- ETR : Évapotranspiration réelle annuelle (mm),
- I : Infiltration annuelle (mm),
- ΔR : Variation de la réserve (mm).

III.5.1. Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'ETP est la quantité d'eau évaporée par le sol, soit bien pourvue en eau, et transpirée par le couvert végétal. Elle est généralement exprimée en millimètre (mm).

Il y a plusieurs méthodes pour estimer l'ETP, donc nous avons choisi la méthode de Thornthwaite (1948), car elle est la plus utilisée, en plus en raison de la disponibilité de données.

$$ETP = 16. \left(\frac{10. T}{I} \right)^a . K \quad (III. 8)$$

avec :

ETP : Évapotranspiration potentielle mensuelle (mm),

T : Température moyenne mensuelle (°C),

I : Indice thermique annuel, calculé par la somme des indices thermiques mensuels (i) s'écrit

sous la forme : $i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1,541}$

a : Constante en fonction de I : $a = 6,75.10^{-7}.I^3 - 7,71.10^{-5}.I^2 + 1,79.10^{-2}.I + 0,49$

K: Coefficient de correction en fonction de la latitude et du mois, dans notre cas égale à 35°N.

Les résultats sont résumés dans le tableau III.16.

Tableau III.16 : Estimation de l'ETP mensuelle à la station de Sidi Bel Abbès (1989/1990-2018/2019)

Mois	K	T (°C)	i	ETP corrigée (mm)
Septembre	1,03	23,1	10,13	107,1
Octobre	0,97	18,8	7,43	69,4
Novembre	0,86	13,5	4,49	33,6
Décembre	0,85	10,3	3,01	20,4
Janvier	0,87	9,1	2,48	16,6
Février	0,85	10,2	2,94	19,9
Mars	1,03	12,8	4,14	36,5
Avril	1,09	15,2	5,38	52,8
Mai	1,21	19,6	7,91	93,4
Juin	1,21	23,9	10,69	134,3
Juillet	1,23	27,5	13,23	176,6
Août	1,16	27,3	13,09	164,4

Donc, l'indice thermique annuel (I) vaut 84,90, la constante (a) vaut 1,87.

La valeur de l'évapotranspiration potentielle mensuelle (ETP) est de 925 mm.

III.5.2. Estimation du ruissellement (R)

Le ruissellement est l'écoulement des eaux à la surface d'un bassin versant. Généralement, il est estimé par la formule de Tixeront-Berkaloff (1958) tel que :

$$R = \frac{P^3}{3.ETP^2} \quad (III. 9)$$

avec:

R : Ruissellement de surface annuel (mm),

P : Hauteur des précipitations annuelles (mm),

ETP: Évapotranspiration potentielle annuelle (mm).

Nous résumons les résultats dans le tableau III.17.

Tableau III.17 : Estimation du ruissellement annuel à la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)

P (mm)	ETP corrigée (mm)	R (mm)
339,4	925	15,2

III.5.3. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)

C'est la quantité d'eau réelle évaporée par le sol et les surfaces libres d'un bassin versant, et transpirée par le couvert végétal. Elle est généralement exprimée en millimètre (mm).

Parmi les formules de calcul de l'ETR, la formule de Turc (1954) est la plus utilisée, et elle est définie par :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}} \text{ avec } L = 200 + 25 \cdot T + 0,05 \cdot T^3 \quad (\text{III. 10})$$

avec:

ETP : Évapotranspiration réelle annuelle (mm),

P : Hauteur des précipitations annuelles (mm),

T : Température moyenne annuelle (°C).

Les résultats sont résumés dans le tableau III.18.

Tableau III.18 : Estimation de l'ETR annuelle à la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)

P (mm)	T (°C)	L	ETR (mm)
339,4	17,6	912,59	333,1

III.5.4. Estimation de la réserve utile (RFU)

La RFU est la quantité d'eau stockée par le sol qui peut être reprise pour l'évaporation par l'intermédiaire des plantes.

Selon la thèse Bellaredj 2020, la réserve utile au niveau de la plaine de Sidi Bel Abbes est estimée à 44 mm par an.

III.5.5. Bilan simplifié selon Thornthwaite

Thornthwaite a proposé un bilan simplifié pour déterminer l'ETR, le déficit agricole et l'excédent en se basant sur la notion de la RFU.

Alors :

- Si $P > ETP$, nous avons $ETR = ETP$, et il reste un excédent ($P - ETP$),
- Si $P < ETP$, nous avons $ETR = P + \min(RFU, ETP - P)$ et $RFU = 0$ dans ce cas, il reste un déficit agricole ($Da = ETP - ETR$).

Le tableau III.19 regroupe les paramètres de ce bilan.

Tableau III.19 : Bilan de Thornthwaite à la station de Sidi Bel Abbès (1989/1990-2018/2019)

Mois	P (mm)	ETP corrigée (mm)	$\Delta R = P - ETP$ (mm)	RFU (mm)	ETR (mm)	Exc = P - ETP (mm)	Da = ETP - ETR (mm)
Septembre	26,4	107,1	-80,7	0	26,4	0	80,7
Octobre	33,9	69,4	-35,5	0	33,9	0	35,5
Novembre	49,0	33,6	15,4	15,4	33,6	0	0
Décembre	41,5	20,4	21,1	36,5	20,4	0	0
Janvier	48,9	16,6	32,3	44	16,6	24,8	0
Février	36,7	19,9	16,8	44	19,9	16,8	0
Mars	38,4	36,5	1,9	44	36,5	1,9	0
Avril	32,6	52,8	-20,2	23,8	52,8	0	0
Mai	19,5	93,4	-73,9	0	43,3	0	50,1
Juin	7,3	134,3	-127	0	7,3	0	127
Juillet	1,5	176,6	-175,1	0	1,5	0	175,1
Août	3,7	164,4	-160,7	0	3,7	0	160,7
Annuel	339,4	925	-	-	295,9	43,5	629,1

P : Précipitations (mm), ETP : Évapotranspiration potentielle (mm), ΔR : Variation de la réserve (mm), RFU : Réserve utile (mm), ETR : Évapotranspiration réelle (mm), Exc : Excédent (mm), Da : le déficit agricole (mm).

Selon le bilan de Thornthwaite, nous constatons que la RFU se forme de Novembre jusqu'à Avril avec un maximum de 44 mm de Janvier à Mars, et l'excédent annuel est de 43,5 mm atteint son maximum de 24,8 en Janvier, de plus, le déficit agricole annuel qui est de 629,1 mm apparaît en Septembre et Octobre et de Mai jusqu'à Août avec un maximum de 175,1 mm en Juillet, enfin l'ETR annuelle obtenue par Thornthwaite est 295,9 mm et son maximum est de 52,8 mm atteint en Avril.

III.5.6. Estimation de l'infiltration (I)

L'infiltration est l'opération par laquelle la quantité d'eau pénètre le sol. Elle est exprimée en millimètre (mm). Nous avons déterminé I à partir du bilan hydrologique.

$$I = P - (ETR + Q) \pm \Delta R \quad (III.11)$$

Dans le cas du calcul de Thornthwaite, le Q est défini comme étant un excédent annuel indiqué dans le tableau III.19 qui est de 43,5 mm.

Les résultats sont résumés dans le tableau III.20.

Tableau III.20 : Estimation de l'infiltration annuelle à la station de Sidi Bel Abbès (1989/1990-2018/2019)

P (mm)	R (mm)	ETR (mm)		ΔR (mm)	I (mm)	
		Thornthwaite	Turc		Thornthwaite	Turc
339,4	15,2	295,9	333,1	0	28,3	0

III.5.7. Estimation de l'écoulement (Q)

L'écoulement est toute eau qui ruisselle et s'infiltré. Il est exprimé en lame d'eau écoulée (en mm).

$$\text{Alors : } Q = R + I \quad (\text{III.12})$$

Les résultats sont résumés dans le tableau III.21.

Tableau III.21 : Estimation de Q annuel à la station de Sidi Bel Abbas (1989/1990-2018/2019)

R (mm)	I (mm)		Q (mm)	
	Thornthwaite	Turc	Thornthwaite	Turc
15,2	28,3	0	43,5	6,3

III.6. Conclusion

L'étude du climat du bassin versant de la basse Mekerra situé dans la région de Sidi Bel Abbas a été effectuée par l'analyse des précipitations, des températures et du climat.

Nous avons pu déduire que la série de précipitations annuelles est une série irrégulière avec un coefficient d'immodération supérieur à 1. La moyenne interannuelle est estimée à 326,6 mm durant la période 1977/1978 - 2018/2019 avec un minimum de 175,8 mm observé en 1995/1996, et un maximum de 591 mm atteint en 2007/2008.

Le mois de Novembre est le mois le plus pluvieux avec une valeur de 48,1 mm, par contre le mois de Juillet est le mois le plus sec avec une valeur de 1,4 mm.

L'Hiver avec une valeur de 125,9 mm constitue la saison la plus pluvieuse et l'Été la saison la plus sèche avec une valeur de 10,9 mm.

La plus basse température moyenne annuelle enregistrée durant la période 1989/1990 - 2018/2019 est de 15,1°C enregistrée en 1991/1992, par ailleurs, la valeur de 20°C est la température la plus élevée de la série (année 2016/2017), la moyenne interannuelle étant de 17,6°C. L'évolution des températures annuelles montre une tendance globale vers l'augmentation de l'ordre de 0,1°C/an.

Le mois de Janvier est le mois le plus froid avec une valeur de 9,1°C, par contre le mois de Juillet est le mois le plus chaud avec une valeur de 27,5°C.

L'Hiver d'une température saisonnière de 9,9°C correspond à la saison la plus froide, l'Été est la saison la plus chaude avec 26,3°C.

Le diagramme pluviothermique de Gaussen et Bagnouls visualise une période humide de Novembre à Avril, la période sèche couvre le reste de l'année.

L'indice d'aridité annuel de De Martonne définit un climat semi-aride pour notre bassin versant.

Le bilan hydrologique est défini comme étant un bilan de stockage qui met en jeu, en premier lieu, les entrées qui sont les précipitations, dans notre bassin versant, elles sont de 339,4 mm/an. En deuxième lieu, les sorties qui sont définies par le ruissellement de surface qui vaut 15,2 mm/an (selon Tixeront-Berkaloff), l'évapotranspiration réelle qui est de 333,1 mm/an (selon Turc) ou bien 295,9 mm/an (selon Thornthwaite) ; l'infiltration est nulle (selon Turc) ou bien de 28,3 mm/an (selon Thornthwaite).

Chapitre IV

*Détermination
des ruptures dans
les séries des
précipitations et
des températures*

IV.1. Introduction

Une rupture peut être définie par un changement dans la loi de probabilité des variables aléatoires dans les réalisations successives qui définissent les séries chronologiques étudiées (Lubes et al., 1994 *in* Paturol et al., 1996).

Le chapitre présent a pour but de détecter les ruptures pour les séries chronologiques de précipitations moyennes et de températures moyennes au pas de temps annuel, mensuel et saisonnier par le code de calcul « **Khronostat 1.01** ».

IV.2. Présentation du logiciel Khronostat

Khronostat est un modèle statistique développé par l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) à la Maison des Sciences de l'Eau (MSE) de Montpellier. Il a été développé dans le cadre d'une étude sur la variabilité climatique en Afrique de l'Ouest et du Centre et est orienté sur l'analyse des séries hydroclimatiques (Boyer 2002 *in* Boukhaly et al., 2017).

C'est un logiciel simple, facile et très pratique. Il nous permet de détecter les ruptures qui peuvent être présentes dans des séries statistiques, à savoir des séries de données pluviométriques, de température, de débit, etc. Il peut être utilisé dans le contexte des variations climatiques ou changements climatiques.

Le logiciel Khronostat regroupe différents tests statistiques. Ces tests sont spécifiques d'un changement de comportement de la variable dans la série temporelle.

Les tests les plus utilisés, les mieux argumentés dans la littérature et, surtout, les plus robustes ont été choisis.

La première catégorie de test concerne le caractère aléatoire des séries (test de corrélation sur le rang et autocorrélogramme). Ils portent sur la constance de la moyenne de la série tout au long de sa période d'observation. Dans l'hypothèse où la série est déclarée non aléatoire, des tests sont proposés (test de Pettitt, statistique de Buishand et ellipse de contrôle de Bois, procédure bayésienne et procédure de segmentation d'Hubert) pour tenter de caractériser la nature « non aléatoire » présente dans la série.

IV.3. Méthode d'analyse de série chronologique

La détection des oscillations au sein d'une série pluviométrique consiste à vérifier auparavant si cette série est formée de variables aléatoires ou organisées. Or, on appelle série purement aléatoire, ou bien encore série au hasard, toute série statistique dans laquelle la probabilité pour que la variable (X) prenne une valeur (X_{i+1}) est indépendante de la valeur immédiatement précédente (X_i). En climatologie une série pluviométrique est considérée comme aléatoire si les valeurs qui la composent se succèdent dans le temps d'une manière fortuite (Sebbar, 2013).

IV.3.1. Tests de vérification du caractère aléatoire

IV.3.1.1. Calcul de l'autocorrélogramme et de son intervalle de confiance (Boukhaly et al., 2017)

L'estimation de l'autocorrélogramme est la première étape de l'analyse statistique des séries chronologiques.

Le coefficient d'autocorrélation d'ordre k est donné par l'équation (IV.1) (Lubès et al., 1994).

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^{N-k} (X_i - \bar{X}_1)(X_{i+k} - \bar{X}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N-k} (X_i - \bar{X}_1)^2 \sum_{i=1}^{N-k} (X_{i+k} - \bar{X}_2)^2}} \quad (\text{IV. 1})$$

Les moyennes \bar{X}_1 et \bar{X}_2 sont déterminées pour chaque valeur de k par les équations (IV.2) et (IV.3).

$$\bar{X}_1 = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} X_i \quad (\text{IV. 2})$$

$$\bar{X}_2 = \frac{1}{N-k} \sum_{i=k+1}^N X_i \quad (\text{IV. 3})$$

Le graphique $r_k=f(k)$ représente l'autocorrélogramme. La série est dite aléatoire lorsque, pour le grand N, le coefficient d'autocorrélation r_k , a une valeur proche de zéro pour toutes les valeurs de k non nulles. Nous pouvons alors déterminer un intervalle de confiance contenant l'autocorrélogramme dans le cas d'une série aléatoire. L'hypothèse nulle consiste à supposer que les éléments de l'échantillon sont indépendants H_0 "les éléments de la série sont indépendants". Pour un niveau de confiance donné α , nous donnons l'intervalle de confiance de l'autocorrélogramme comme suit (IV.4) (Bop, 2008) :

$$-\frac{U_{(1-\frac{\alpha}{2})}}{\sqrt{N}} < r_k < \frac{U_{(1-\frac{\alpha}{2})}}{\sqrt{N}} \quad (\text{IV. 4})$$

U est la variable normale standard obtenue à partir de la table de Student avec un degré de liberté N-2. La série est considérée comme aléatoire si toutes ou la plupart des valeurs de r_k se trouvent dans l'intervalle de confiance de l'autocorrélogramme.

IV.3.1.2. Test de corrélation sur le rang (Boukhaly et al., 2017)

Le test de corrélation dans la ligne pour déterminer le nombre de paires de X_i et X_j tel que $X_j > X_i$, pour $j > i$. Sous l'hypothèse nulle H_0 "la série est aléatoire" pour un niveau de signification donné $\alpha = 5\%$. Le score standard U est donné par l'équation (IV.5) (IRD-Orstom, 1998) :

$$U = \frac{\mathbf{r}^*}{\sqrt{\mathbf{var}(\mathbf{r}^*)}} \quad (\text{IV. 5})$$

Le test est basé sur la statistique définie par l'équation (IV.6) :

$$\mathbf{r}^* = \frac{4 \text{ Nc}}{\text{N}(\text{N} - 1)} - 1 \quad (\text{IV. 6})$$

Dans cette expression, Nc représente le nombre de paires d'observations consécutives (X_i, X_j) comme $X_j > X_i$; $j > i$; avec ($i = 1, j = 2, N$), ($i = 2, j = 3, N$), ..., ($i = N - 1, j = N$).

La variance $\mathbf{var}(\mathbf{r}^*)$ est donnée par la relation (IV.7) (Boyer, 2002) :

$$\mathbf{var}(\mathbf{r}^*) = \frac{2(2\text{N} + 5)}{9\text{N}(\text{N} - 1)} \quad (\text{IV. 7})$$

Sous l'hypothèse nulle d'une série aléatoire, la variable centrée réduite U tend à suivre une distribution normale lorsque N augmente. L'hypothèse nulle est acceptée lorsque nous avons :

$$U_{\frac{\alpha}{2}} < U < U_{1-\frac{\alpha}{2}}$$

Dans le cas d'un test de queue, l'hypothèse nulle est acceptée lorsque :

$$|U| < U_{1-\frac{\alpha}{2}} ; \text{avec } U_{1-\frac{\alpha}{2}} = 1,96 \text{ pour une taille d'échantillon } (\text{N} > 30)$$

Lorsque la série n'est pas aléatoire, elle peut admettre une tendance ou une périodicité.

IV.3.2. Tests de détection de rupture

IV.3.2.1. Test de Buishand et ellipse de Bois (Boukhaly et al., 2017)

La procédure Buishand se réfère au même modèle et aux mêmes hypothèses que l'approche Lee et Heghinian. Si l'hypothèse est qu'il existe une distribution uniforme pour la position du point de rupture t, la statistique U de Buishand est définie par l'équation (IV.8) (Rosine et al, 2015) :

$$U = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} (S_k / \sigma_x)^2}{\text{N}(\text{N} + 1)} \quad (\text{IV. 8})$$

Où les termes S_k et σ_x sont respectivement la somme partielle et l'écart-type donnés respectivement par les équations (IV.9) et (IV.10) :

$$S_k = \sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X}) \quad (\text{IV. 9})$$

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{\text{N}} \sum_{i=1}^{\text{N}} (X_i - \bar{X})^2 \quad (\text{IV. 10})$$

L'hypothèse nulle du test statistique est l'absence de rupture dans la série. En cas de rejet de l'hypothèse nulle, aucune estimation de la date de la rupture n'est proposée par ce test. En plus de ces différentes procédures, la construction d'une ellipse de contrôle permet d'analyser l'homogénéité de la série (x_i). Sous l'hypothèse nulle, la variable SA, définie ci-dessus, suit une distribution normale avec une moyenne nulle et une variance égale à l'équation (IV.11) (Buishand, 1984) :

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} k (N - k) ; \text{avec } k = 0 \text{ à } N \quad (\text{IV. 11})$$

Cette ellipse de contrôle a été utilisée ici pour estimer visuellement l'importance des déviations sous l'hypothèse nulle de l'homogénéité de la série. Il est donc possible de définir des limites de confiance incluant la série du S_k .

IV.3.2.2. Méthode non paramétrique de Pettitt (Boukhaly et al., 2017)

L'approche Pettitt est non-paramétrique et est dérivée du test de Mann-Whitney. L'absence de rupture dans la série (x_i) de taille N est l'hypothèse nulle. L'utilisation du test suppose que pour tout temps t ayant une valeur comprise entre 1 et N, les deux séries temporelles (X_i) pour $i = 1$ à t et pour $i = t + 1$ à N appartiennent à la même population. La variable à tester est K_N , le maximum en termes absolus de la variable $U_{t,N}$ défini par la relation (IV.12) (L'hote et al, 2002) :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{i,j} \quad (\text{IV. 12})$$

Où :

$D_{i,j}$: Coefficient donné par l'équation (IV.13) :

$$D_{i,j} = \text{sgn}(x) = \text{sgn}(x_i - x_j) ; \text{avec } \text{sgn}(x) = 1 \text{ si } x > 0, \text{ si } x = 0 \text{ et } -1, \text{ si } x < 0 \quad (\text{IV.13})$$

Si k est la valeur de K_N prise sur la série étudiée, sous l'hypothèse nulle, alors la probabilité de dépassement de la valeur k est donnée approximativement par l'équation (IV.14) (Rosine et al., 2015) :

$$\text{Prob}(K_N > k) \approx 2 \exp\left(-\frac{6k^2}{N^3 + N^2}\right) \quad (\text{IV. 14})$$

Si $\text{Prob}(K > k) < \alpha$, pour un niveau de signification α , alors l'hypothèse nulle est rejetée, alors une estimation de la date de la rupture est fournie par le moment t définissant le maximum en termes absolus de la variable $U_{t,N}$.

IV.3.2.3. Méthode bayésienne de Lee et Heghinian (Boukhaly et al., 2017)

Les tests de Lee et Heghinian sont des procédures bayésiennes appliquées en supposant que la série étudiée est normalement distribuée. Les tests sont basés sur le modèle suivant, qui

suppose un changement de la moyenne de la série donnée par l'équation (IV.15) (L'hote et al., 2002) :

$$\mathbf{x}_i = \begin{cases} \boldsymbol{\mu} + \boldsymbol{\varepsilon}_i ; i = 1, \dots, \tau \\ \boldsymbol{\mu} + \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\varepsilon}_i ; i = \tau + 1, \dots, N \end{cases} \quad (\text{IV. 15})$$

Les ε_i sont indépendants et normalement distribués, avec une moyenne égale à zéro et une variance égale à σ^2 , τ et σ représentent respectivement la position dans le temps et l'ampleur du changement possible de la moyenne. La méthode détermine la fonction de distribution de probabilité a posteriori des paramètres μ et δ , en considérant leur distribution a priori et en supposant que le temps de rupture suit une distribution uniforme. Lorsque la distribution est unimodale, la date de rupture est estimée par le mode avec d'autant plus de précision que la dispersion de la distribution est faible (Boyer, 2002).

IV.3.2.4. Segmentation d'Hubert (Boukhaly et al., 2017)

La procédure de segmentation d'Hubert détecte les multiples ruptures dans les séries temporelles. Le principe consiste à découper la série en m segments ($m > 1$) de telle sorte que les moyennes calculées des sous-séries voisines diffèrent sensiblement. Pour limiter la segmentation, les moyennes de deux segments contigus doivent être différentes au point de satisfaire le test de Scheffe (Hubert, 1987). La procédure donne le calendrier des décalages. En donnant une segmentation d'ordre m de la série temporelle, i_k $k = 1 \dots m$, le rang dans la série initiale de l'extrémité du $k^{\text{ème}}$ segment (avec $i_0 = 0$), les suivants sont définis par l'équation (IV.16) (Hubert et al., 2007) :

$$\bar{\mathbf{X}}_k = \frac{\sum_{i_{k-1}+1}^{i_k} \mathbf{X}_i}{n_k} \quad (\text{IV. 16})$$

D_m est l'écart quadratique entre la série et la segmentation donnée par l'équation (IV.17) :

$$D_m = \sum_{k=1}^m \sum_{i_{k-1}+1}^{i_k} (\mathbf{X}_i - \bar{\mathbf{X}}_k)^2 \quad (\text{IV. 17})$$

Pour un ordre de segmentation donné, l'algorithme détermine la segmentation optimale d'une série qui est telle que l'écart D_m est minimal. Cette procédure peut également être interprétée comme un test stationnaire, l'hypothèse nulle étant que la série étudiée est non stationnaire. Si la procédure ne produit pas de segmentations acceptables d'ordre supérieur ou égal à deux, l'hypothèse nulle est acceptée (Paturel, 1995).

IV.4. Résultats et discussions

IV.4.1. Analyse des précipitations annuelles

IV.4.1.1. Tests de vérification du caractère aléatoire

IV.4.1.1.a. Calcul de l'autocorrélogramme et son intervalle de confiance

Les résultats de calcul à l'aide du code Khronostat des coefficients d'autocorrélation aux intervalles de confiance à 99%, 95% et 90% sur la série des précipitations annuelles enregistrées au niveau de la station de Sidi Bel Abbes pendant la période 1977/1978-2018/2019, sont représentés par la figure IV.1.

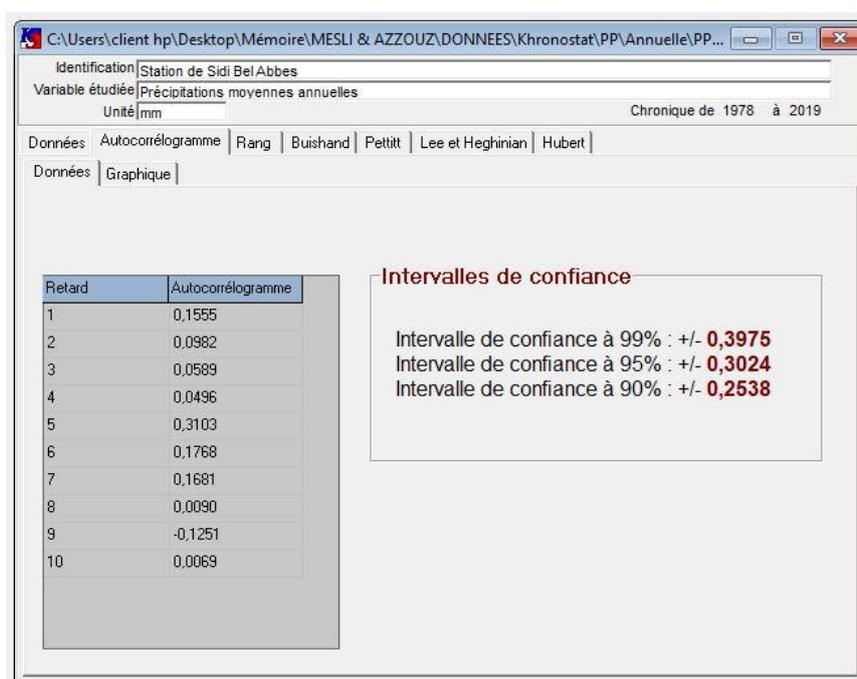


Figure IV.1 : Calcul de l'autocorrélogramme et son intervalle de confiance pour les variations annuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

L'autocorrélogramme réalisé sur la série des précipitations annuelles enregistrées au niveau de la station de Sidi Bel Abbes pendant la période 1977/1978-2018/2019 (fig.IV.2) montre que notre série étudiée est aléatoire, et que la succession des précipitations ne suit aucune organisation précise dans le temps, car les coefficients d'autocorrélation sont compris entre l'intervalle de confiance à 99% pour le coefficient maximum de 0,3103 qui correspond au retard de 5, et l'intervalle de confiance à 90% pour le coefficient minimum de -0,1251 qui correspond au retard de 9. Ainsi, nous pouvons dire que l'hypothèse nulle est acceptée au seuil de confiance de 99%, et rejetée au seuil de confiance de 90% et 95%.

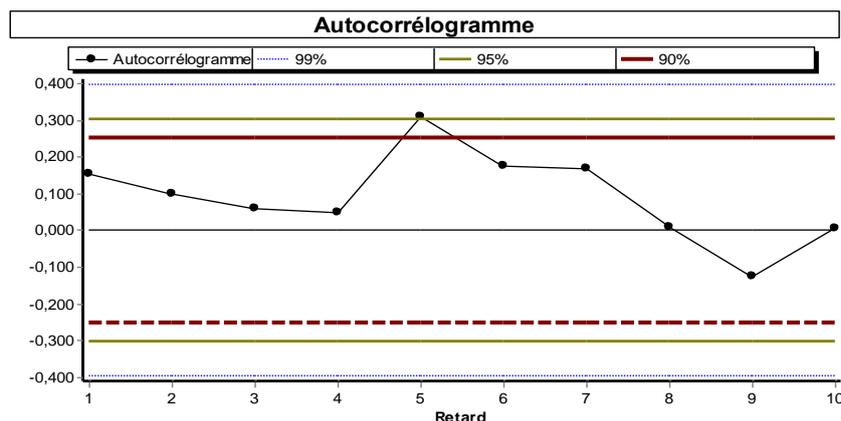


Figure IV.2 : Autocorrélogramme pour les variations annuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbès (1977/1978-2018/2019)

IV.4.1.1.b. Test de corrélation sur le rang

Les résultats du test de corrélation sur le rang (fig.IV.3), désignent que la série des précipitations annuelles enregistrées au niveau de la station de Sidi Bel Abbès pendant la période 1977/1978-2018/2019, est aléatoire au seuil de confiance de 99%, et non aléatoire au seuil de confiance de 95% et de 90%.



Figure IV.3 : Résultats du test de corrélation sur le rang pour les variations annuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbès (1977/1978-2018/2019)

IV.4.1.2. Tests de détection de rupture

IV.4.1.2.a. Test de Buishand et ellipse de Bois

Les résultats du test de Buishand sur la série des précipitations annuelles enregistrées au niveau de la station de Sidi Bel Abbes durant la période 1977/1978-2018/2019 (fig.IV.4), montrent que l'hypothèse d'absence de rupture est acceptée au seuil de confiance de 99%, et rejetée au seuil de confiance de 95% et de 90%.

D'après l'ellipse de Bois (fig.IV.5), la série étudiée présente une rupture de 2003/2004 jusqu'en 2006/2007, traduite par une augmentation de la pluviométrie jusqu'à une valeur de 591 mm (maximum enregistrée en 2007/2008) (cf. chapitre III).



Figure IV.4 : Résultats du test de Buishand pour les variations annuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

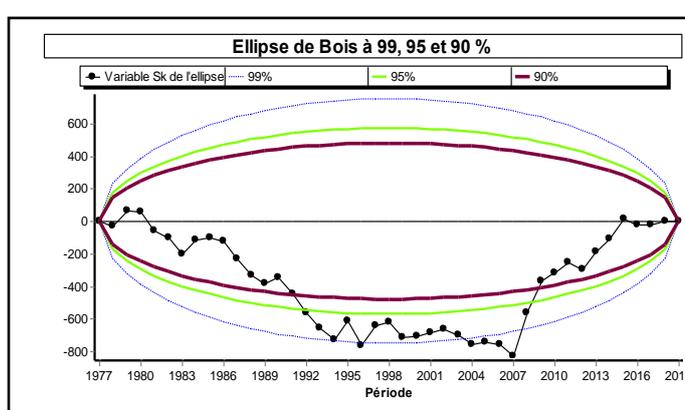


Figure IV.5 : Ellipse de Bois pour les variations annuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

IV.4.1.2.b. Méthode non paramétrique de Pettitt

D'après les figures IV.6 et IV.7, nous remarquons que les résultats du test de Pettitt obtenus pour la série de précipitations annuelles enregistrées au niveau de la station de Sidi Bel Abbes pendant la période d'étude, sont identiques aux résultats du test de Buishand s'agissant de l'hypothèse d'absence de rupture.

La rupture a été détectée en 1995/1996 pour une probabilité de dépassement de $4,2 \cdot 10^{-2}$. C'est en effet, durant l'année 1995/1996 que la région a connu une chute rapide des précipitations et a enregistré la plus faible valeur (minimum de 175,8 mm).



Figure IV.6 : Résultats du test de Pettitt pour les variations annuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

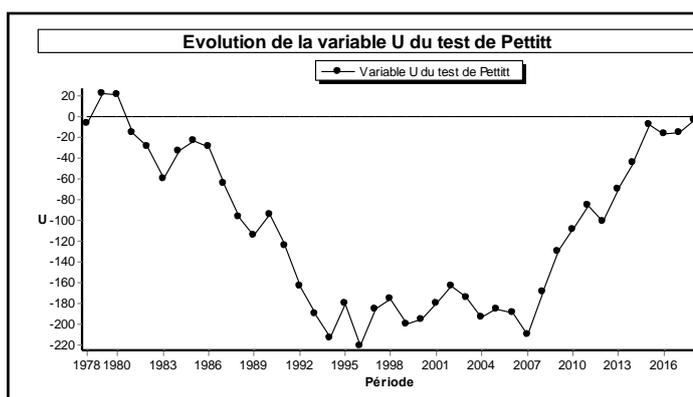


Figure IV.7 : Évolution de la variable U du test de Pettitt pour les variations annuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

IV.4.1.2.c. Méthode bayésienne de Lee et Heghinian

Conformément aux figures IV.8 et IV.9, le résultat de la méthode bayésienne de Lee et Heghinian pour la série de précipitations annuelles enregistrées au niveau de la station de Sidi Bel Abbas pendant la période 1977/1978-2018/2019, a détecté une rupture en 2006/2007 confirmée par l'ellipse de Bois, qui concorde avec la densité de probabilité à posteriori de 0,3563. Cette rupture indique une augmentation des précipitations annuelles confirmée par la valeur maximale des précipitations enregistrée l'année 2007/2008 avec un pic de 591 mm (cf. chapitre III).

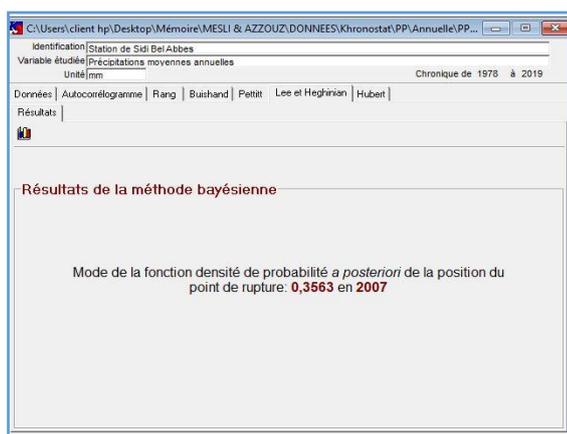


Figure IV.8 : Résultats de la méthode bayésienne de Lee et Heghinian pour les variations annuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

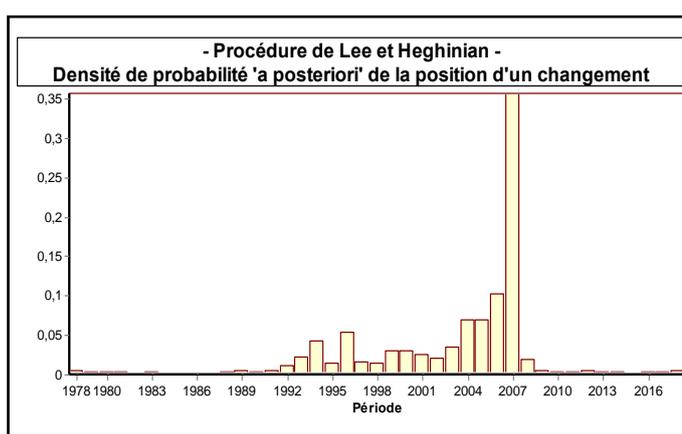


Figure IV.9 : Densité de probabilité a posteriori de la position d'un changement de précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

IV.4.1.2.d. Segmentation d'Hubert

D'après la figure IV.10, la segmentation d'Hubert a proposé un découpage de 1977/1978-2006/2007, de 2007/2008-2008/2009 et de 2009/2010-2018/2019 pour la série des précipitations annuelles enregistrées au niveau de la station de Sidi Bel Abbes pendant la période 1977/1978-2018/2019, en concluant qu'il y a une apparition de deux ruptures en 2006/2007 et en 2008/2009. Le changement de la moyenne et de l'écart type entre les trois périodes avant et après la rupture, indique une énorme augmentation de la pluviométrie pour la première rupture, suivie d'une diminution pour la deuxième.

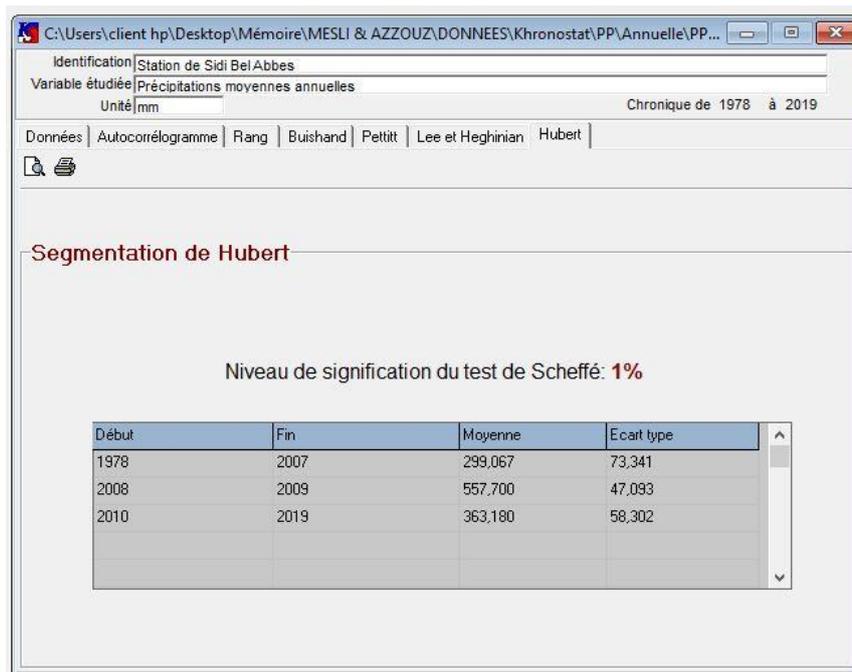


Figure IV.10 : Segmentation d'Hubert pour les variations annuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

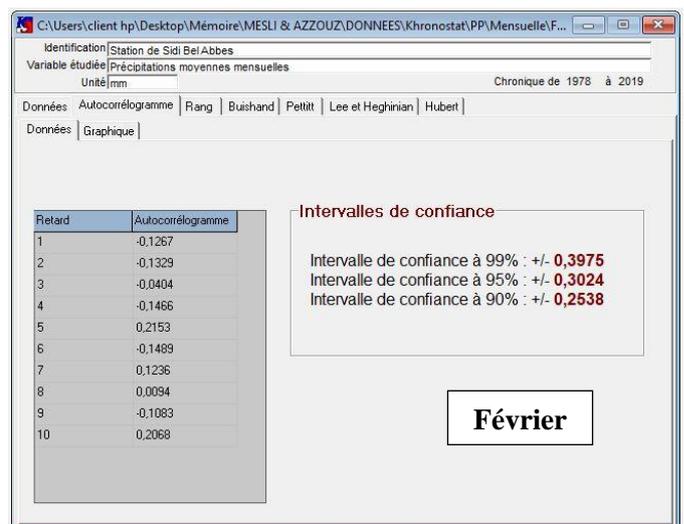
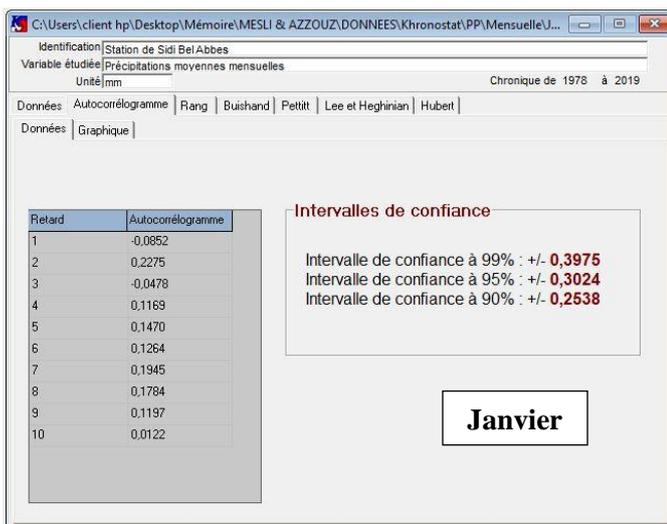
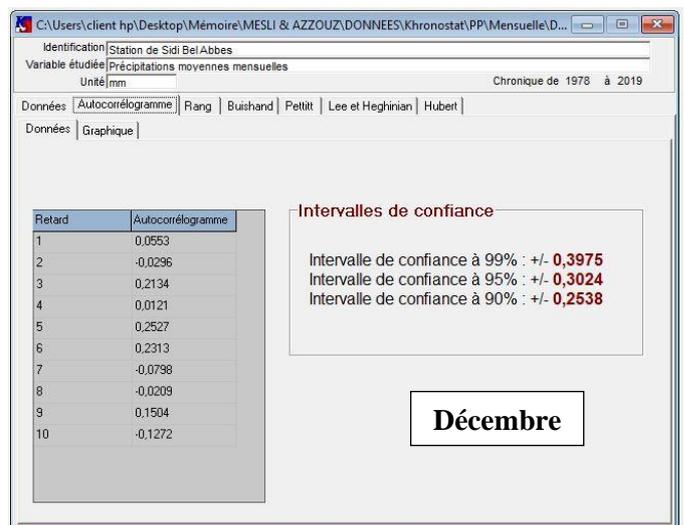
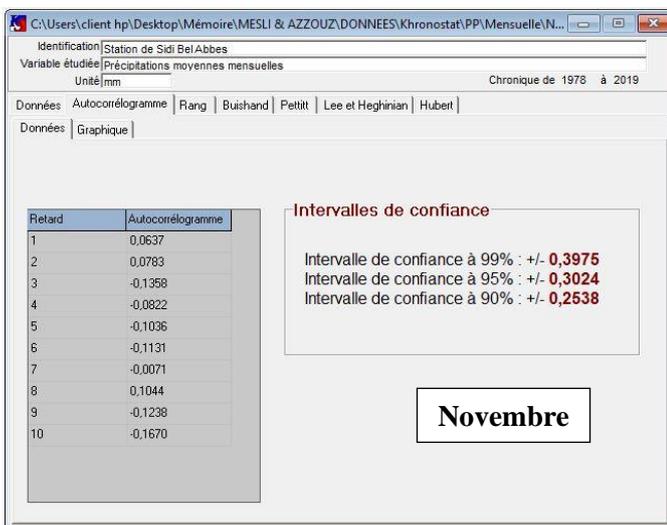
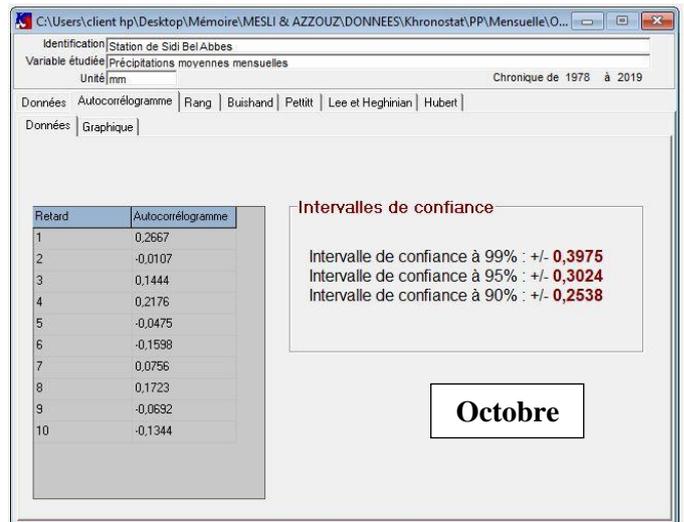
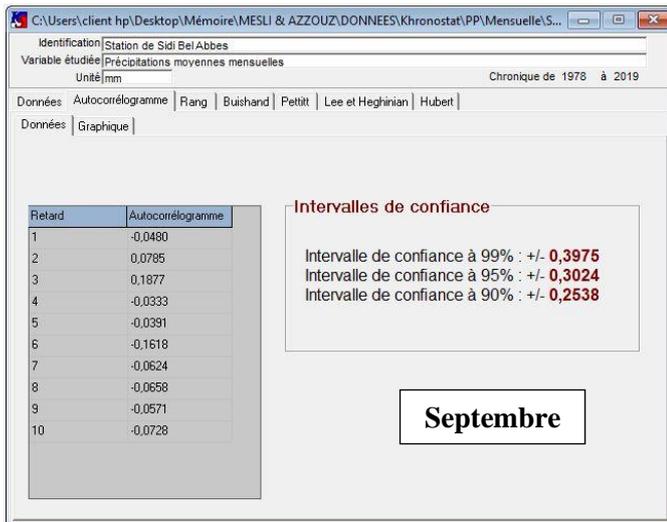
IV.4.2. Analyse des précipitations mensuelles

IV.4.2.1. Tests de vérification du caractère aléatoire

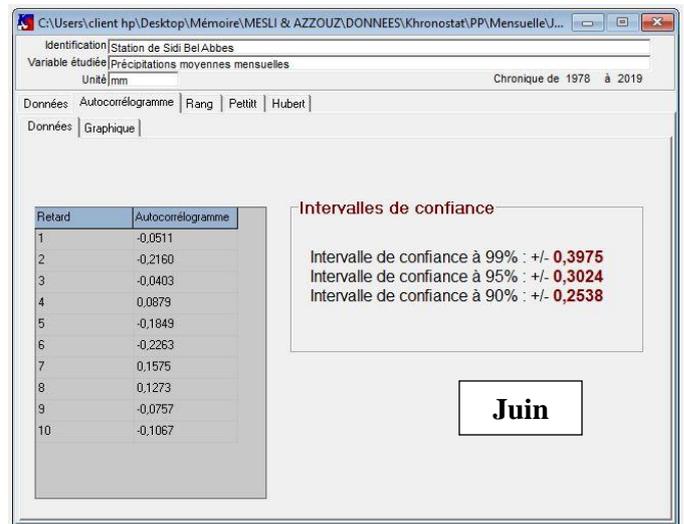
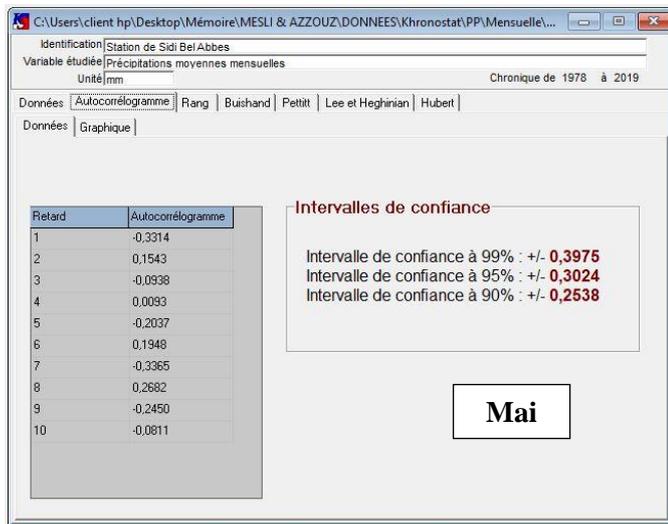
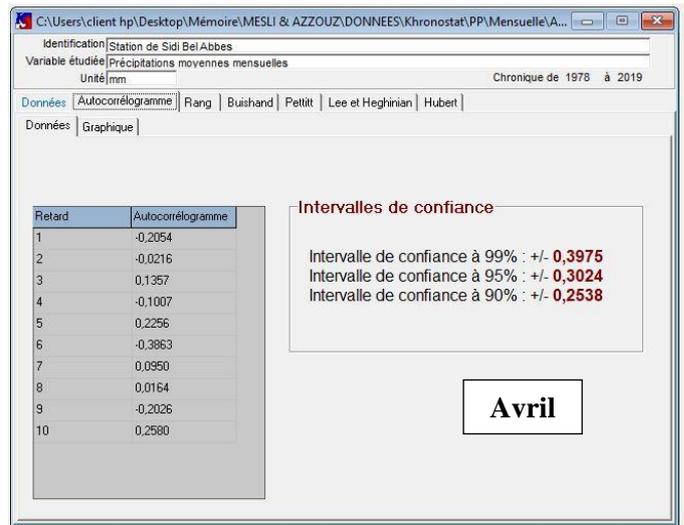
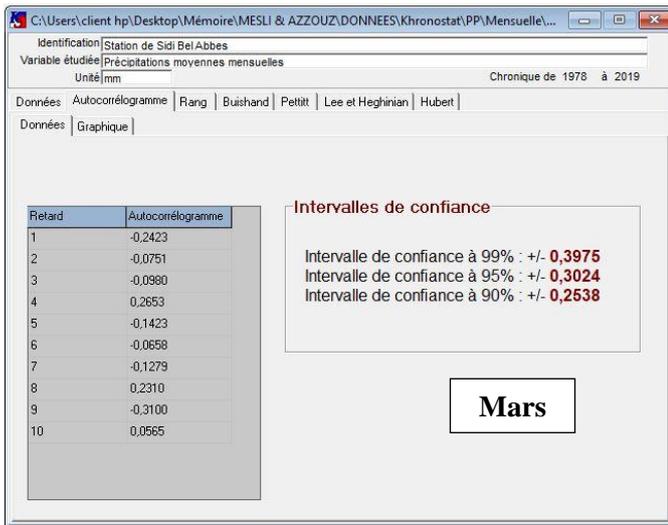
IV.4.2.1.a. Calcul de l'autocorrélogramme et de son intervalle de confiance

Les résultats du calcul des coefficients d'autocorrélation et de ses intervalles de confiance à 99%, 95% et 90% réalisé par le code KRONOSTAT sur les séries des précipitations mensuelles à la station de Sidi Bel Abbes pendant la période 1977/1978-2018/2019, sont représentés dans la figure IV.11.

Chapitre IV Détermination des ruptures dans les séries des précipitations et des températures



Chapitre IV Détermination des ruptures dans les séries des précipitations et des températures



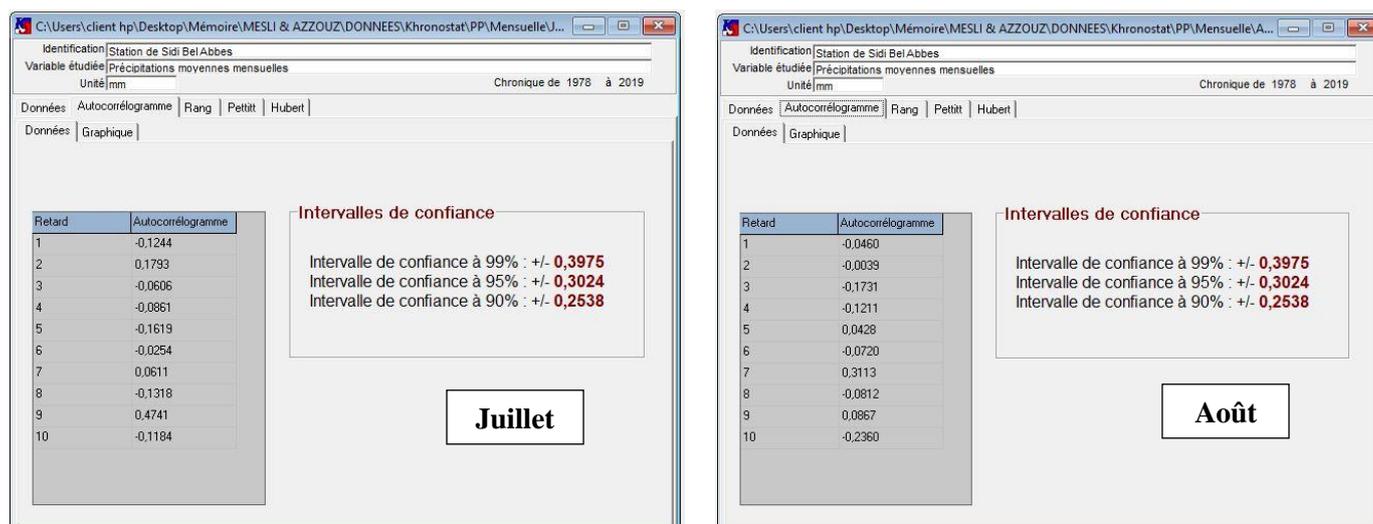
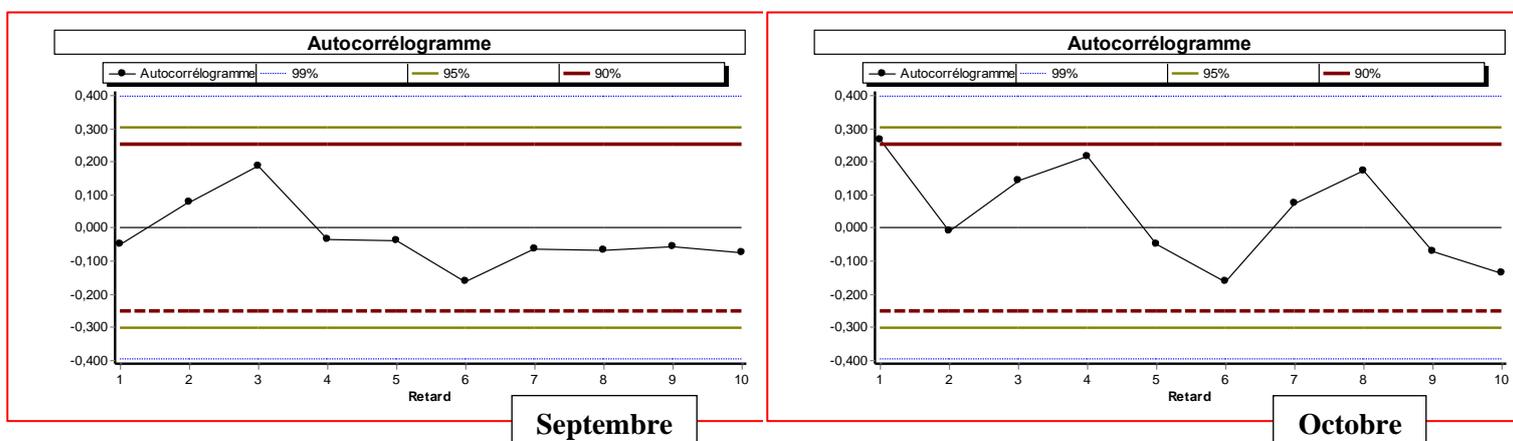


Figure IV.11 : Calcul de l'autocorrélogramme et son intervalle de confiance pour les variations mensuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

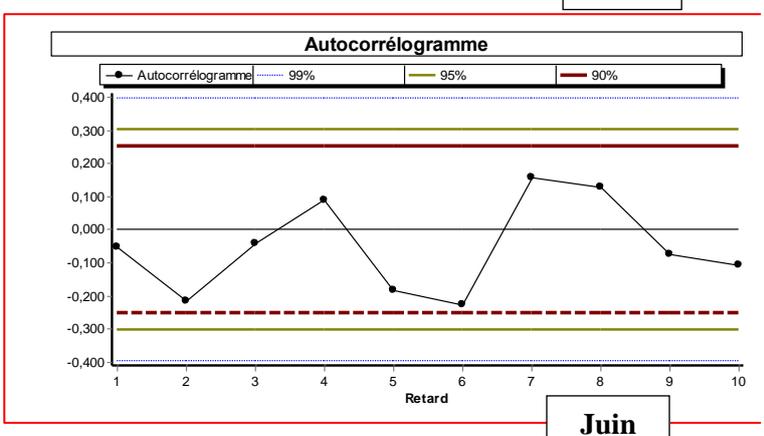
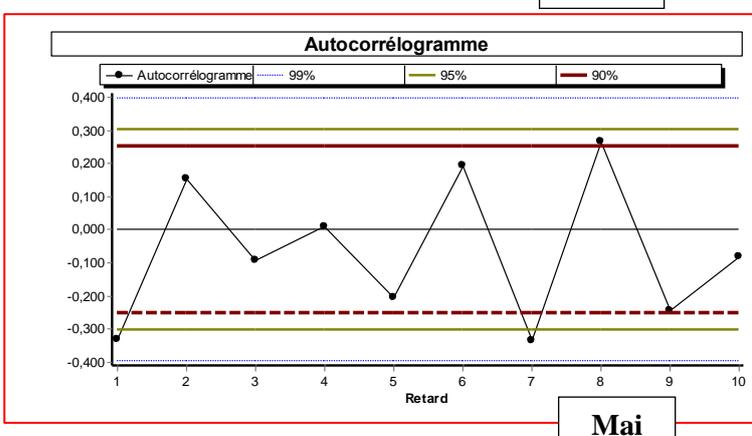
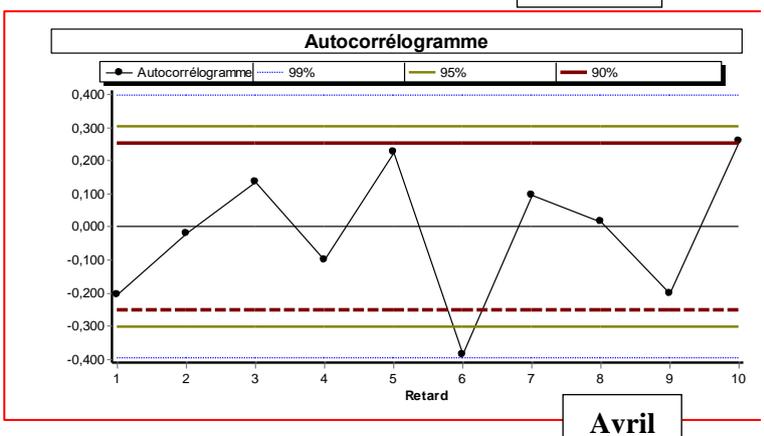
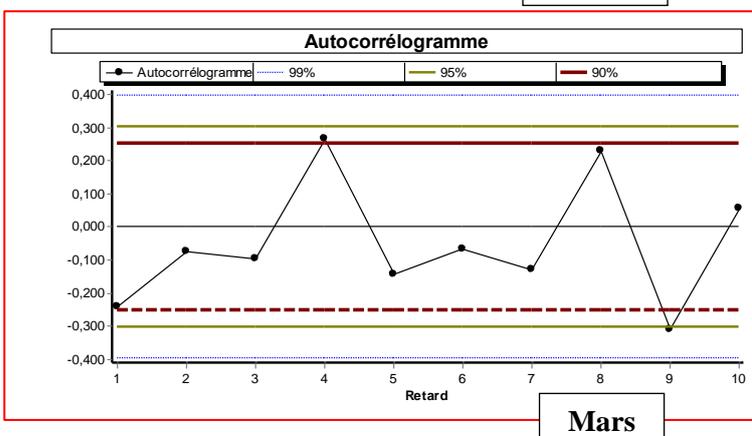
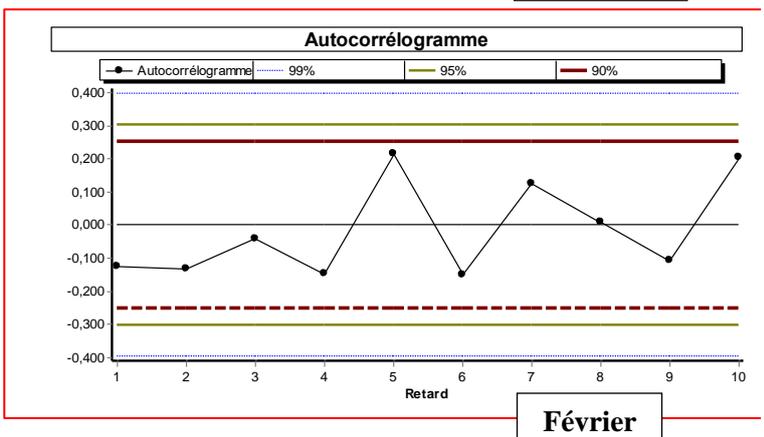
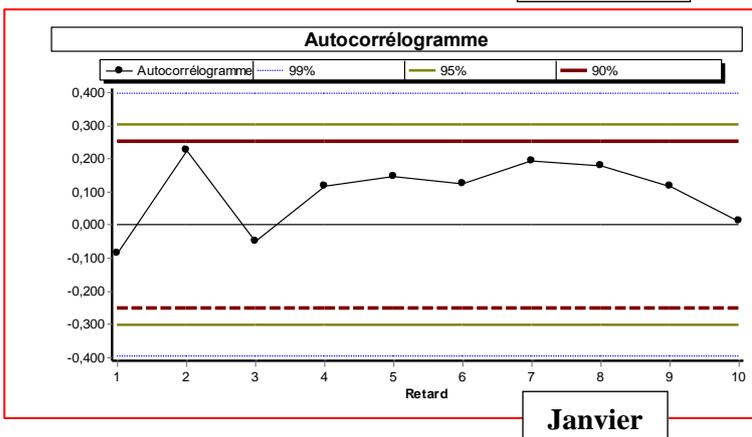
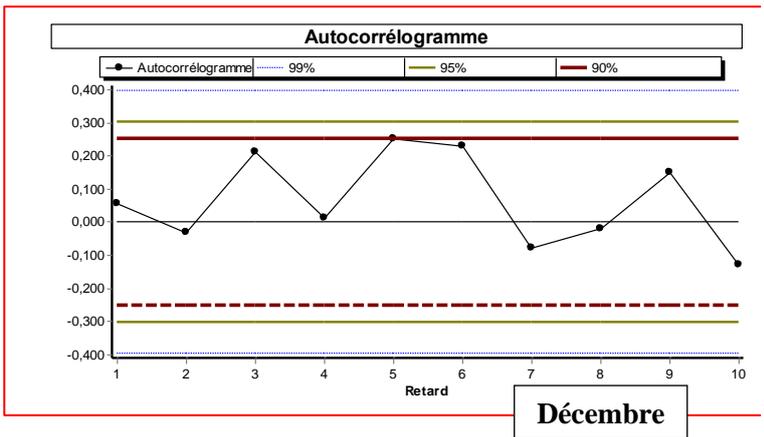
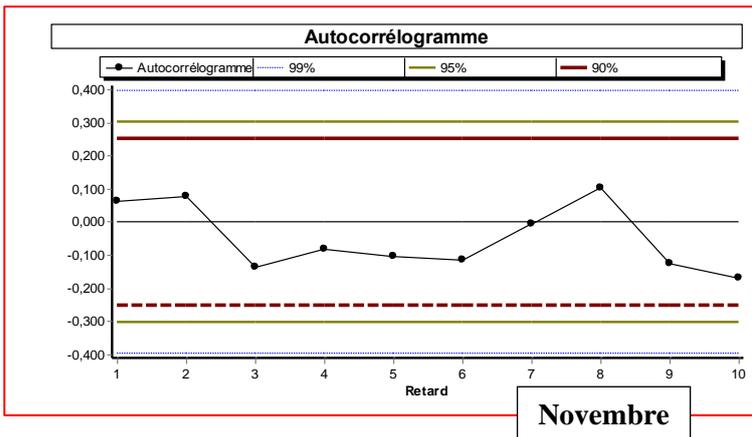
Les graphes de la figure IV.12 montrent que toutes les valeurs du coefficient d'autocorrélation se trouvent dans les intervalles de confiance à 90%, 95% et 99% pour les mois de Septembre, Novembre, Décembre, Janvier, Février et Juin, nous pouvons dire ainsi que l'hypothèse nulle est acceptée aux trois seuils de confiances.

L'hypothèse nulle est rejetée au seuil de confiance de 90% pour les valeurs du mois d'Octobre, et au seuil de confiance de 90% et 95% pour les valeurs des mois de Mars, Avril, Mai et Août, et aussi au seuil de confiance à 90%, 95% et 99% pour les valeurs du mois de Juillet.

Nous considérons par conséquent que les séries des précipitations mensuelles enregistrées à la station de Sidi Bel Abbas pendant la période 1977/1978-2018/2019, sont aléatoires, malgré que l'hypothèse nulle soit rejetée pour le mois de Juillet pour les trois seuils de confiance, les précipitations en Juillet sont généralement nulles ce qui influe sur la validité du test. Aussi nous pouvons admettre la sous-série de ce mois comme étant aléatoire.



Chapitre IV Détermination des ruptures dans les séries des précipitations et des températures



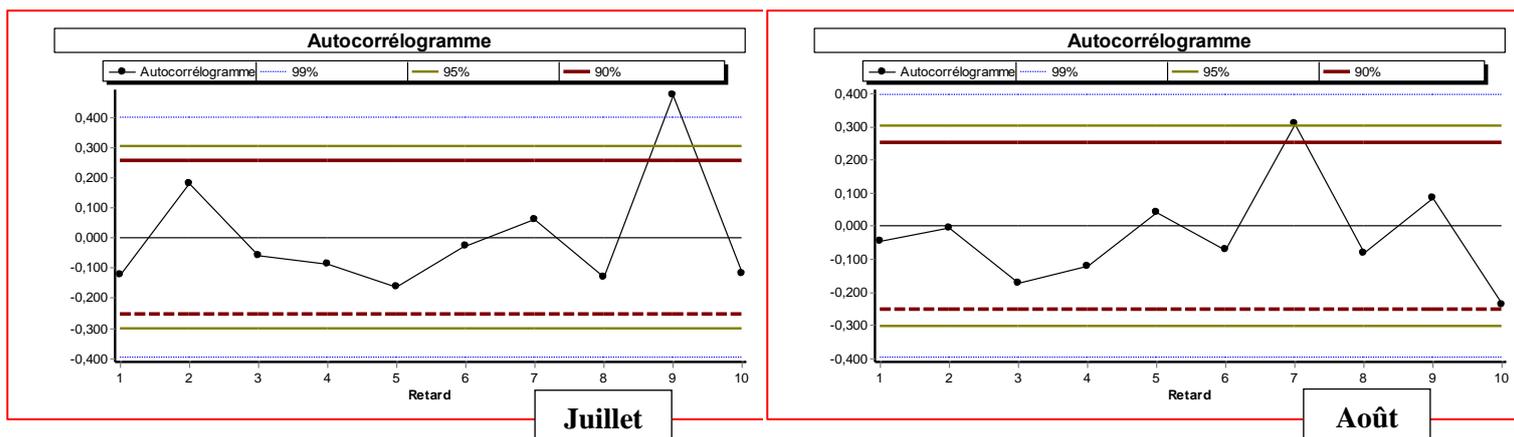


Figure IV.12 : Autocorrélogrammes des variations mensuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

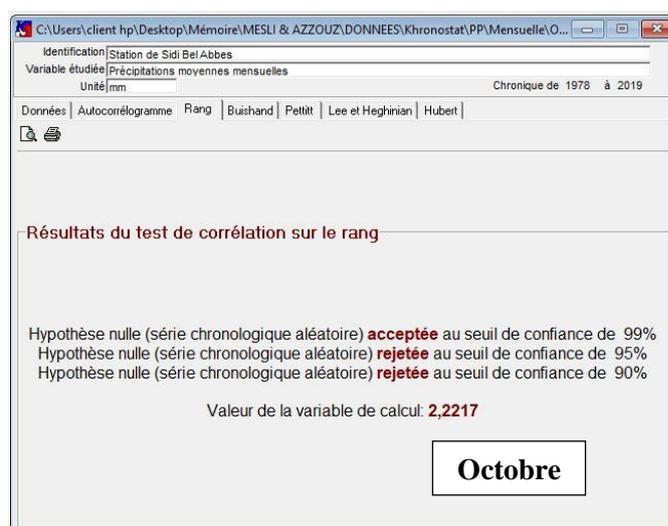
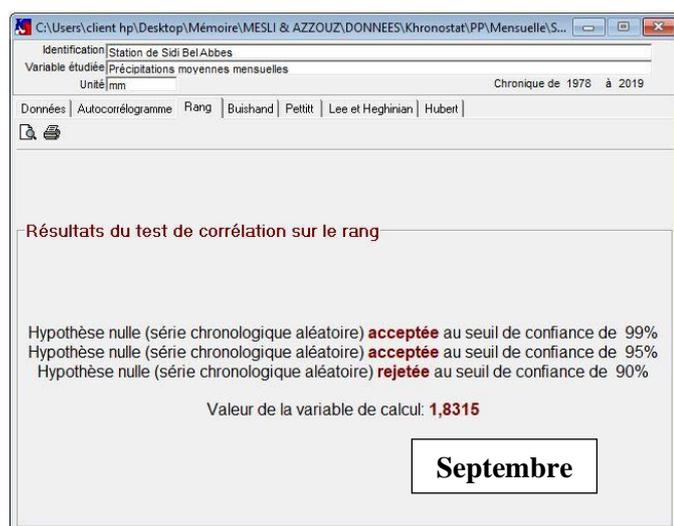
IV.4.2.1.b. Test de corrélation sur le rang

Les résultats du test de corrélation sur le rang appliqué aux séries des précipitations mensuelles enregistrées à la station de Sidi Bel Abbas pendant la période 1977/1978-2018/2019 (fig.IV.13), montrent que l'hypothèse nulle est rejetée au seuil de confiance de :

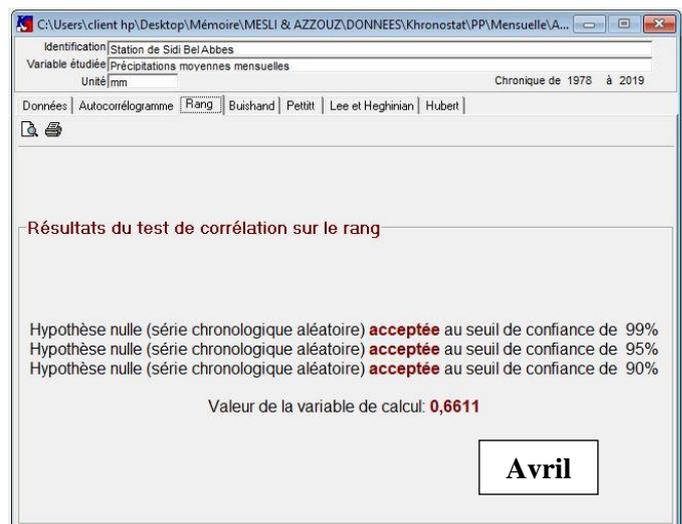
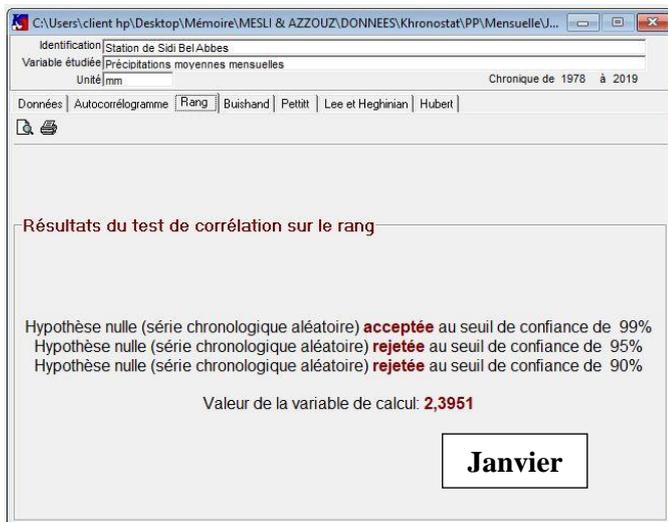
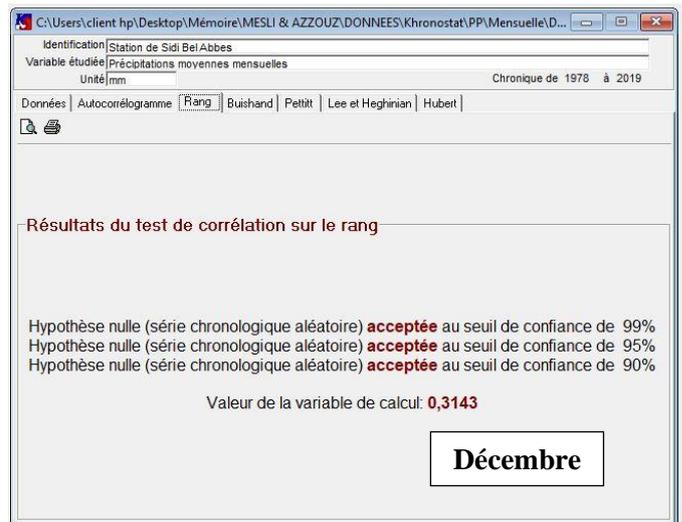
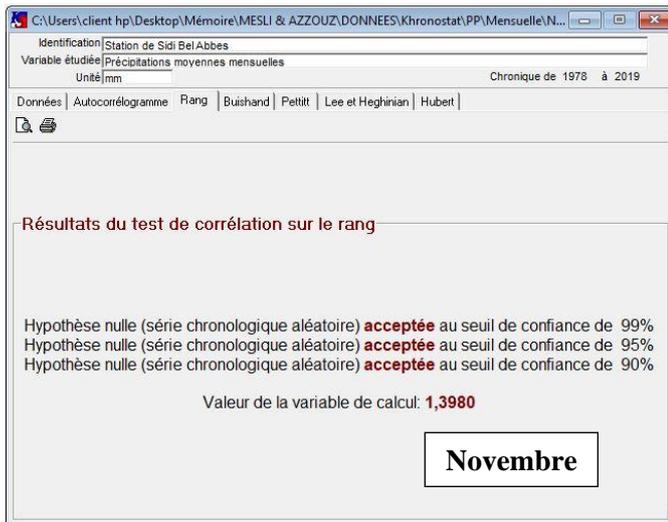
1. 90% au mois de Septembre,
2. 90% et 95% aux mois d'Octobre, de Janvier et d'Août,
3. 90%, 95% et 99% au mois de Juillet.

Cette hypothèse est acceptée aux trois seuils de confiance pour le reste des mois.

Toutes les sous-séries étudiées sont de caractère aléatoire exception faite pour le mois de Juillet.



Chapitre IV Détermination des ruptures dans les séries des précipitations et des températures



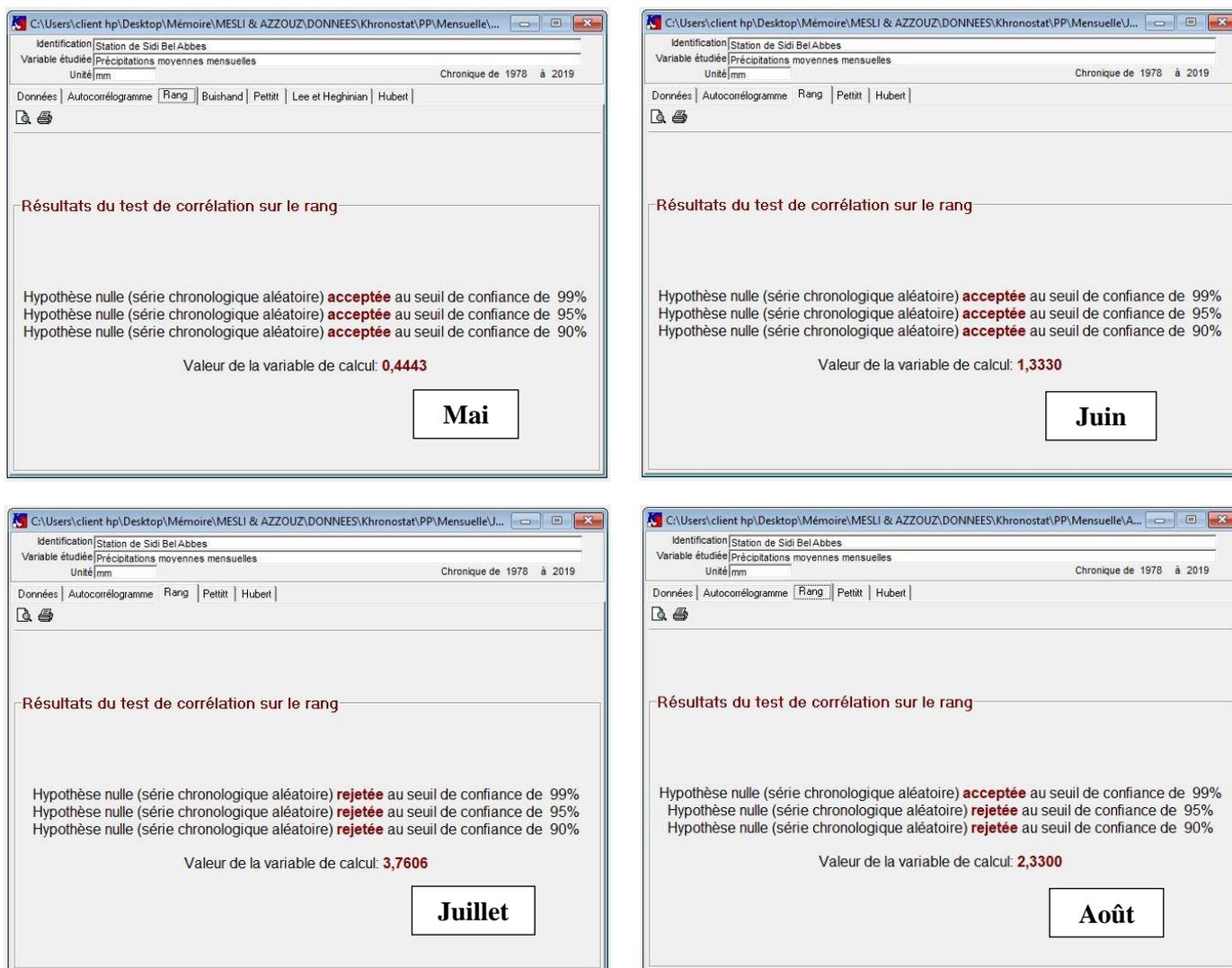


Figure IV.13 : Résultats du test de corrélation sur le rang pour les variations mensuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbès (1977/1978-2018/2019)

IV.4.2.2. Tests de détection de rupture

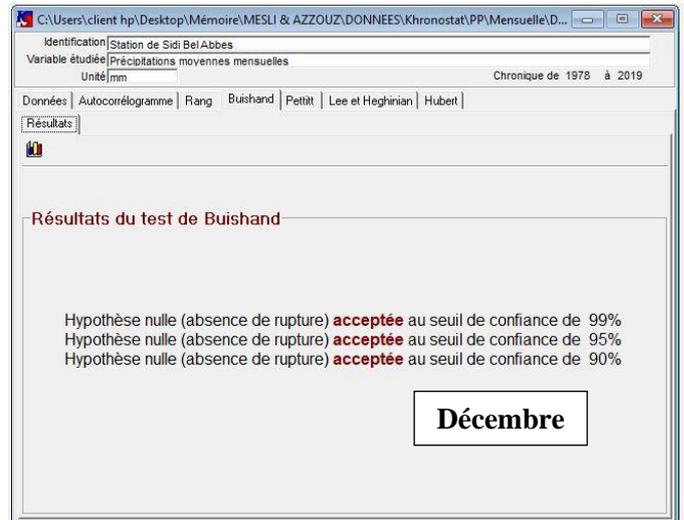
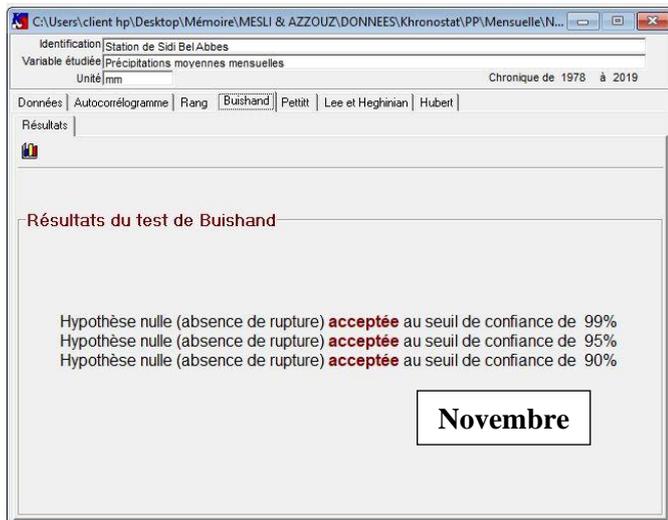
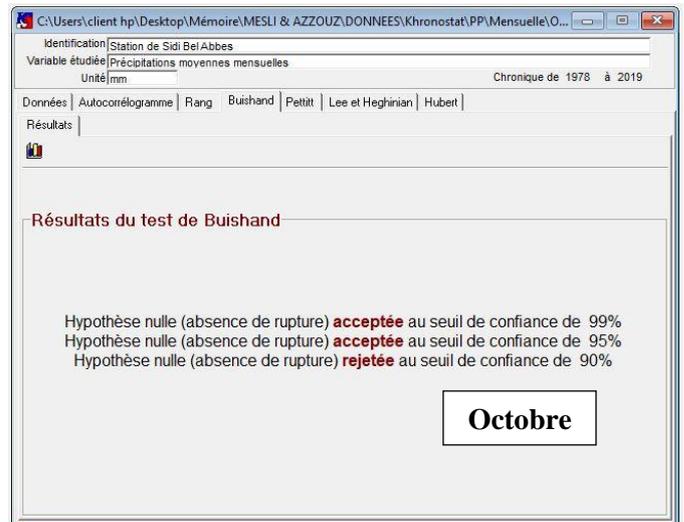
IV.4.2.2.a. Test de Buishand et ellipse de Bois

Le test de Buishand n'a pas été appliqué aux mois de Juin, Juillet et Août car ses séries ne suivent pas la loi normale.

Les résultats du test de Buishand représentés dans la figure IV.14 montrent que l'hypothèse nulle est rejetée au mois d'Octobre pour un seuil de confiance de 90%, et au mois de Janvier pour 90%, 95% et 99%, par contre cette hypothèse est acceptée pour le reste des mois au trois seuils de confiance.

Les ellipses de Bois représentées dans la figure IV.15 laissent apparaître des ruptures au mois de Janvier des années 1998/1999, 2000/2001, 2005/2006 et 2006/2007. Ces ruptures définissent un changement du régime dans la pluviométrie, pour les trois premières ruptures,

il est traduit par une augmentation, et par la suite par une diminution pour la quatrième rupture (2006/2007).



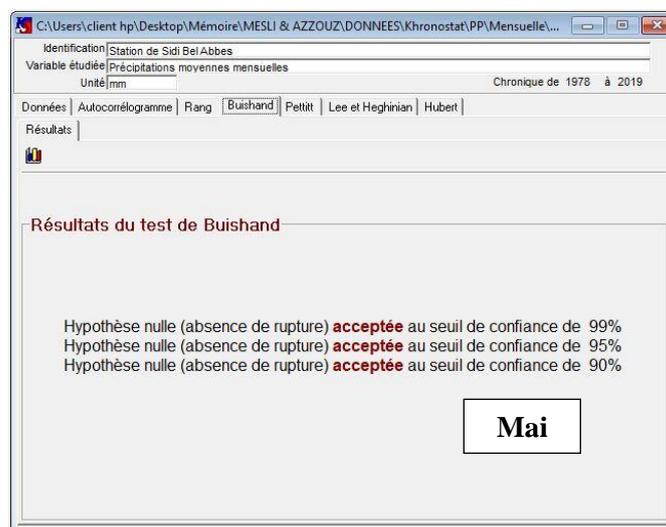
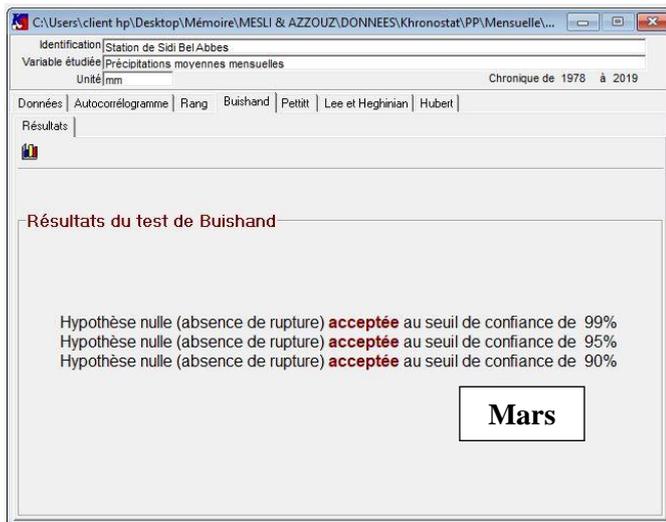
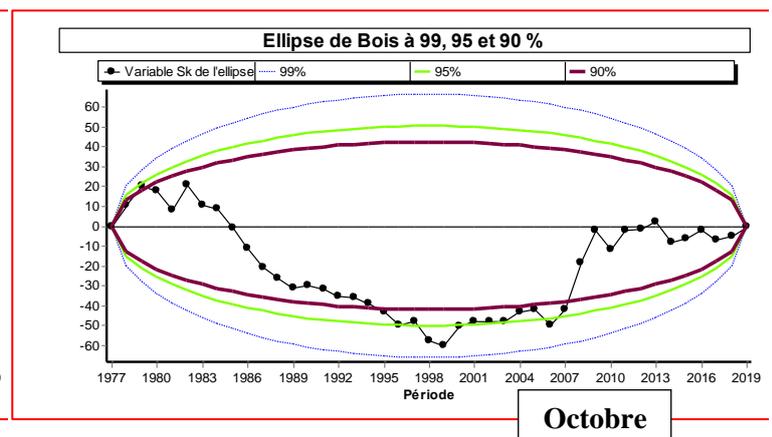
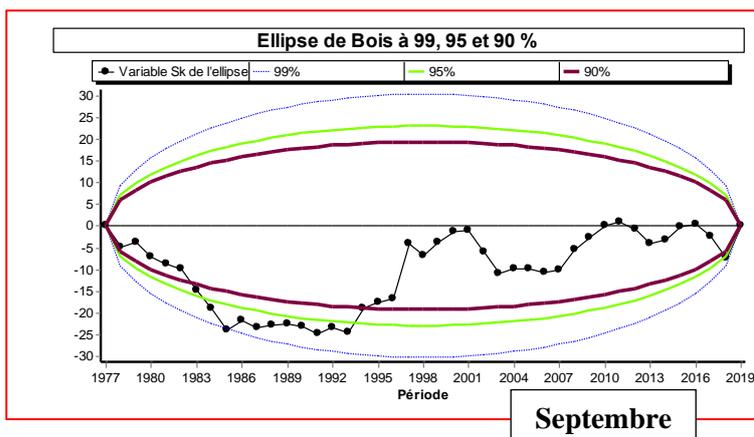
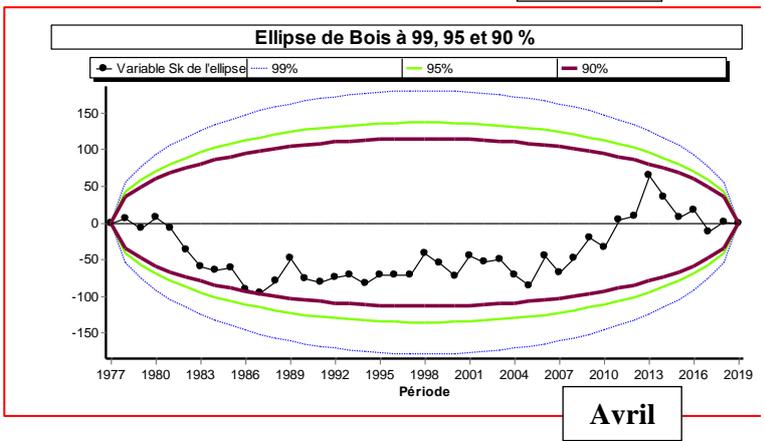
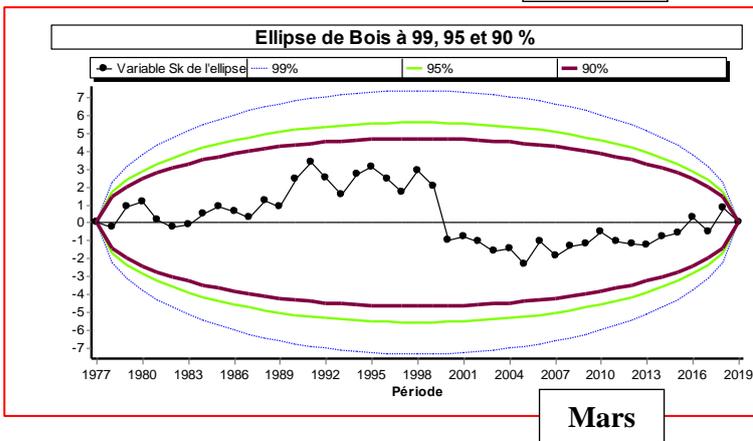
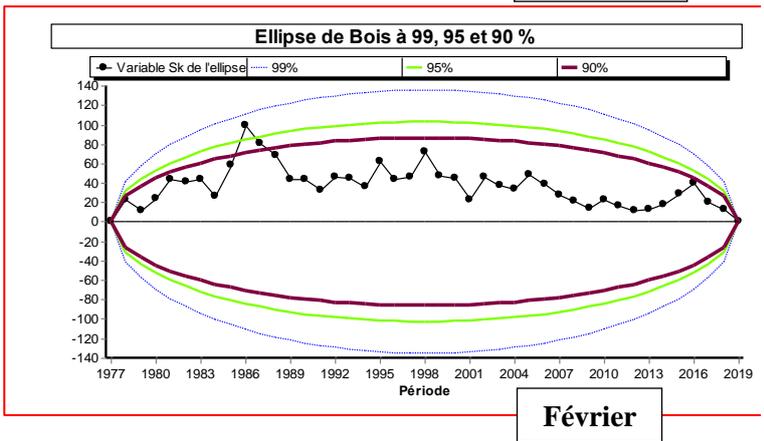
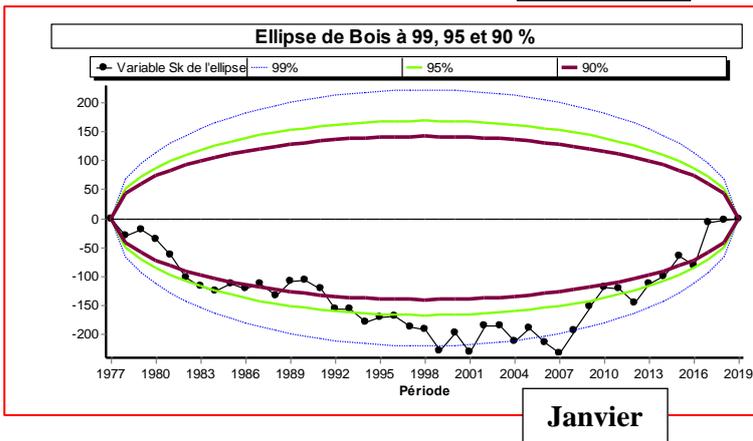
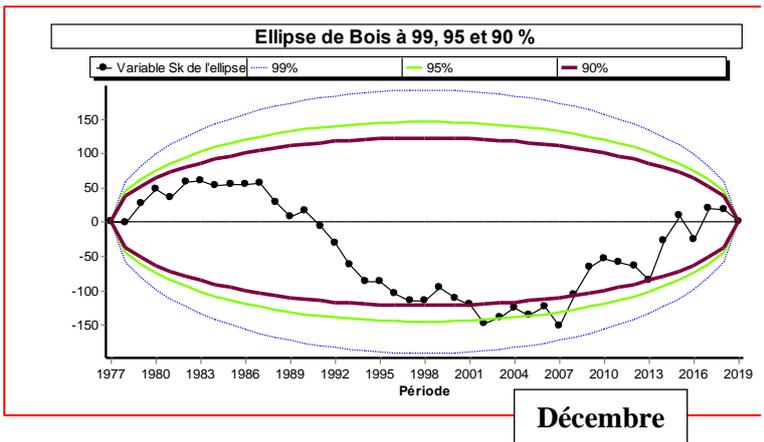
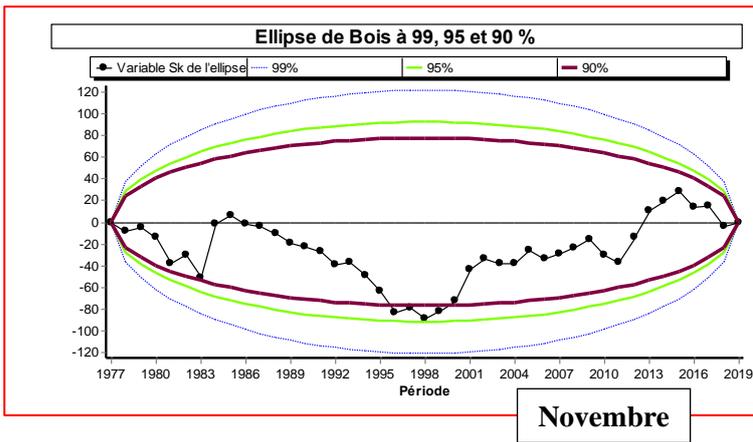


Figure IV.14 : Résultats du test de Buishand sur les variations mensuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)





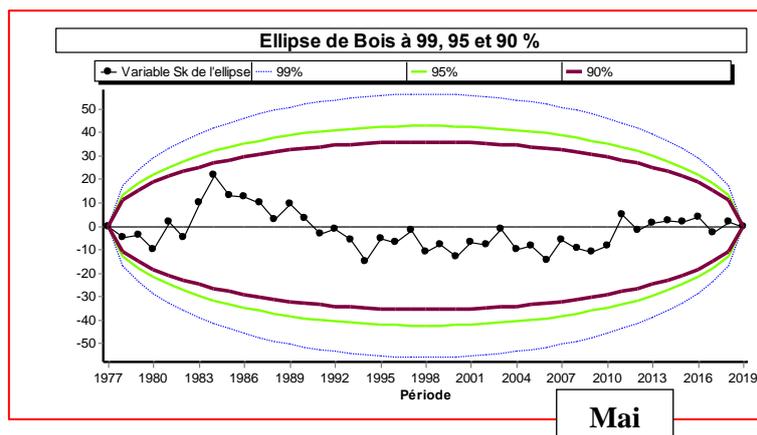
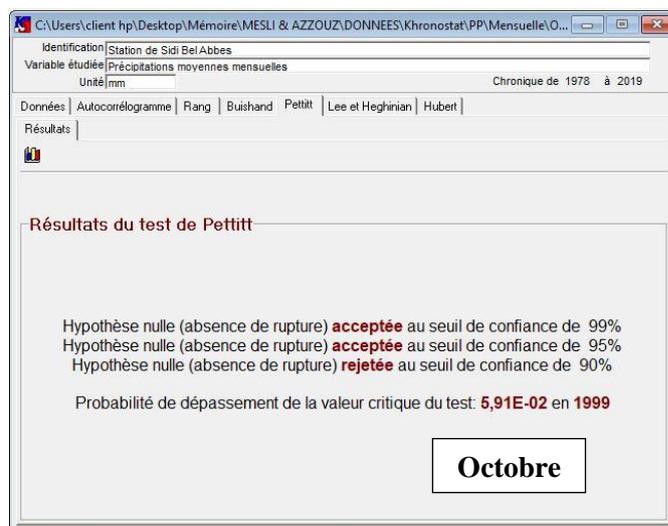


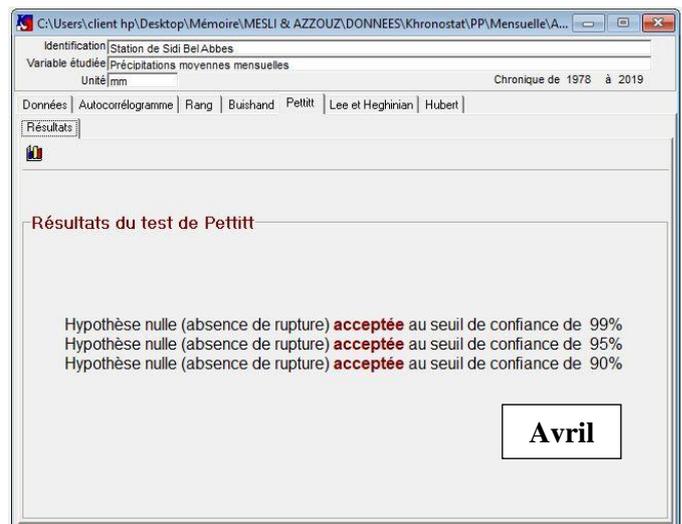
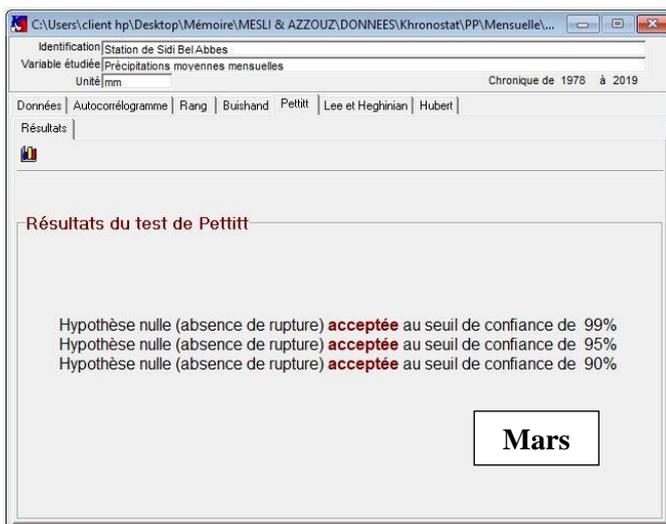
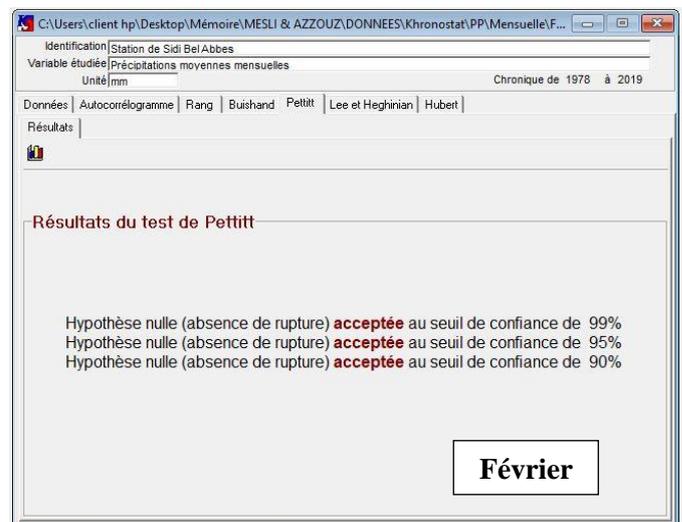
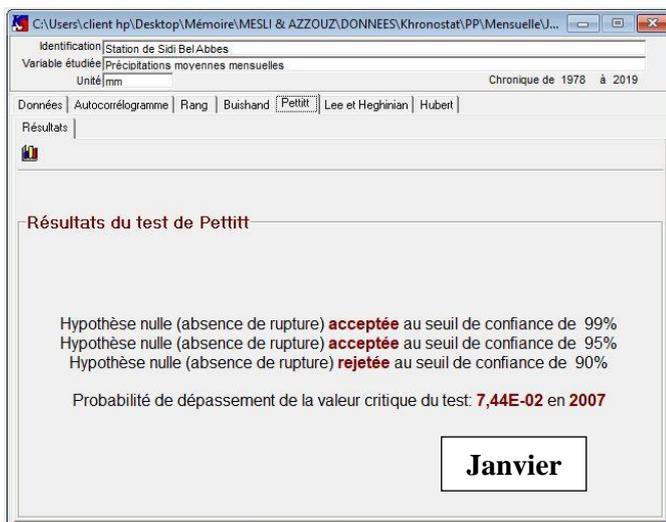
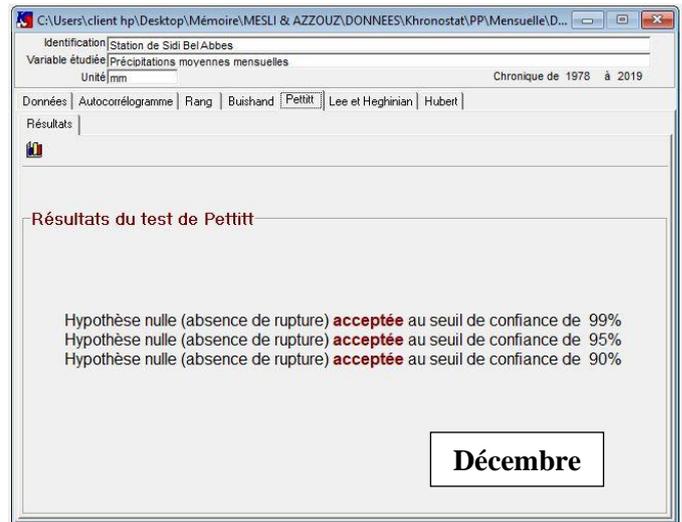
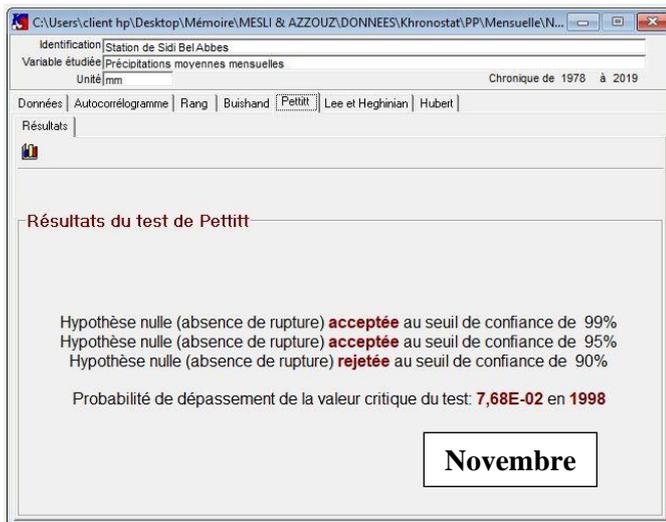
Figure IV.15 : Ellipses de Bois pour les variations mensuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

IV.4.2.2.b. Méthode non paramétrique de Pettitt

Les résultats de la figure IV.16 du test de Pettitt sur les séries des précipitations mensuelles de Sidi Bel Abbas pendant la période 1977/1978-2018/2019, montrent que l'hypothèse nulle est rejetée au seuil de confiance de 90%, en observant des détections des ruptures en Octobre 1998/1999, en Novembre 1997/1998 et en Janvier 2006/2007, qui correspondent respectivement à des probabilités de dépassement de $5,91 \cdot 10^{-2}$, de $7,68 \cdot 10^{-2}$, et de $7,44 \cdot 10^{-2}$.



Chapitre IV Détermination des ruptures dans les séries des précipitations et des températures



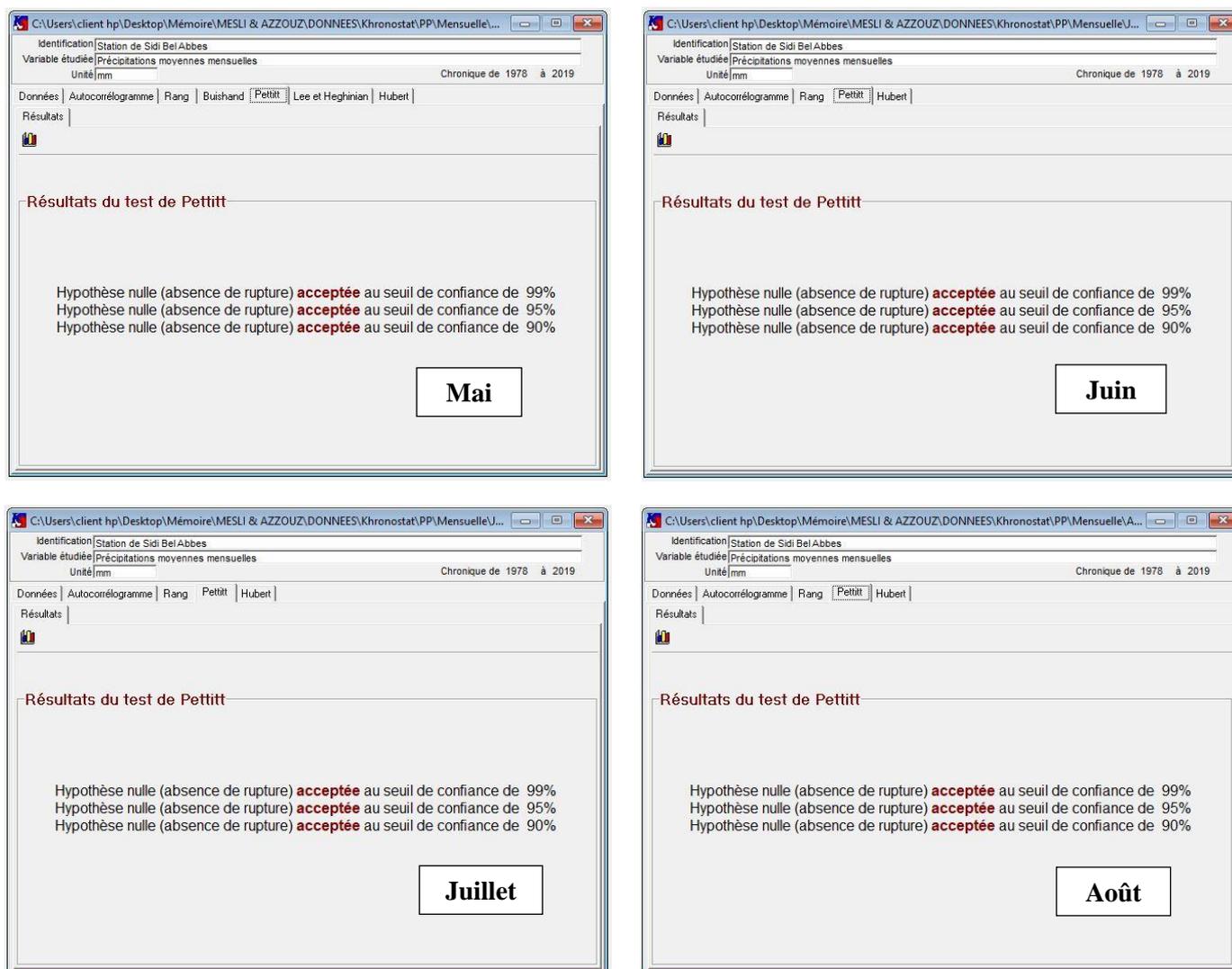


Figure IV.16 : Résultats du test de Pettitt sur les variations mensuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

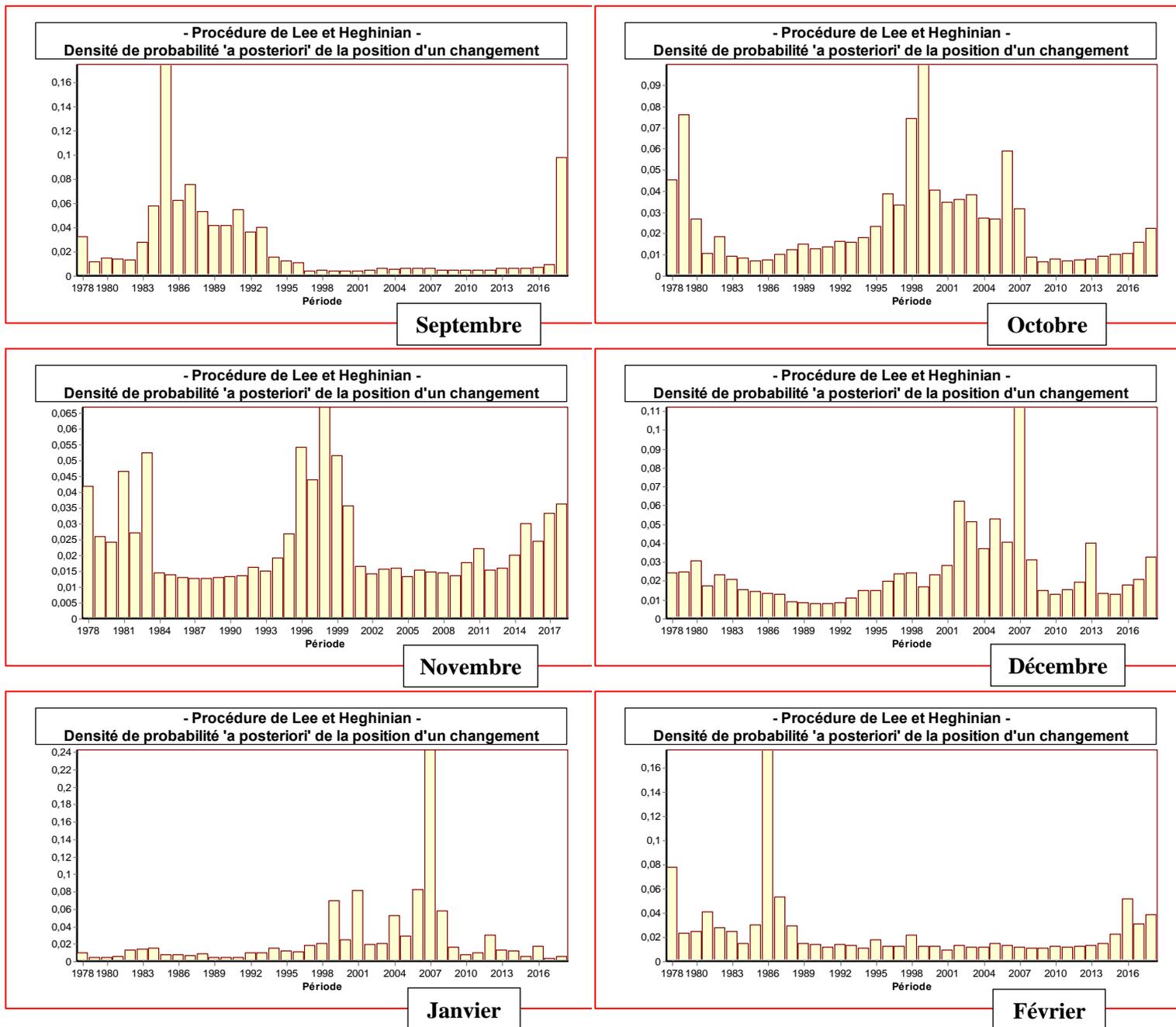
IV.4.2.2.c. Méthode bayésienne de Lee et Heghinian

Pour rappel le test de Lee et Heghinian n'a pas été appliqué aux précipitations mensuelles de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019) des mois de Juin, Juillet et Août en raison que ses sous-séries ne suivent pas la loi normale.

Nous résumons les dates de ruptures dans les séries mensuelles des précipitations dans le tableau IV.1, qui sont matérialisées par les densités de probabilité a posteriori, représentées dans la figure IV.17.

Tableau IV.1 : Ruptures détectées par la méthode bayésienne de Lee et Heghinian sur les variations mensuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

Mois	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai
Date de rupture	1984/1985	1998/1999	1997/1998	2006/2007	2006/2007	1985/1986	2017/2018	1985/1986	1977/1978



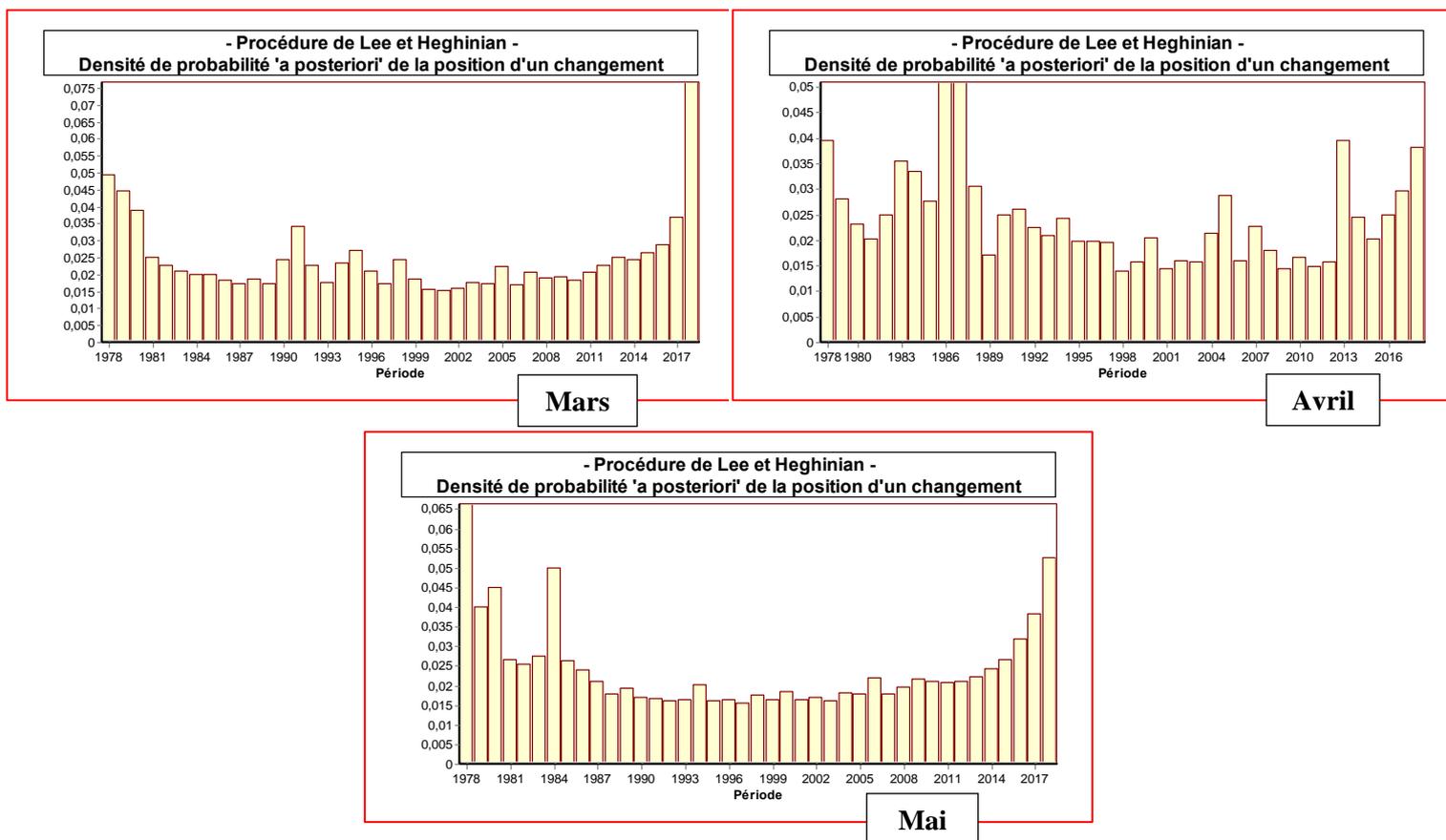
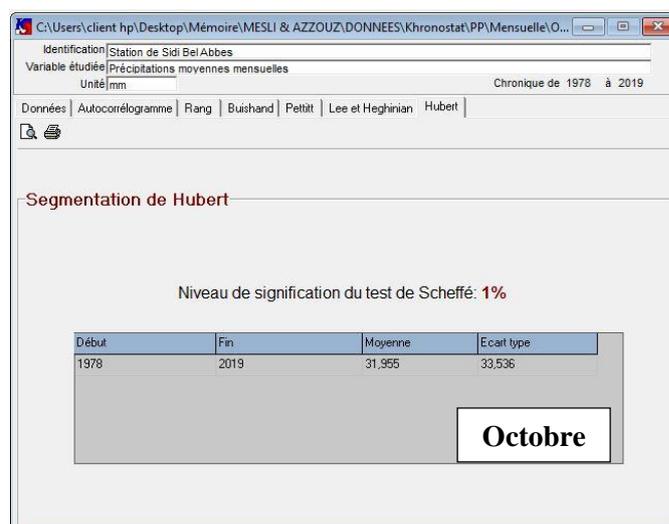
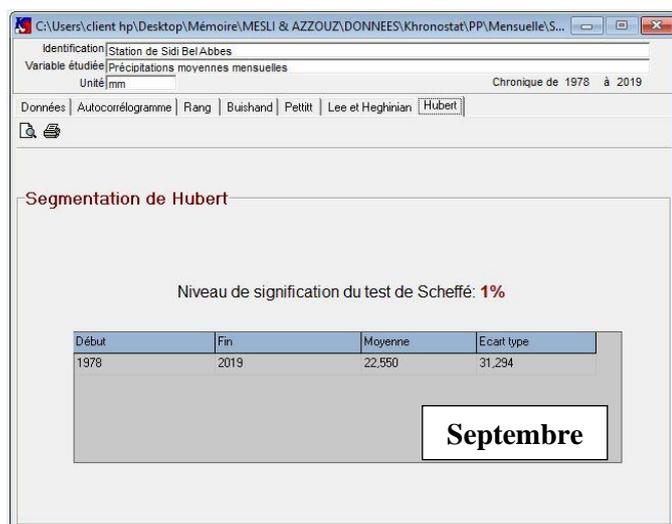


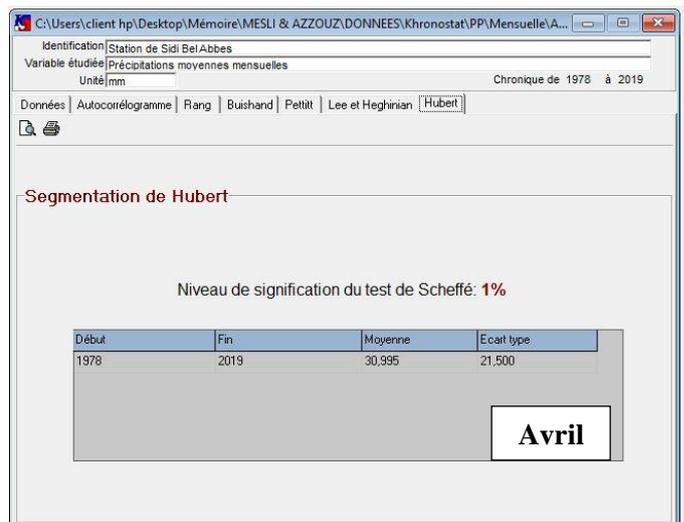
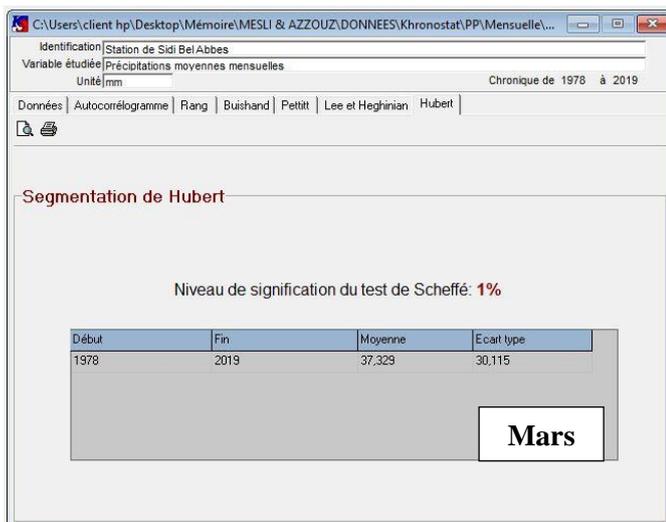
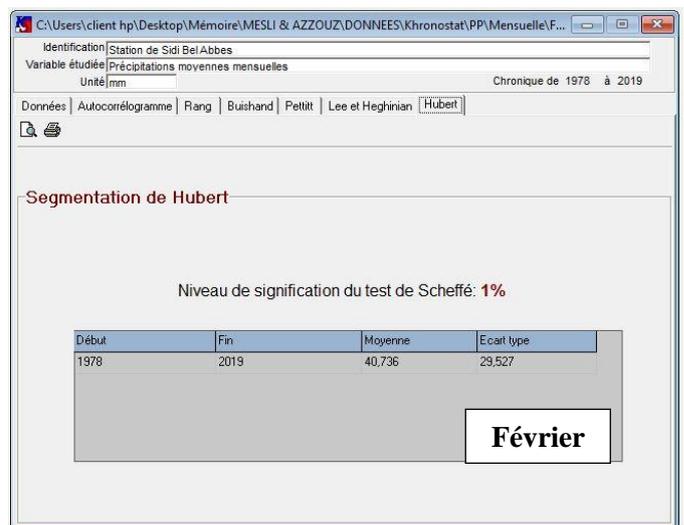
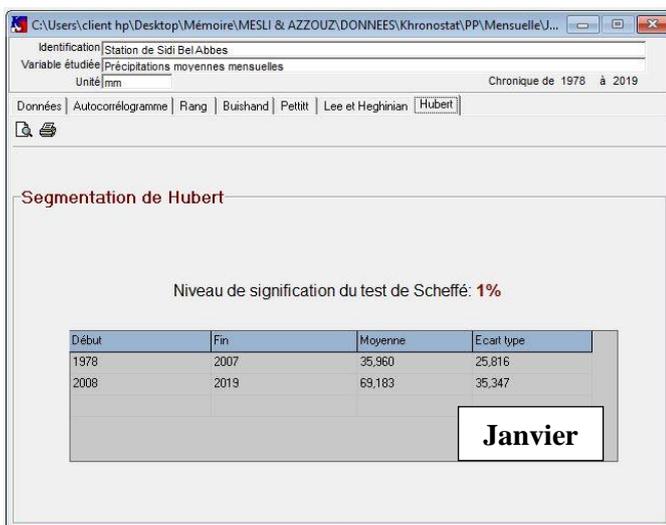
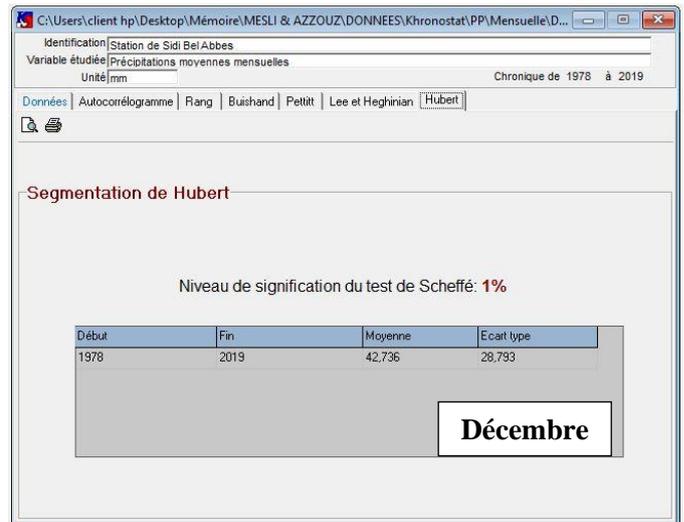
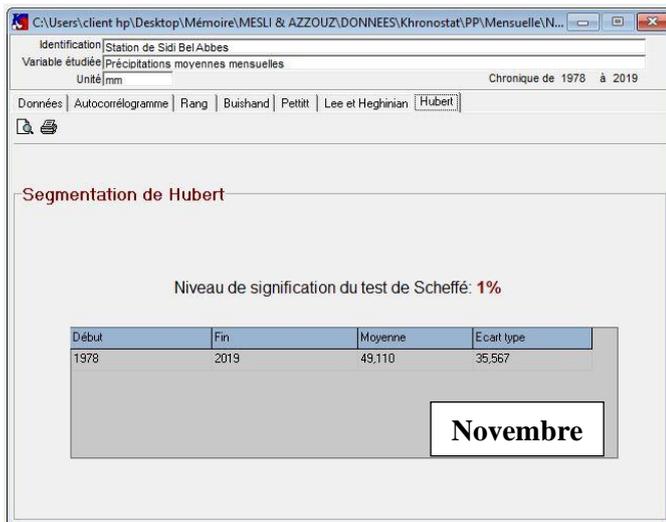
Figure IV.17 : Densité de probabilité a posteriori de la position d'un changement des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

IV.4.2.2.d. Segmentation d'Hubert

La méthode d'Hubert appliquée aux séries des précipitations mensuelles enregistrées au niveau de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019) (fig.IV.18), indique que seul la série du mois de Janvier présente deux segments de 1977/1978-2006/2007 et de 2007/2008-2018/2019, mettant ainsi en évidence une rupture en 2006/2007.



Chapitre IV Détermination des ruptures dans les séries des précipitations et des températures



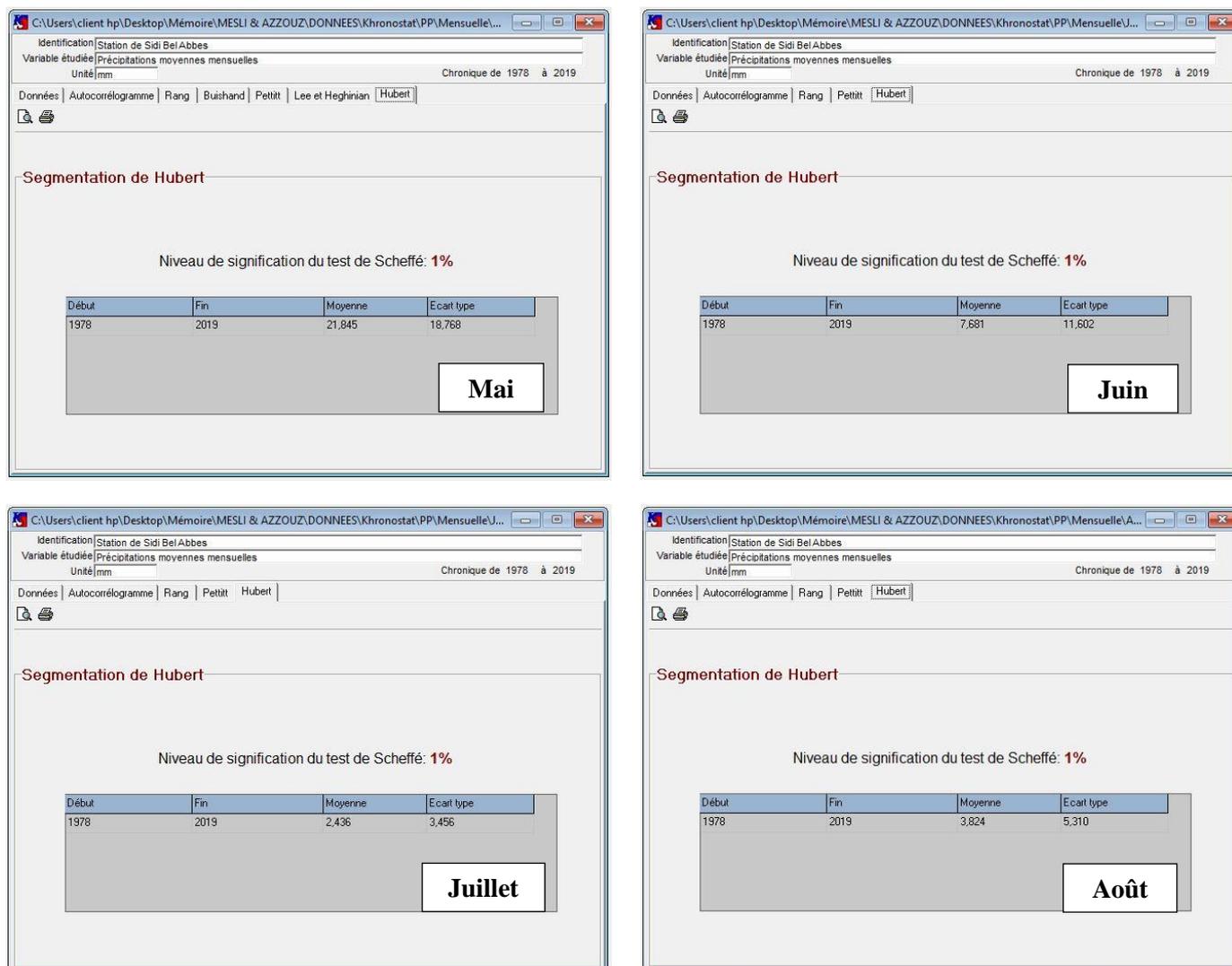


Figure IV.18 : Segmentation d’Hubert sur les variations mensuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

IV.4.3. Analyse des précipitations saisonnières

IV.4.3.1. Tests de vérification du caractère aléatoire

IV.4.3.1.a. Calcul de l’autocorrélogramme et son intervalle de confiance

Les résultats du calcul des coefficients d’autocorrélation aux intervalles de confiance à 99%, 95% et 90% sur les séries des précipitations saisonnières enregistrées au niveau de la station de Sidi Bel Abbas pendant la période 1977/1978-2018/2019, à l’aide du code Chronostat sont représentés par la figure IV.19.

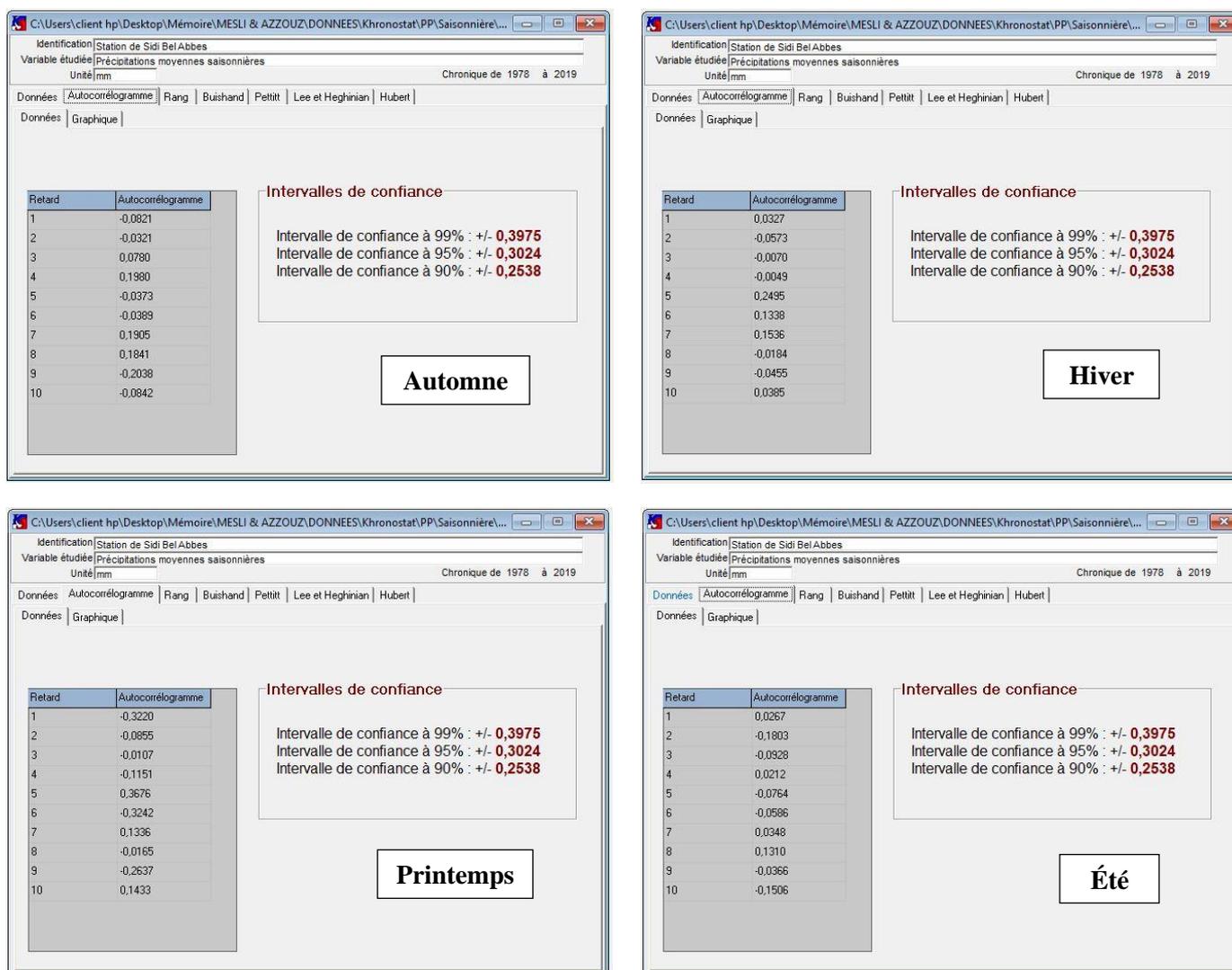


Figure IV.19 : Calcul de l'autocorrélogramme et son intervalle de confiance pour les variations saisonnières des précipitations de la station de Sidi Bel Abbès (1977/1978-2018/2019)

Les autocorrélogrammes (fig.IV.20) des séries des précipitations saisonnières à la station de Sidi Bel Abbès pendant la période 1977/1978-2018/2019, indiquent que l'hypothèse nulle est rejetée au seuil de confiance de 90% et 95% pour le Printemps, par contre elle est acceptée aux trois seuils de confiance pour le reste des saisons. Nous pouvons considérer que les séries des précipitations saisonnières sont aléatoires.

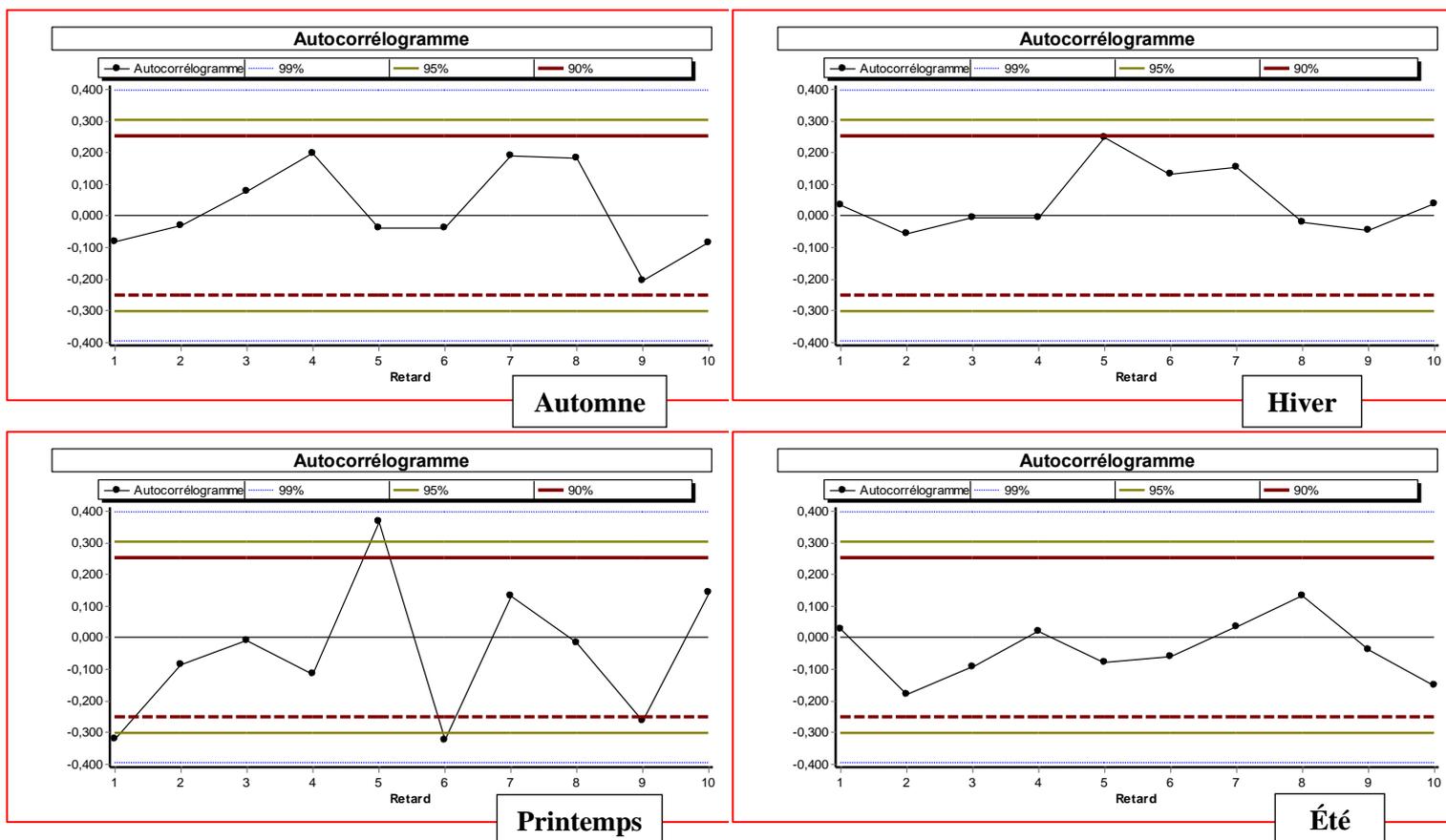


Figure IV.20 : Autocorrélogrammes des variations saisonnières des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

IV.4.3.1.b. Test de corrélation sur le rang

Conformément aux résultats du test de corrélation sur le rang représentés dans la figure IV.21 pour les séries des précipitations saisonnières à la station de Sidi Bel Abbas pendant la période 1977/1978-2018/2019, l'hypothèse nulle est rejetée au seuil de confiance de 90% pour la saison d'Automne, en revanche, elle est acceptée aux trois seuils de confiance pour les autres saisons.

Ces résultats permettent de confirmer le caractère aléatoire de nos séries.

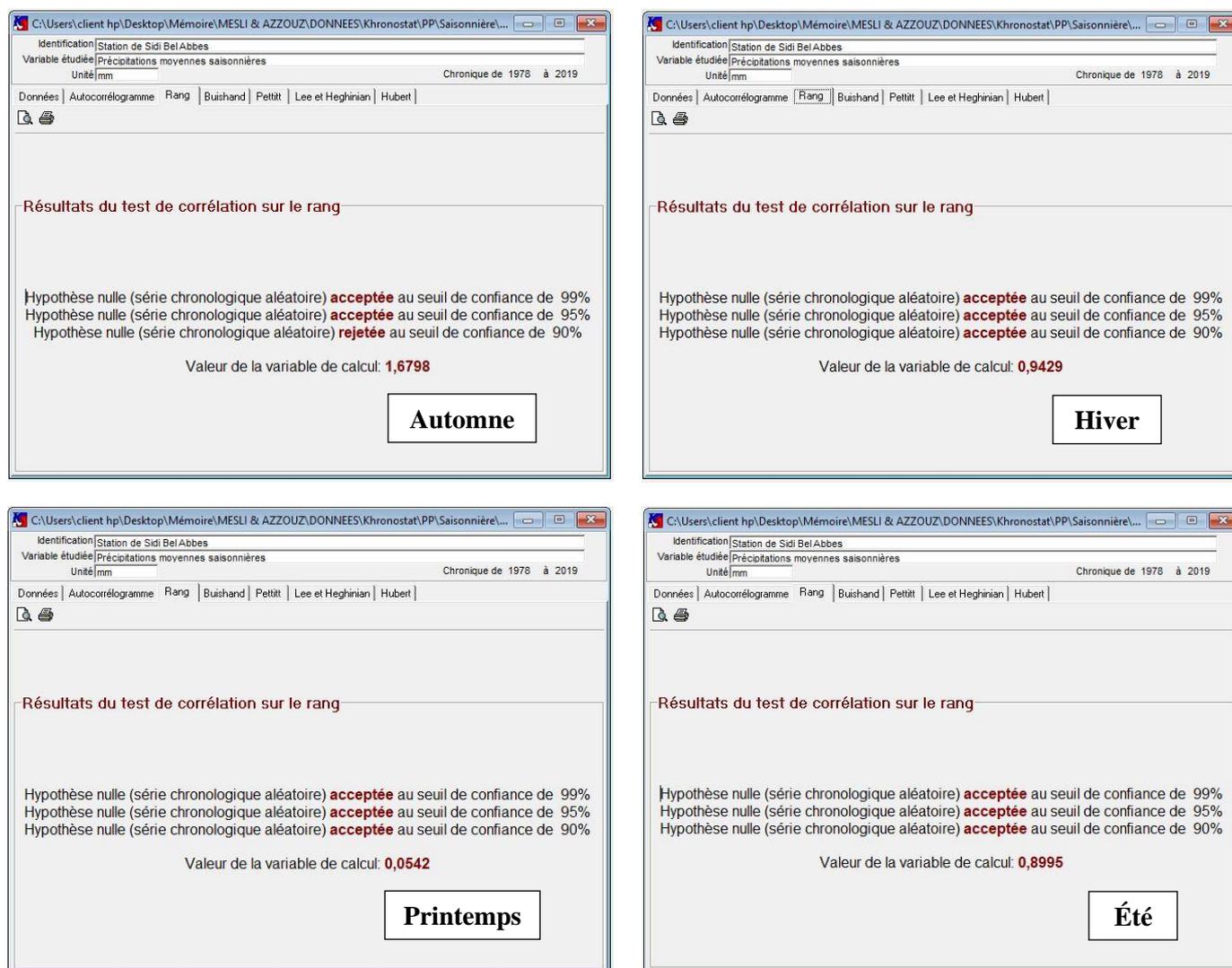


Figure IV.21 : Résultats du test de corrélation sur le rang pour les variations saisonnières des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

IV.4.3.2. Tests de détection de rupture

IV.4.3.2.a. Test de Buishand et ellipse de Bois

Selon les résultats du test de Buishand appliqué aux séries des précipitations saisonnières de la station de Sidi Bel Abbas relatives à la période 1977/1978-2018/2019 (fig.IV.22), nous remarquons que l'hypothèse nulle est rejetée au seuil de confiance de 90% pour la saison d'Automne, mais elle est acceptée aux trois seuils de confiance pour les autres saisons.

D'après les ellipses de Bois (fig.IV.23), nous observons une absence de rupture pour les quatre saisons.

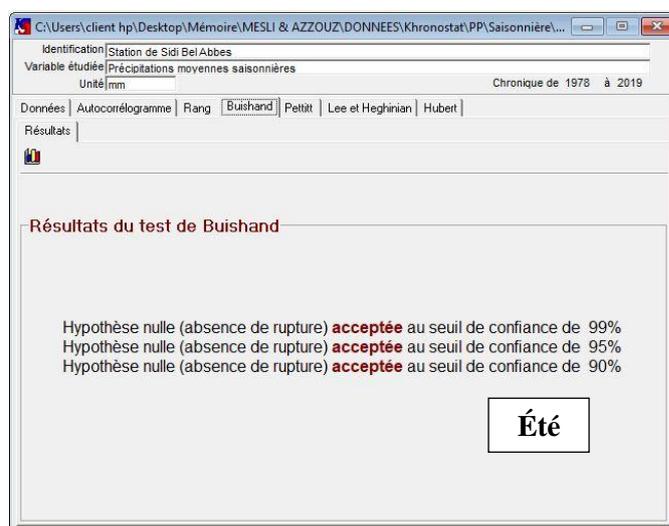
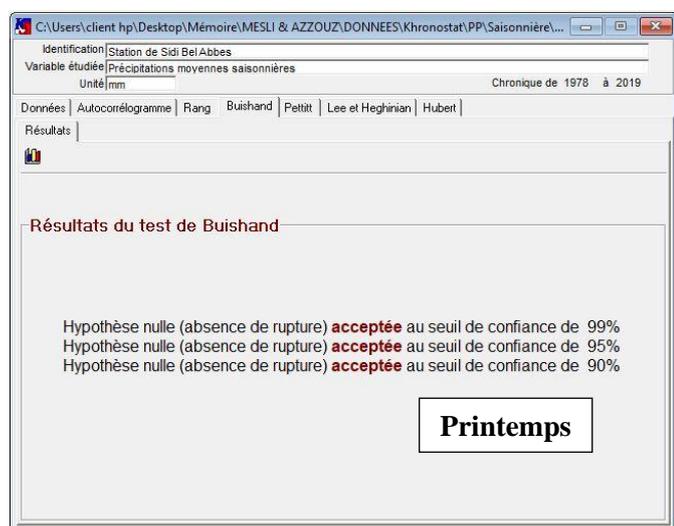
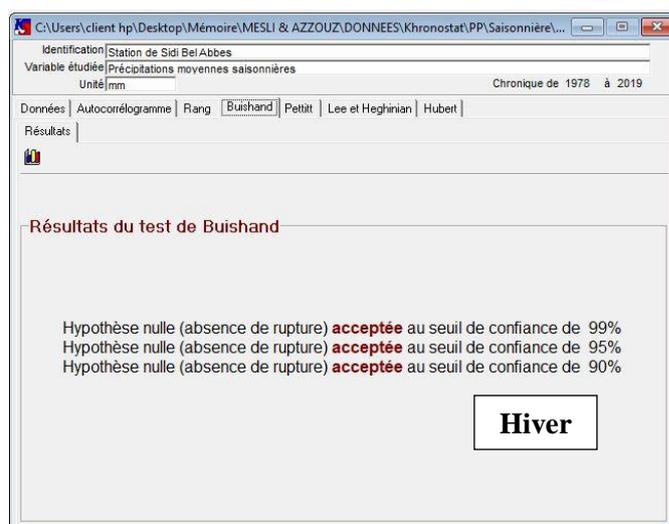
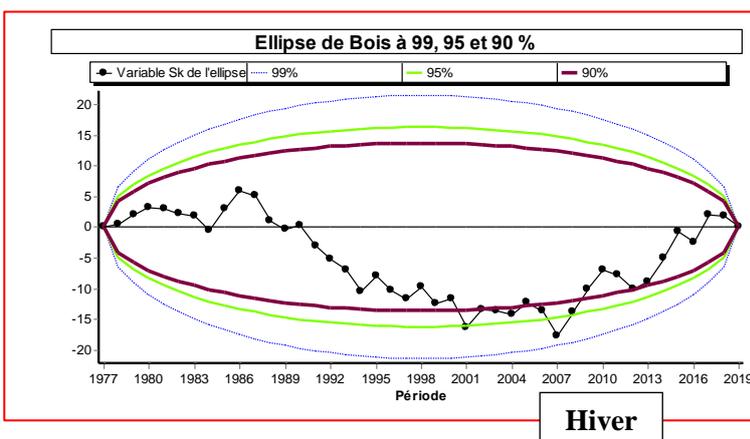
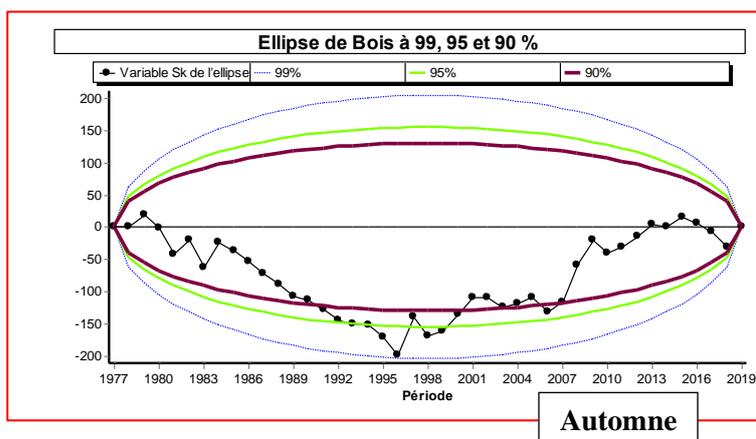


Figure IV.22 : Résultats du test de Buishand pour les variations saisonnières des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)



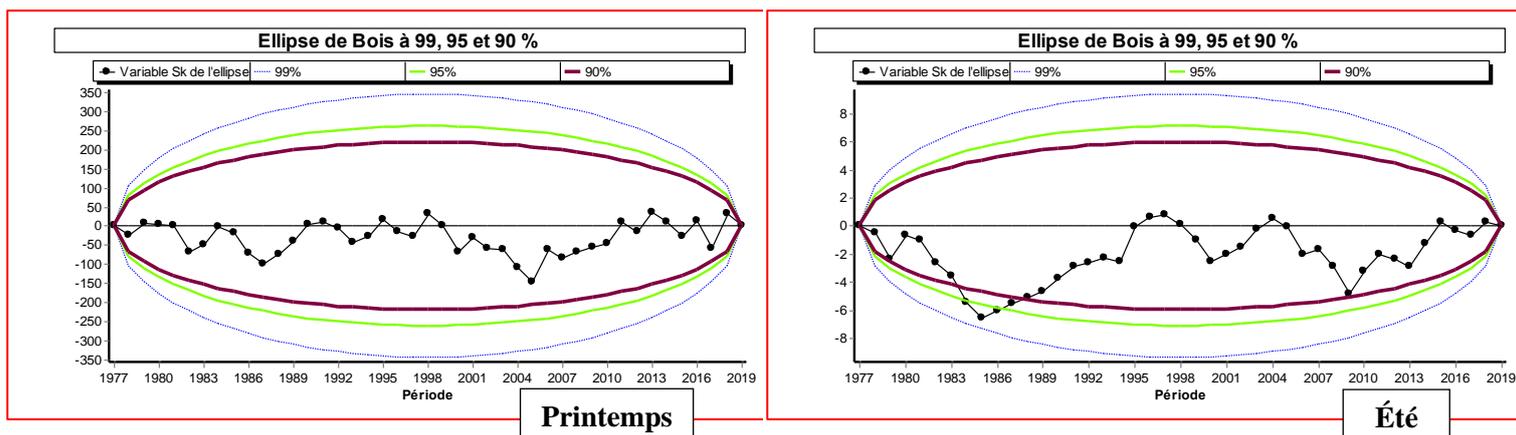
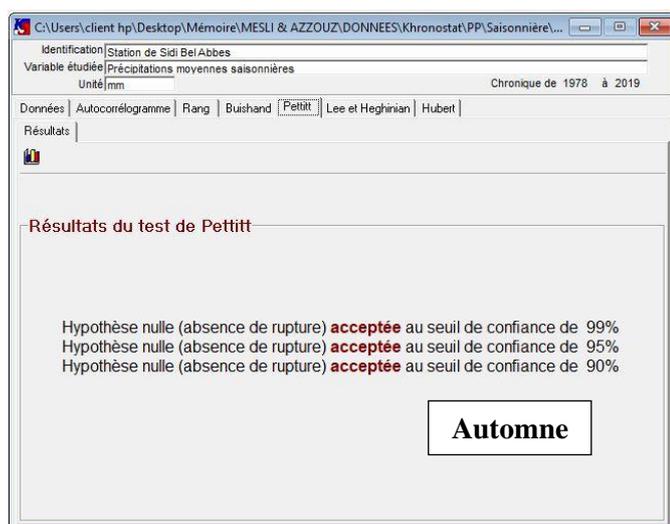


Figure IV.23 : Ellipses de Bois pour les variations saisonnières des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

IV.4.3.2.b. Méthode non paramétrique de Pettitt

Les résultats du test de Pettitt (fig.IV.24) montrent l'absence de rupture pour les quatre saisons. En effet, l'hypothèse nulle est acceptée aux trois seuils de confiance pour les séries des précipitations saisonnières de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019).



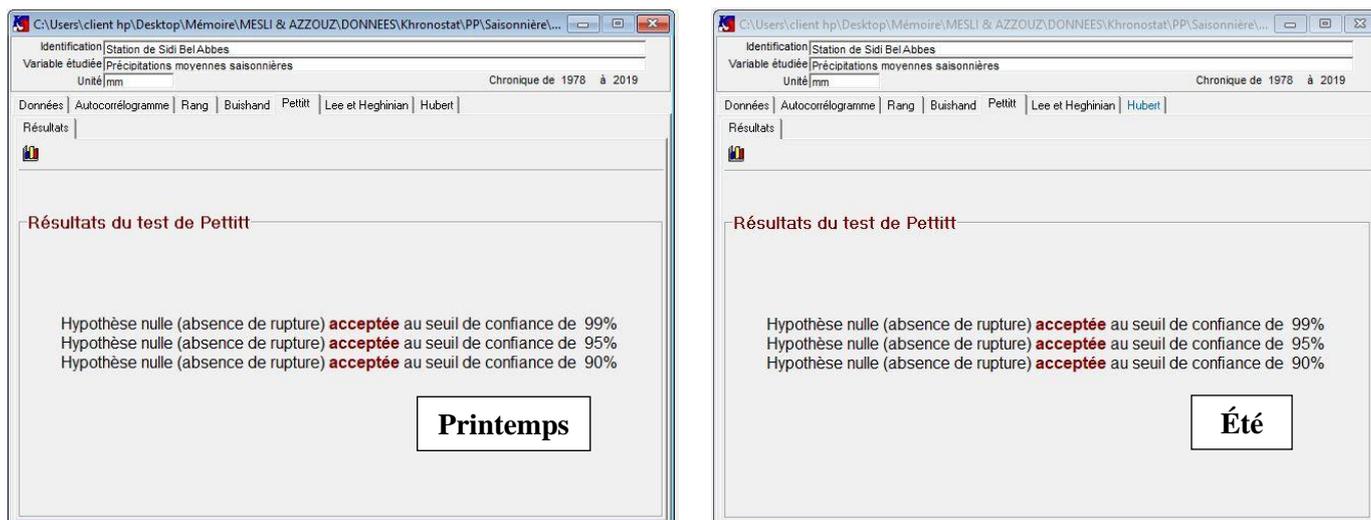


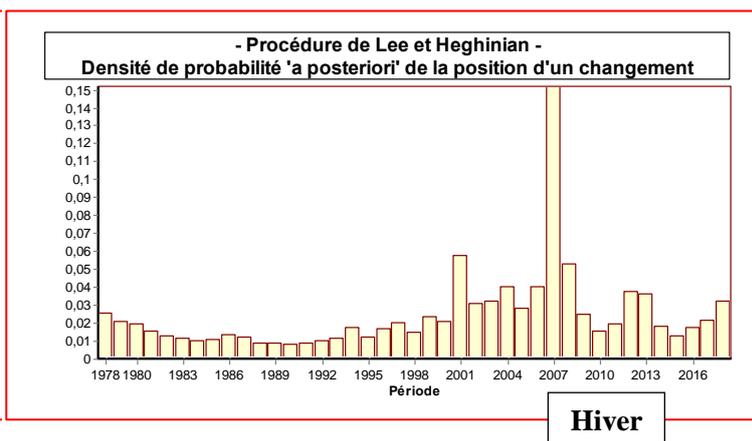
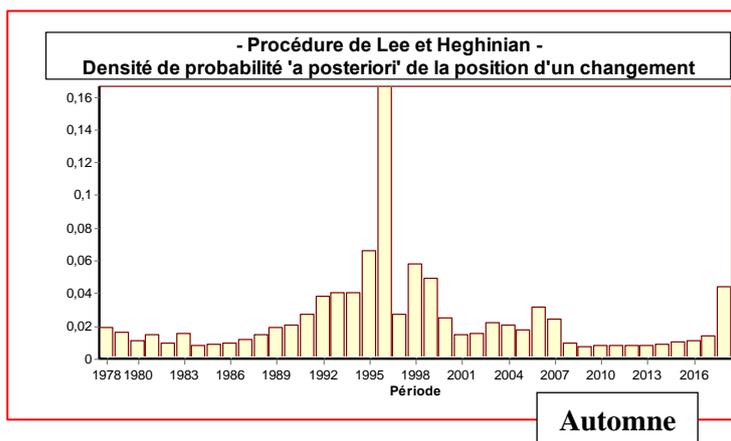
Figure IV.24 : Résultats du test de Pettitt pour les variations saisonnières des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

IV.4.3.2.c. Méthode bayésienne de Lee et Heghinian

La méthode bayésienne appliquée aux séries des précipitations saisonnières de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019), dont les résultats sont présentés en figure IV.25, indiquent l'existence d'au moins une rupture pour chaque saison (tab.IV.2).

Tableau IV.2 : Ruptures détectées par la méthode bayésienne de Lee et Heghinian pour les variations moyennes saisonnières des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Été
Date de rupture	1995/1996	2006/2007	2017/2018	1984/1985



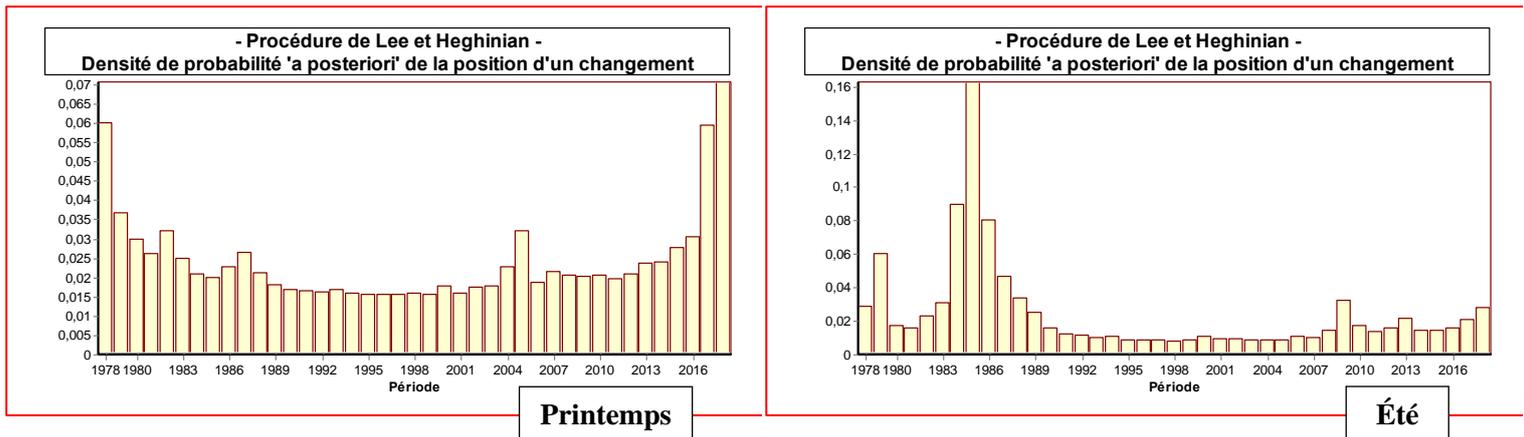
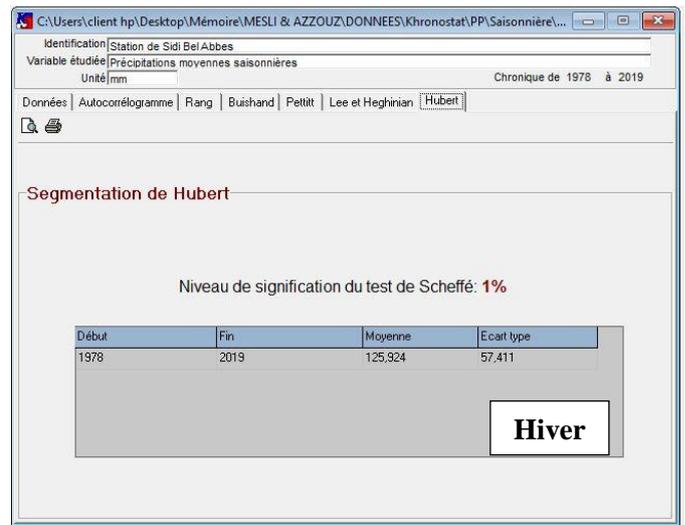
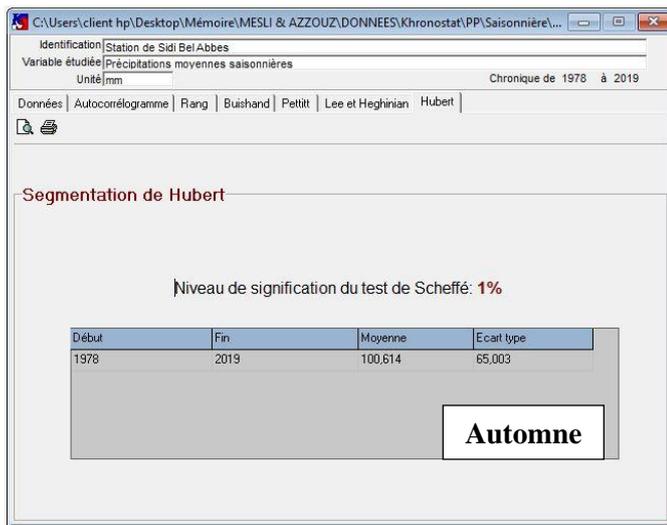


Figure IV.25 : Densité de probabilité à posteriori de la position d'un changement de précipitations saisonnières de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

IV.4.3.2.d. Segmentation d'Hubert

Selon les résultats de la figure IV.26, la segmentation d'Hubert n'a proposé aucun découpage des séries des précipitations saisonnières de la station de Sidi Bel Abbas pendant la période 1977/1978-2018/2019.



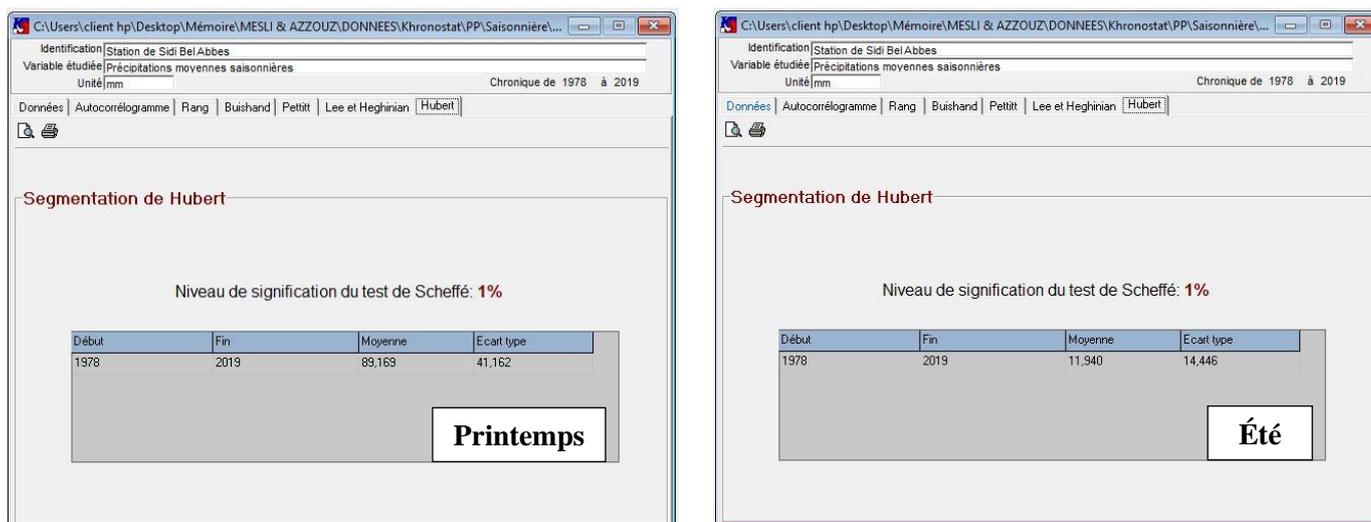


Figure IV.26 : Segmentation d’Hubert pour les variations saisonnières des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

IV.4.4. Analyse des températures moyennes annuelles

IV.4.4.1. Tests de vérification du caractère aléatoire

IV.4.4.1.a. Calcul de l’autocorrélogramme et son intervalle de confiance

Les résultats du calcul des coefficients d’autocorrélation et de ses intervalles de confiance à 99%, 95% et 90% à l’aide de Khronostat pour la série de températures moyennes annuelles de la station de Sidi Bel Abbas relatives à la période 1989/1990-2018/2019 sont consignés dans la figure IV.27.

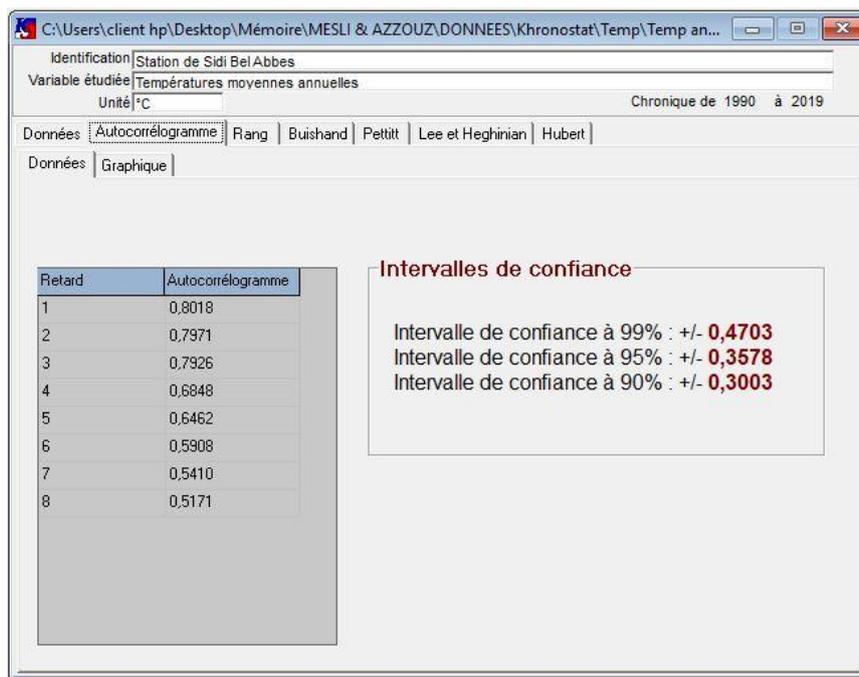


Figure IV.27 : Calcul de l'autocorrélogramme et de son intervalle de confiance pour les variations moyennes annuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbas (1989/1990-2018/2019)

Selon l'autocorrélogramme de la série de températures moyennes annuelles de la station de Sidi Bel Abbas (1989/1990-2018/2019), (fig.IV.28), nous observons que les coefficients d'autocorrélation ne sont pas inclus dans aucun intervalle de confiance. Notre série étudiée n'est pas à caractère aléatoire.

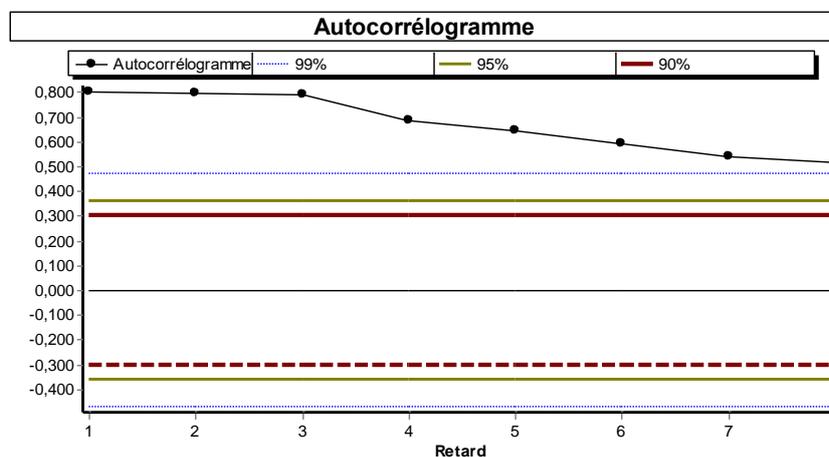


Figure IV.28 : Autocorrélogramme des variations moyennes annuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbas (1989/1990-2018/2019)

IV.4.4.1.b. Test de corrélation sur le rang

Les résultats du test de corrélation sur le rang (fig.IV.29) définissent que la série de températures moyennes annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019), n'est pas à caractère aléatoire, l'hypothèse nulle est rejetée aux trois seuils de confiance.

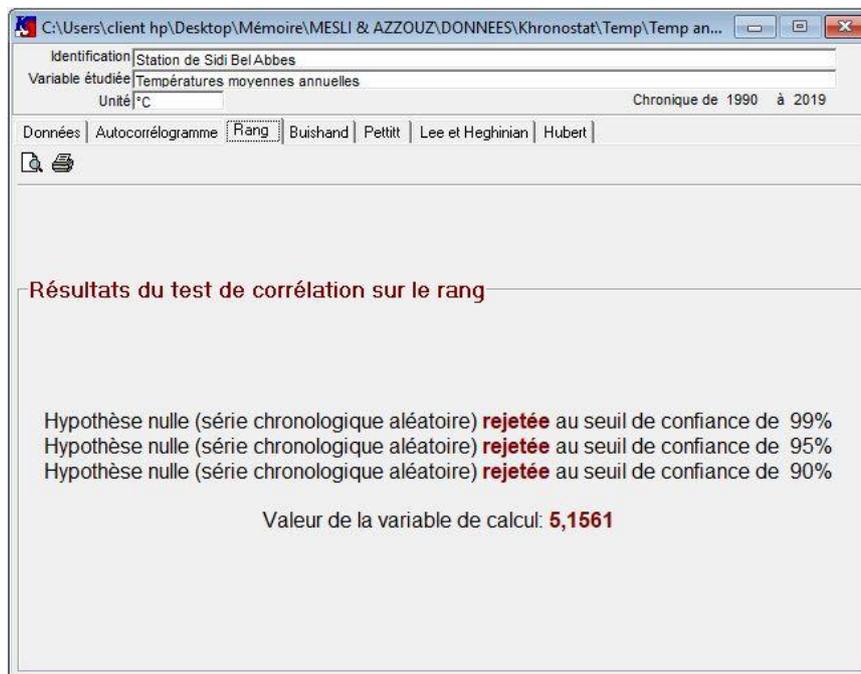


Figure IV.29 : Résultats du test de corrélation sur le rang pour les variations moyennes annuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)

IV.4.4.2. Tests de détection de rupture

IV.4.4.2.a. Test de Buishand et ellipse de Bois

L'hypothèse nulle est rejetée aux trois seuils de confiance par le test de Buishand sur la série de températures moyennes annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019) (fig.IV.30). Toutefois l'ellipse de Bois de la figure IV.31 fait apparaître une rupture au cours de la période 1991/1992 jusqu'à 2014/2015.

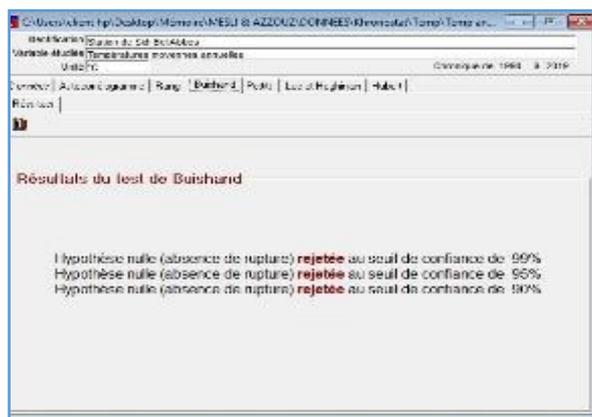


Figure IV.30 : Résultats du test de Buishand sur les variations moyennes annuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbas (1989/1990-2018/2019)

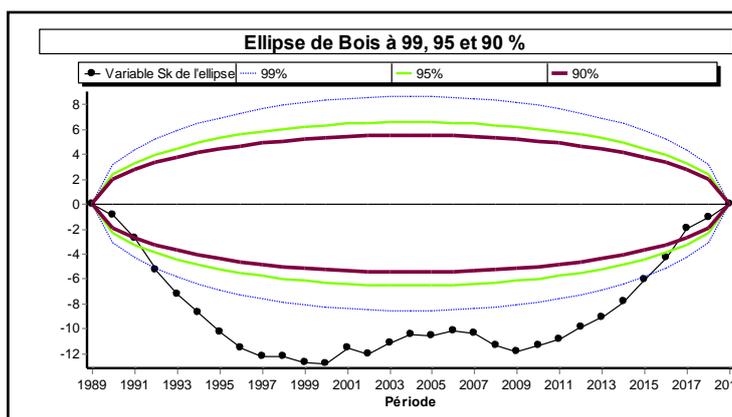


Figure IV.31 : Ellipse de Bois pour les variations moyennes annuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbas (1989/1990-2018/2019)

IV.4.4.2.b. Méthode non paramétrique de Pettitt

D'après les figures IV.32 et IV.33, les résultats du test de Pettitt obtenus pour la série de températures moyennes annuelles de la station de Sidi Bel Abbas (1989/1990-2018/2019), indiquent un refus de l'hypothèse nulle aux trois seuils de confiance, avec une apparition de rupture en 1999/2000 pour une probabilité de dépassement de $1,49 \cdot 10^{-3}$.

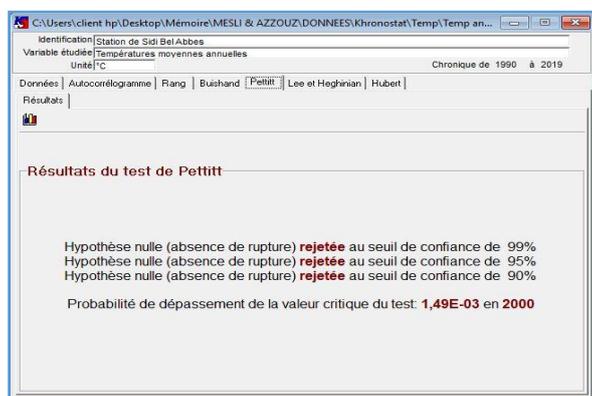


Figure IV.32 : Résultats du test de Pettitt sur les variations moyennes annuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbas (1989/1990-2018/2019)

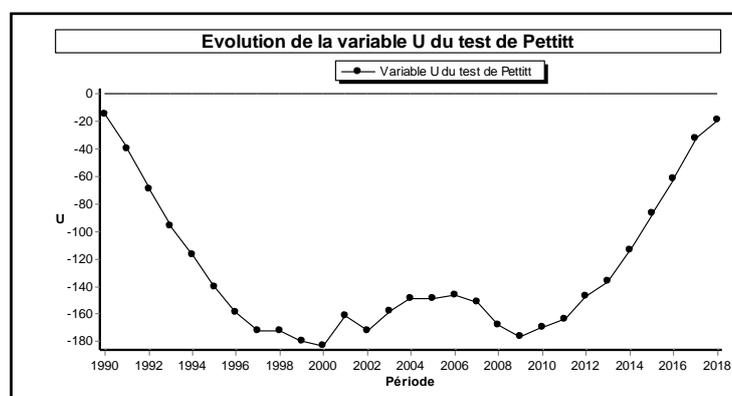


Figure IV.33 : Évolution de la variable U du test de Pettitt sur les variations moyennes annuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbas (1989/1990-2018/2019)

IV.4.4.2.c. Méthode bayésienne de Lee et Heghinian

La méthode bayésienne de Lee et Heghinian appliquée à la série de températures moyennes annuelles de la station de Sidi Bel Abbès (1989/1990-2018/2019), (fig.IV.34 et fig.IV.35), a détecté une rupture en 1996/1997 pour une densité de probabilité à posteriori de 0,3846.

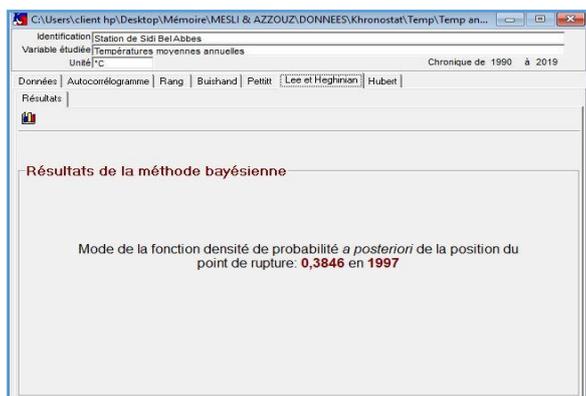


Figure IV.34 : Résultats de la méthode bayésienne de Lee et Heghinian sur les variations moyennes annuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbès (1989/1990-2018/2019)

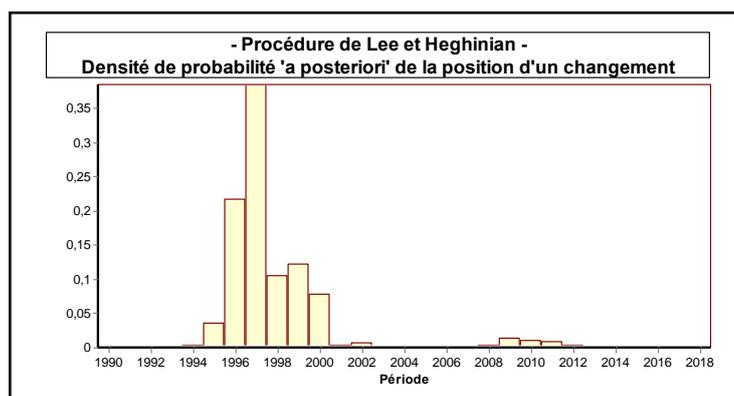


Figure IV.35 : Densité de probabilité à posteriori de la position d'un changement de températures moyennes annuelles de la station de Sidi Bel Abbès (1989/1990-2018/2019)

IV.4.4.2.d. Segmentation d'Hubert

Selon la figure IV.36, la segmentation d'Hubert a proposé un découpage de 1989/1990-1995/1996, de 1996/1997-2010/2011 et de 2011/2012-2018/2019 pour la série de températures moyennes annuelles de la station de Sidi Bel Abbès pendant la période 1989/1990-2018/2019, ce qui nous permet de dire que la rupture a été aperçue en 1995/1996 et en 2010/2011.

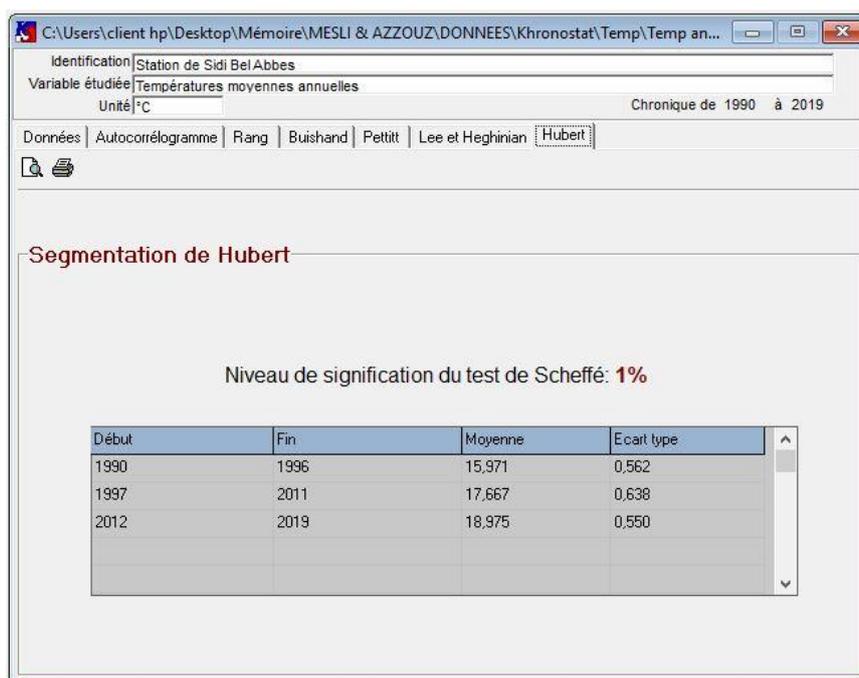


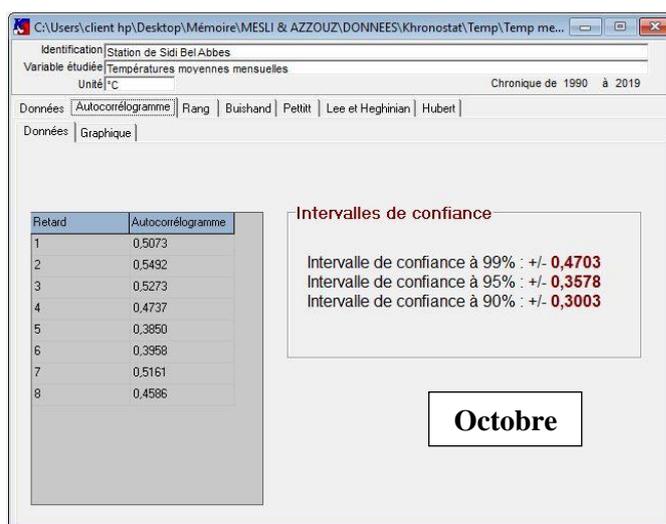
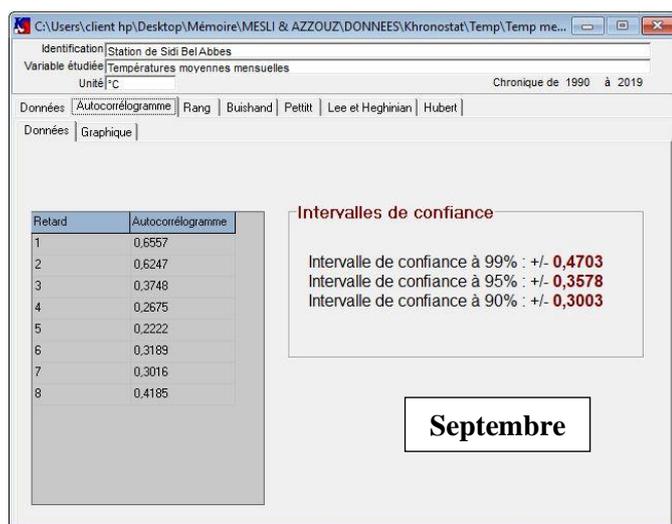
Figure IV.36 : Segmentation d’Hubert pour les variations moyennes annuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbès (1989/1990-2018/2019)

IV.4.5. Analyse des températures moyennes mensuelles

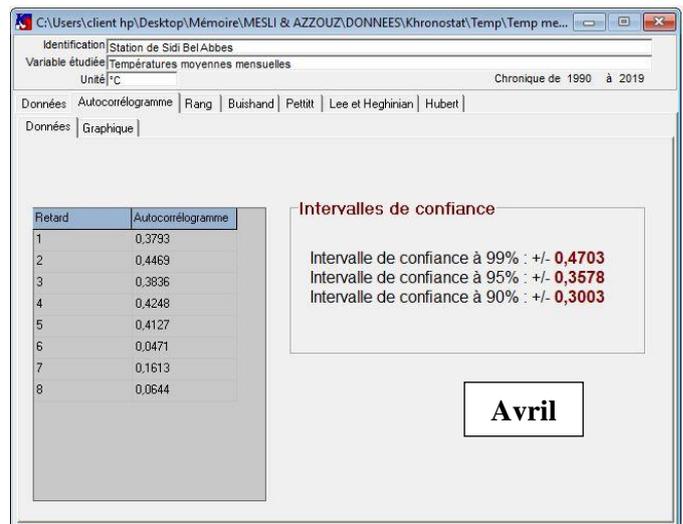
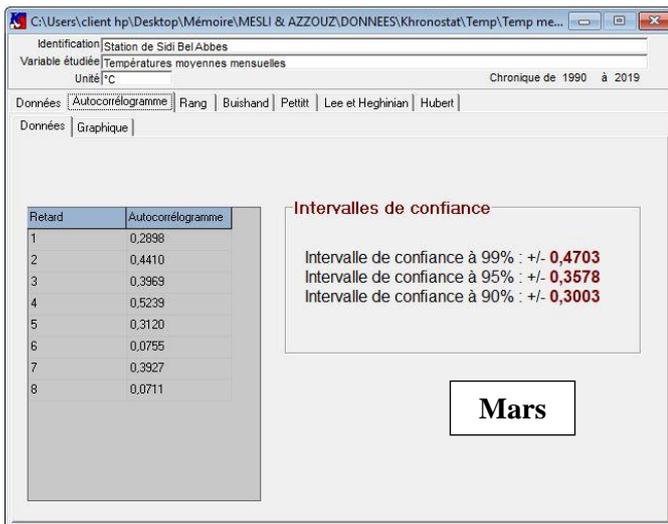
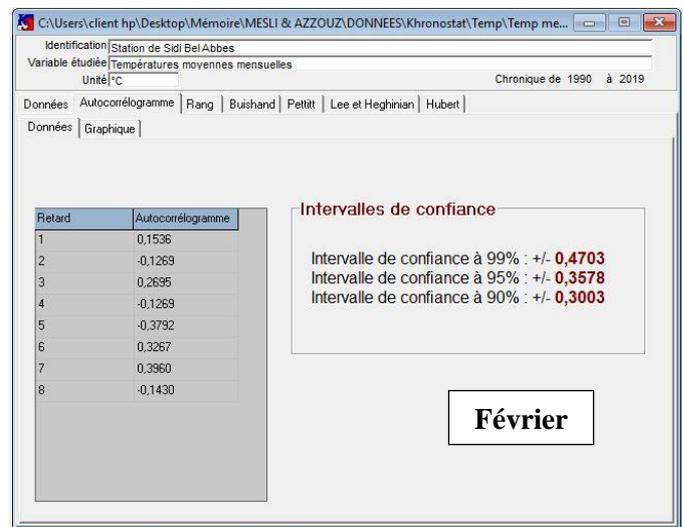
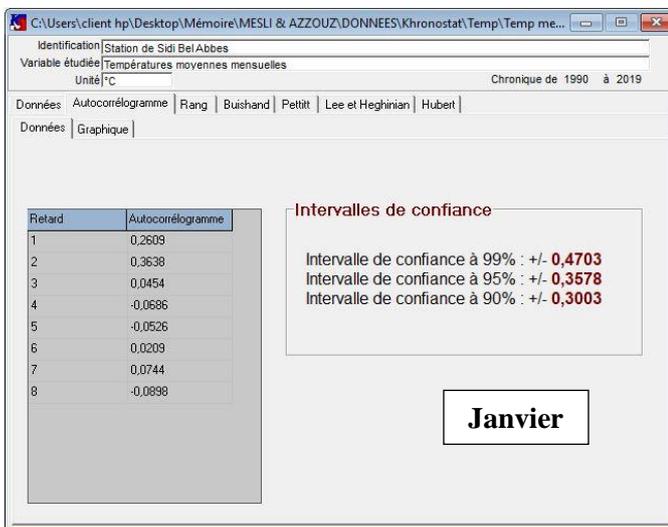
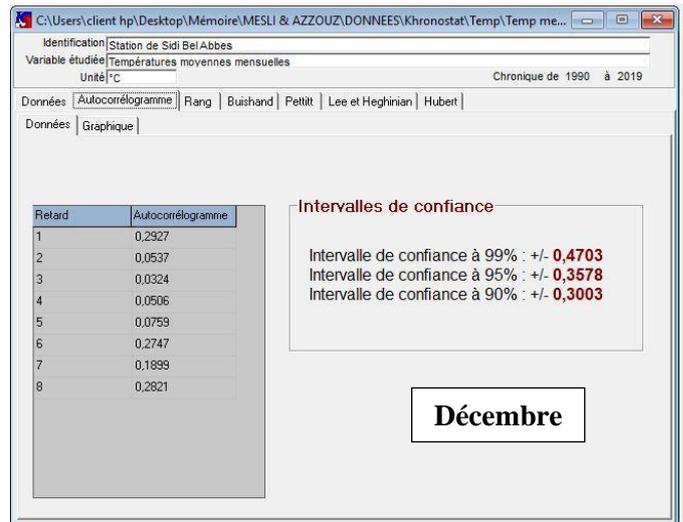
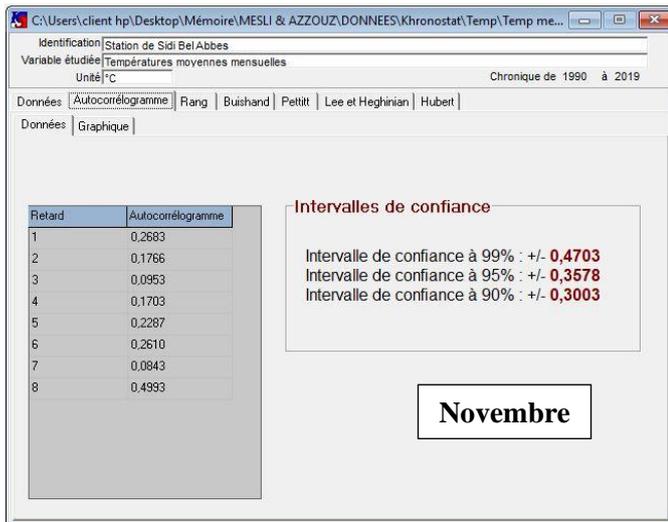
IV.4.5.1. Tests de vérification du caractère aléatoire

IV.4.5.1.a. Calcul de l’autocorrélogramme et de son intervalle de confiance

Les résultats du calcul des coefficients d’autocorrélation et des intervalles de confiance à 99%, 95% et 90% pour les séries de températures moyennes mensuelles de la station de Sidi Bel Abbès (1989/1990-2018/2019), à l’aide du logiciel Kronostat sont représentés par la figure IV.37.



Chapitre IV Détermination des ruptures dans les séries des précipitations et des températures



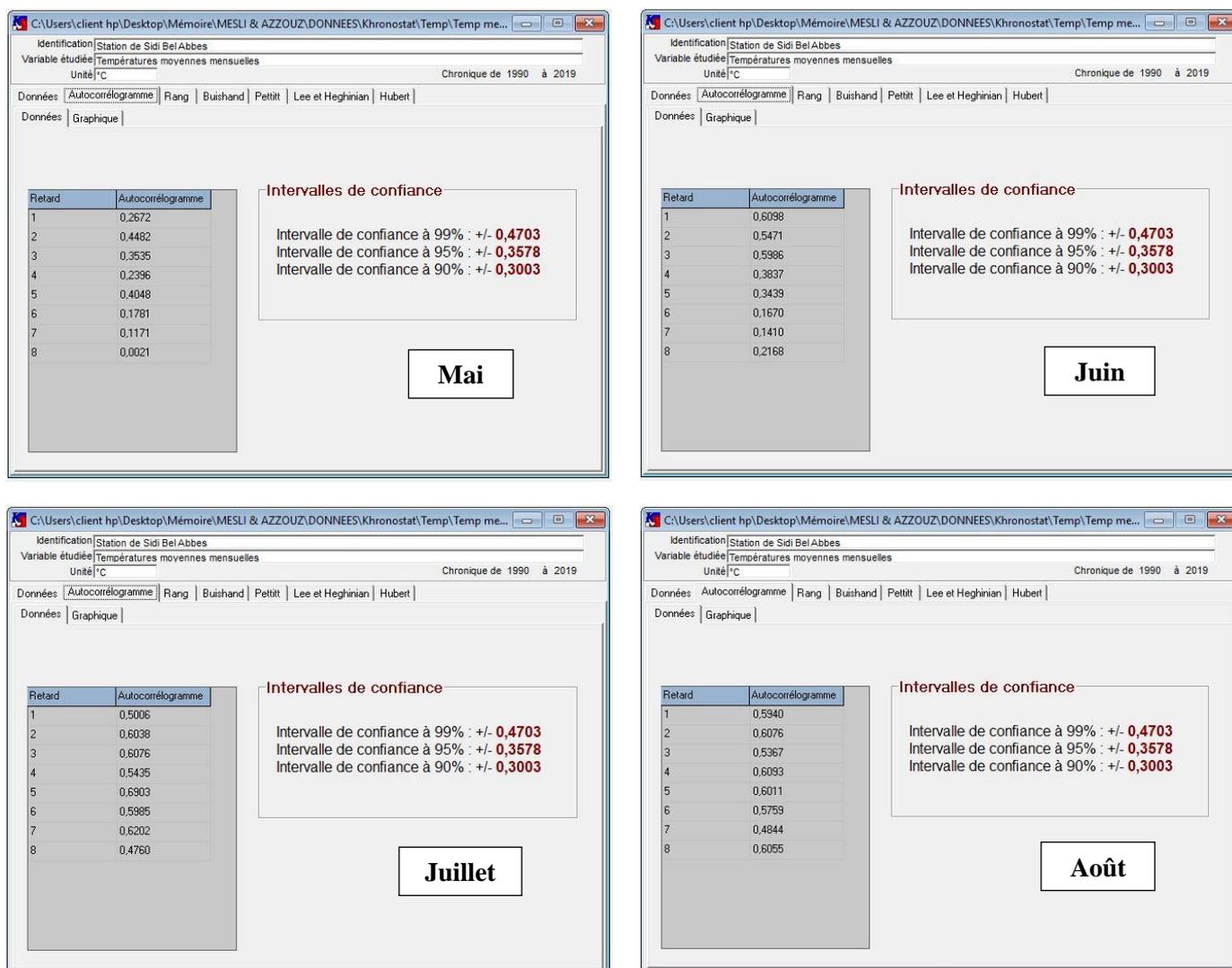
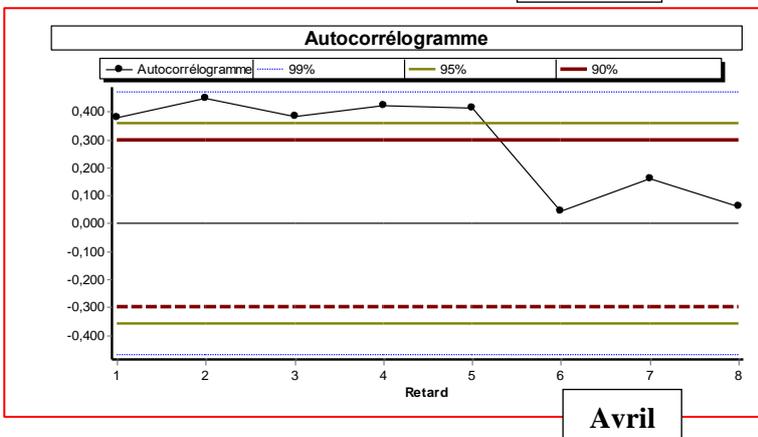
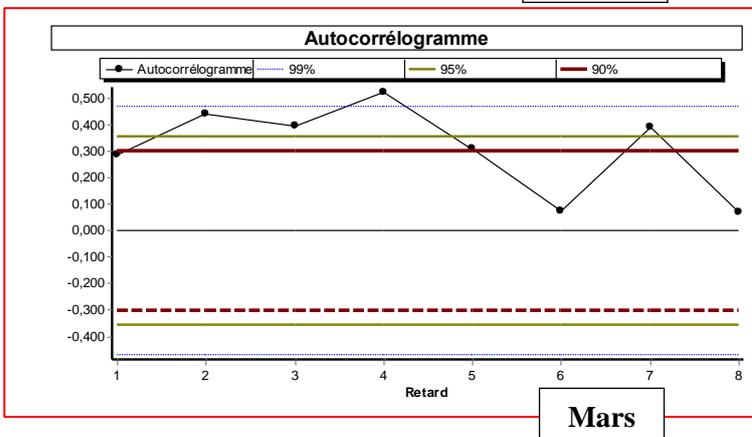
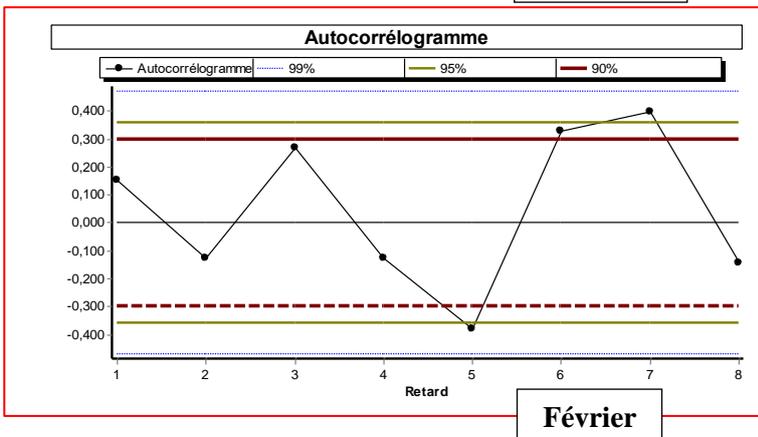
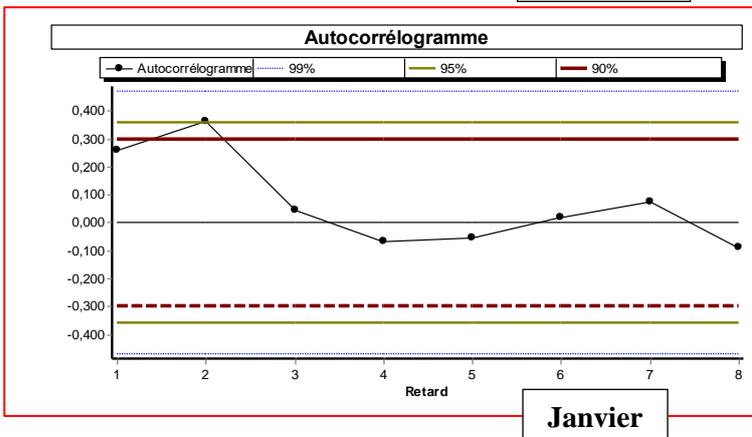
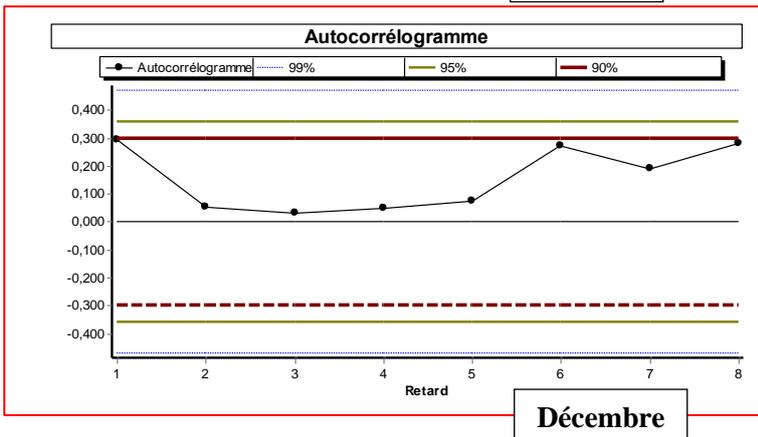
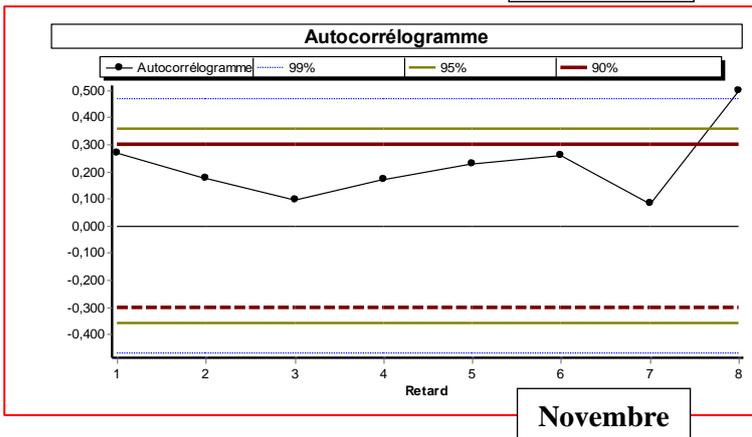
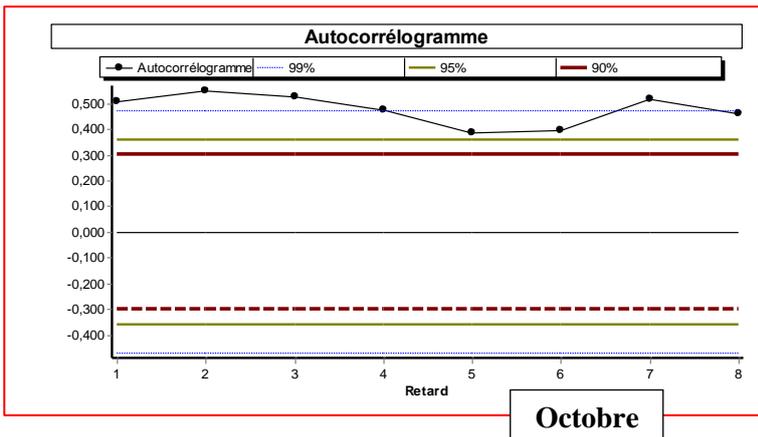
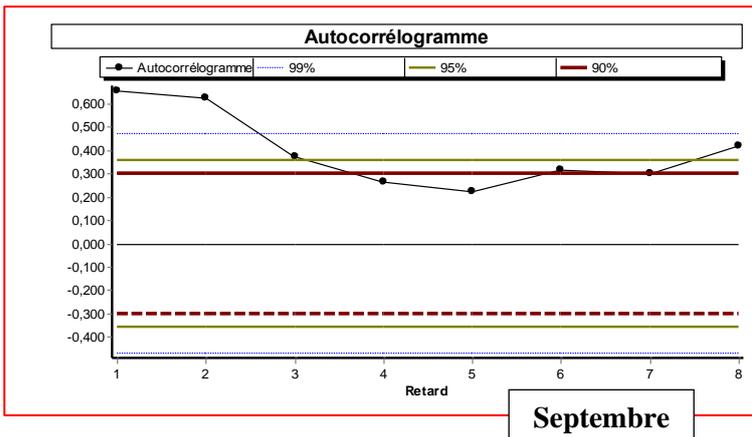


Figure IV.37 : Calcul de l'autocorrélogramme et de son intervalle de confiance pour les variations moyennes mensuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbès (1989/1990-2018/2019)

Les autocorrélogrammes des séries de températures moyennes mensuelles de la station de Sidi Bel Abbès (1989/1990-2018/2019) (fig.IV.38), montrent que pour les mois d'Octobre, de Juillet et d'Août, la majorité des valeurs du coefficient d'autocorrélation ne se trouvent pas dans les intervalles de confiance à 90%, 95% et 99%. Pour les autres mois les sous-séries sont à caractère aléatoire.

Chapitre IV Détermination des ruptures dans les séries des précipitations et des températures



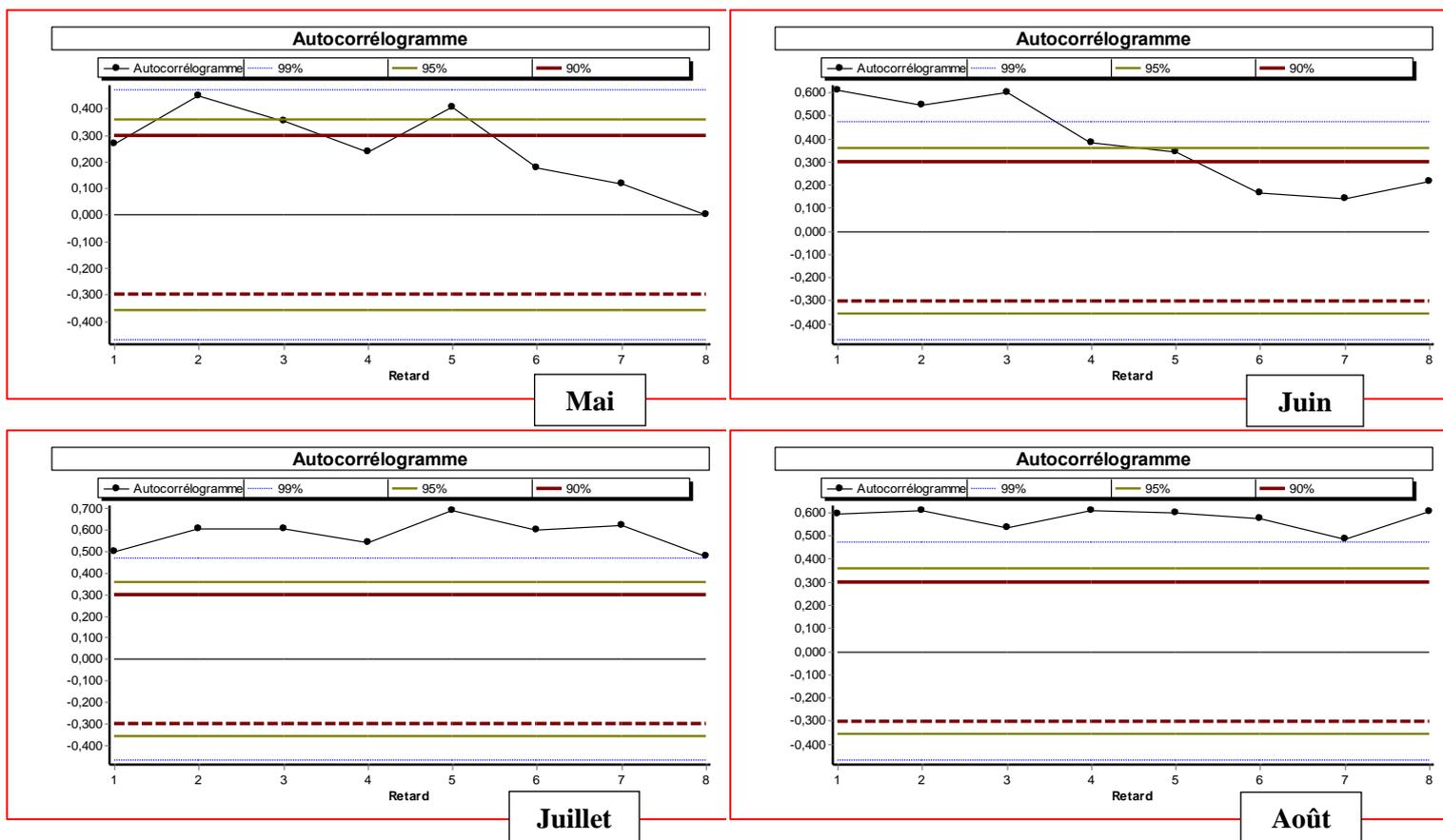


Figure IV.38 : Autocorrélogrammes des variations moyennes mensuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)

IV.4.5.1.b. Test de corrélation sur le rang

Les résultats du test de corrélation sur le rang appliqué aux séries de températures moyennes mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019) (fig.IV.39), nous montrent qu'il y a juste trois sous-séries qui sont à caractère aléatoire pour que l'hypothèse nulle soit acceptée au seuil de confiance de 99% pour les mois de Décembre et de Janvier, et aux seuils de 95% et 99% pour Février.

Chapitre IV Détermination des ruptures dans les séries des précipitations et des températures

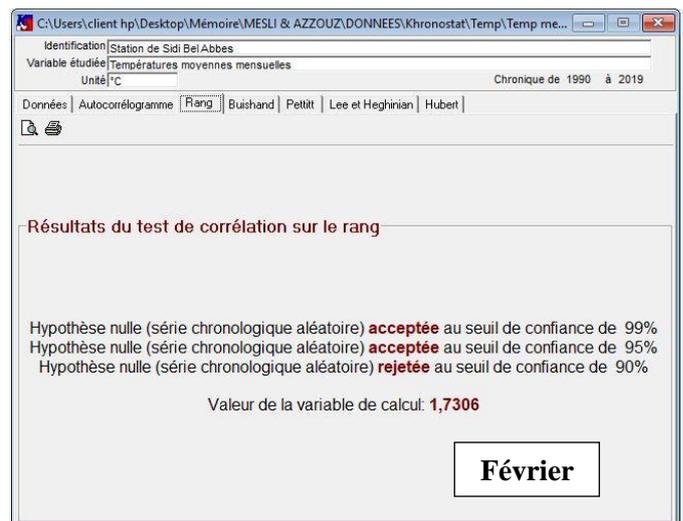
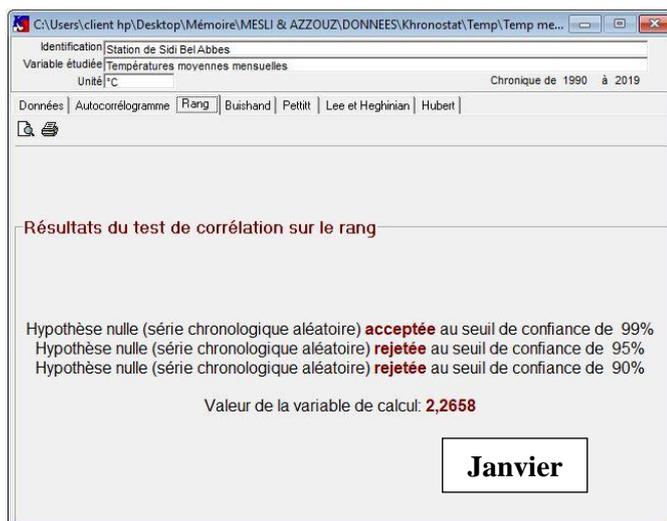
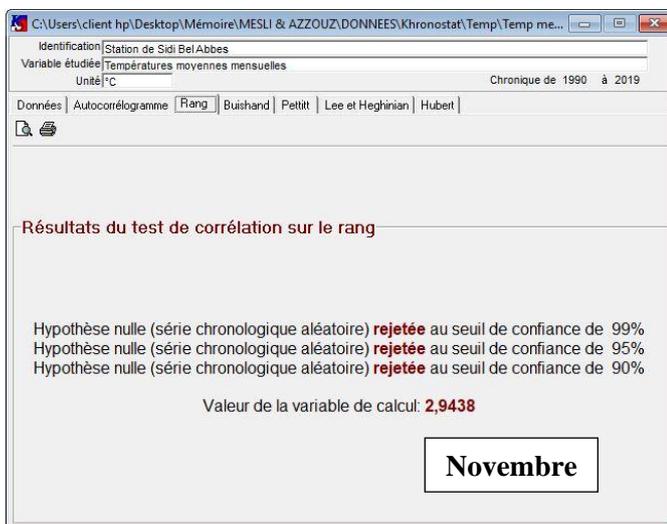
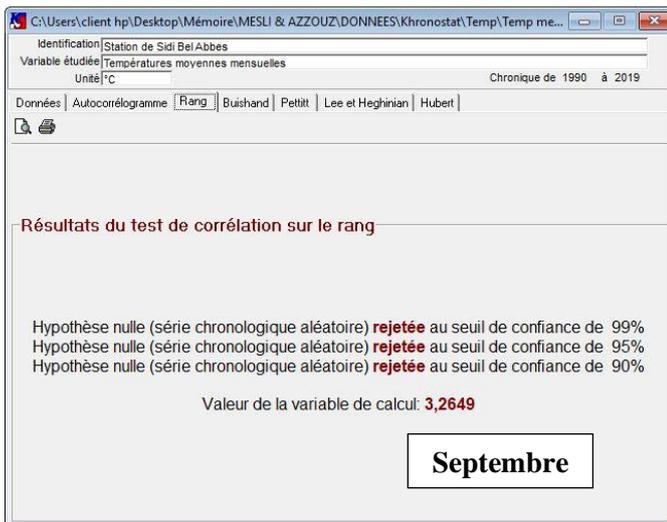




Figure IV.39 : Résultats du test de corrélation sur le rang pour les variations moyennes mensuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbas (1989/1990-2018/2019)

IV.4.5.2. Tests de détection de rupture

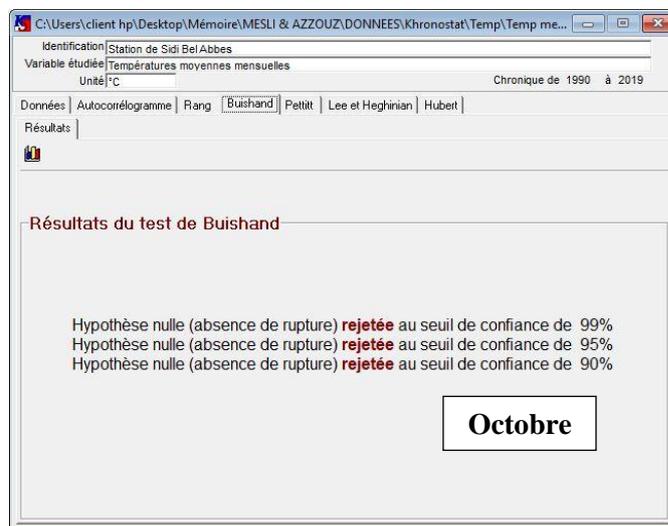
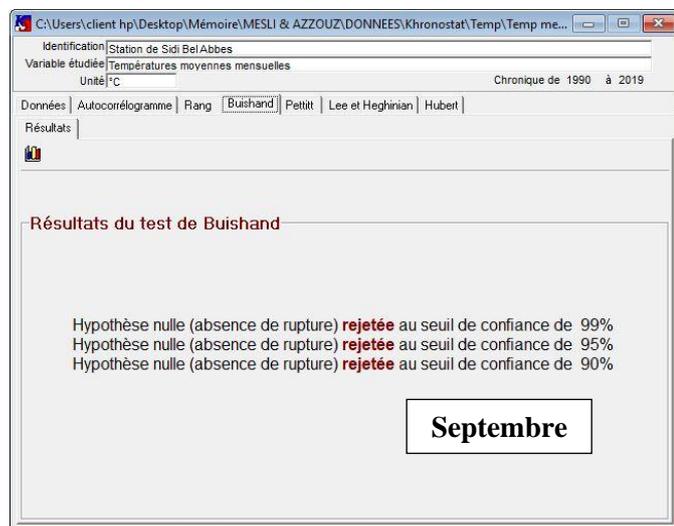
IV.4.5.2.a. Test de Buishand et ellipse de Bois

Selon les résultats du test de Buishand (fig.IV.40), nous observons une acceptation de l'hypothèse nulle au seuil de confiance à 99% pour les mois de Novembre, Décembre et Janvier, ainsi qu'aux trois seuils de confiance pour le mois de Février. Pour les autres mois, c'est le refus de l'hypothèse nulle.

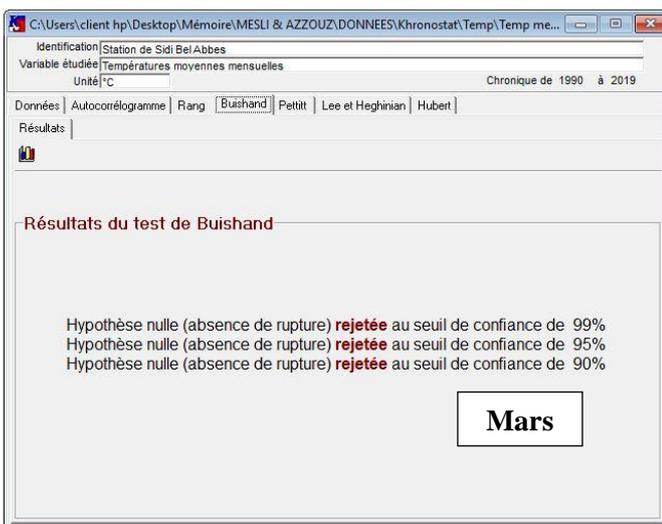
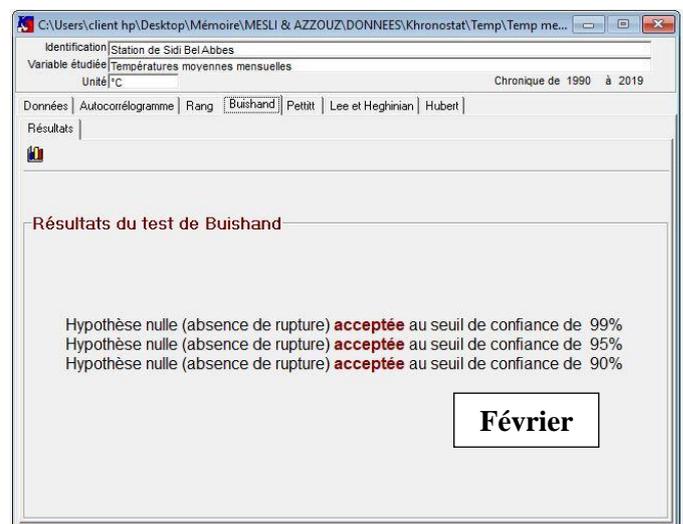
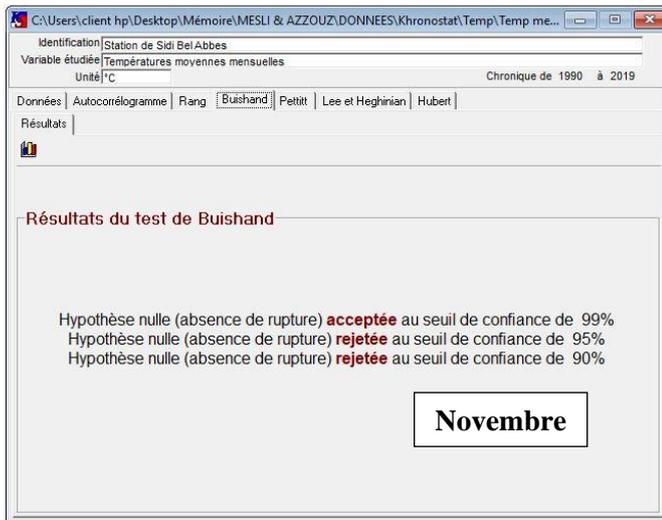
Les ellipses de Bois représentées dans la figure IV.41, nous permettent de détecter des ruptures dans les séries des températures moyennes mensuelles, que nous mentionnons dans le tableau IV.3.

Tableau IV.3 : Ruptures détectées par les ellipses de Bois sur les variations moyennes mensuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)

Mois	Date de rupture	Mois	Date de rupture
Septembre	De 2006/2007 à 2013/2014	Mars	1992/1993 et de 1994/1995 à 1999/2000
Octobre	De 1993/1994 à 2013/2014	Avril	De 1992/1993 à 1999/2000 et 2008/2009, 2009/2010, 2011/2012 et 2012/2013
Novembre	2008/2009 et 2009/2010	Mai	De 1992/1993 à 1999/2000
Décembre	1993/1994 et 1994/1995	Juin	De 1991/1992 à 2001/2002 et 2010/2011
Janvier	De 1992/1993 à 1994/1995	Juillet	De 1995/1996 à 2013/2014
Février	Absence de rupture	Août	De 1996/1997 à 1998/1999 et de 2000/2001 à 2013/2014



Chapitre IV Détermination des ruptures dans les séries des précipitations et des températures



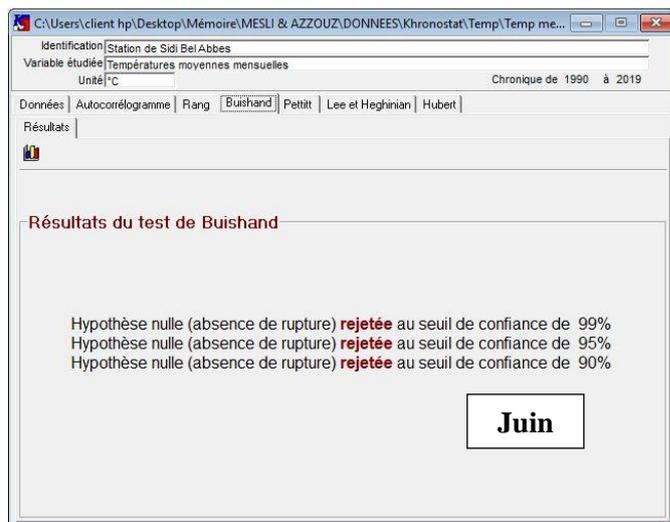
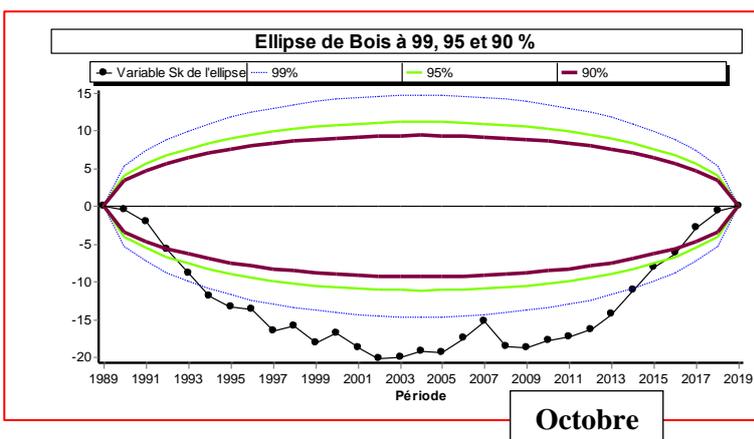
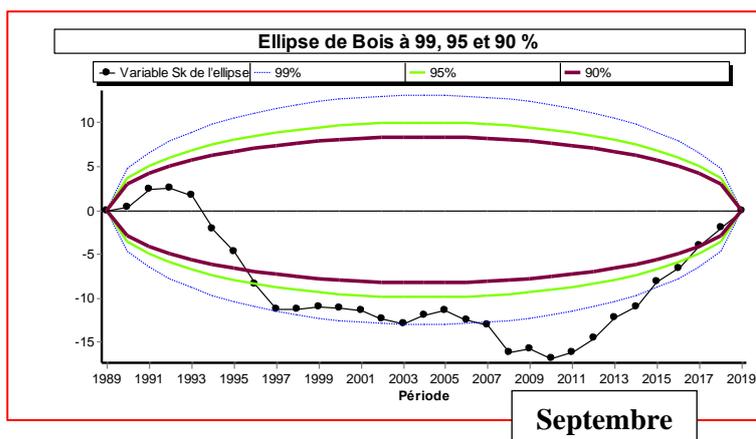
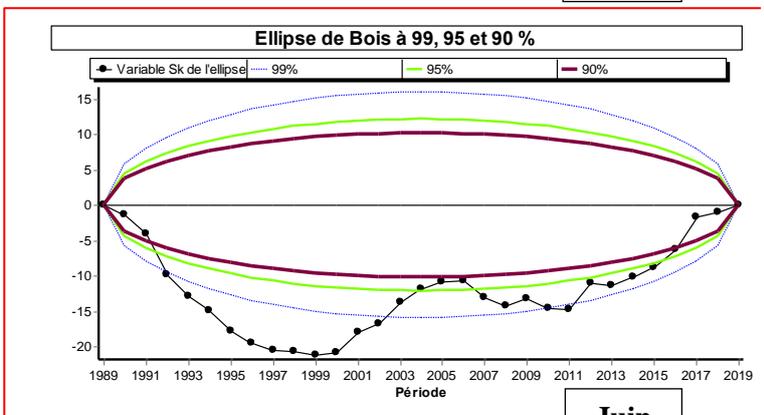
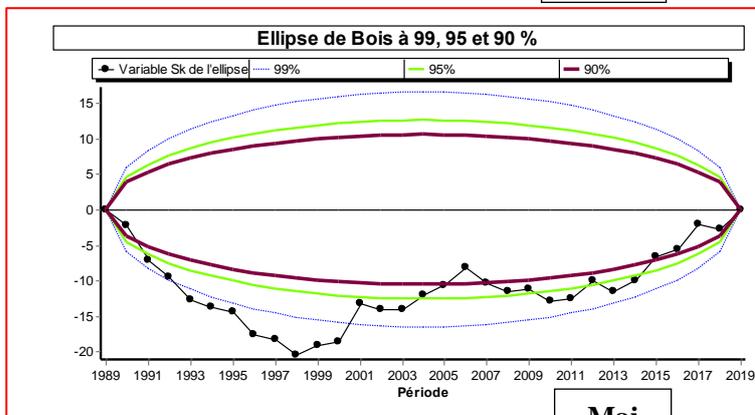
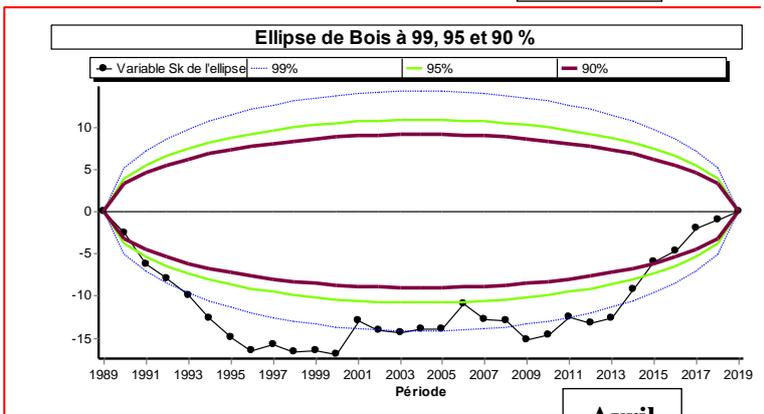
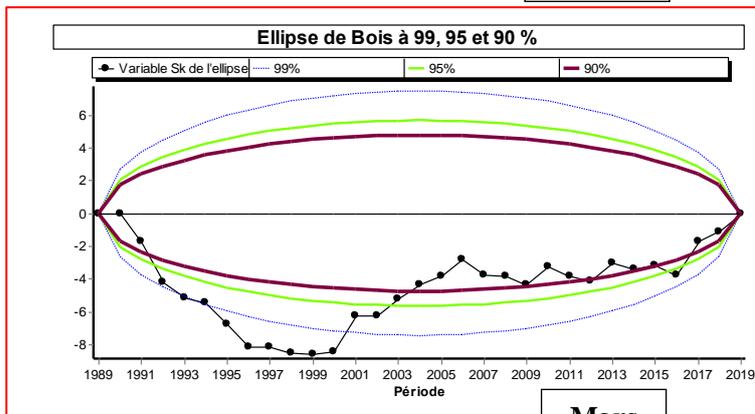
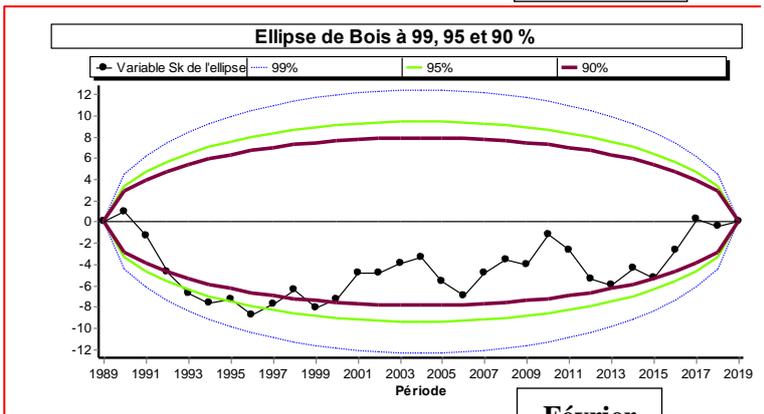
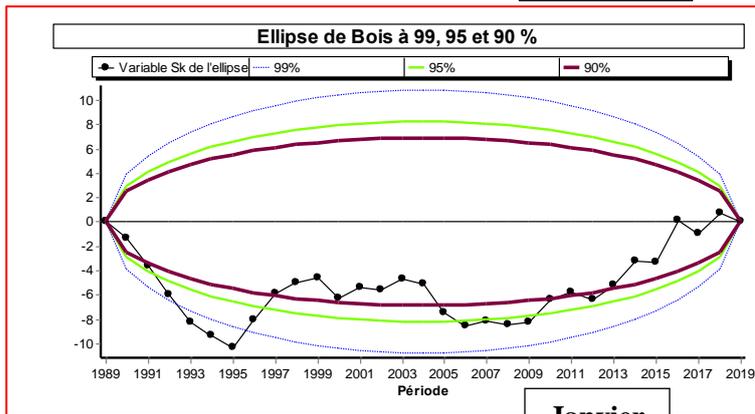
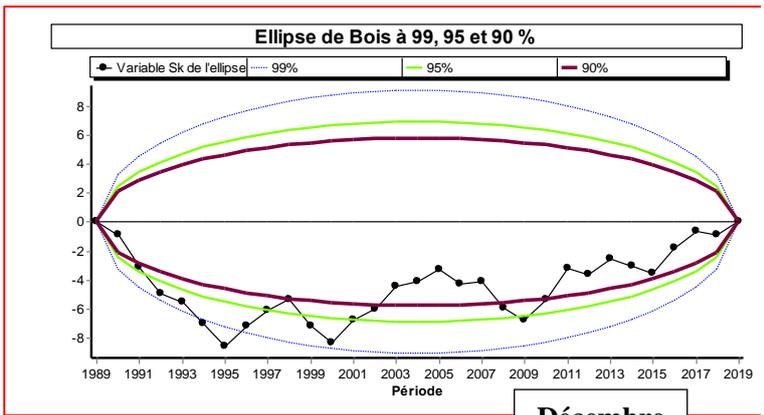
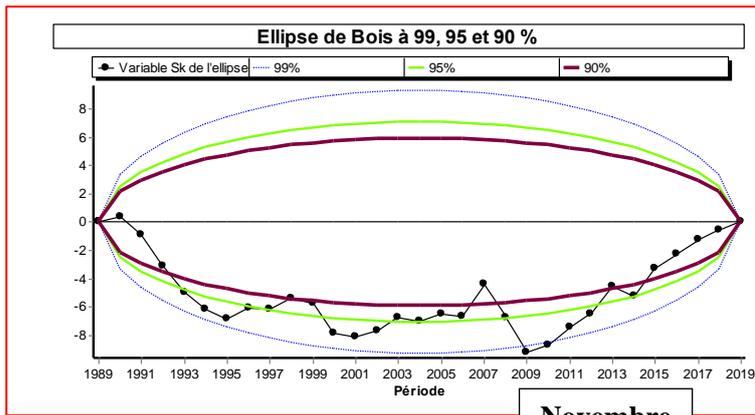


Figure IV.40 : Résultats du test de Buishand sur les variations moyennes mensuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbas (1989/1990-2018/2019)





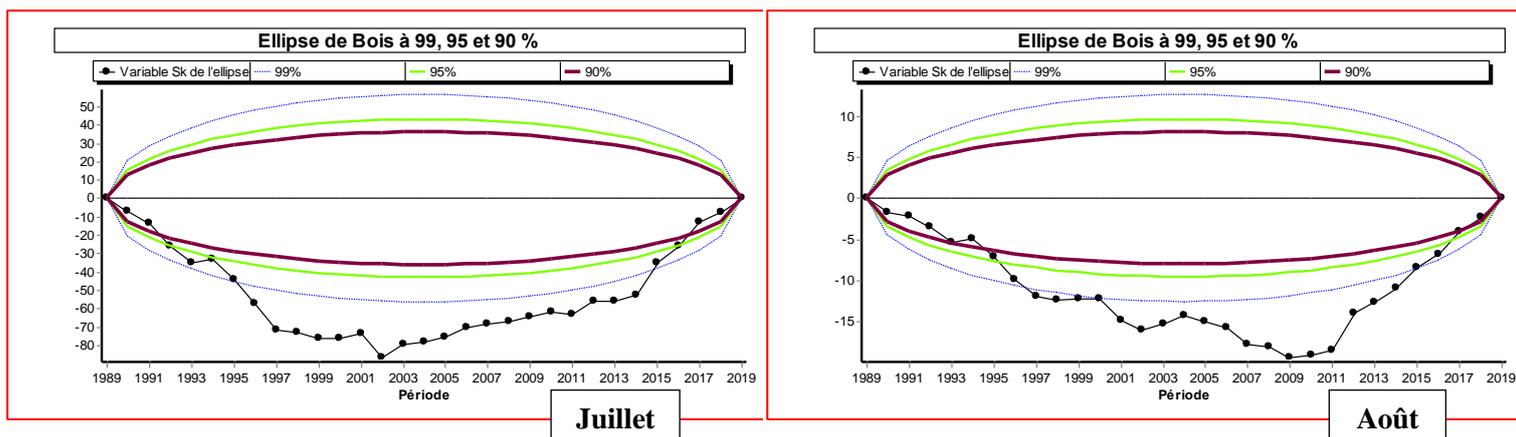


Figure IV.41 : Ellipses de Bois pour les variations moyennes mensuelles des températures à la station de Sidi Bel Abbas (1989/1990-2018/2019)

IV.4.5.2.b. Méthode non paramétrique de Pettitt

D'après les résultats du test de Pettitt sur les séries de températures moyennes mensuelles de la station de Sidi Bel Abbas (1989/1990-2018/2019) représentés dans la figure IV.42, nous remarquons que l'hypothèse nulle est acceptée au seuil de confiance de :

1. 99% pour les mois de Novembre, Mars et Avril,
2. 95% et 99% pour le mois de Janvier,
3. 90%, 95% et 99% pour les mois de Décembre et de Février.

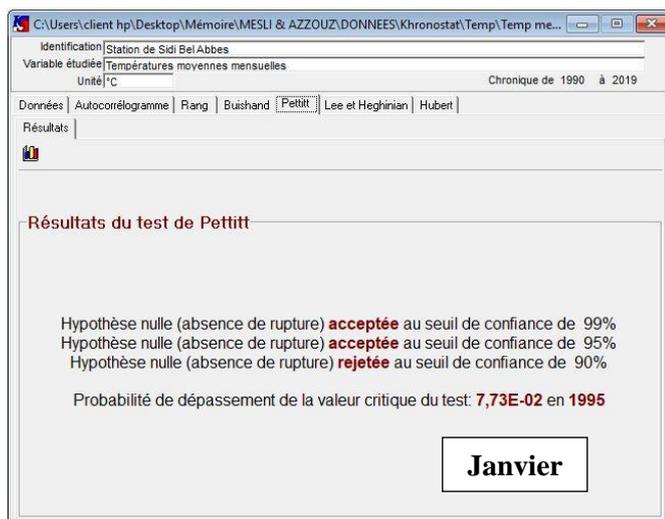
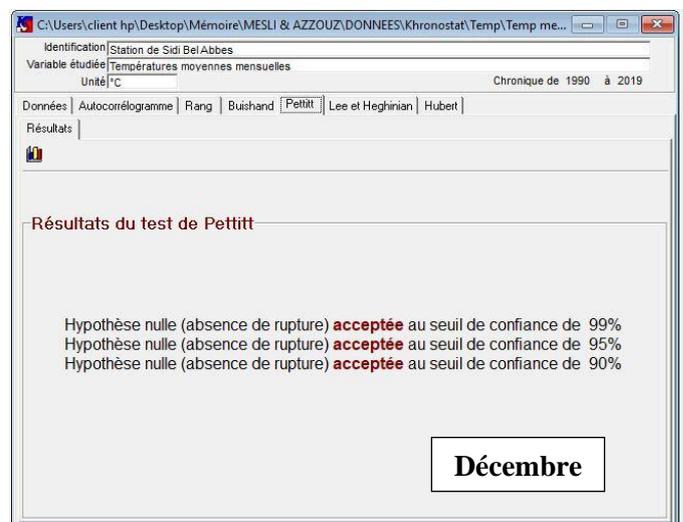
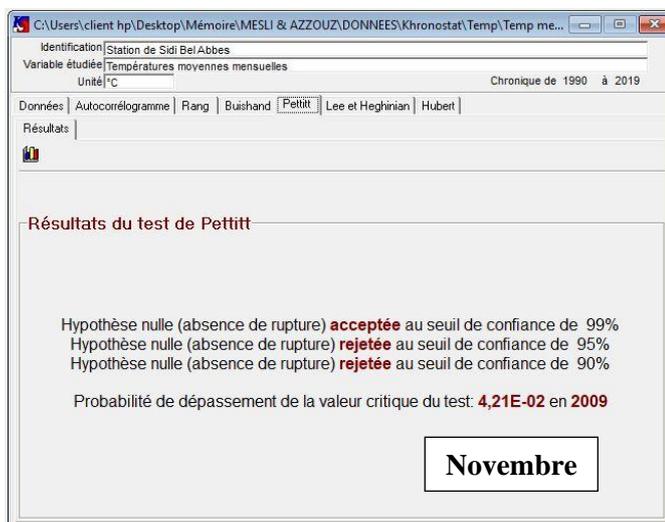
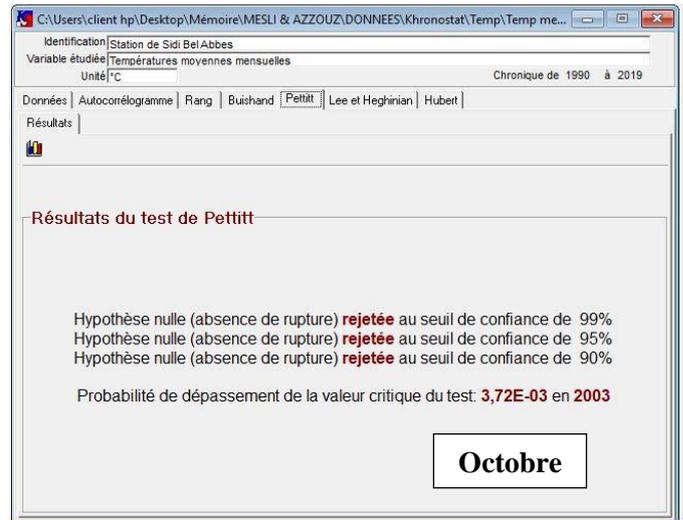
D'autre part, cette hypothèse est rejetée pour les autres mois.

Dans le tableau IV.4, nous citons les dates de rupture et ses probabilités de dépassement pour nos séries étudiées.

Tableau IV.4 : Ruptures détectées et les probabilités de dépassement par le test de Pettitt pour les variations moyennes mensuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbas (1989/1990-2018/2019)

Mois	Date de rupture	Probabilité de dépassement	Mois	Date de rupture	Probabilité de dépassement
Septembre	2009/2010	$2,37 \cdot 10^{-3}$	Mars	1998/1999	$3,75 \cdot 10^{-2}$
Octobre	2002/2003	$3,72 \cdot 10^{-3}$	Avril	1999/2000	$1,80 \cdot 10^{-2}$
Novembre	2008/2009	$4,21 \cdot 10^{-2}$	Mai	1997/1998	$8,71 \cdot 10^{-3}$
Décembre	Absence de rupture	/	Juin	1998/1999	$3,45 \cdot 10^{-3}$
Janvier	1994/1995	$7,73 \cdot 10^{-2}$	Juillet	2001/2002	$6,64 \cdot 10^{-4}$
Février	Absence de rupture	/	Août	2008/2009	$7,83 \cdot 10^{-4}$

Chapitre IV Détermination des ruptures dans les séries des précipitations et des températures



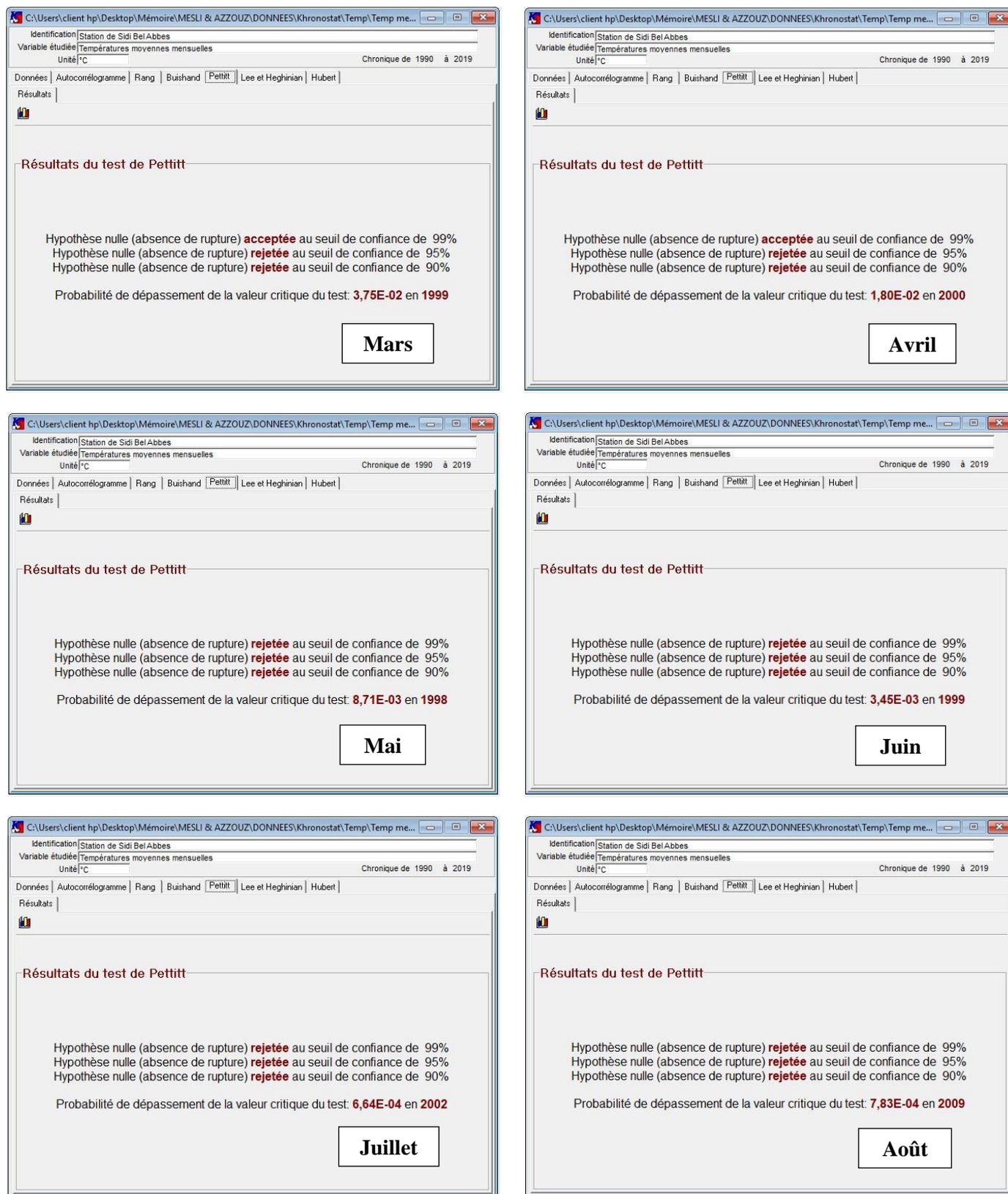


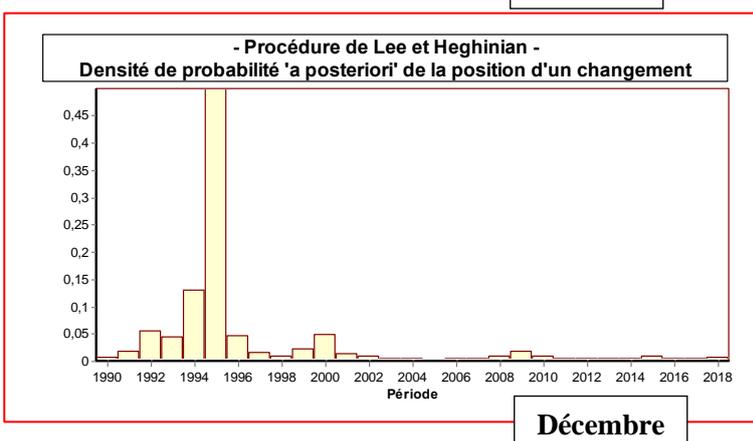
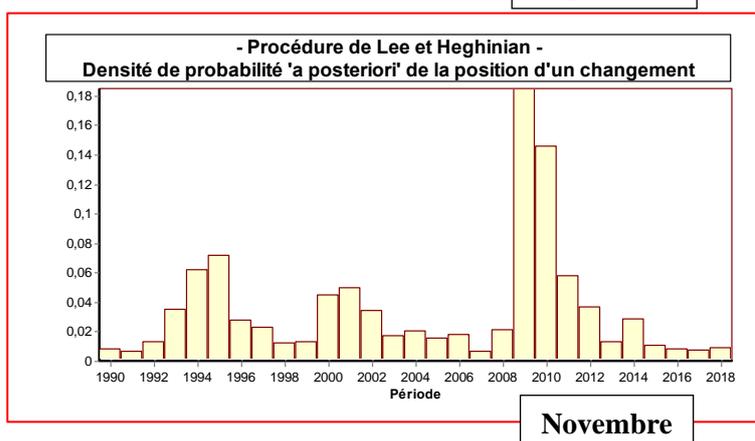
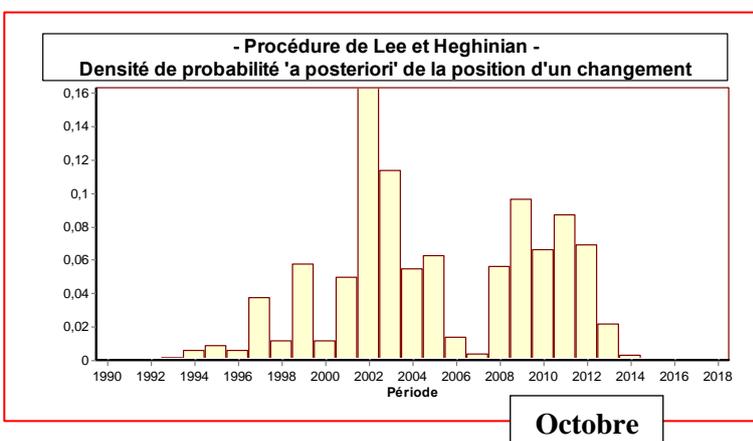
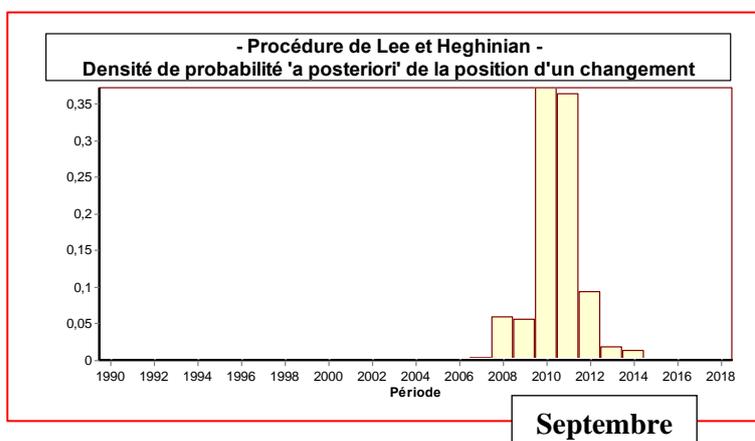
Figure IV.42 : Résultats du test de Pettitt pour les variations moyennes mensuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbas (1989/1990-2018/2019)

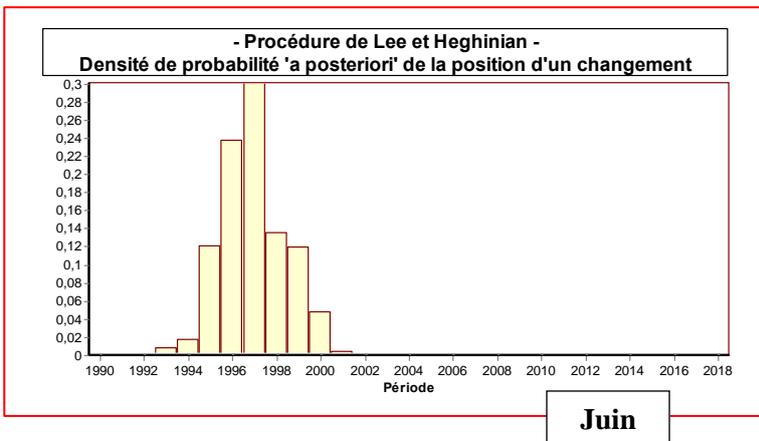
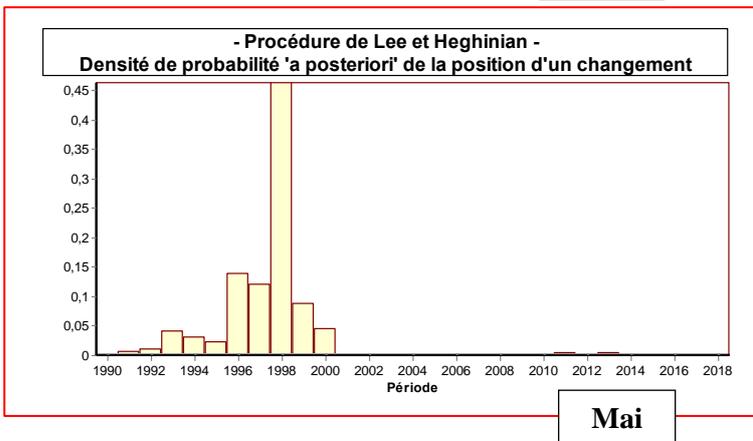
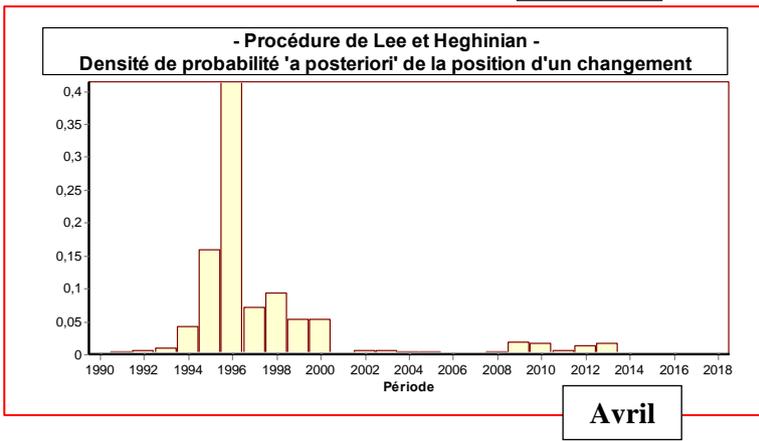
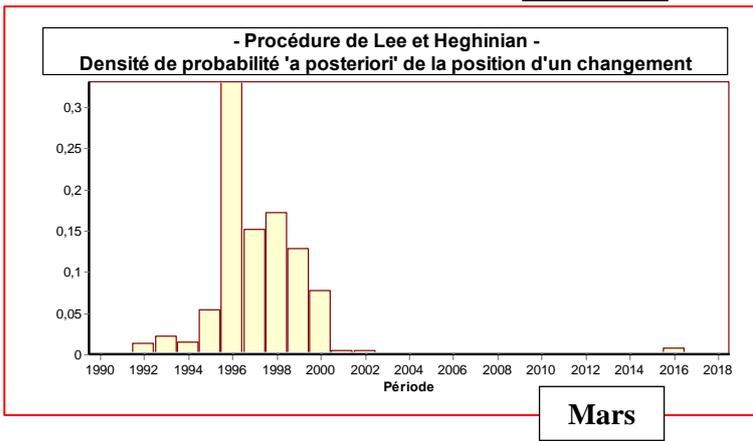
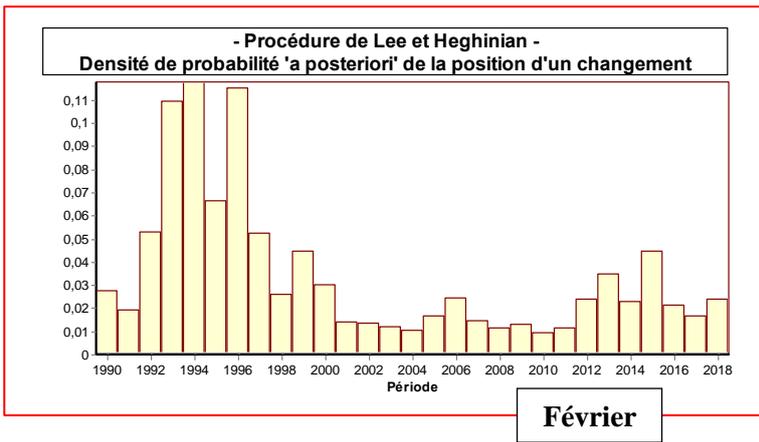
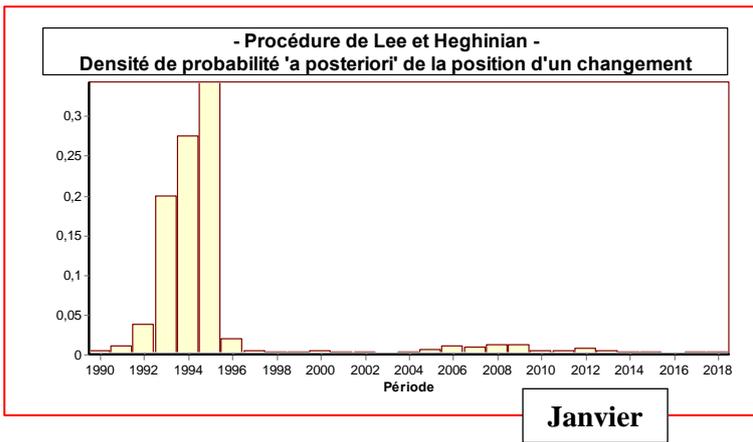
IV.4.5.2.c. Méthode bayésienne de Lee et Heghinian

Les résultats de l'application de la méthode bayésienne de Lee et Heghinian sur les séries de températures de Sidi Bel Abbes (fig.IV.43), sont synthétisés dans le tableau IV.5.

Tableau IV.5 : Ruptures détectées par la méthode bayésienne de Lee et Heghinian pour les variations moyennes mensuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)

Mois	Date de rupture	Mois	Date de rupture
Septembre	2009/2010	Mars	1995/1996
Octobre	2001/2002	Avril	1995/1996
Novembre	2008/2009	Mai	1997/1998
Décembre	1994/1995	Juin	1996/1997
Janvier	1994/1995	Juillet	2001/2002
Février	1993/1994	Août	2010/2011





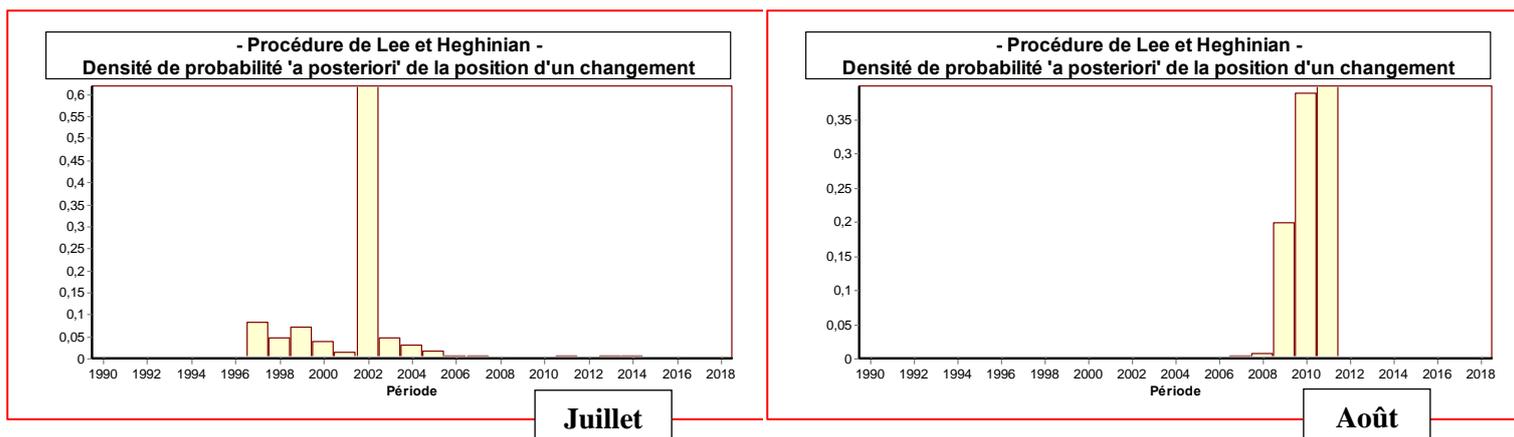


Figure IV.43 : Densité de probabilité à posteriori de la position d'un changement de températures moyennes mensuelles de la station de Sidi Bel Abbès (1989/1990-2018/2019)

IV.4.5.2.d. Segmentation d'Hubert

Nous présentons la segmentation d'Hubert sur les séries de températures moyennes mensuelles de Sidi Bel Abbès (1989/1990-2018/2019) dans le tableau IV.6.

Tableau IV.6 : Ruptures détectées et ses segments d'Hubert pour les variations moyennes mensuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbès (1989/1990-2018/2019)

Mois	Segment d'Hubert	Date de rupture	Mois	Segment d'Hubert	Date de rupture
Septembre	1989/1990-1992/1993, 1993/1994-1996/1997, 1997/1998-2010/2011, 2011/2012-2018/2019	1992/1993, 1996/1997 et 2010/2011	Mars	1989/1990-1995/1996, 1996/1997-2018/2019	1995/1996
Octobre	1989/1990-1996/1997, 1997/1998-2011/2012, 2012/2013-2018/2019	1996/1997 et 2011/2012	Avril	1989/1990-1995/1996, 1996/1997-2018/2019	1995/1996
Novembre	1989/1990-2008/2009, 2009/2010-2018/2019	2008/2009	Mai	1989/1990-1997/1998, 1998/1999-2018/2019	1997/1998
Décembre	1989/1990-1994/1995, 1995/1996-2018/2019	1994/1995	Juin	1989/1990-1996/1997, 1997/1998-2018/2019	1996/1997
Janvier	1989/1990-1994/1995, 1995/1996-2018/2019	1994/1995	Juillet	1989/1990-1996/1997, 1997/1998-2013/2014, 2014/2015-2018/2019	1996/1997 et 2013/2014
Février	1989/1990-2018/2019	Absence de rupture	Août	1989/1990-2009/2010, 2010/2011-2018/2019	2009/2010

IV.4.6. Analyse des températures moyennes saisonnières

IV.4.6.1. Tests de vérification du caractère aléatoire

IV.4.6.1.a. Calcul de l'autocorrélogramme et de son intervalle de confiance

Le calcul des coefficients d'autocorrélation et des intervalles de confiance à 99%, 95% et 90% pour les séries de températures moyennes saisonnières enregistrées au niveau de la station de Sidi Bel Abbes pendant la période 1989/1990-2018/2019, en utilisant le code Khronostat donne les résultats représentés dans la figure IV.44.

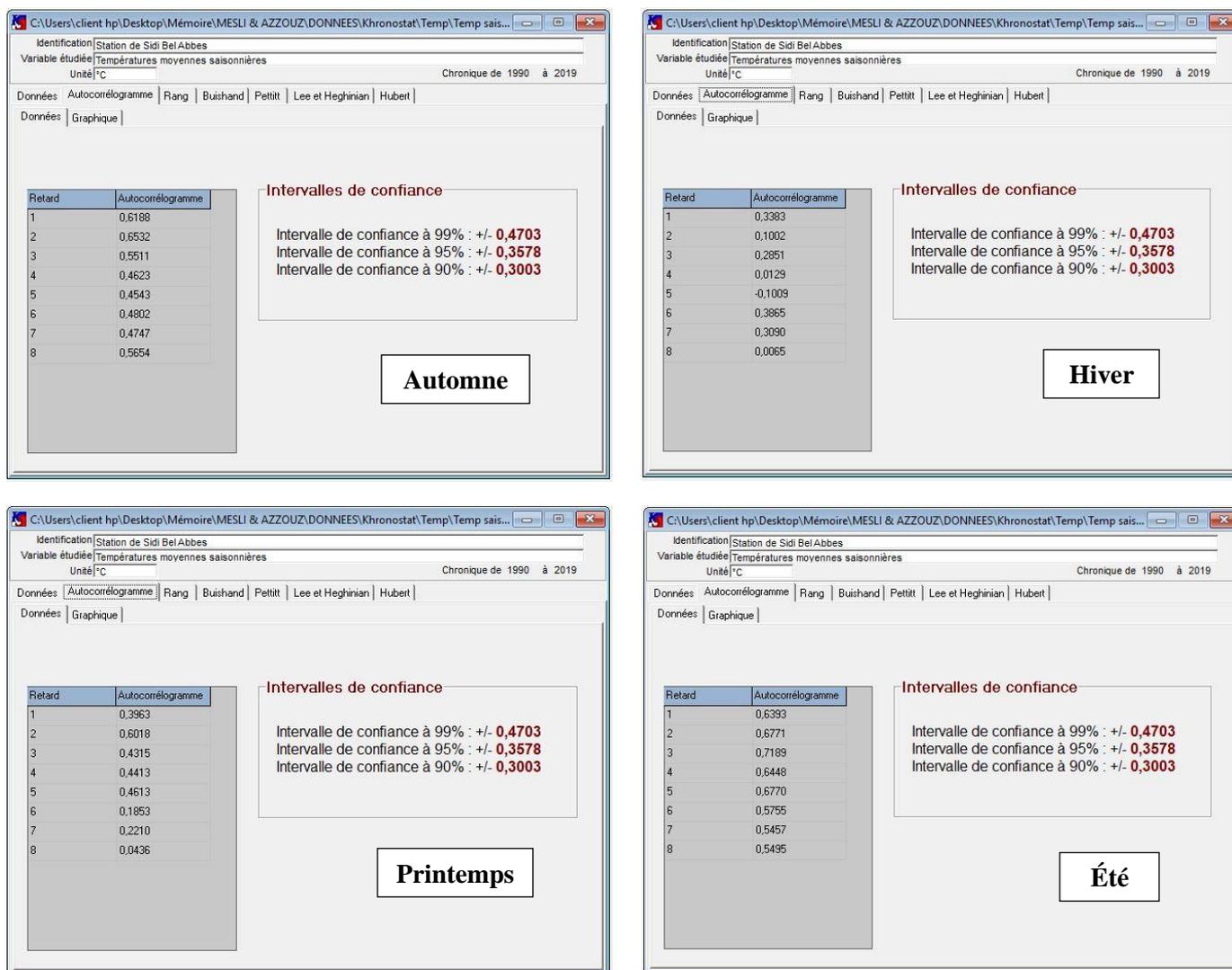


Figure IV.44 : Calcul de l'autocorrélogramme et des intervalles de confiance pour les variations moyennes saisonnières des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)

Les autocorrélogrammes représentés dans la figure IV.45 des séries de températures moyennes saisonnières de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019), indiquent que l'hypothèse nulle est acceptée aux trois seuils de confiance pour l'Hiver et le Printemps,

ces sous-séries étudiées sont donc à caractère aléatoire. Pour l'Automne et l'Été l'hypothèse nulle étant rejetée, les séries ne sont pas aléatoires.

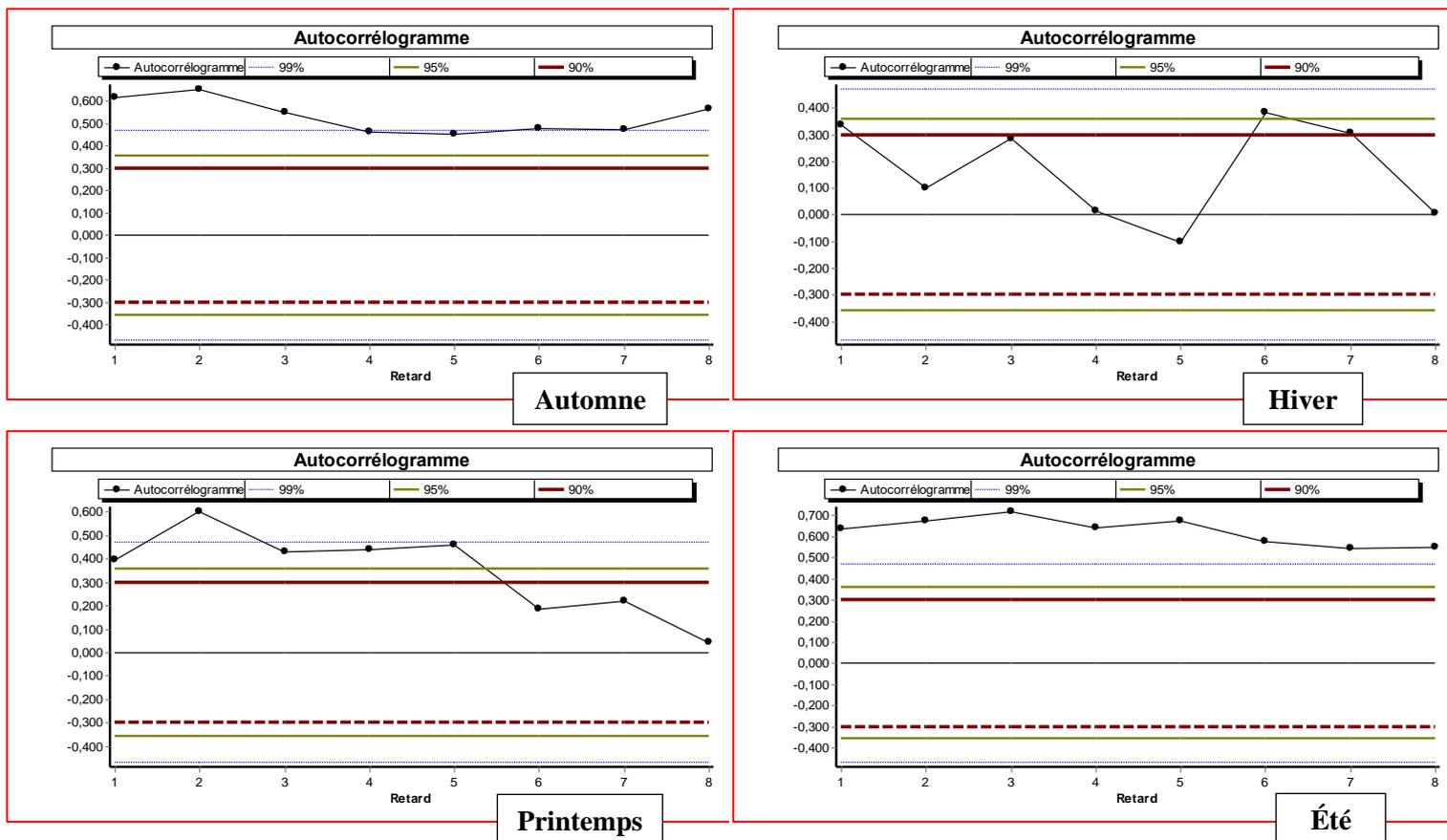


Figure IV.45 : Autocorrélogrammes pour les variations moyennes saisonnières des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)

IV.4.6.1.b. Test de corrélation sur le rang

Les résultats du test de corrélation sur le rang pour les séries de températures moyennes saisonnières de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019) (fig.IV.46), montrent que l'hypothèse nulle est rejetée aux trois seuils de confiance pour toutes les saisons excepté l'Hiver pour lequel elle est acceptée au seuil de confiance de 99%. Hormis la série des températures de l'Hiver, les séries des autres saisons ne sont pas à caractère aléatoire.

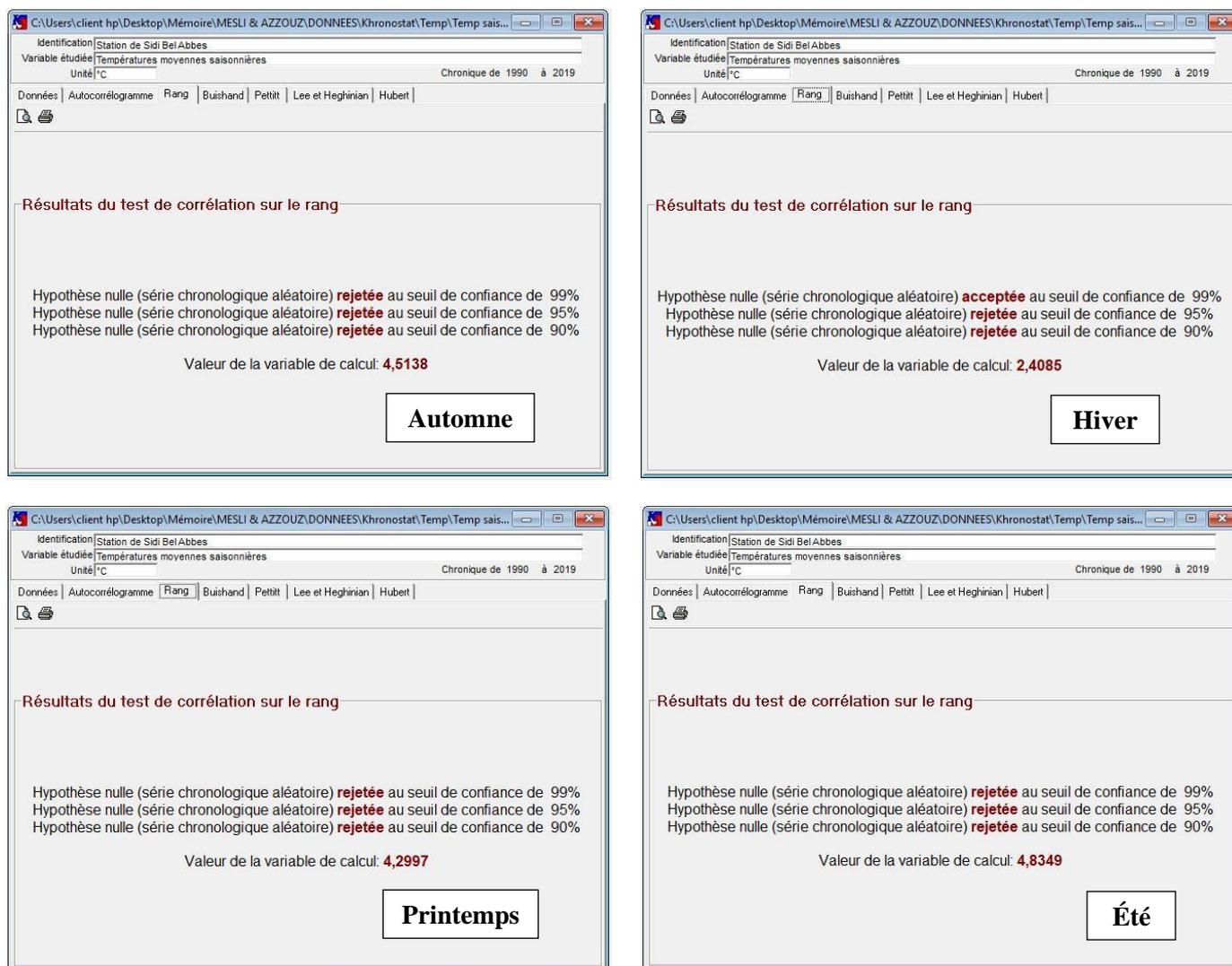


Figure IV.46 : Résultats du test de corrélation sur le rang pour les variations moyennes saisonnières des températures de la station de Sidi Bel Abbas (1989/1990-2018/2019)

IV.4.6.2. Tests de détection de rupture

IV.4.6.2.a. Test de Buishand et ellipse de Bois

Les résultats du test de Buishand appliqué sur les séries de températures moyennes saisonnières de la station de Sidi Bel Abbas (1989/1990-2018/2019) (fig.IV.47), indiquent que l'hypothèse nulle est acceptée pour la saison d'Hiver au seuil de confiance de 99%, mais elle est rejetée pour les autres saisons aux trois seuils de confiance.

Les ellipses de Bois de la figure IV.48, présentent les ruptures détectées pour chaque saison, résumées dans le tableau IV.7.

Tableau IV.7 : Ruptures détectées par les ellipses de Bois pour les variations moyennes saisonnières des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Été
Date de rupture	1995/1996-2013/2014	1992/1993-1995/1996	1991/1992-1999/2000	1992/1993-2014/2015

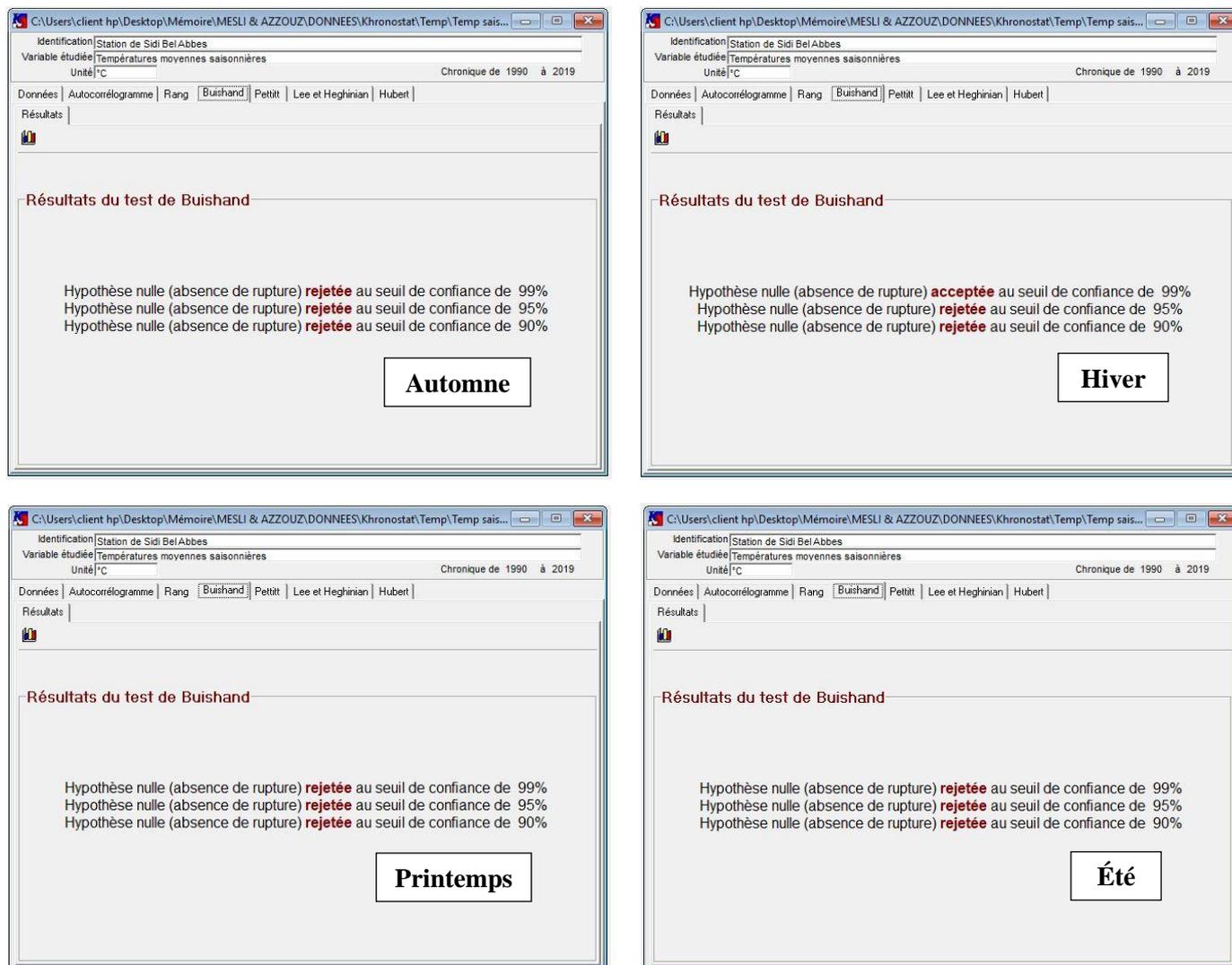


Figure IV.47 : Résultats du test de Buishand pour les variations moyennes saisonnières des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)

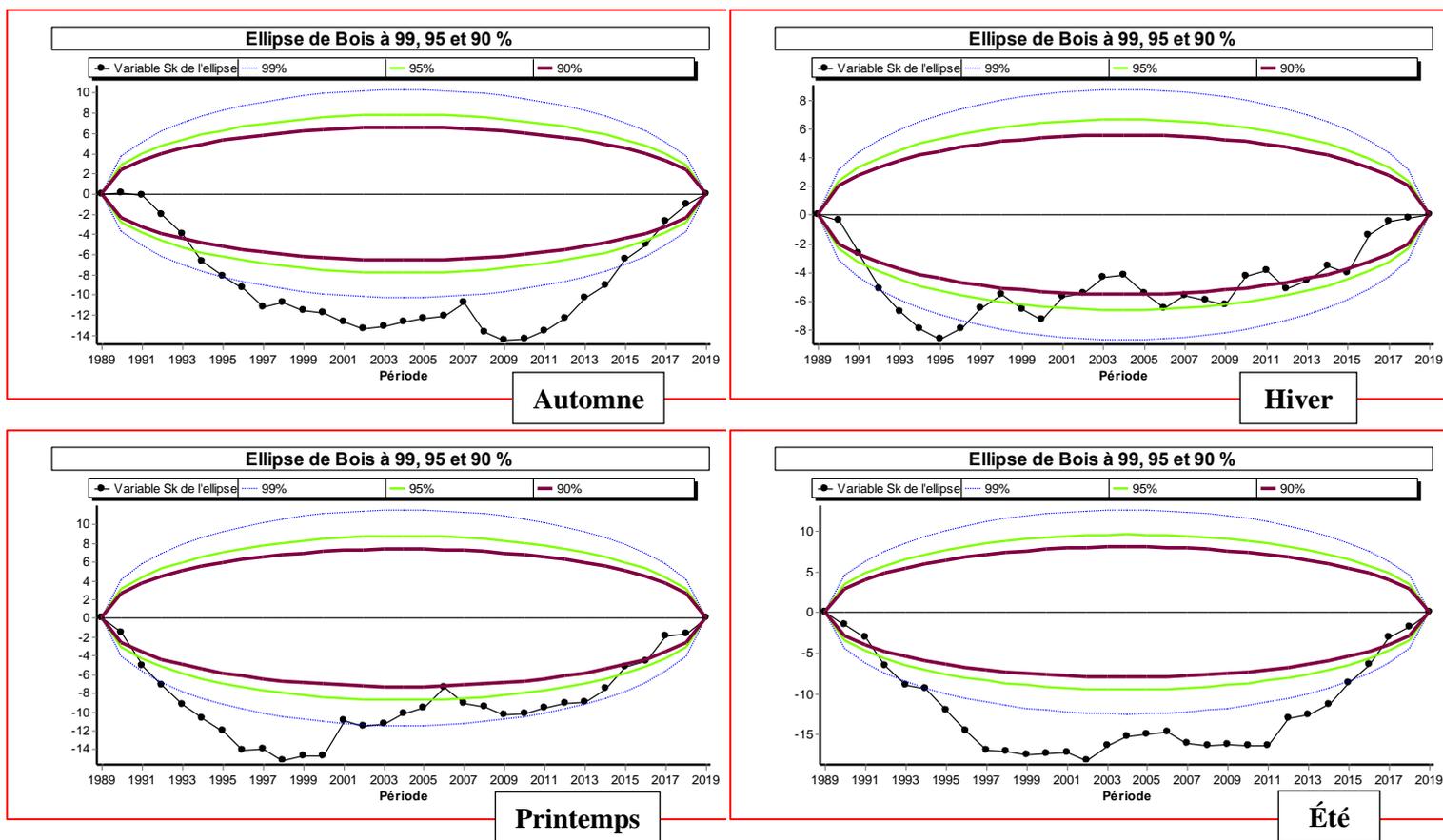


Figure IV.48 : Ellipses de Bois pour les variations moyennes saisonnières des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)

IV.4.6.2.b. Méthode non paramétrique de Pettitt

Le test de Pettitt appliqué sur les séries des températures saisonnières fait apparaître une absence de rupture en Hiver, l'hypothèse nulle étant acceptée aux trois seuils de confiance (fig.IV.49). Pour les autres saisons, les ruptures ont été détectées en Automne 2009/2010, au Printemps 1997/1998 et en Été 2001/2002, correspondant respectivement à des probabilités de dépassement de $1,74 \cdot 10^{-3}$, de $4 \cdot 10^{-3}$, et de $8,5 \cdot 10^{-4}$.

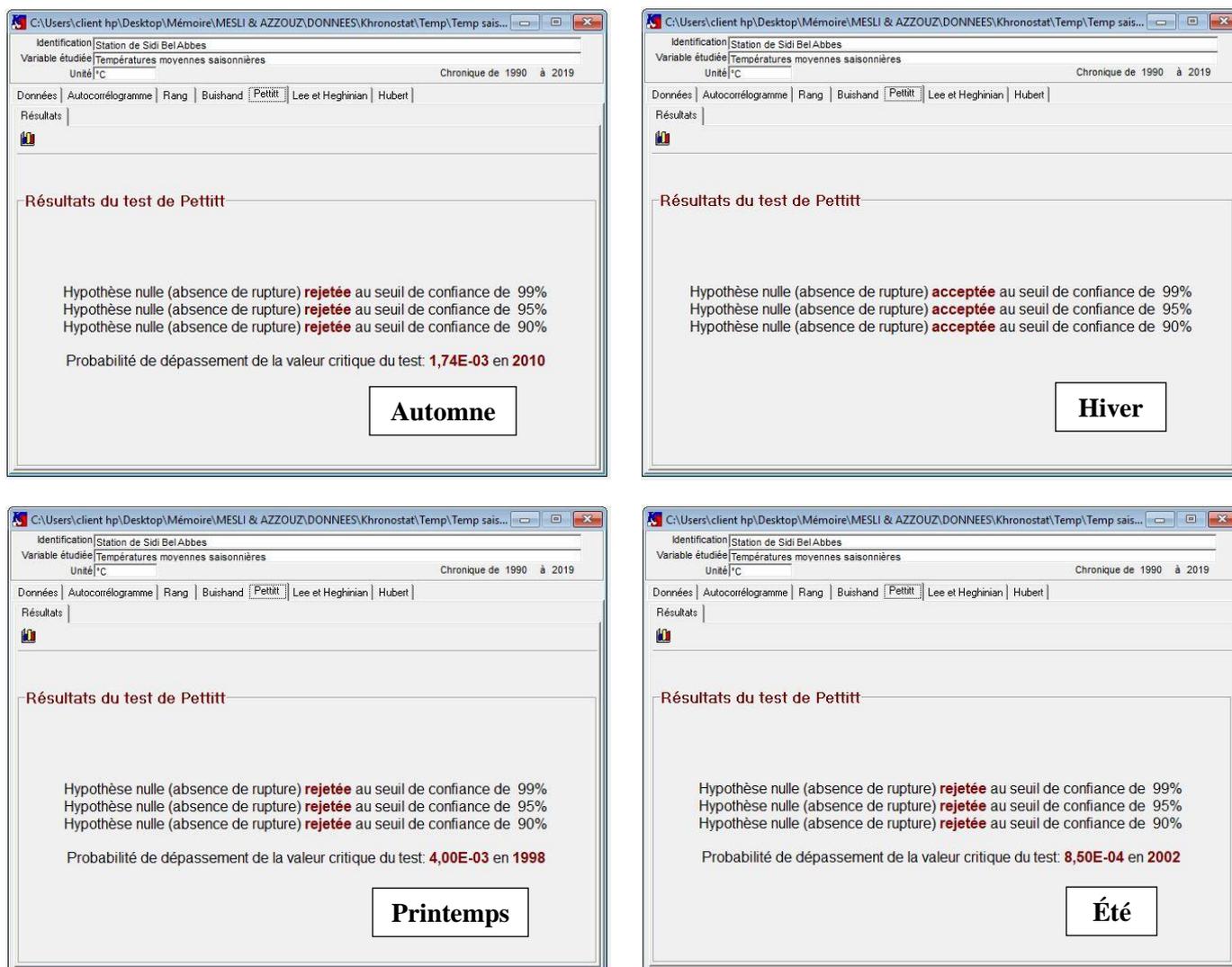


Figure IV.49 : Résultats du test de Pettitt pour les variations moyennes saisonnières des températures de la station de Sidi Bel Abbas (1989/1990-2018/2019)

IV.4.6.2.c. Méthode bayésienne de Lee et Heghinian

Les résultats de la méthode bayésienne représentés dans la figure IV.50 pour les séries de températures moyennes saisonnières de la station de Sidi Bel Abbas (1989/1990-2018/2019) donnent les ruptures citées dans le tableau IV.8.

Tableau IV.8 : Ruptures détectées par la méthode bayésienne de Lee et Heghinian pour les variations moyennes saisonnières des températures de la station de Sidi Bel Abbas (1989/1990-2018/2019)

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Été
Date de rupture	2009/2010	1994/1995	1995/1996	1996/1997

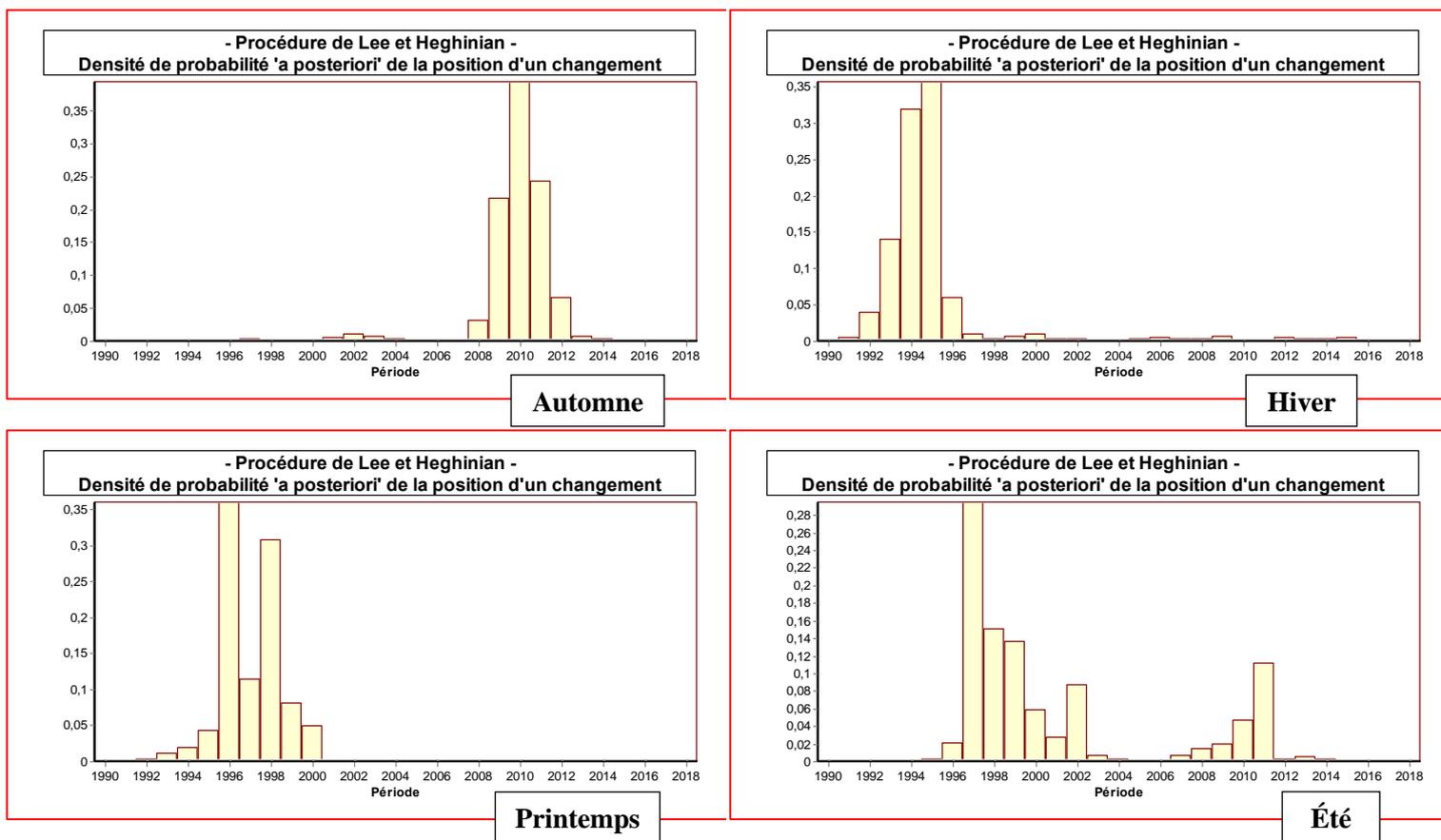


Figure IV.50 : Densité de probabilité a posteriori de la position d'un changement de températures moyennes saisonnières de la station de Sidi Bel Abbas (1989/1990-2018/2019)

IV.4.6.2.d. Segmentation d'Hubert

Nous regroupons les résultats proposés par la segmentation d'Hubert dans le tableau IV.9, sur les séries de températures moyennes saisonnières de Sidi Bel Abbas (1989/1990-2018/2019).

Tableau IV.9 : Ruptures détectées et ses segments d'Hubert pour les variations moyennes saisonnières des températures de la station de Sidi Bel Abbas (1989/1990-2018/2019)

Saison	Segment d'Hubert	Date de rupture	Saison	Segment d'Hubert	Date de rupture
Automne	1989/1990-2009/2010, 2010/2011-2018/2019	2009/2010	Printemps	1989/1990-1995/1996, 1996/1997-2018/2019	1995/1996
Hiver	1989/1990-1994/1995, 1995/1996-2018/2019	1994/1995	Été	1989/1990-1996/1997, 1997/1998-2010/2011, 2011/2012-2018/2019	1996/1997 et 2010/2011

IV.4.7. Calcul des variations moyennes

Pour les variables hydroclimatiques dont la série chronologique présente une rupture, il est intéressant de calculer les variations moyennes de part et d'autre de la rupture en appliquant, selon Ardoin-Bardin (2004), la formule suivante (Soro et al., 2011) :

$$D = \left(\frac{\bar{X}_j}{\bar{X}_i} \right) - 1 \quad (\text{IV. 18})$$

D'où :

D : Variation moyenne ou bien le déficit,

\bar{X}_j : Moyenne sur la période après la rupture,

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

IV.4.7.1. Pour les précipitations

IV.4.7.1.a. À l'échelle annuelle

Le calcul des variations moyennes indiqué dans le tableau IV.10, nous montre que la moyenne des précipitations annuelles avant et après la rupture a augmenté de 17% à 32%.

Tableau IV.10 : Variations moyennes pour les précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

Test	Date de rupture	Moyenne avant la rupture (mm)	Moyenne après la rupture (mm)	D (%)
Buishand	2003/2004	299,7	377,0	25,79
	2004/2005	298,7	379,6	27,08
	2005/2006	300,2	384,9	28,21
	2006/2007	300,5	395,6	31,65
Pettitt	1995/1996	292,6	359,8	22,97
Lee et Heghinian	2006/2007	300,5	395,6	31,65
Hubert	2006/2007	300,5	395,6	31,65
	2008/2009	308,5	363,2	17,73

IV.4.7.1.b. À l'échelle mensuelle

Nous constatons d'après le tableau IV.11 que la moyenne des précipitations mensuelles avant et après la rupture a augmenté de l'ordre de 45% à 331% pour les mois de Septembre, Octobre, Novembre, Décembre, Janvier et Avril. Cette variation a diminué pour le mois de Février avec un pourcentage de -35,78% pendant l'année de rupture 1985/1986, et pour le mois de Mars avec un pourcentage de -68,6% pendant l'année de rupture 2017/2018.

Tableau IV.11 : Variations moyennes pour les précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

Mois	Test	Date de rupture	Moyenne avant la rupture (mm)	Moyenne après la rupture (mm)	D (%)
Septembre	Buishand	/	/	/	/
	Pettitt	/	/	/	/
	Lee et Heghinian	1984/1985	5,9	25,4	330,51
	Hubert	/	/	/	/
Octobre	Buishand	/	/	/	/
	Pettitt	1998/1999	20,4	42,8	109,80
	Lee et Heghinian	1998/1999	20,4	42,8	109,80
	Hubert	/	/	/	/
Novembre	Buishand	/	/	/	/
	Pettitt	1997/1998	39,5	57,5	45,57
	Lee et Heghinian	1997/1998	39,5	57,5	45,57
	Hubert	/	/	/	/
Décembre	Buishand	/	/	/	/
	Pettitt	/	/	/	/
	Lee et Heghinian	2006/2007	36,2	57,9	59,95
	Hubert	/	/	/	/
Janvier	Buishand	1998/1999	33,2	58,5	76,20
		2000/2001	33,9	60,1	77,29
		2005/2006	36,2	64,6	78,45
		2006/2007	35,4	68,2	92,66
	Pettitt	2006/2007	35,4	68,2	92,66
	Lee et Heghinian	2006/2007	35,4	68,2	92,66
	Hubert	2006/2007	35,4	68,2	92,66
Février	Buishand	/	/	/	/
	Pettitt	/	/	/	/
	Lee et Heghinian	1985/1986	53,1	34,1	-35,78
	Hubert	/	/	/	/
Mars	Buishand	/	/	/	/
	Pettitt	/	/	/	/
	Lee et Heghinian	2017/2018	36,3	11,4	-68,60
	Hubert	/	/	/	/
Avril	Buishand	/	/	/	/
	Pettitt	/	/	/	/
	Lee et Heghinian	1985/1986	23,3	33,8	45,06
	Hubert	/	/	/	/
Mai	Buishand	/	/	/	/
	Pettitt	/	/	/	/
	Lee et Heghinian	1977/1978	/	21,2	/
	Hubert	/	/	/	/

Juin	Buishand	/	/	/	/
	Pettitt	/	/	/	/
	Lee et Heghinian	/	/	/	/
	Hubert	/	/	/	/
Juillet	Buishand	/	/	/	/
	Pettitt	/	/	/	/
	Lee et Heghinian	/	/	/	/
	Hubert	/	/	/	/
Août	Buishand	/	/	/	/
	Pettitt	/	/	/	/
	Lee et Heghinian	/	/	/	/
	Hubert	/	/	/	/

IV.4.7.1.c. À l'échelle saisonnière

Selon le tableau IV.12, nous distinguons la présence d'une augmentation de la variation entre la moyenne des précipitations saisonnières avant et après la rupture. Pour les saisons d'Automne, d'Hiver et d'Été, l'augmentation est de l'ordre de 40% à 94%, par contre pour le Printemps, on enregistre plutôt une diminution de -36,6% pendant l'année de rupture 2017/2018.

Tableau IV.12 : Variations moyennes pour les précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

Saison	Test	Date de rupture	Moyenne avant la rupture (mm)	Moyenne après la rupture (mm)	D (%)
Automne	Buishand	/	/	/	/
	Pettitt	/	/	/	/
	Lee et Heghinian	1995/1996	75,8	123,1	62,40
	Hubert	/	/	/	/
Hiver	Buishand	/	/	/	/
	Pettitt	/	/	/	/
	Lee et Heghinian	2006/2007	114,3	160,7	40,59
	Hubert	/	/	/	/
Printemps	Buishand	/	/	/	/
	Pettitt	/	/	/	/
	Lee et Heghinian	2017/2018	87,7	55,6	-36,60
	Hubert	/	/	/	/
Été	Buishand	/	/	/	/
	Pettitt	/	/	/	/
	Lee et Heghinian	1984/1985	6,3	12,2	93,65
	Hubert	/	/	/	/

IV.4.7.2. Pour les températures moyennes

IV.4.7.2.a. À l'échelle annuelle

Le calcul de la variation entre la moyenne des températures moyennes annuelles avant et après la rupture, cité dans le tableau IV.13, indique une augmentation comprise entre 8% et 14%.

Tableau IV.13 : Variations moyennes pour les températures moyennes annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)

Test	Date de rupture	Moyenne avant la rupture (°C)	Moyenne après la rupture (°C)	D (%)
Buishand	1991/1992	16,2	17,8	9,66
	1992/1993	15,9	17,9	12,78
	1993/1994	15,8	18,0	13,67
	1994/1995	15,9	18,0	13,59
	1995/1996	15,9	18,1	13,86
	1996/1997	16,0	18,2	13,73
	1997/1998	16,1	18,2	13,06
	1998/1999	16,3	18,2	12,18
	1999/2000	16,4	18,3	11,82
	2000/2001	16,5	18,3	10,95
	2001/2002	16,7	18,3	10,04
	2002/2003	16,7	18,3	9,79
	2003/2004	16,8	18,3	8,95
	2004/2005	16,9	18,4	8,59
	2005/2006	17,0	18,4	8,49
	2006/2007	17,0	18,5	8,59
	2007/2008	17,0	18,6	9,45
	2008/2009	17,0	18,8	10,46
	2009/2010	17,0	18,9	10,86
	2010/2011	17,1	19,0	11,09
2011/2012	17,1	19,0	11,12	
2012/2013	17,2	19,1	11,36	
2013/2014	17,2	19,2	11,34	
2014/2015	17,3	19,1	10,62	
Pettitt	1999/2000	16,4	18,3	11,82
Lee et Heghinian	1996/1997	16,0	18,2	13,73
Hubert	1995/1996	15,9	18,1	13,86
	2010/2011	17,1	19,0	11,09

IV.4.7.2.b. À l'échelle mensuelle

D'après le tableau IV.14, nous remarquons que la variation entre la moyenne des températures mensuelles avant et après la rupture a augmenté de 7% à 35%, à l'exception de

la date de rupture 1992/1993 pour le mois de Septembre, où, la diminution est de l'ordre de -3,88%.

Tableau IV.14 : Variations moyennes pour les températures mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)

Mois	Test	Date de rupture	Moyenne avant la rupture (°C)	Moyenne après la rupture (°C)	D (%)
Septembre	Buishand	2006/2007	22,3	24,2	8,16
		2007/2008	22,3	24,5	9,85
		2008/2009	22,2	24,7	10,96
		2009/2010	22,3	24,9	11,96
		2010/2011	22,3	25,1	12,72
		2011/2012	22,3	25,1	12,59
		2012/2013	22,4	25,1	11,93
		2013/2014	22,6	25,3	12,07
	Pettitt	2009/2010	22,3	24,9	11,96
	Lee et Heghinian	2009/2010	22,3	24,9	11,96
	Hubert	1992/1993	23,9	23,0	-3,88
		1996/1997	21,9	23,6	7,82
2010/2011		22,3	25,1	12,72	
Octobre	Buishand	1993/1994	16,6	19,3	16,12
		1994/1995	16,4	19,4	17,87
		1995/1996	16,6	19,4	16,93
		1996/1997	16,9	19,6	15,97
		1997/1998	16,7	19,6	16,82
		1998/1999	17,0	19,7	15,61
		1999/2000	17,0	19,7	15,83
		2000/2001	17,3	19,8	14,80
		2001/2002	17,2	20,0	15,90
		2002/2003	17,3	20,0	16,17
		2003/2004	17,4	20,1	15,54
		2004/2005	17,5	20,2	15,17
		2005/2006	17,6	20,1	14,46
		2006/2007	17,8	20,1	12,88
		2007/2008	18,0	20,5	14,07
		2008/2009	17,8	20,7	15,90
		2009/2010	17,9	20,8	16,21
		2010/2011	18,0	21,0	16,74
		2011/2012	18,0	21,1	17,29
		2012/2013	18,1	21,2	17,09
	2013/2014	18,2	21,0	15,36	
	Pettitt	2002/2003	17,3	20,0	16,17
	Lee et Heghinian	2001/2002	17,2	20,0	15,90
	Hubert	1996/1997	16,9	19,6	15,97
		2011/2012	18,0	21,1	17,29

Novembre	Buishand	2008/2009	13,1	14,4	9,74
		2009/2010	13,0	14,5	10,98
	Pettitt	2008/2009	13,1	14,4	9,74
	Lee et Heghinian	2008/2009	13,1	14,4	9,74
	Hubert	2008/2009	13,1	14,4	9,74
Décembre	Buishand	1993/1994	9,0	10,6	18,37
		1994/1995	8,9	10,7	19,69
	Pettitt	/	/	/	/
	Lee et Heghinian	1994/1995	8,9	10,7	19,69
	Hubert	1994/1995	8,9	10,7	19,69
Janvier	Buishand	1992/1993	7,1	9,4	32,21
		1993/1994	7,1	9,5	34,58
		1994/1995	7,2	9,5	31,79
	Pettitt	1994/1995	7,2	9,5	31,79
	Lee et Heghinian	1994/1995	7,2	9,5	31,79
	Hubert	1994/1995	7,2	9,5	31,79
	Février	Buishand	/	/	/
Pettitt		/	/	/	/
Lee et Heghinian		1993/1994	8,5	10,5	23,17
Hubert		/	/	/	/
Mars	Buishand	1992/1993	11,4	13,0	13,90
		1994/1995	11,7	13,1	11,68
		1995/1996	11,7	13,1	12,62
		1996/1997	11,6	13,2	13,12
		1997/1998	11,8	13,2	12,02
		1998/1999	11,8	13,2	11,57
		1999/2000	11,9	13,2	10,91
	Pettitt	1998/1999	11,8	13,2	11,57
	Lee et Heghinian	1995/1996	11,7	13,1	12,62
	Hubert	1995/1996	11,7	13,1	12,62
Avril	Buishand	1992/1993	12,5	15,6	24,22
		1993/1994	12,7	15,7	23,35
		1994/1995	12,7	15,8	24,87
		1995/1996	12,7	15,9	25,10
		1996/1997	12,8	15,9	23,98
		1997/1998	13,2	16,0	20,84
		1998/1999	13,3	16,0	20,01
		1999/2000	13,5	16,1	18,75
		2008/2009	14,5	16,7	15,16
		2009/2010	14,4	16,8	16,50
		2011/2012	14,6	17,1	16,75
		2012/2013	14,6	17,3	18,35
		Pettitt	1999/2000	13,5	16,1
	Lee et Heghinian	1995/1996	12,7	15,9	25,10

	Hubert	1995/1996	12,7	15,9	25,10
Mai	Buishand	1992/1993	16,4	20,1	22,20
		1993/1994	16,4	20,1	22,62
		1994/1995	16,9	20,2	19,76
		1995/1996	17,2	20,4	18,35
		1996/1997	17,1	20,4	19,53
		1997/1998	17,3	20,6	18,80
		1998/1999	17,3	20,6	18,63
		1999/2000	17,7	20,6	16,37
	Pettitt	1997/1998	17,3	20,6	18,80
Lee et Heghinian	1997/1998	17,3	20,6	18,80	
Hubert	1997/1998	17,3	20,6	18,80	
Juin	Buishand	1991/1992	21,9	24,3	10,82
		1992/1993	20,6	24,4	18,26
		1993/1994	20,7	24,5	18,38
		1994/1995	20,9	24,7	17,83
		1995/1996	20,9	24,8	18,24
		1996/1997	21,1	24,8	17,57
		1997/1998	21,3	24,9	16,65
		1998/1999	21,6	25,0	15,52
		1999/2000	21,8	25,0	14,73
		2000/2001	22,0	24,9	13,09
		2001/2002	22,4	24,9	11,05
		2010/2011	23,2	25,8	10,95
	Pettitt	1998/1999	21,6	25,0	15,52
	Lee et Heghinian	1996/1997	21,1	24,8	17,57
Hubert	1996/1997	21,1	24,8	17,57	
Juillet	Buishand	1995/1996	25,7	28,1	9,58
		1996/1997	25,5	28,3	11,20
		1997/1998	25,3	28,4	12,33
		1998/1999	25,5	28,5	11,67
		1999/2000	25,6	28,5	11,32
		2000/2001	25,8	28,5	10,62
		2001/2002	26,0	28,8	10,75
		2002/2003	25,9	28,8	11,22
		2003/2004	26,1	28,8	10,39
		2004/2005	26,2	28,9	10,06
		2005/2006	26,4	28,9	9,53
		2006/2007	26,5	28,9	9,21
		2007/2008	26,6	29,0	9,22
		2008/2009	26,7	29,1	9,22
		2009/2010	26,7	29,2	9,28
		2010/2011	26,8	29,5	9,98
		2011/2012	26,8	29,5	10,02
		2012/2013	26,9	29,8	10,75

		2013/2014	27,0	30,1	11,76	
	Pettitt	2001/2002	26,0	28,8	10,75	
	Lee et Heghinian	2001/2002	26,0	28,8	10,75	
	Hubert	1996/1997	25,5	28,3	11,20	
		2013/2014	27,0	30,1	11,76	
Août	Buishand	1996/1997	25,9	27,9	7,50	
		1997/1998	25,8	27,9	8,04	
		1998/1999	26,0	27,9	7,60	
		2000/2001	26,2	28,2	7,35	
		2001/2002	26,1	28,3	8,33	
		2002/2003	26,1	28,3	8,33	
		2003/2004	26,2	28,3	7,74	
		2004/2005	26,4	28,4	7,60	
		2005/2006	26,4	28,5	8,10	
		2006/2007	26,4	28,8	9,10	
		2007/2008	26,3	29,0	9,94	
		2008/2009	26,4	29,3	10,90	
		2009/2010	26,4	29,4	11,68	
		2010/2011	26,4	29,6	12,11	
		2011/2012	26,5	29,3	10,64	
		2012/2013	26,7	29,4	10,13	
	2013/2014	26,8	29,5	10,06		
		Pettitt	2008/2009	26,4	29,3	10,90
		Lee et Heghinian	2010/2011	26,4	29,6	12,11
		Hubert	2009/2010	26,4	29,4	11,68

IV.4.7.2.c. À l'échelle saisonnière

Selon le tableau IV.15, nous observons que la variation entre la moyenne des températures moyennes saisonnières avant et après la rupture a tendance à augmenter de 8% à 25%.

Tableau IV.15 : Variations moyennes pour les températures moyennes saisonnières de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)

Saison	Test	Date de rupture	Moyenne avant la rupture (°C)	Moyenne après la rupture (°C)	D (%)
Automne	Buishand	1995/1996	17,1	18,9	10,47
		1996/1997	17,1	19,0	10,82
		1997/1998	17,0	19,0	11,33
		1998/1999	17,2	19,0	10,35
		1999/2000	17,3	19,1	10,34
		2000/2001	17,4	19,2	10,28
		2001/2002	17,4	19,2	10,62
		2002/2003	17,4	19,3	10,63

		2003/2004	17,5	19,3	10,21	
		2004/2005	17,6	19,3	9,85	
		2005/2006	17,7	19,4	9,69	
		2006/2007	17,7	19,4	9,15	
		2007/2008	17,8	19,7	10,43	
		2008/2009	17,7	19,9	12,31	
		2009/2010	17,7	20,1	13,15	
		2010/2011	17,8	20,2	13,47	
		2011/2012	17,8	20,2	13,44	
		2012/2013	17,9	20,2	12,68	
		2013/2014	18,0	20,3	12,51	
		Pettitt	2009/2010	17,7	20,1	13,15
		Lee et Heghinian	2009/2010	17,7	20,1	13,15
Hubert	2009/2010	17,7	20,1	13,15		
Hiver	Buishand	1992/1993	8,2	10,1	24,41	
		1993/1994	8,2	10,2	24,69	
		1994/1995	8,3	10,2	23,66	
		1995/1996	8,4	10,2	21,31	
	Pettitt	/	/	/	/	
	Lee et Heghinian	1994/1995	8,3	10,2	23,66	
Hubert	1994/1995	8,3	10,2	23,66		
Printemps	Buishand	1991/1992	13,4	16,1	20,77	
		1992/1993	13,5	16,2	20,48	
		1993/1994	13,6	16,3	20,15	
		1994/1995	13,7	16,4	19,04	
		1995/1996	13,9	16,5	18,81	
		1996/1997	13,8	16,5	19,11	
		1997/1998	14,1	16,6	17,55	
		1998/1999	14,2	16,6	17,10	
		1999/2000	14,4	16,6	15,61	
	Pettitt	1997/1998	14,1	16,6	17,55	
	Lee et Heghinian	1995/1996	13,9	16,5	18,81	
Hubert	1995/1996	13,9	16,5	18,81		
Été	Buishand	1992/1993	24,1	26,6	10,52	
		1993/1994	24,0	26,6	10,91	
		1994/1995	24,4	26,8	9,73	
		1995/1996	24,3	26,9	10,84	
		1996/1997	24,2	27,0	11,73	
		1997/1998	24,2	27,1	12,07	
		1998/1999	24,4	27,1	11,36	
		1999/2000	24,5	27,2	10,84	
		2000/2001	24,7	27,2	10,20	
		2001/2002	24,8	27,3	9,99	
		2002/2003	24,9	27,3	9,68	
		2003/2004	25,1	27,3	8,65	

		2004/2005	25,2	27,3	8,20
		2005/2006	25,3	27,4	8,09
		2006/2007	25,4	27,6	8,61
		2007/2008	25,4	27,7	9,31
		2008/2009	25,4	27,9	9,72
		2009/2010	25,4	28,1	10,28
		2010/2011	25,5	28,3	11,01
		2011/2012	25,5	28,1	10,11
		2012/2013	25,7	28,3	10,32
		2013/2014	25,7	28,5	10,84
		2014/2015	25,8	28,4	10,11
	Pettitt	2001/2002	24,8	27,3	9,99
	Lee et Heghinian	1996/1997	24,2	27,0	11,73
	Hubert	1996/1997	24,2	27,0	11,73
		2010/2011	25,5	28,3	11,01

IV.5. Conclusion

A l'issue de ce chapitre, les deux tests de vérification du caractère aléatoire à savoir : le test de corrélation sur le rang et le calcul de l'autocorrélogramme et de son intervalle de confiance, ont montré que les séries des précipitations annuelles, mensuelles et saisonnières sont à caractère aléatoire.

Les tests de détection de rupture tels que : le test de Buishand, le test de Pettitt, la méthode bayésienne de Lee et Heghinian et la segmentation d'Hubert, ont mis en évidence une forte rupture en 2006/2007 pour les trois pas de temps. La baisse de la pluviométrie est remarquée en date de rupture en Février 1985/1986 pour un déficit de 35,78%, en Mars et au Printemps de l'année 2017/2018 pour un déficit respectivement de 68,6% et 36,6%.

Les deux tests de vérification du caractère aléatoire ont révélé que la série des températures moyennes annuelles est non aléatoire, par contre ce caractère n'est pas vérifié pour les séries de températures moyennes mensuelles et saisonnières par l'autocorrélogramme et ses intervalles de confiance exception faite pour les mois d'Octobre, Juillet et Août, et pour les saisons d'Automne et d'Été.

Aussi, nous avons identifié des ruptures pendant la période 1991/1992-2014/2015 à partir des quatre tests de détection de rupture, où nous constatons des fortes ruptures au cours des périodes 1992/1993-2001/2002 et 2008/2009-2010/2011 pour les trois pas de temps. Ces ruptures sont caractérisées par une baisse de température remarquable au mois de Septembre de l'année 1992/1993 (année de rupture) relative à une diminution de 3,88%.

Chapitre V

Indices de sécheresse

V.1. Introduction

La sécheresse touche de nombreuses personnes dans le monde et entraîne d'énormes pertes économiques, destruction environnementale et dommage sociale. Cependant, la sécheresse est de loin le phénomène le moins compris (elle apparaît après une longue période sans précipitations, mais il est difficile de déterminer son début, son intensité et sa fin. Par conséquent, il est difficile de quantifier objectivement ses caractéristiques). Toutefois il est important de pouvoir la détecter et la surveiller. De nombreuses organisations comme l'organisation météorologique mondiale (OMM) et l'administration nationale des océans et de l'atmosphère des États-Unis (NOAA) ont recommandé la caractérisation des sécheresses météorologiques ainsi que les autres catégories de sécheresses (ELSA E. MOREIRA et al, 2016). Pour cela les scientifiques ont élaboré divers indices pour surveiller la sécheresse, tels que l'indice de précipitations standardisé (SPI), PN, DI, Z-Score, CZI et MCZI. L'indice de sécheresse est utile pour une évaluation claire, simple et quantitative des principaux facteurs caractéristiques de la sécheresse : intensité, durée et étendue spatiale (Hayes et al, 1999).

L'indice de sécheresse nécessite l'obtention des milliers de données sur les précipitations, la couverture de neige, le débit des rivières, etc. L'analyse des données pour chaque période permet d'obtenir une cartographie du phénomène compréhensible et complète. La valeur de l'indice de sécheresse est généralement un nombre entier, interprété d'après une classification selon la sévérité de l'événement, sa position et d'identifier la probabilité d'occurrence de différentes classes de sévérité (sur les échelles anormalement humide, moyenne et anormalement sèche).

Beaucoup d'efforts ont été faits pour développer des technologies d'analyse et de surveillance de la sécheresse. Parmi eux, les indicateurs objectifs sont largement utilisés, mais la subjectivité de la définition de la sécheresse rend très difficile l'établissement d'un indicateur de sécheresse unique et universel.

Le présent chapitre définit le programme du calcul et les indices utilisés dans notre étude et qui nous permettent de caractériser le phénomène de sécheresse dans l'aval Mekerra.

V.2. Logiciel MDM

Le logiciel "MDM" (Meteorological Drought Monitoring) est un logiciel gratuit utilisé pour calculer les indices à base de précipitations développé par Agrimetsoft Agricultural and Meteorological Software. Dans cet outil, huit indices météorologiques sont calculés. Tous les calculs et les plages d'indices peuvent être trouvés dans le document intitulé "Estimation of meteorological drought indices based on Agmerra precipitation data and station-observed precipitation data ", les séries de données de précipitations doivent être en forma Excel (2 colonnes ; la première pour les années et la deuxième pour les précipitations), les données de précipitations peuvent être mensuelles ou journalières.

Les indices calculés par le MDM sont :

- ❖ SPI: Indice de Précipitation Standardisé,
- ❖ PN: Pourcentage à la Normale,
- ❖ DP: Déciles,
- ❖ EDI: Indice de Sécheresse Efficace,
- ❖ CZI: Indice Z Chinois,
- ❖ MCZI: Indice Z Chinois Modifié,
- ❖ RAI: Indice d'Anomalie Pluviométrique,
- ❖ Z-Score: Statistiques Z-Score.

V.3. Indice standardisé des précipitations (SPI)

V.3.1. Définition

L'indice standardisé des précipitation (SPI) est basé sur des calculs statistiques des précipitations pendant une longue période (30 ans au moins). Il est possible d'exécuter le programme si de telles séries présentent des données manquantes, mais le degré de confiance à accorder aux résultats s'en trouve, alors affecté en fonction de la distribution des données manquantes par rapport à la durée de la période de relevés. Le SPI est développé en 1993 par McKEE, N.J. DOESKEN & J. KLEIST de l'université de l'État du Colorado, pour la détermination des déficits pluviométriques.

C'est un indice très important, puissant et simple à calculer. Les données sur les précipitations constituent en fait le seul paramètre requis.

En outre, l'indice SPI se révèle tout aussi efficace pour analyser les périodes des cycles humides que les périodes des cycles secs.

L'expression la plus simple pour calculer SPI est :

$$\text{SPI} = \frac{P_i - P_m}{\sigma} \quad (\text{V. 1})$$

avec :

P_i : Précipitation totale d'une période i ,

P_m : Précipitation moyenne historique de la période,

σ : Écart-type historique de la série sur l'échelle temporelle considérée.

V.3.2. Méthode de calcul

Le calcul du SPI est fondé sur le relevé des précipitations à long terme (plus de 30 ans est souhaitable) pour un emplacement particulier. La méthode de calcul consiste à transformer une distribution de fréquence (gamma, par exemple) en une autre distribution de fréquence (normale ou gaussienne). La première étape du calcul de SPI consiste à choisir adéquatement une distribution de probabilité particulière (p. ex., la distribution gamma, la distribution bêta incomplète (McKee et al, (1993, 1995)) et la distribution Pearson III (Guttman, (1998, 1999)) qui correspond de façon fiable à la distribution à long terme. Les séries chronologiques

des précipitations à terme et la conduite adaptée à cette distribution. La distribution gamma a été largement utilisée, car la distribution gamma a été considérée comme l'ajustement fiable à la distribution des précipitations. [8]

V.3.2.1. Distribution Gamma

SPI est un indice basé sur la distribution de probabilité des précipitations. Cela dépend de la densité ajustée, de la fonction de probabilité, de la longueur de la séquence utilisée pour estimer les paramètres de la fonction de probabilité et de la méthode d'estimation. Dans cette étude, la fonction de densité de probabilité gamma a été ajustée à la série mensuelle de l'intervalle de temps sélectionné, et le test Pearson a été utilisé pour vérifier la qualité de l'ajustement. Utilisez la méthode du maximum de vraisemblance pour estimer les paramètres. Ensuite, convertissez l'appareil de l'état normal à l'état standard. La valeur de la variable ordinaire standard est en fait la valeur SPI.

V.3.2.2. Formule

L'expression est donnée par la formule suivante :

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (x > 0) \quad (\text{V.2})$$

d'où :

$\alpha > 0$: est un paramètre de forme,

$\beta > 0$: est un paramètre d'échelle et $x > 0$ est la quantité des précipitations,

$\Gamma(\alpha)$: est la fonction gamma, définie par:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (\text{V.3})$$

L'ajustement de la distribution aux données nécessite l'estimation de α et β . En utilisant l'approximation de Thom (1958), ces paramètres peuvent être estimés comme suit :

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (\text{V.4})$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (\text{V.5})$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (\text{V.6})$$

avec :

\bar{x} : Valeur moyenne de la quantité des précipitations,

n: Numéro de mesure des précipitations,

x: Quantité de précipitations dans une séquence de données.

V.3.3. Classification des valeurs (SPI)

McKee et al (1993) ont développé cet indicateur afin de faire ressortir l'impact de la période étudiée (ex. 1, 2, 3 mois) sur les différentes ressources en eau. Comme les réserves souterraines, les réservoirs, les dépôts neigeux où les cours d'eau ne réagissent pas aux variations pluviométriques avec la même rapidité, la période de calcul du SPI fait ressortir l'effet de cette variation sur chacun de ces systèmes hydrologiques. À l'échelle temporelle d'une semaine, par exemple, la réponse du SPI est très variable.

La classification adoptée par l'organisation mondiale de la météorologie, où six classes de sécheresse sont distinguées, variant de l'extrêmement sèche à l'extrêmement humide, peuvent être distinguées (tab.V.1).

Tableau V.1 : Classification des sécheresses selon les valeurs du SPI

Classes du SPI	Degré de la sécheresse
$SPI > 2$	Humidité extrême
$1 < SPI < 2$	Humidité forte
$0 < SPI < 1$	Humidité modérée
$-1 < SPI < 0$	Sécheresse modérée
$-2 < SPI < -1$	Sécheresse forte
$SPI < -2$	Sécheresse extrême

McKee et al. (1993) utilisent la classification retrouvée au tableau V.1, afin de définir l'intensité des sécheresses à l'aide du SPI. Selon l'auteur, une sécheresse sévit lorsque le SPI est consécutivement négatif et que sa valeur atteint une intensité de -1 ou moins et se termine lorsque le SPI devient positif. La magnitude de la sécheresse est obtenue en additionnant toutes les valeurs du SPI d'une période sèche.

V.3.4. Avantages de méthode SPI

- L'indice SPI offre une bonne souplesse d'utilisation, il est possible de le calculer pour de multiples échelles de temps,
- Quand il porte sur un laps de temps relativement court, entre 1 et 3 mois par exemple, l'indice SPI permet de détecter rapidement les situations de sécheresse et d'en évaluer la gravité,
- L'indice SPI présente une bonne cohérence spatiale, ce qui permet d'établir des comparaisons entre des zones différentes soumises à des climats différents,
- Sa nature probabiliste le place dans un contexte historique, ce qui convient bien à la prise de décision.

V.3.5. Inconvénients de méthode SPI

- L'indice SPI ne repose que sur les relevés de précipitations,
- Le bilan hydrique du sol n'étant pas pris en compte, l'indice ne permet pas le calcul du rapport évapotranspiration/évapotranspiration potentielle (ET/ETP).

V.3.6. Indice SPI sur 1 mois

Un graphique SPI sur 1 mois ressemble beaucoup à un graphique montrant le pourcentage de précipitations normales en 30 jours. Puisque la distribution est normalisée, l'indice résultant fournit en fait une représentation plus précise des précipitations mensuelles. Par exemple, l'indice SPI d'un mois qui se termine à la fin de novembre compare les précipitations mensuelles totales en novembre de l'année sous revue avec les précipitations mensuelles totales en novembre de toutes les années dans les conditions suivantes. Étant donné que l'indice SPI à 1 mois représente des conditions à court terme, son application est particulièrement pertinente à la sécheresse météorologique, à l'eau du sol à court terme et au stress hydrique des cultures. Pendant la période végétative. En théorie, il est possible de calculer l'indice SPI pour moins d'un mois, mais en pratique cela n'est pas recommandé. Il est fortement recommandé aux utilisateurs en moyenne pendant au moins quatre semaines (OMM, 2012).

V.3.7. Indice SPI sur 3 mois

L'indice SPI sur 3 mois compare les précipitations totales de la période de trois mois qui peuvent être examinées avec les précipitations totales de la même période de trois mois pour toutes les années qui ont été enregistrées. En d'autres termes, l'indice SPI à trois mois qui se termine à la fin de février peut comparer les précipitations cumulées de décembre, janvier et février de l'année vérifiée avec les précipitations cumulées de toutes les années de décembre à février. Des recherches ont été menées sur l'historique d'observation de la station. L'indice SPI à 3 mois peut indiquer les conditions d'humidité à court et moyen terme et estimer les précipitations tout au long de la saison. Comparez l'indice SPI à 3 mois avec une période plus longue. Dans le cas d'une sécheresse qui dure longtemps, un état relativement normal voire humide peut apparaître dans les trois mois, ce qui ne peut être prouvé que par une observation pendant une durée relativement longue. Par conséquent, il est vital d'assurer une surveillance continue pour déterminer le début et la fin de la sécheresse et pour éviter d'annoncer faussement son début et sa fin.

Comme pour l'indice SPI à 1 mois, l'indice SPI à 3 mois dans les zones à climat sec normal au cours de la période de 3 mois considérée peut prêter à confusion. La valeur négative ou positive significative de l'indice SPI peut être liée à une accumulation de précipitations qui ne s'écarte que légèrement de la valeur moyenne. Par rapport à la valeur moyenne, une petite méthode ou une autre méthode peut entraîner une valeur négative ou positive importante du SPI (OMM, 2012).

V.3.8. Indice SPI sur 6 mois

L'indice SPI sur 6 mois compare la quantité de précipitations au cours de la période de 6 mois considérée avec la quantité totale de précipitations pouvant être enregistrée au cours de la même période de 6 mois. Par exemple, en utilisant l'indice SPI sur six mois qui se termine à la fin de septembre, les précipitations cumulées d'avril à septembre de l'année considérée peuvent être comparées aux précipitations cumulées au cours de la même période au cours des

dernières années. L'indice SPI sur 6 mois peut indiquer la tendance des précipitations tout au long de la saison et la plage médiane.

L'indice SPI à 6 mois est très efficace pour mettre en évidence les précipitations au cours d'une saison donnée. Par exemple, l'indice SPI à 6 mois qui se termine à la fin de mars peut fournir une bonne indication des précipitations pendant la saison des pluies d'octobre à mars, ce qui est très important pour certaines régions méditerranéennes. À partir de 6 mois, nous pouvons également corrélérer les informations fournies par l'indice SPI avec des anomalies de débit des rivières et des niveaux d'eau des réservoirs, selon la région et l'année considérées (OMM, 2012).

V.3.9. Indice SPI sur 9 mois

L'indice SPI sur 9 mois indique la pluviométrie inter-saisonnière moyenne. Il faut généralement au moins une saison pour entrer dans des conditions sèches. Un indice SPI établi sur 9 mois et affichant moins de -1,5 est généralement un bon indicateur des conditions de sécheresse, qui aura un impact important sur l'agriculture et peut également affecter d'autres secteurs. Nous avons commencé à établir un lien entre sécheresse saisonnière à court terme et sécheresse à long terme. La sécheresse à long terme peut évoluer vers une sécheresse hydrologique ou plusieurs années de sécheresse.

V.3.10. Indice SPI sur 12 mois jusqu'à 24 mois

À ces échelles de temps, l'indice SPI fournit une représentation des régimes de précipitations à longue échéance. L'indice SPI sur 12 mois établit la comparaison entre les précipitations sur une période de 12 mois consécutifs et celles enregistrées sur la même série de 12 mois consécutifs de toutes les années pour lesquelles on dispose de relevés. Étant donné que ces échelles de temps constituent le cumul de périodes plus courtes pouvant se situer au-dessus ou au-dessous de la normale, les valeurs des indices SPI établis pour une période relativement longue tendent à graviter autour de zéro, à moins qu'une tendance humide ou sèche bien distincte ne se soit installée. Les indices SPI pour ces échelles de temps sont en général associés au débit des cours d'eau, au niveau des réservoirs et au niveau des eaux souterraines à relativement long terme (OMM, 2012).

V.4. Rapport à la normale (PN)

Le rapport à la normale des précipitations représente le pourcentage de l'écart des précipitations d'une période par rapport à la normale historique de cette période. La normale étant habituellement la moyenne des précipitations totales de la période. Cet indicateur est appliqué à l'échelle locale ou régionale pour des périodes de temps variant de 1 mois à quelques mois, voire même une année.

Le PN a été décrit par Willeke et al. (1994) comme un pourcentage des précipitations normales. Le PN s'est avéré très efficace pour décrire les sécheresses dans une seule région ou une seule saison. Il est calculé comme suit :

$$PN = \frac{P_i}{P} * 100 \quad (V.7)$$

Où :

P_i: Précipitations par unité de temps i (mm),

P: Précipitations normales pour la période d'étude (mm).

Tableau V.2 : Classification des sécheresses selon les valeurs du PN

Classification du PN	Valeur
Extrêmement sec	< 40
Sécheresse sévère	40 à 55
Sécheresse faible	70 à 80
Sécheresse modérée	55 à 70
Normal	80 à 100
Humide	> 100

La condition nécessaire pour appliquer cette méthode est la normalité de la distribution donnée de précipitations. En fait, cette distribution est de quelques mois ou moins. Puis la moyenne et la médiane diffèrent, alors il faut sélectionner les données que vous souhaitez utiliser comme référence historique.

PN est utilisé pour comparer une seule zone où il n'y a qu'une seule saison. Dans des régions hétérogènes ou des saisons différentes, les changements temporels et spatiaux des précipitations la rendent plus difficile à expliquer. Par exemple, 10% de 150 mm et 10% de 500 mm ont des significations différentes. Cette variabilité fait également en sorte qu'il est difficile de calculer la fréquence des écarts à la normale et donc de connaître la fréquence des sécheresses et de comparer ses effets entre différentes régions. Cet indicateur est souvent incompris et donc parfois mal interprété.

- **Points forts :** c'est un moyen populaire, rapide et facile d'utiliser les mathématiques de base,
- **Points faibles :** certains utilisateurs peuvent confondre l'établissement d'une valeur normale avec le calcul des précipitations moyennes pour un emplacement. Il est difficile de comparer différents modèles météorologiques, en particulier lorsqu'il y a des saisons des pluies et des saisons sèches.

V.5. Décile index (DI)

Le DI a été défini comme un classement des précipitations dans un intervalle de temps particulier sur l'ensemble de la période historique (Gibbs et Maher, 1967). Plus précisément, les données triées par ordre décroissant et divisés en dix catégories égales ou déciles. Ainsi, les précipitations en un mois donné peuvent être placées dans le contexte historique par décile.

Cette méthode est un indice de sécheresse sous-utilisé, mais sa simplicité en fait le point de départ le plus raisonnable. Gibbs et Maher ont créé la méthode des déciles de précipitations en

1967 pour effectuer une évaluation cohérente des conditions météorologiques dans les régions, où les moyennes de précipitations sont insuffisantes. Cet indice est avantageux car il est facile à calculer et relativement rapide. De plus, les seules données requises pour l'entrée sont les valeurs des précipitations à long terme, qui n'est pas difficile à trouver. Certaines de ces lacunes comprennent la fourchette des déciles, l'incapacité de représenter avec précision le schéma de sécheresse dans les zones où le schéma de sécheresse dépend largement de la saison, et la difficulté à comprendre le schéma lorsqu'il est construit en série chronologique.

La classification de l'indice est représentée dans le tableau V.3.

Tableau V.3 : Classification des sécheresses selon les valeurs du DI

Classification du DI	Valeur
Extrêmement sec	1
Sécheresse sévère	2
Sécheresse modérée	3
Sécheresse faible	4
Pas de sécheresse	≥ 5

- **Points forts :** une seule variable étant analysée, la méthode est simple et s'adapte à de multiples situations. À l'aide de seuils soigneusement définis, les données récentes sont placées dans une perspective historique afin de déterminer le degré de sécheresse. La méthode est utile dans les conditions d'humidité comme de sécheresse,
- **Points faibles :** comme d'autres indicateurs qui reposent uniquement sur les précipitations, il ne prend pas en considération l'impact des températures et d'autres variables sur l'évolution de la sécheresse. La méthode est plus efficace quand on détient une longue série de relevés, car un grand nombre de périodes sèches et de périodes humides sont incluses dans la distribution (OMM, 2016).

V.6. China-Z Index (CZI) et Modified China-Z Index (MCZI)

Le centre national du climat de Chine a développé le CZI en 1995 comme une alternative au SPI (Ju et al, 1997), lorsque les précipitations moyennes suivent la distribution de type III de Pearson, CZI est calculé comme suit :

$$CZI_{ij} = \frac{6}{C_{si}} * \left(\frac{C_{si}}{2} \times \varphi_{ij} + 1 \right)^{1/3} - \frac{6}{C_{si}} + \frac{C_{si}}{6} \quad (V.8)$$

$$C_{si} = \frac{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_1)^3}{n \times \sigma_1^3} \quad (V.9)$$

$$\varphi_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_1}{\sigma_1} \quad (V.10)$$

Où i est l'échelle de temps d'intérêt et j est le mois courant, CZI_{ij} signifie la valeur du CZI du mois courant (j) pour la période (i), C_{si} est le coefficient d'asymétrie, et ϕ_{ij} est le coefficient normalisé et x_{ij} la précipitation de j mois pour la période, n est le nombre total de mois.

Tableau V.4 : Classification des sécheresses selon les valeurs de CZI et MCZI

Classification du CZI-MCZI	Valeur
Extrêmement humide	> 2
Très humide	1,5 à 1,99
Modérément humide	1,0 à 1,49
Près de normal	-0,99 à 0,99
Sécheresse modérée	-1,0 à -1,49
Sécheresse sévère	-1,5 à -1,99
Sécheresse extrême	< -2

- **Points forts :** les calculs sont simples et peuvent être répétés avec plusieurs pas de temps. L'indice s'applique à la fois aux périodes de sécheresse et aux périodes d'humidité et, comme le SPI, tolère des lacunes dans les données,
- **Points faibles :** les scores Z n'exigent pas d'ajustement en les adaptant à des distributions gamma ou Pearson type II; il pourrait en résulter une moins bonne représentation des échelles temporelles réduites qu'avec le SPI (OMM, 2016).

V.6.1. Différence entre CZI (China-Z Index) et MCZI (Modified CZI)

L'indice China-Z (CZI) est un indice de sécheresse (Ju et al, 1997) qui a été introduit au centre météorologique national de Chine (NMCC) au début des années 1990. Malheureusement, l'origine du CZI ne peut pas être facilement documenté. Cet indice est appelé 'China-Z Index.' National Climate Center of China'' a mis au point le CZI en 1995 comme alternative au SPI (Ju et al, 1997), lorsque les précipitations moyennes suivent la distribution de Pearson de type III. On trouvera plus de détails dans Wu et al (2001). De plus, le MCZI peut également être calculé à l'aide de la formule CZI, mais en remplaçant la précipitation médiane par la précipitation moyenne.

De nombreux indices de sécheresse, comme l'indice China-Z (CZI) (Wu et al., 2001), sont largement utilisés, tandis que l'indice normalisé des précipitations (SPI) (McKee et al, 1993) a atteint une popularité mondiale. Wu et al (2001) ont exprimé trois indices, y compris l'indice des précipitations standard (SPI), l'indice China Z et l'indice Z-Score (ZSI) pour le climat sec et humide en Chine, et ont décrit leurs avantages et leurs inconvénients par des données mensuelles sur les précipitations. Ils ont également tenté de déduire avec déférence l'indice des précipitations standard et le CZI modifiée. Les différences globales entre ces deux indices se sont considérablement réduites par rapport à la différence entre le SPI et la CZI. [9]

V.7. Z-Score Index (ZSI)

Le ZSI est parfois confondu avec le SPI. Cependant, il est plus analogue à CZI, mais sans la nécessité d'adapter les données de précipitations à la distribution gamma ou à Pearson de type III. ZSI peut être calculé par l'équation suivante :

$$\text{ZSI} = \frac{P_i - \bar{P}}{\sigma} \quad (\text{V. 11})$$

Où P est la précipitation mensuelle moyenne (mm), P_i est la précipitation d'un mois donné (mm), et σ est l'écart-type de toute échelle de temps (mm).

Tableau V.5 : Classification des sécheresses selon les valeurs du ZSI

Classification du ZSI	Valeur
Pas de sécheresse	> 0,25
Sécheresse faible	0,25 à -0,25
Sécheresse légère	-0,25 à -0,52
Sécheresse modérée	-0,52 à -0,84
Sécheresse sévère	-0,84 à -1,25
Sécheresse extrême	< -1,25

- **Points forts :** les calculs sont simples et peuvent être répétés avec plusieurs pas de temps. L'indice s'applique à la fois aux périodes de sécheresse et aux périodes d'humidité et, comme le SPI, il tolère des lacunes dans les données,
- **Points faibles :** les scores Z n'exigent pas d'ajustement en les adaptant à des distributions gamma ou Pearson type ; il pourrait en résulter une moins bonne représentation des échelles temporelles réduites qu'avec le SPI (OMM, 2016).

V.8. Rainfall Anomaly Index (RAI)

Le RAI considère deux anomalies, l'une positive et l'autre négative. Tout d'abord, les données de précipitations sont répertoriées par ordre décroissant. Moyenne des dix valeurs les plus élevées pour former un seuil d'anomalie positif et moyenne des dix valeurs les plus basses pour former un seuil d'anomalie négatif. Les seuils sont calculés par les équations V.12 et V.13, respectivement :

$$\text{RAI} = 3 * \left[\frac{(P - \bar{P})}{(\bar{m} - \bar{p})} \right] \quad (\text{V. 12})$$

$$\text{RAI} = -3 * \left[\frac{(P - \bar{P})}{(\bar{m} - \bar{p})} \right] \quad (\text{V. 13})$$

Où :

P: Précipitations réelles pour chaque année (mm),

\bar{P} : Précipitations moyennes à long terme (mm),

\bar{m} : Moyenne des dix valeurs les plus élevées de p pour l'anomalie positive et la moyenne des dix valeurs les plus faibles de p pour l'anomalie négative.

Tableau V.6 : Classification des sécheresses selon les valeurs du RAI

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

L'indice peut analyser les sécheresses affectant l'agriculture, les ressources en eau et d'autres secteurs car il a un certain degré de flexibilité et peut être compilé dans des délais différents.

- **Points forts** : il est facile à calculer, avec un seul paramètre d'entrée (précipitations) et peut être analysé à une échelle mensuelle, saisonnière ou annuelle,
- **Points faibles** : il faut disposer d'une série complète de données et estimer les valeurs manquantes. Les fluctuations au cours de l'année doivent être faibles par rapport aux variations temporelles (OMM, 2016).

V.9. Effective Drought Index (EDI)

L'EDI est calculé au pas de temps quotidien et ses valeurs sont normalisées de la même manière que pour calculer les valeurs du SPI. L'EDI a été élaboré à l'origine par Byun et Wilhite (1999) pour surmonter certaines limites d'autres indices. La valeur d'EDI varie généralement de -2,5 à 2,5.

Les conditions proches de la normale sont indiquées lorsque l'EDI varie de -1,0 à 1,0, tandis que la sécheresse extrême les conditions sont indiquées lorsque l'EDI est inférieur ou égal à -2,0. Les précipitations efficaces devraient être calculées en premier avant d'obtenir l'EDI.

$$E_{pi} = \sum_{n=1}^i \left(\frac{(\sum_{m=1}^n P_m)}{n} \right) \quad (\text{V. 14})$$

Où :

E_{pi} : Précipitations effectives (mm) qui représente les accumulations valides de précipitations,
 P_m : Précipitations au cours des m jours précédents (mm),
 n : Durée de la période précédente (jour).

Lorsque $i=365$, E_{p365} montre les précipitations disponibles accumulées sur 365 jours. Pour plus de détails sur le calcul de l'EDI, voir Byun et Wilhite (1999).

Tableau V.7 : Classification des sécheresses selon les valeurs d'EDI

Classification d'EDI	Valeur
Extrêmement humide	> 2
Très humide	1,5 à 1,99
Modérément humide	1,0 à 1,49
Près de normal	-0,99 à 0,99
Sécheresse modérée	-1,0 à -1,49
Sécheresse sévère	-1,5 à -1,99
Sécheresse extrême	< -2

- **Points forts :** comme les seules données d'entrée nécessaires sont les précipitations, il est possible de calculer l'indice pour tout emplacement où ces dernières sont mesurées. Le programme est accompagné de documents qui expliquent la démarche. L'indice étant normalisé, les valeurs obtenues dans tous les régimes climatiques se prêtent à des comparaisons. L'EDI se révèle efficace pour détecter le début, la fin et la durée des périodes de sécheresse (OMM, 2016),
- **Points faibles :** l'incidence des températures sur la sécheresse n'est pas directement prise en compte puisque l'indice repose sur les seules précipitations.

Chapitre VI

Résultats et discussion

VI.1. Introduction

L'identification, le suivi et la caractérisation de la sécheresse sont très importants dans la planification et la gestion des ressources en eau pour comprendre la relation spatio-temporelle de l'occurrence de la sécheresse. Pour ce faire et en se basant sur les données climatiques de la station de Sidi Bel Abbès nous avons calculé les différents indices de sécheresse cités par le code MDM.

VI.2. Calcul du SPI (Indice standardisé des précipitations)

Afin d'évaluer l'évolution des précipitations au niveau de la zone d'étude, nous avons calculé 42 ans de valeur de l'indice SPI à différentes échelles de temps en se servant des données de la station de Sidi Bel Abbès sur la période (1977/1978-2018/2019).

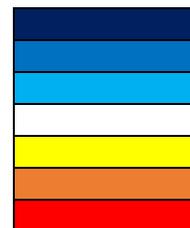
VI.2.1. À l'échelle annuelle

Tableau VI.1 : Résultats de calcul du SPI annuel pour la série des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbès (1977/1978-2018/2019)

Année	SPI annuel	Année	SPI annuel	Année	SPI annuel
1977/1978		1991/1992		2005/2006	
1978/1979		1992/1993		2006/2007	
1979/1980		1993/1994		2007/2008	
1980/1981		1994/1995		2008/2009	
1981/1982		1995/1996		2009/2010	
1982/1983		1996/1997		2010/2011	
1983/1984		1997/1998		2011/2012	
1984/1985		1998/1999		2012/2013	
1985/1986		1999/2000		2013/2014	
1986/1987		2000/2001		2014/2015	
1987/1988		2001/2002		2015/2016	
1988/1989		2002/2003		2016/2017	
1989/1990		2003/2004		2017/2018	
1990/1991		2004/2005		2018/2019	

Légende

Extrêmement humide
Très humide
Modérément humide
Proche de la normale
Modérément sec
Sévèrement sec
Extrêmement sec



L'évolution de l'indice SPI pour la station de Sidi Bel Abbès (1977/1978-2018/2019) (fig.VI.1), montre que notre série est caractérisée par une alternance d'épisodes secs et humides, nous observons aussi que la valeur maximale du SPI qui définit l'humidité la plus élevée atteint 2,56 en 2007/2008, et la sécheresse la plus sévère définit par la valeur minimale du SPI atteint -2,02 en 1995/1996.

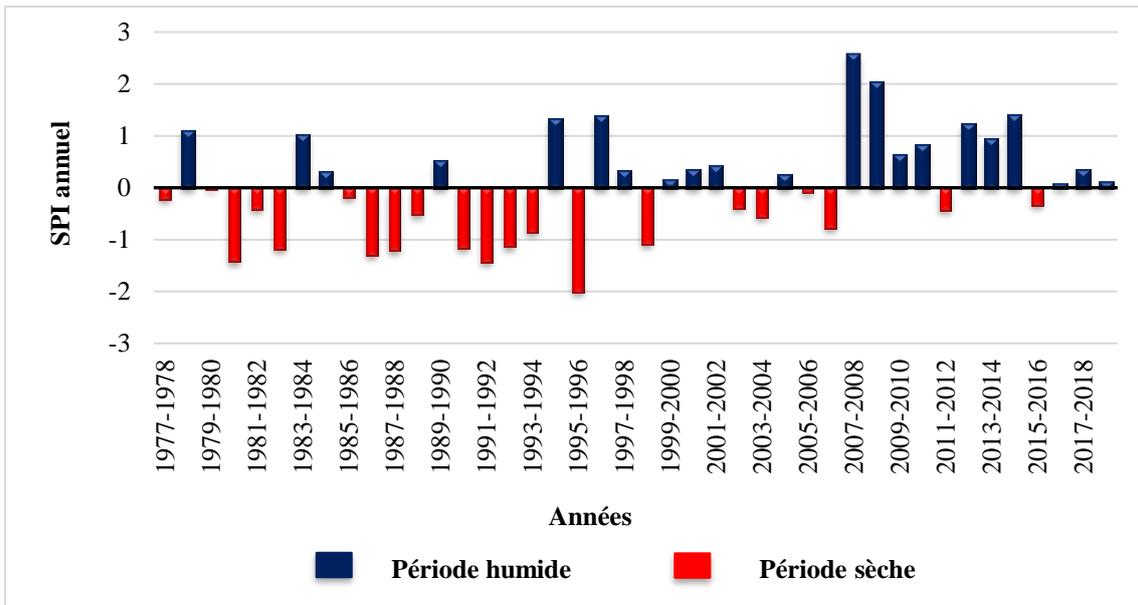


Figure VI.1 : Évolution du SPI pour la série des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

La répartition du SPI pour la série des précipitations annuelles enregistrées au niveau de la station de Sidi Bel Abbes pendant la période 1977/1978-2018/2019, selon la classification de sécheresse (cf. chapitre V) (fig.VI.2) indique que la période proche de la normale est dominante de 59,52% par rapport aux autres périodes. La station de Sidi Bel Abbes n’a pas enregistré une pluviométrie caractérisée par des séquences sévèrement sèches et très humides durant la période étudiée. Le pourcentage minimal de 2,38% est remarqué pour la classe extrêmement sèche.

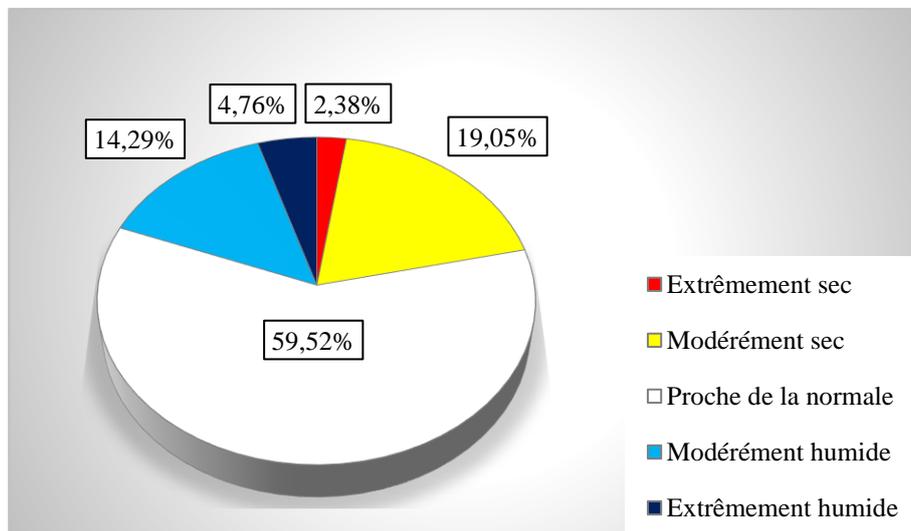


Figure VI.2 : Répartition du SPI pour la série des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

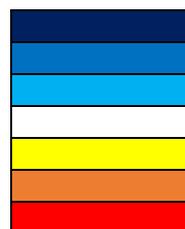
VI.2.2. À l'échelle mensuelle

Tableau VI.2 : Résultats de calcul du SPI mensuel pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbès (1977/1978-2018/2019)

Année	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
1977/1978	Modérément sec	Modérément humide			Modérément sec	Modérément humide						
1978/1979		Modérément humide		Modérément humide			Modérément humide					
1979/1980										Modérément humide		
1980/1981		Modérément sec	Modérément sec			Modérément humide	Modérément sec		Modérément humide			
1981/1982		Modérément humide			Modérément sec		Modérément sec		Modérément sec			
1982/1983	Modérément sec	Modérément sec	Modérément sec					Modérément sec	Modérément humide			
1983/1984			Extrêmement sec			Modérément sec			Modérément humide			
1984/1985	Modérément sec	Modérément sec				Modérément humide			Modérément sec			
1985/1986		Modérément sec				Extrêmement sec		Extrêmement sec			Extrêmement sec	
1986/1987		Modérément sec				Modérément sec						
1987/1988				Modérément sec			Modérément humide		Modérément sec			
1988/1989						Modérément sec		Modérément humide			Modérément humide	
1989/1990						Extrêmement sec	Modérément sec	Modérément sec				Modérément humide
1990/1991				Modérément sec			Modérément humide		Modérément sec			
1991/1992				Modérément sec	Modérément sec		Modérément sec					
1992/1993				Modérément sec			Modérément sec				Modérément humide	
1993/1994	Modérément humide			Modérément sec			Modérément humide		Modérément sec			
1994/1995						Modérément humide		Modérément humide	Modérément sec	Extrêmement sec	Extrêmement sec	
1995/1996			Modérément sec			Modérément sec						Modérément humide
1996/1997	Extrêmement sec											
1997/1998		Modérément sec				Modérément humide	Modérément humide	Modérément humide	Modérément sec			
1998/1999					Modérément sec	Modérément sec	Modérément sec					
1999/2000		Modérément humide			Modérément humide		Extrêmement sec					
2000/2001			Modérément humide		Modérément sec	Modérément sec		Modérément humide				Modérément humide
2001/2002	Modérément sec			Modérément sec	Modérément humide	Modérément humide						
2002/2003	Modérément sec											Modérément humide
2003/2004									Modérément sec		Modérément humide	
2004/2005							Modérément sec					
2005/2006							Modérément humide	Modérément humide				
2006/2007		Modérément humide		Modérément sec				Modérément sec	Modérément humide			
2007/2008	Modérément humide	Extrêmement sec		Modérément humide	Modérément humide							
2008/2009		Modérément humide		Modérément humide	Modérément humide			Modérément humide				
2009/2010		Modérément sec	Modérément sec		Modérément humide							Extrêmement sec
2010/2011		Modérément humide						Modérément humide	Modérément humide	Modérément humide		
2011/2012			Modérément humide						Modérément sec			
2012/2013			Modérément humide		Modérément humide			Modérément humide				
2013/2014		Modérément sec		Modérément humide				Modérément sec		Modérément humide		
2014/2015				Modérément humide	Modérément humide			Modérément sec		Modérément humide		
2015/2016				Modérément sec			Modérément humide					
2016/2017				Modérément humide	Modérément humide	Modérément sec		Modérément sec	Modérément sec			
2017/2018	Modérément sec		Modérément sec				Modérément humide					
2018/2019	Modérément humide						Modérément sec				Modérément humide	

Légende

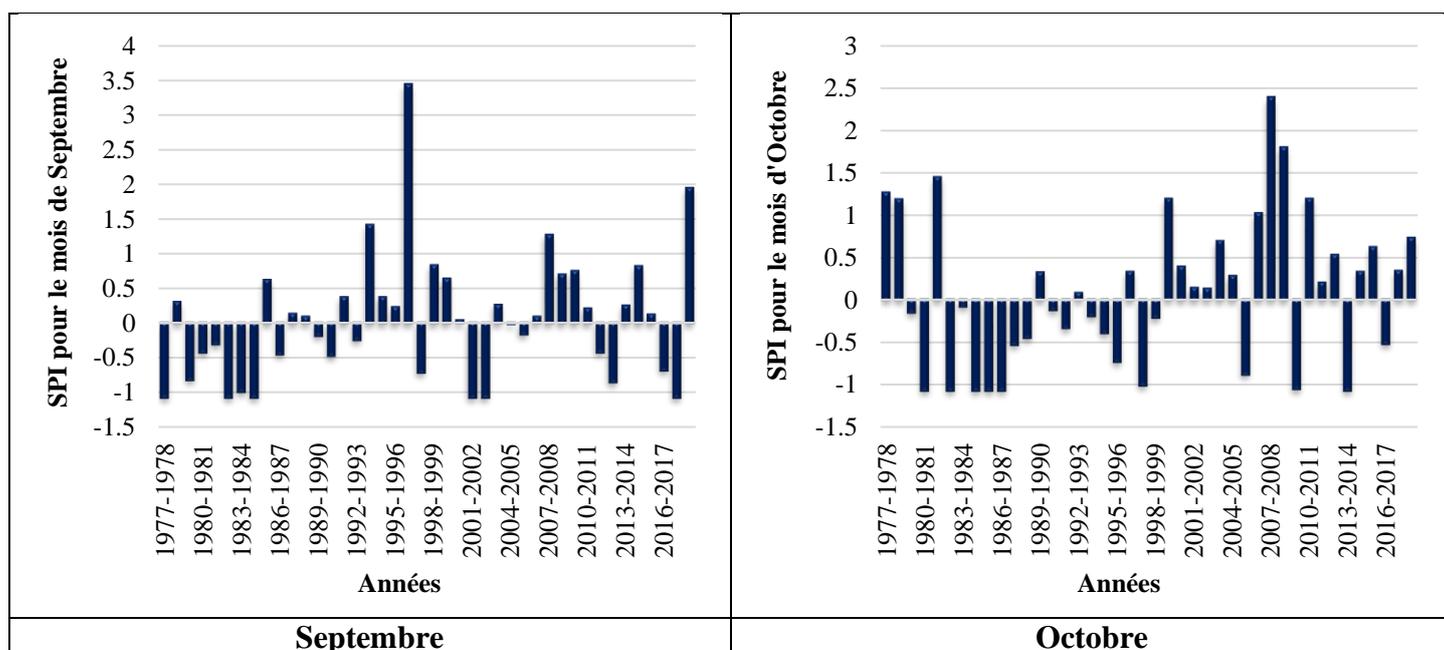
Extrêmement humide
 Très humide
 Modérément humide
 Proche de la normale
 Modérément sec
 Sévèrement sec
 Extrêmement sec

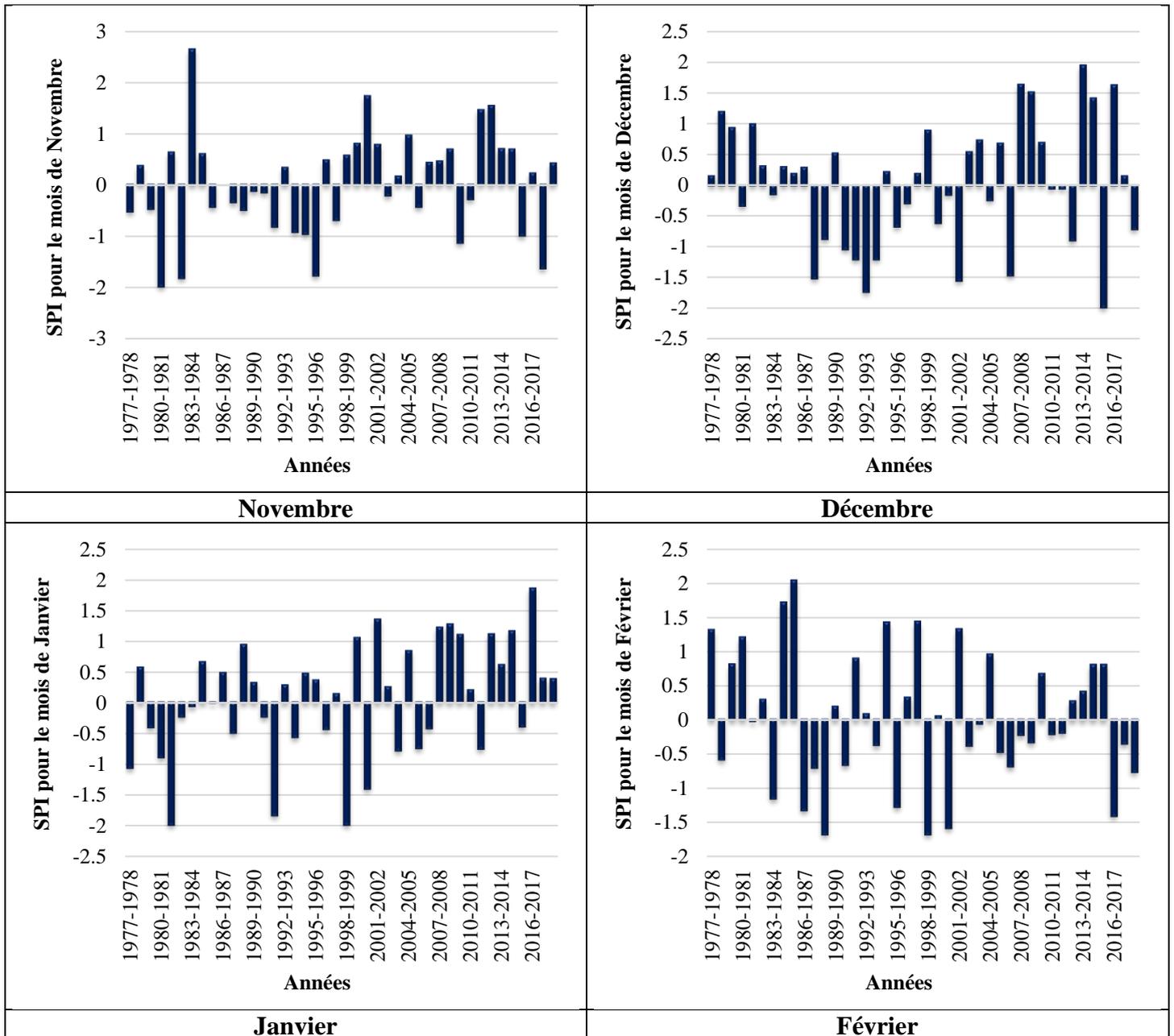


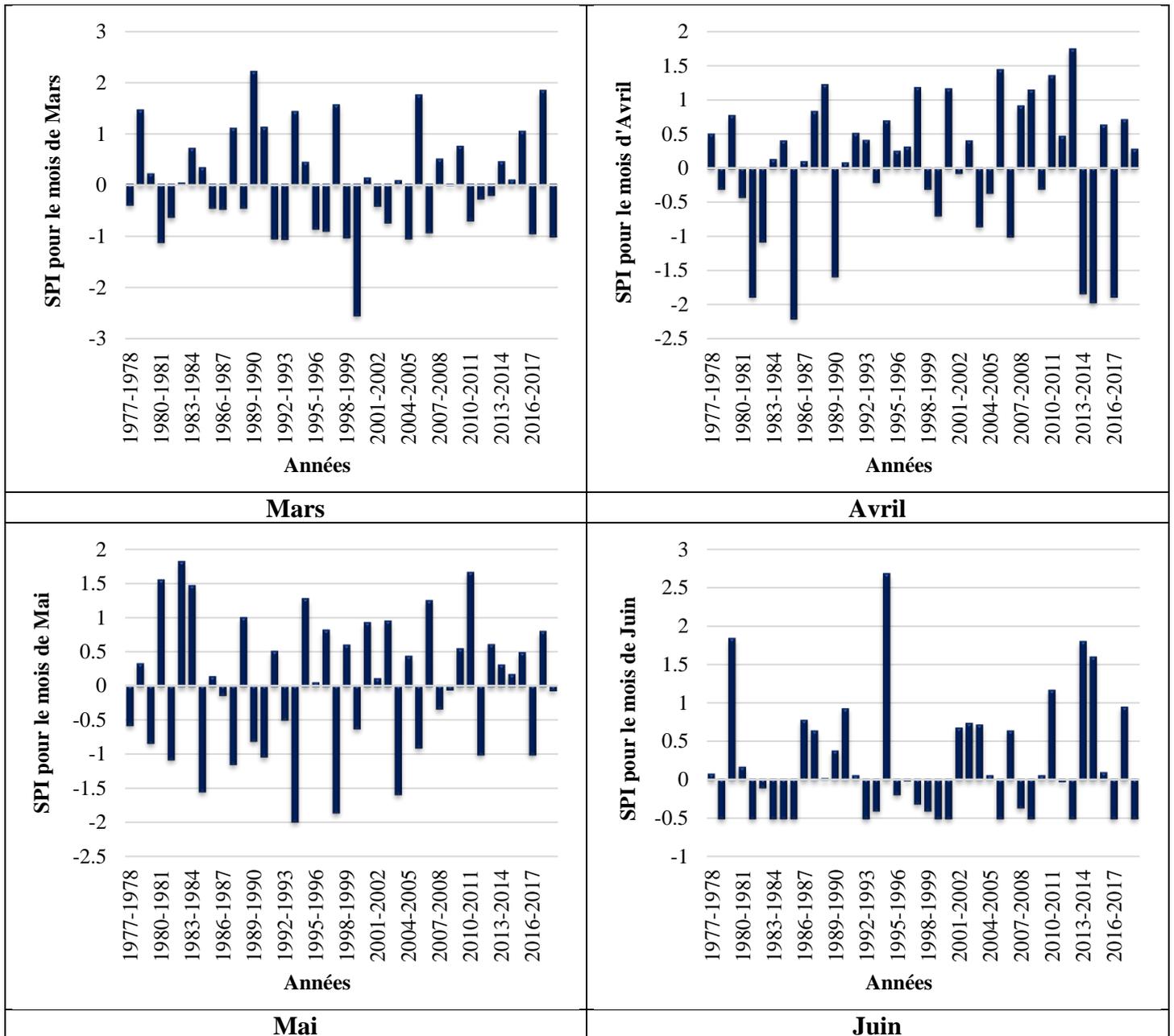
L'évolution du SPI appliqué à la série des précipitations mensuelles enregistrées au niveau de la station de Sidi Bel Abbès pendant la période 1977/1978-2018/2019 (fig.VI.3), nous montre une absence de sécheresse au mois de Juillet, par ailleurs, une alternance d'épisodes secs et humides avec une forte sécheresse remarquable de Septembre jusqu'à Mai, où sa valeur est inférieure à -1,5 (tab.VI.3).

Tableau VI.3 : SPI maximaux et minimaux pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbès (1977/1978-2018/2019)

Mois	Période humide		Période sèche	
	SPI max	Date	SPI min	Date
Septembre	3,43	1996/1997	-1,07	1977/1978, 1982/1983, 1984/1985, 2001/2002, 2002/2003, 2017/2018
Octobre	2,38	2007/2008	-1,07	1980/1981, 1982/1983, 1984/1985 à 1986/1987, 2013/2014
Novembre	2,64	1983/1984	-1,98	1980/1981
Décembre	1,94	2013/2014	-1,98	2015/2016
Janvier	1,85	2016/2017	-1,98	1981/1982, 1998/1999
Février	2,03	1985/1986	-1,67	1988/1989, 1998/1999
Mars	2,2	1989/1990	-2,55	1999/2000
Avril	1,73	2012/2013	-2,2	1985/1986
Mai	1,81	1982/1983	-1,98	1993/1994
Juin	2,67	1994/1995	-0,5	1978/1979, 1981/1982, 1983/1984 à 1985/1986, 1992/1993, 1999/2000, 2000/2001, 2005/2006, 2008/2009, 2012/2013, 2016/2017, 2018/2019
Juillet	2,72	1994/1995	0,12	1978/1979 à 1980/1981, 1982/1983 à 1984/1985, 1986/1987, 1987/1988, 1990/1991, 1991/1992, 1993/1994, 1996/1997 à 2000/2001, 2005/2006, 2006/2007, 2008/2009, 2013/2014 à 2015/2016, 2017/2018
Août	2,9	2009/2010	-0,18	1977/1978, 1978/1979, 1981/1982 à 1983/1984, 1985/1986 à 1987/1988, 1992/1993, 2003/2004 à 2008/2009, 2013/2013, 2013/2014, 2015/2016







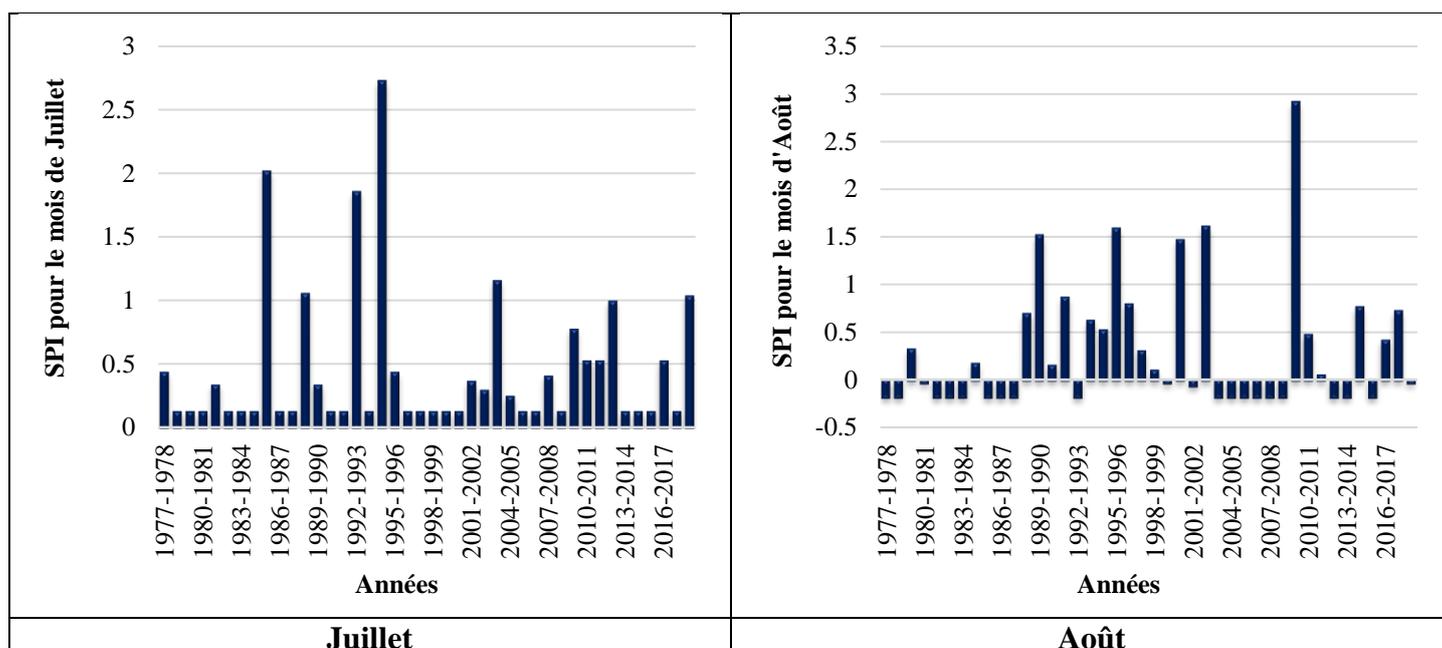
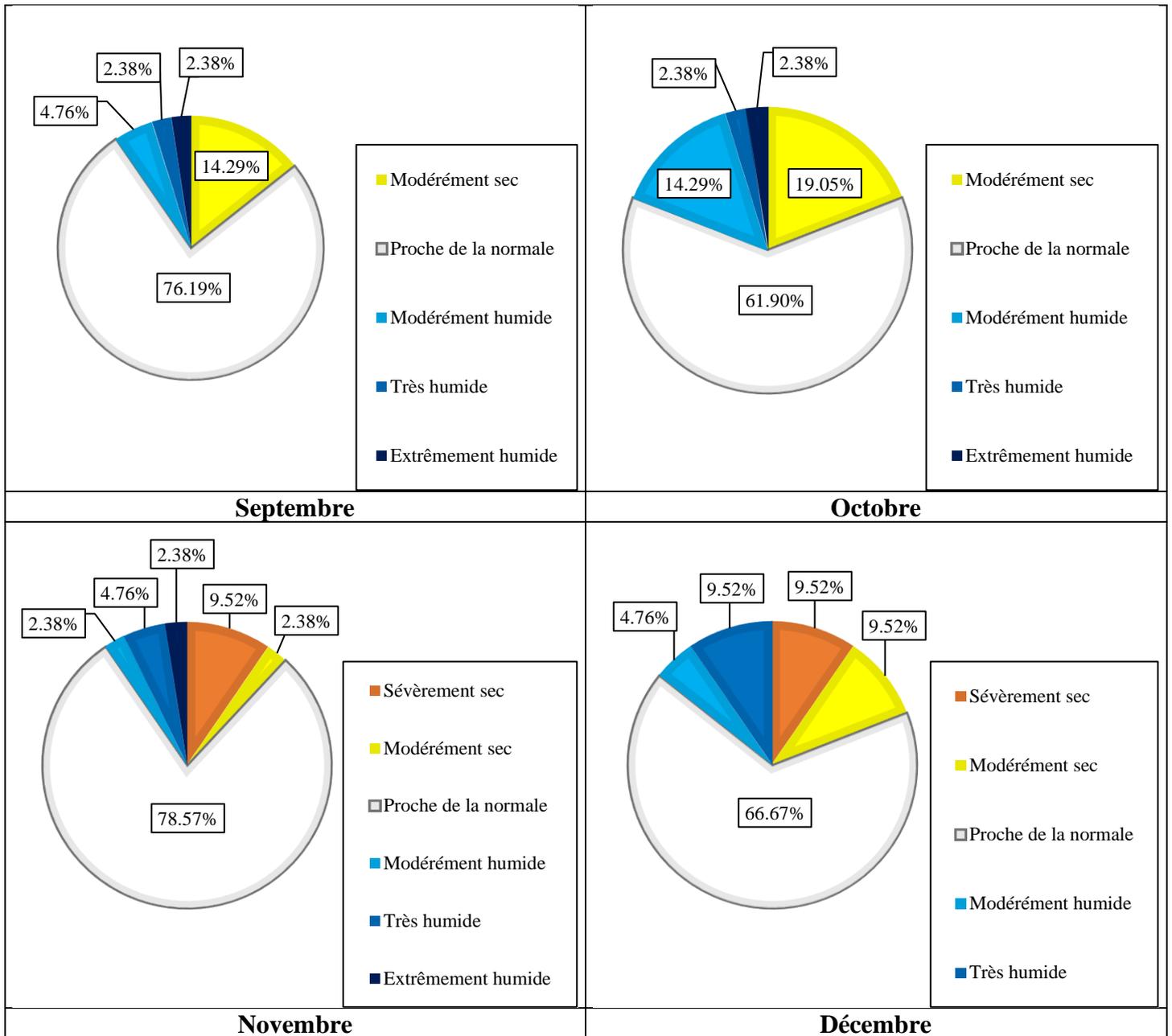


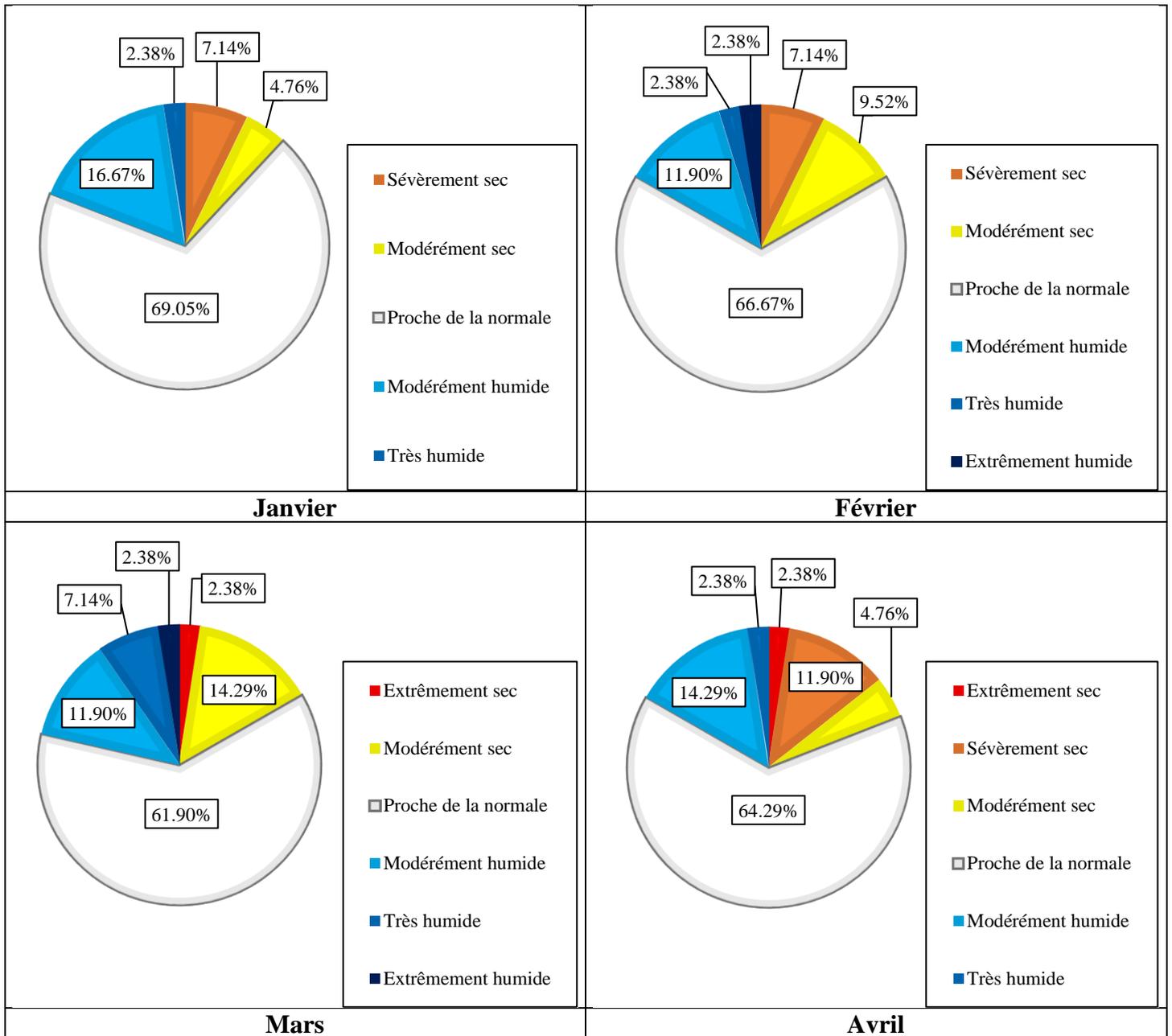
Figure VI.3 : Évolution du SPI pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

La répartition du SPI pour la série de précipitations mensuelles de Sidi Bel Abbes pendant la période 1977/1978-2018/2019 (fig.VI.4), met en évidence la dominance de la classe proche de la normale pour tous les mois.

Notre série pluviométrique n'a pas été classée dans la classe extrêmement sèche sauf en Mars et Avril de 2,38%. Pour la classe modérément sèche le pourcentage minimal est de 0%, visible en Juin, Juillet, Août, Septembre, Octobre et Mars. Pour la classe sévèrement sèche, les pourcentages maximaux sont respectivement de 19,05% en Octobre et de 11,90% en Avril et Mai.

Pour la période humide, la classe modérément humide varie entre 2,38% en Novembre, Juin et Août, et 16,67% en Janvier. La classe très humide varie entre 2,38% en Septembre, Octobre, Janvier, Février, Avril et Juillet, et 9,52% en Décembre. La classe extrêmement humide varie entre 0% en Décembre, Janvier, Avril et Mai, et 4,76% en Juillet.





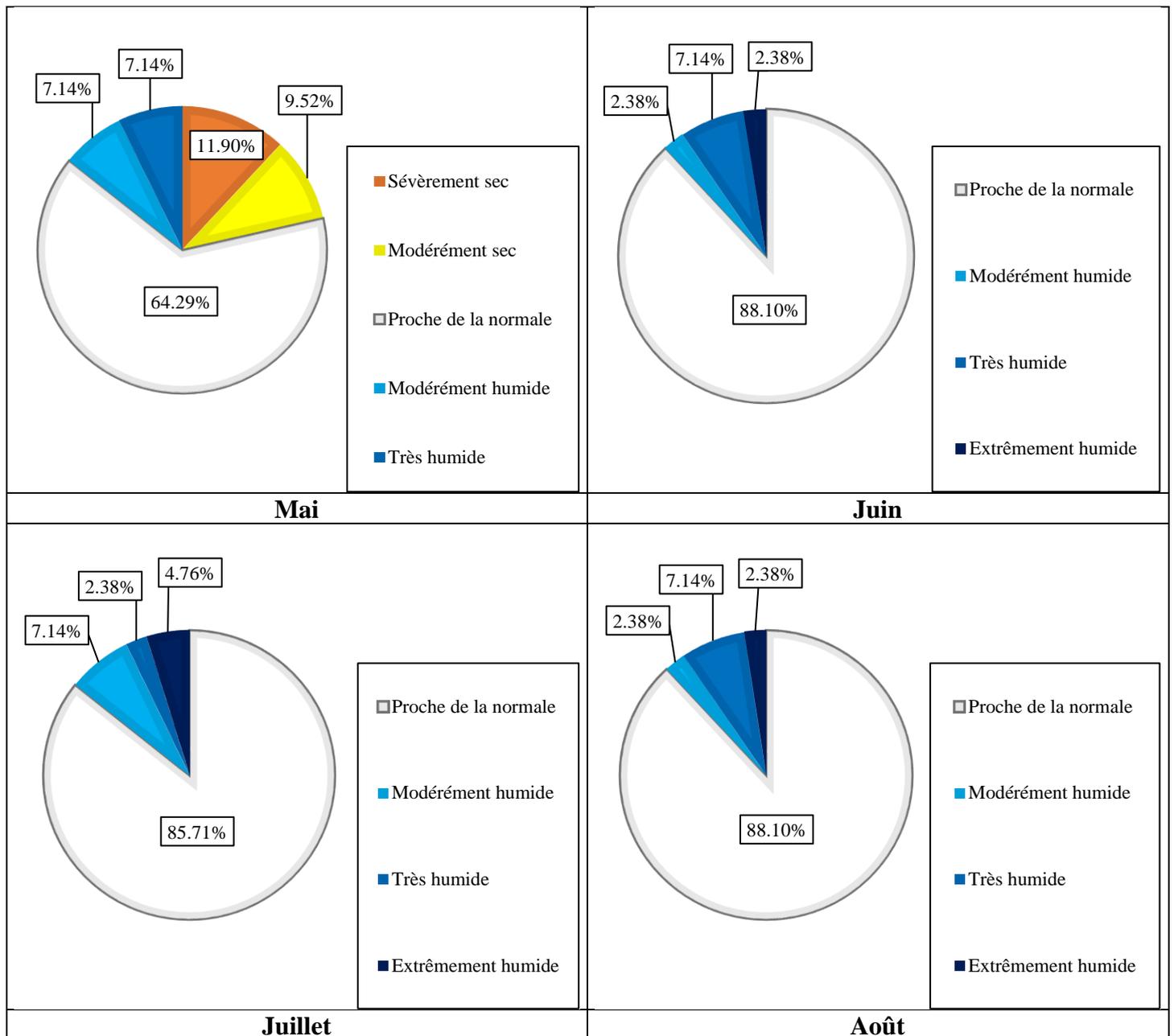


Figure VI.4 : Répartition du SPI pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

VI.2.3. À l'échelle de 3 mois

Tableau VI.4 : Résultats de calcul du SPI-3 mois pour la série des précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

Année	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
1977/1978	NaN	NaN										
1978/1979				Modérément humide								Modérément sec
1979/1980	Modérément sec											Extrêmement sec
1980/1981		Modérément sec	Extrêmement sec	Extrêmement sec	Modérément sec						Modérément humide	
1981/1982		Modérément humide		Modérément humide			Modérément sec	Modérément sec	Extrêmement sec	Extrêmement sec	Modérément sec	Modérément sec
1982/1983	Modérément sec	Modérément sec	Extrêmement sec	Modérément sec							Modérément humide	
1983/1984	Modérément sec		Modérément humide	Extrêmement sec	Extrêmement sec				Modérément humide		Modérément humide	Modérément sec
1984/1985	Modérément sec	Modérément sec				Modérément humide	Modérément humide	Modérément humide			Extrêmement sec	
1985/1986						Modérément humide			Modérément sec	Modérément sec		
1986/1987		Modérément sec						Modérément sec				
1987/1988				Modérément sec	Modérément sec	Modérément sec						
1988/1989				Modérément sec						Modérément humide		
1989/1990							Modérément humide	Modérément humide	Modérément humide	Modérément sec		
1990/1991						Modérément sec						
1991/1992				Modérément sec	Extrêmement sec							
1992/1993												
1993/1994	Modérément humide			Modérément sec	Modérément sec	Modérément sec				Modérément sec	Extrêmement sec	
1994/1995							Modérément humide	Modérément humide	Modérément humide	Extrêmement sec	Extrêmement sec	Extrêmement sec
1995/1996			Modérément sec	Modérément sec				Modérément sec				
1996/1997	Extrêmement sec	Extrêmement sec	Modérément humide									
1997/1998		Modérément sec	Modérément sec				Modérément humide	Extrêmement sec	Modérément humide		Extrêmement sec	
1998/1999						Modérément sec	Extrêmement sec	Extrêmement sec				
1999/2000		Modérément humide	Modérément humide					Modérément sec	Extrêmement sec	Modérément sec		Modérément sec
2000/2001			Modérément humide	Modérément humide		Modérément sec	Modérément sec			Modérément humide		
2001/2002						Modérément humide	Modérément humide					
2002/2003	Modérément sec											Modérément humide
2003/2004									Modérément sec	Modérément sec		
2004/2005												
2005/2006		Modérément sec						Modérément humide	Extrêmement sec		Modérément sec	Modérément sec
2006/2007						Modérément sec	Modérément sec	Modérément sec			Modérément humide	
2007/2008	Modérément humide	Extrêmement sec	Extrêmement sec	Extrêmement sec	Extrêmement sec	Modérément humide						
2008/2009		Extrêmement sec	Modérément humide	Extrêmement sec	Extrêmement sec	Modérément humide						Modérément sec
2009/2010						Modérément humide	Modérément humide					Extrêmement sec
2010/2011	Modérément humide	Modérément humide							Modérément humide	Extrêmement sec	Extrêmement sec	Modérément humide
2011/2012												
2012/2013	Modérément sec				Modérément humide				Modérément humide	Modérément humide		
2013/2014					Modérément humide	Modérément humide						Modérément humide
2014/2015				Modérément humide		Extrêmement sec	Modérément humide					Modérément humide
2015/2016					Modérément sec			Modérément humide				
2016/2017	Modérément sec	Modérément sec			Extrêmement sec	Extrêmement sec		Extrêmement sec	Extrêmement sec	Extrêmement sec	Modérément sec	
2017/2018	Modérément sec						Modérément humide	Modérément humide	Extrêmement sec			
2018/2019	Extrêmement sec	Extrêmement sec	Modérément humide					Modérément sec				

Légende

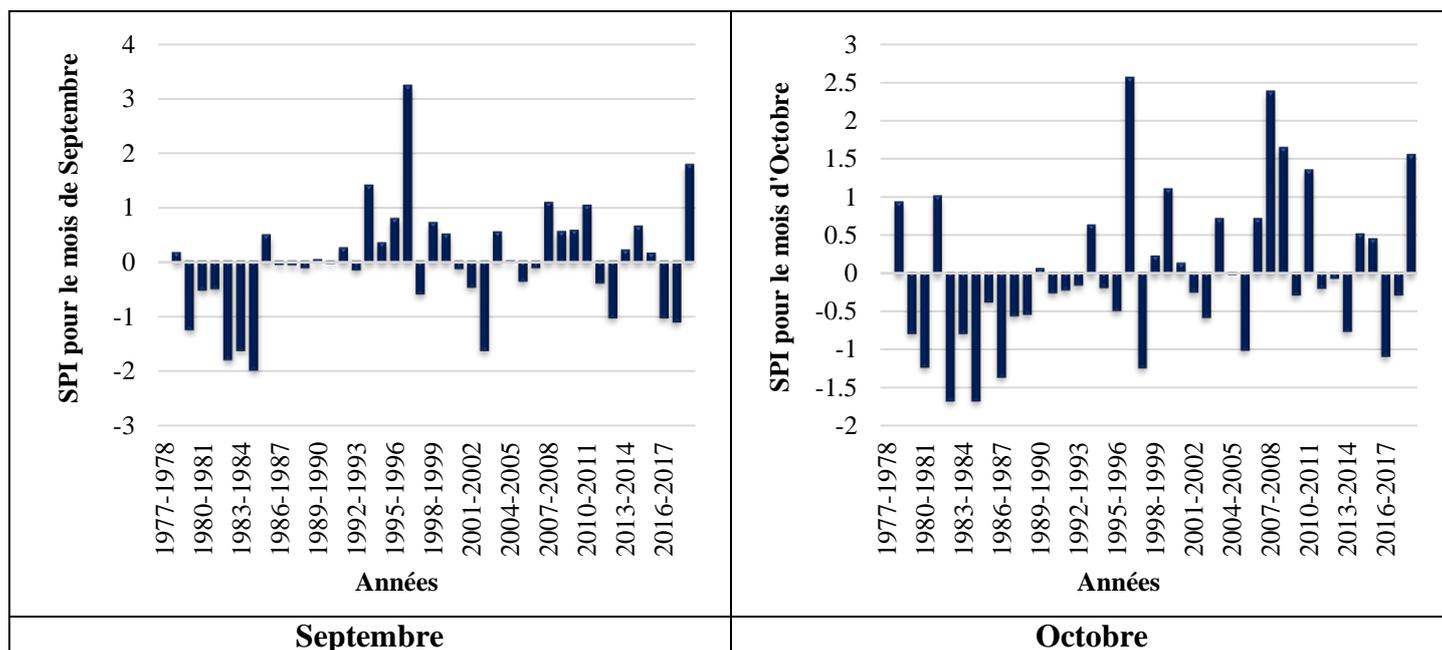
Extrêmement humide
 Très humide
 Modérément humide
 Proche de la normale
 Modérément sec
 Sévèrement sec
 Extrêmement sec
 Pas un nombre

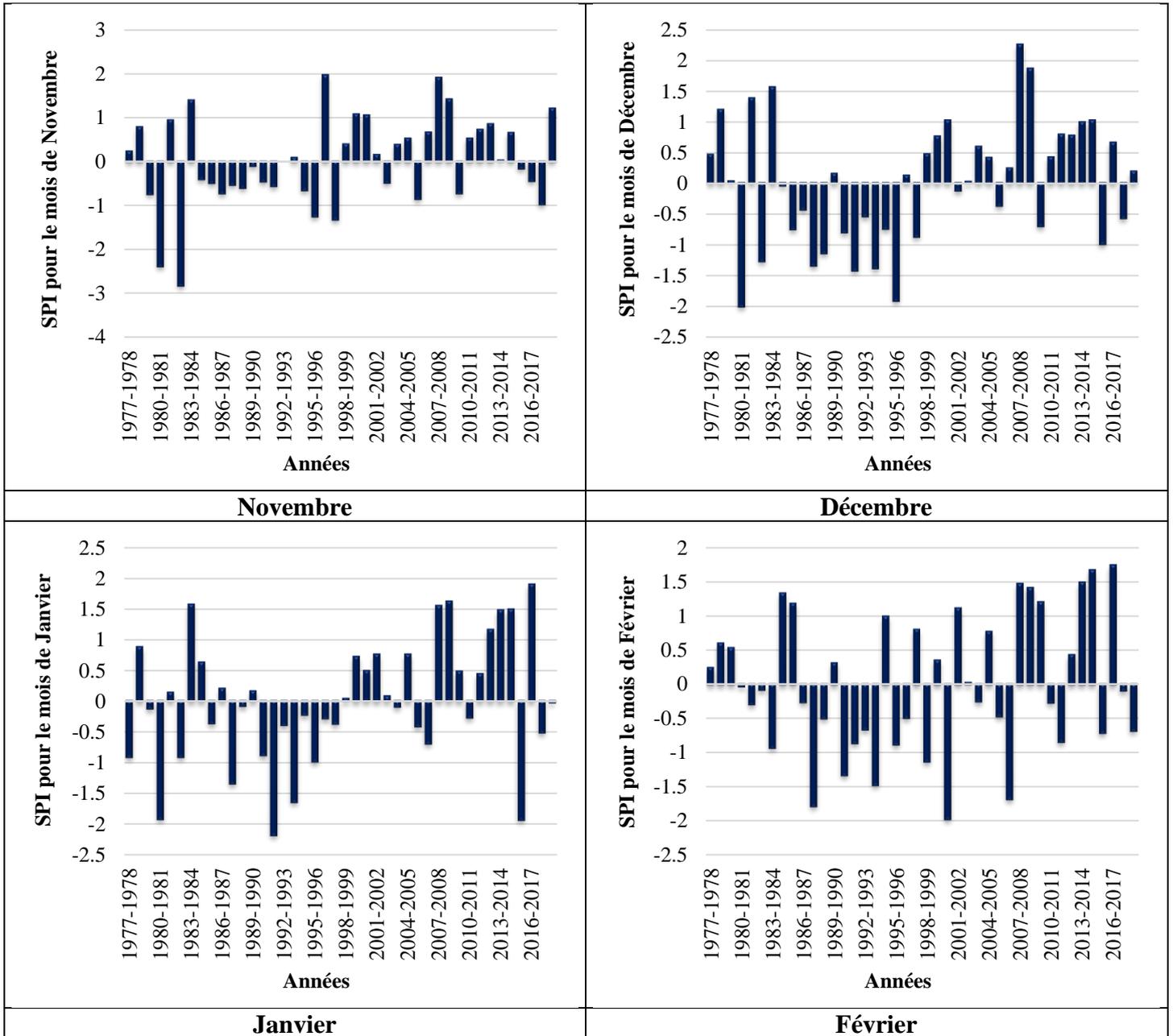


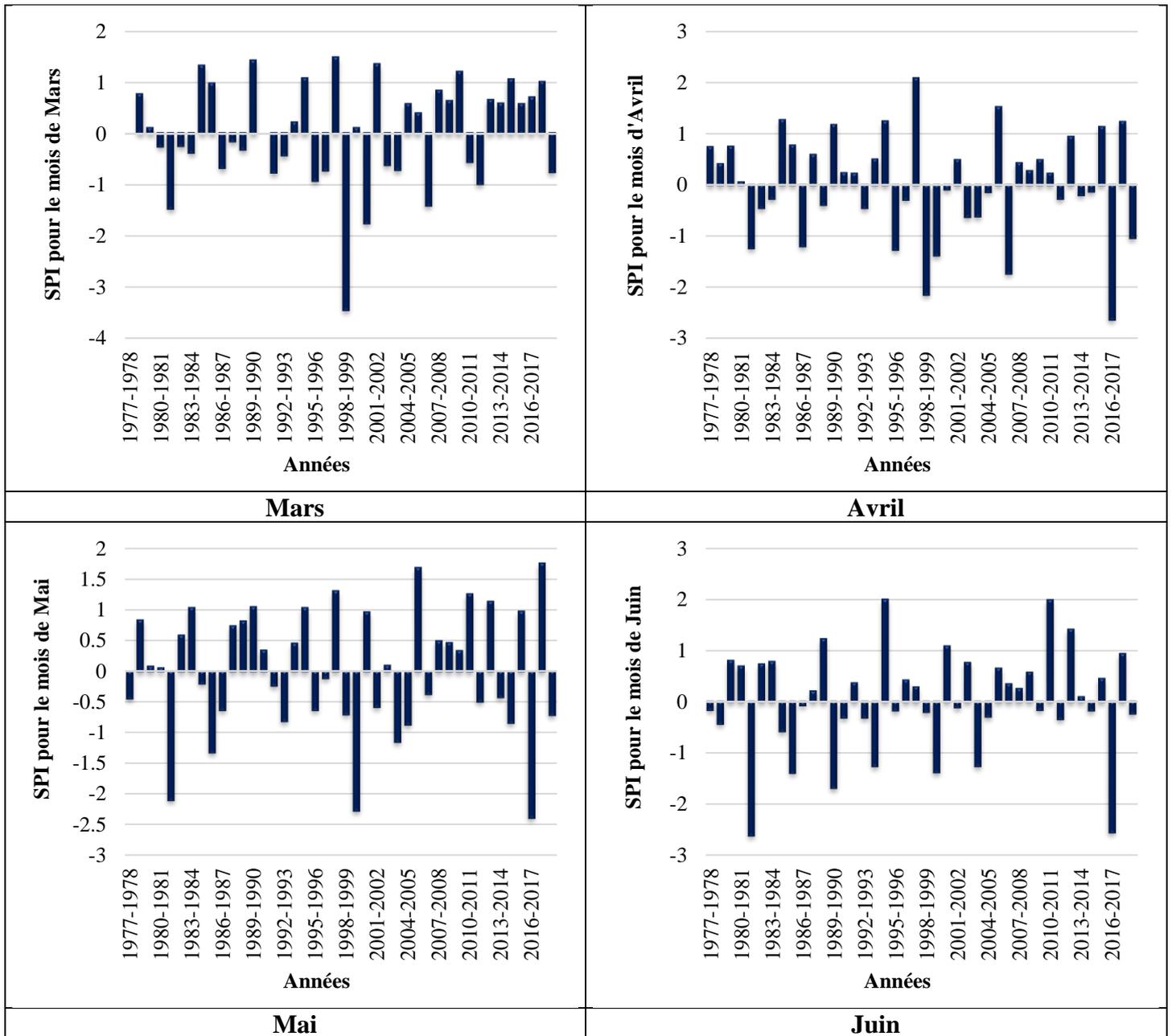
Les valeurs du SPI-3 présentées dans le tableau VI.5 et représentées dans la figure VI.5, montrent que le bassin versant de la basse Mekerra est caractérisé par l’alternance de séquences sèches et humides, ainsi que par une forte sécheresse observée beaucoup plus en Octobre, Décembre jusqu’à Août focalisée dans les années 80 et 90.

Tableau VI.5 : SPI maximaux et minimaux à l’échelle de 3 mois pour la série de précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

Mois	Période humide		Période sèche	
	SPI max	Date	SPI min	Date
Septembre	3,23	1996/1997	-1,97	1984/1985
Octobre	2,55	1996/1997	-1,66	1982/1983, 1984/1985
Novembre	1,96	1996/1997	-2,83	1982/1983
Décembre	2,25	2007/2008	-2	1980/1981
Janvier	1,9	2016/2017	-2,18	1991/1992
Février	1,74	2016/2017	-1,97	2000/2001
Mars	1,48	1997/1998	-3,45	1998/1999
Avril	2,08	1997/1998	-2,64	2016/2017
Mai	1,75	2017/2018	-2,39	2016/2017
Juin	1,99	1994/1995	-2,62	1981/1982
Juillet	2,29	1994/1995	-2,65	1993/1994
Août	2,95	1994/1995	-1,31	1978/1979, 1983/1984, 2005/2006, 2008/2009







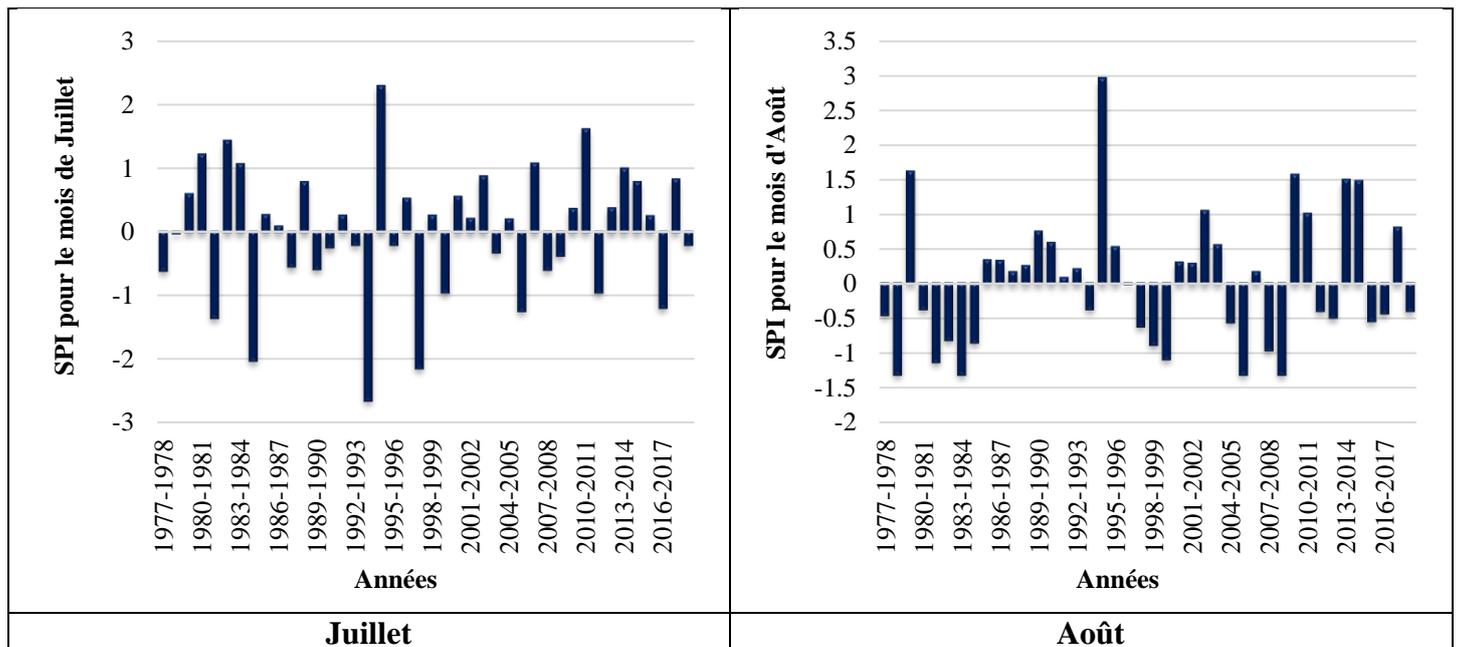
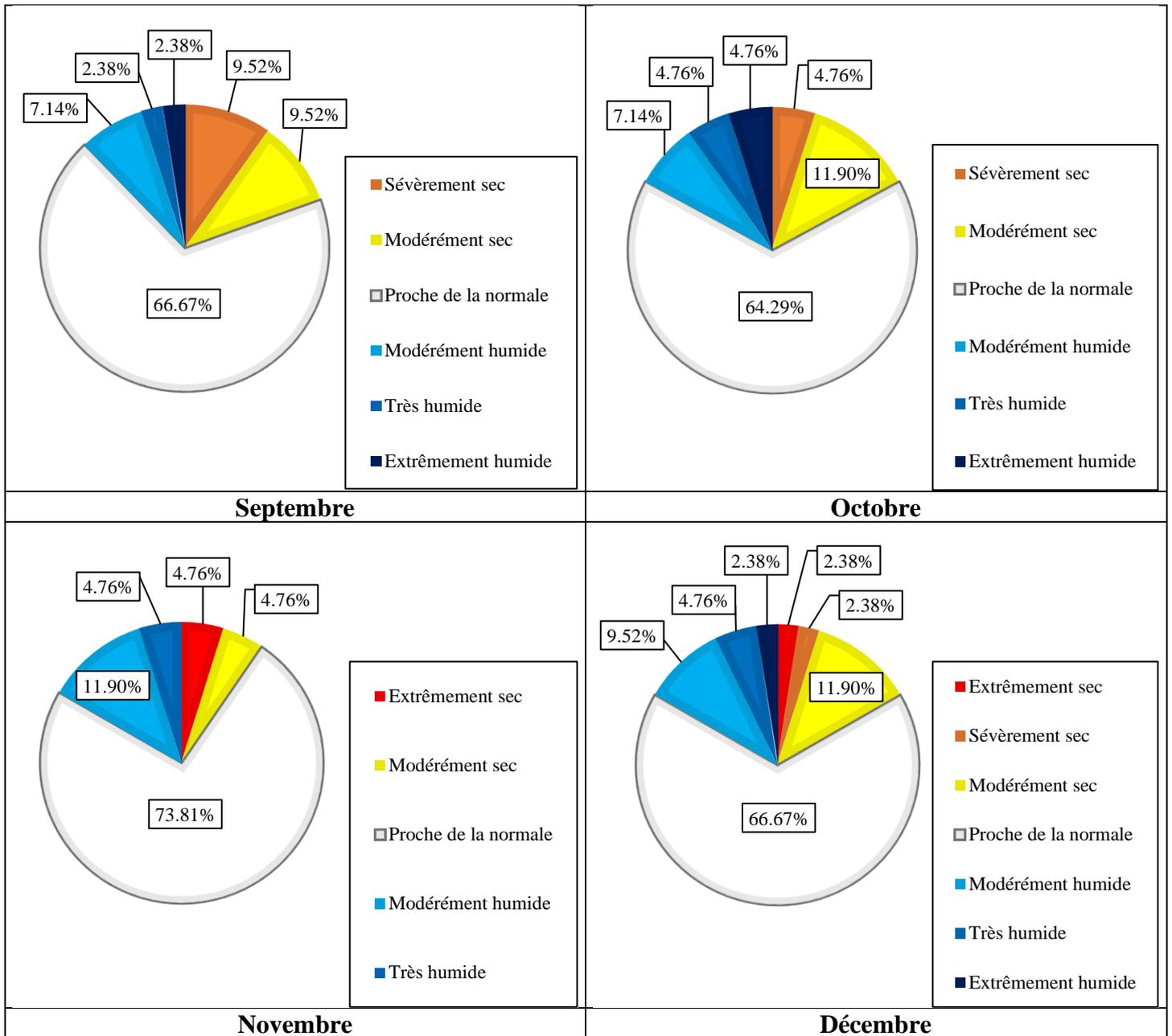


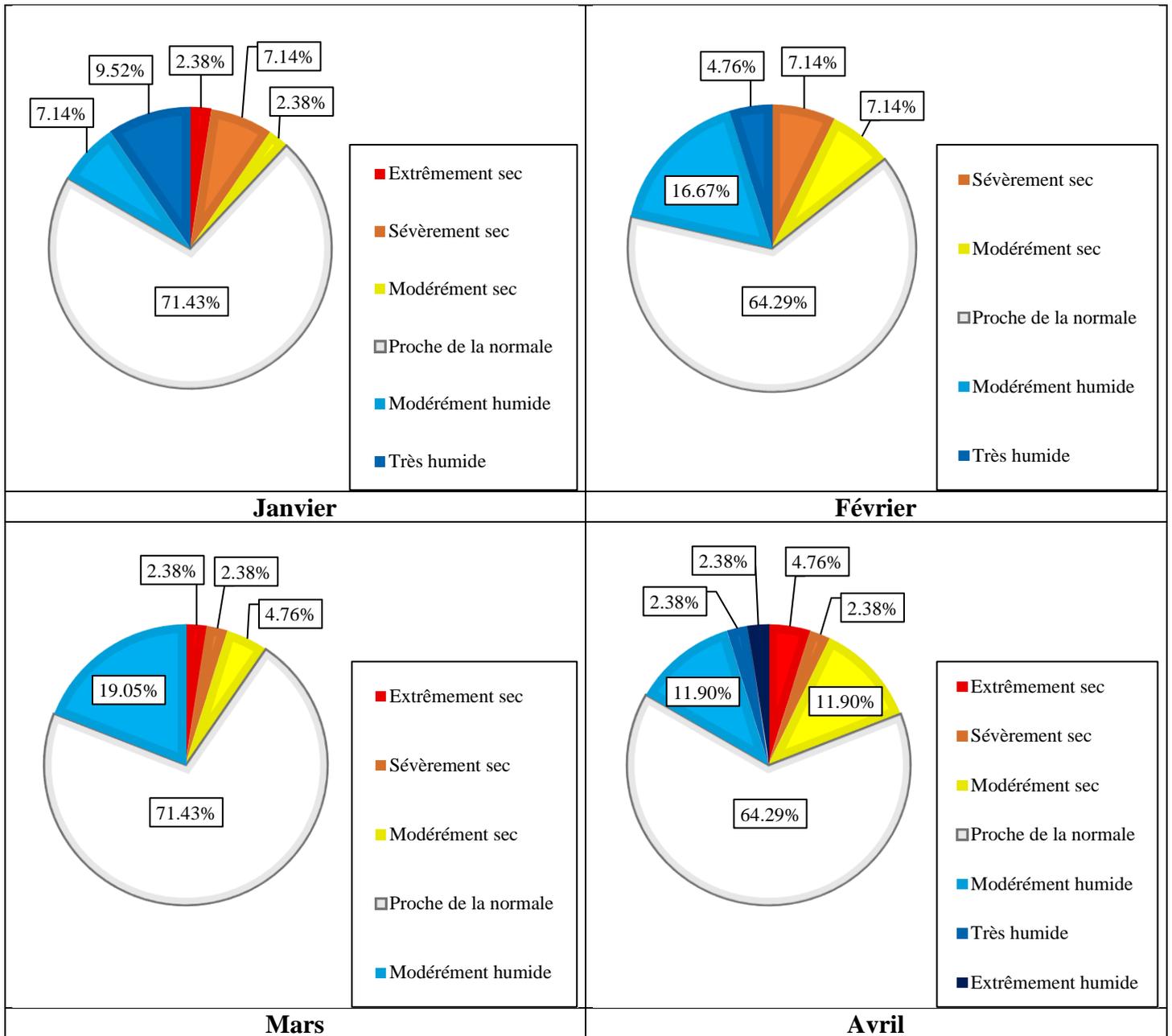
Figure VI.5 : Évolution du SPI à l'échelle de 3 mois pour la série des précipitations de la station de Sidi Bel Abbès (1977/1978-2018/2019)

D'après la répartition du SPI à l'échelle de 3 mois pour la série des précipitations enregistrées au niveau de la station de Sidi Bel Abbès pendant la période 1977/1978-2018/2019 (fig.VI.6), nous observons que les pourcentages les plus élevés sont visibles pour la classe proche de la normale, avec un minimum de 64,29% en Octobre, Février et Avril, et un maximum de 73,81% en Novembre.

Les pourcentages de la sécheresse extrême, sévère et modérée sont compris entre un minimum de 0% visible pour la première classe en Septembre, Octobre, Février et en Août, pour la deuxième classe en Novembre, Mai, Juillet et Août, et est de 2,38% en Janvier pour la troisième classe, et un maximum respectivement de 7,14% en Mai et Juillet, de 9,52% en Septembre, et de 14,29% en Août.

Pour la période humide, les pourcentages des classes modérément, très et extrêmement humide sont compris entre un minimum de 7,14% en Septembre, Octobre, Janvier et Juin pour la première classe, et de 0% en Mars pour la deuxième et en Novembre, Janvier, Février, Mars, Mai et en Juin pour la troisième, et un maximum respectivement de 19,05% en Mars, de 9,52% en Janvier, et de 4,76% en Octobre.





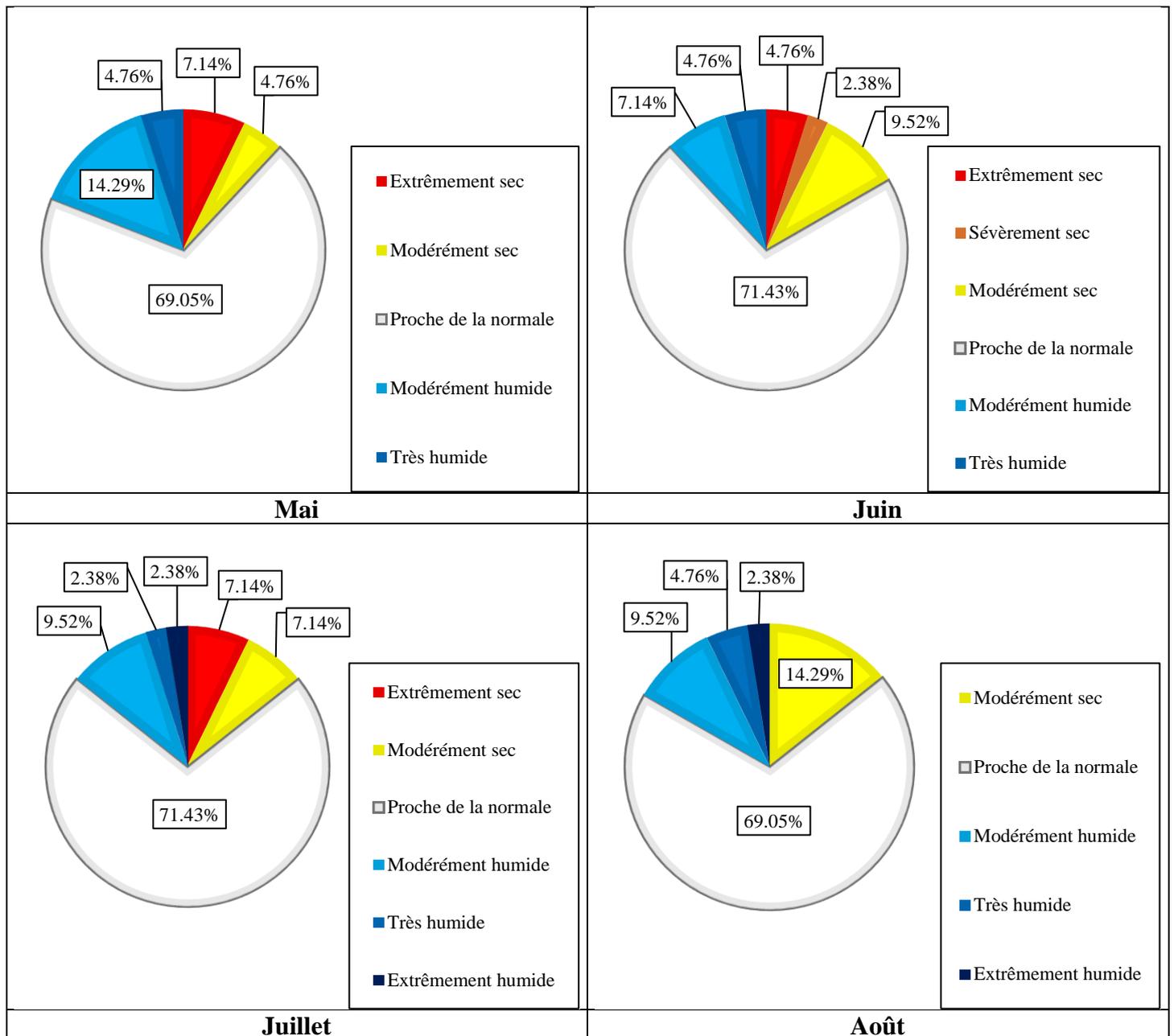


Figure VI.6 : Répartition du SPI à l'échelle de 3 mois pour la série de précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

VI.2.4. À l'échelle de 6 mois

Tableau VI.6 : Résultats de calcul du SPI-6 mois pour la série des précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

Année	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
1977/1978	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN							
1978/1979												
1979/1980												
1980/1981												
1981/1982												
1982/1983												
1983/1984												
1984/1985												
1985/1986												
1986/1987												
1987/1988												
1988/1989												
1989/1990												
1990/1991												
1991/1992												
1992/1993												
1993/1994												
1994/1995												
1995/1996												
1996/1997												
1997/1998												
1998/1999												
1999/2000												
2000/2001												
2001/2002												
2002/2003												
2003/2004												
2004/2005												
2005/2006												
2006/2007												
2007/2008												
2008/2009												
2009/2010												
2010/2011												
2011/2012												
2012/2013												
2013/2014												
2014/2015												
2015/2016												
2016/2017												
2017/2018												
2018/2019												

Légende

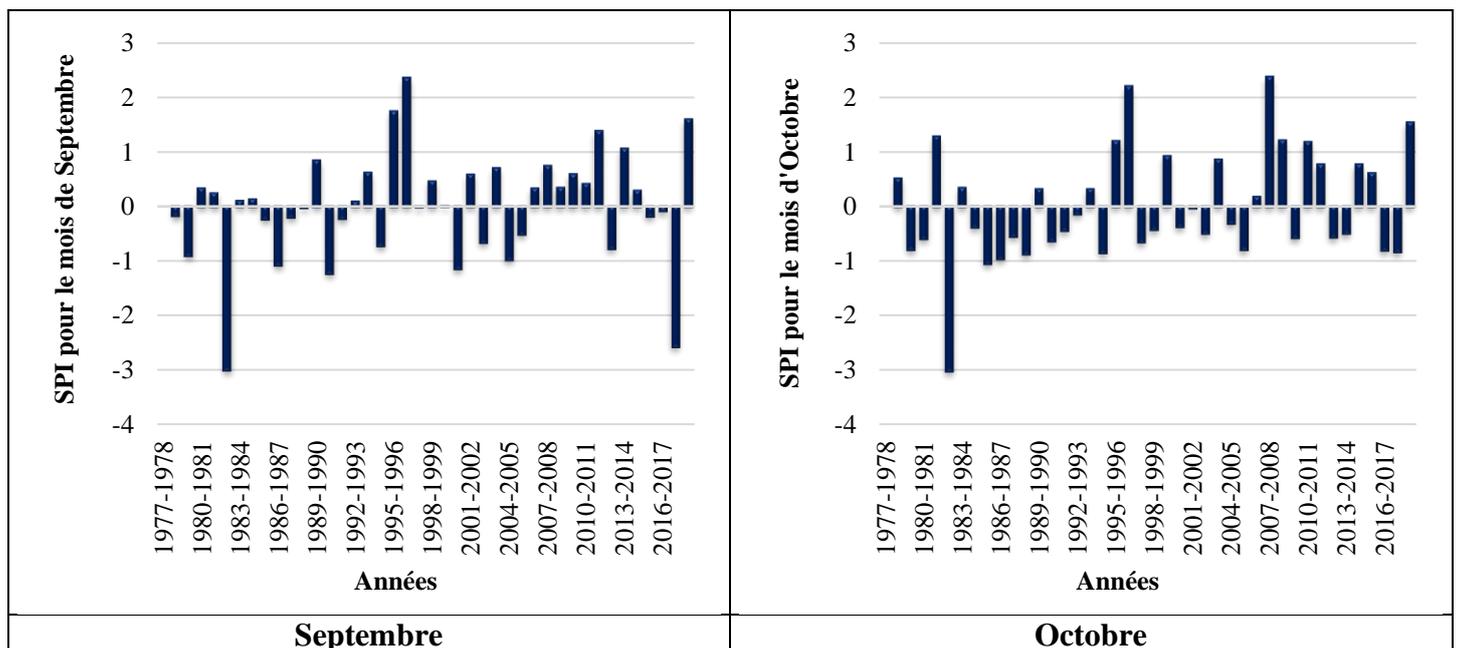
Extrêmement humide
 Très humide
 Modérément humide
 Proche de la normale
 Modérément sec
 Sévèrement sec
 Extrêmement sec
 Pas un nombre

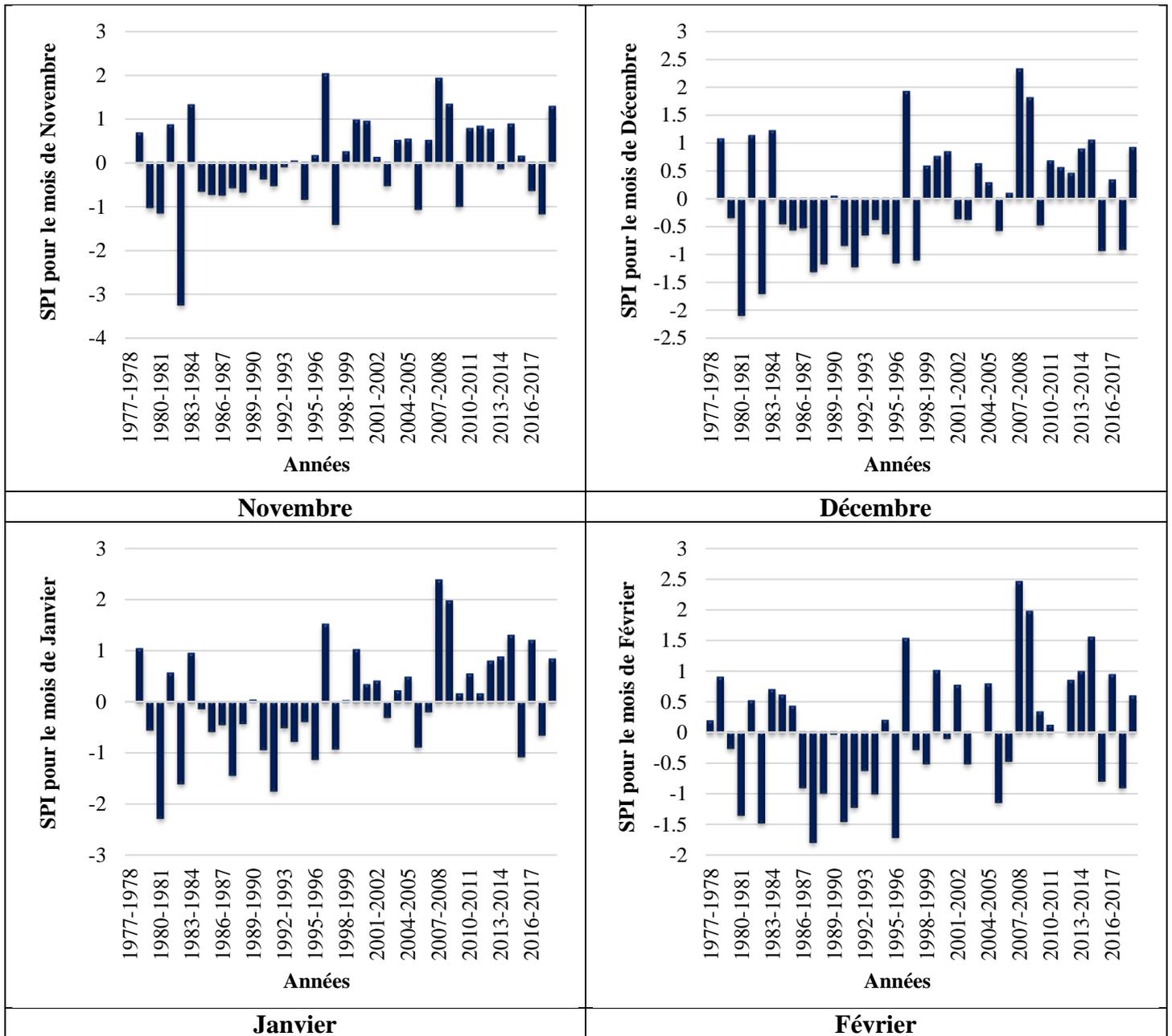


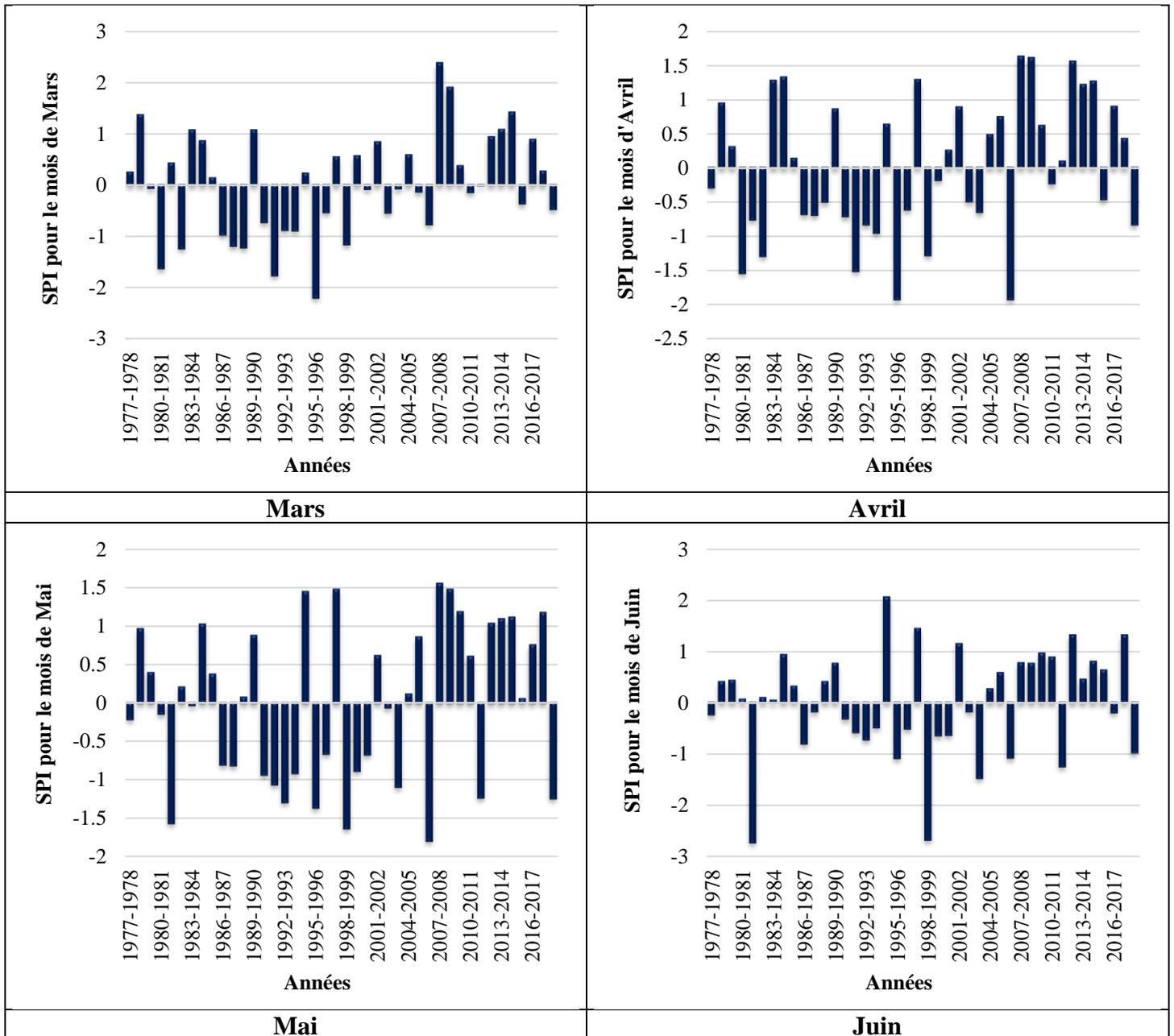
Selon les données du tableau VI.7 et la figure VI.7, notre série pluviométrique est caractérisée par l’alternance des séquences sèches et humides. La forte sécheresse est concentrée toujours au niveau des décennies des années 80 et 90 en particulier de Décembre jusqu’à Août. La sécheresse totale est observée en 1986/1987 pour tous les mois, par contre, aucune sécheresse n’est visible pour 2007/2008.

Tableau VI.7 : SPI maximaux et minimaux à l’échelle de 6 mois pour la série des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

Mois	Période humide		Période sèche	
	SPI max	Date	SPI min	Date
Septembre	2,35	1996/1997	-3	1982/1983
Octobre	2,37	2007/2008	-3,02	1982/1983
Novembre	2,01	1996/1997	-3,22	1982/1983
Décembre	2,31	2007/2008	-2,08	1980/1981
Janvier	2,37	2007/2008	-2,26	1980/1981
Février	2,44	2007/2008	-1,78	1987/1988
Mars	2,37	2007/2008	-2,2	1995/1996
Avril	1,62	2007/2008	-1,92	1995/1996, 2006/2007
Mai	1,55	2007/2008	-1,79	2006/2007
Juin	2,05	1994/1995	-2,72	1981/1982
Juillet	2,25	1994/1995	-3,06	2016/2017
Août	1,91	1994/1995	-2,44	1999/2000







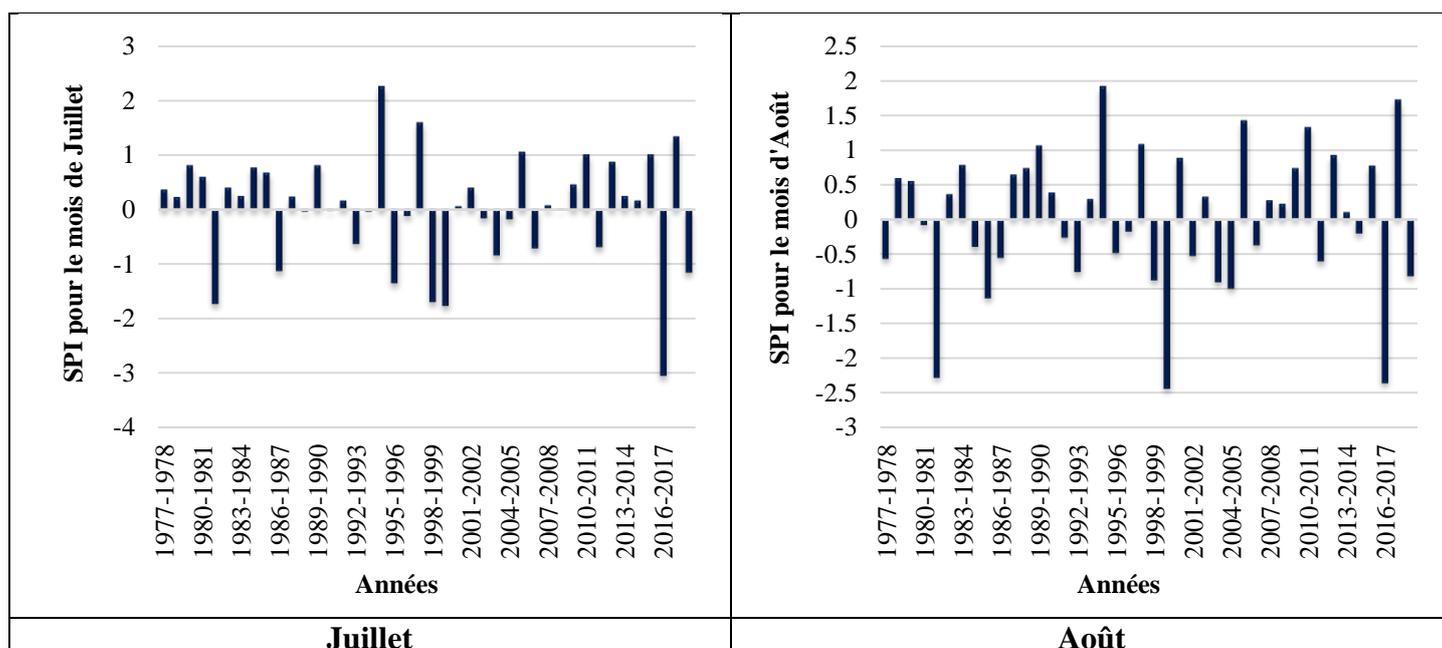
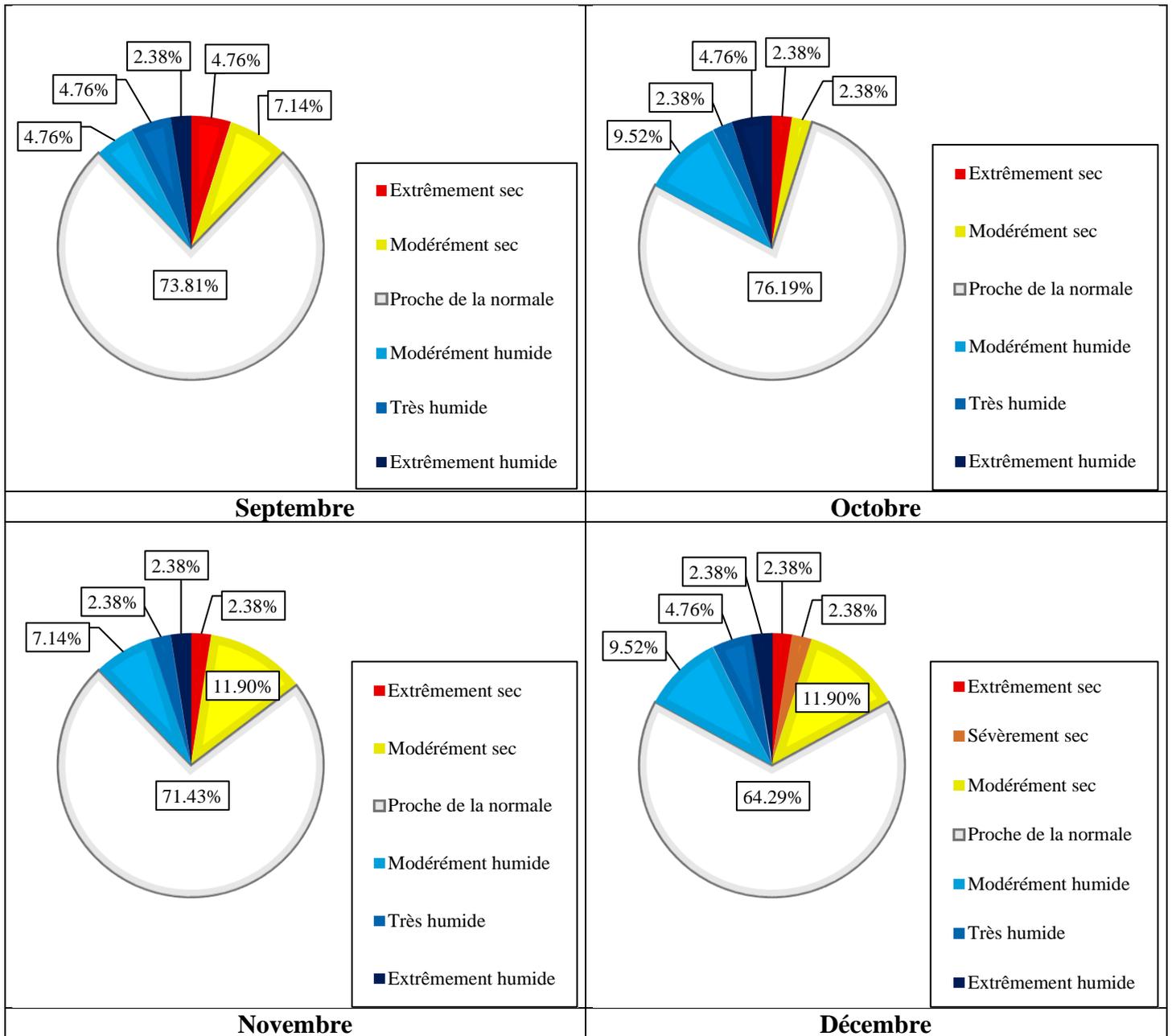


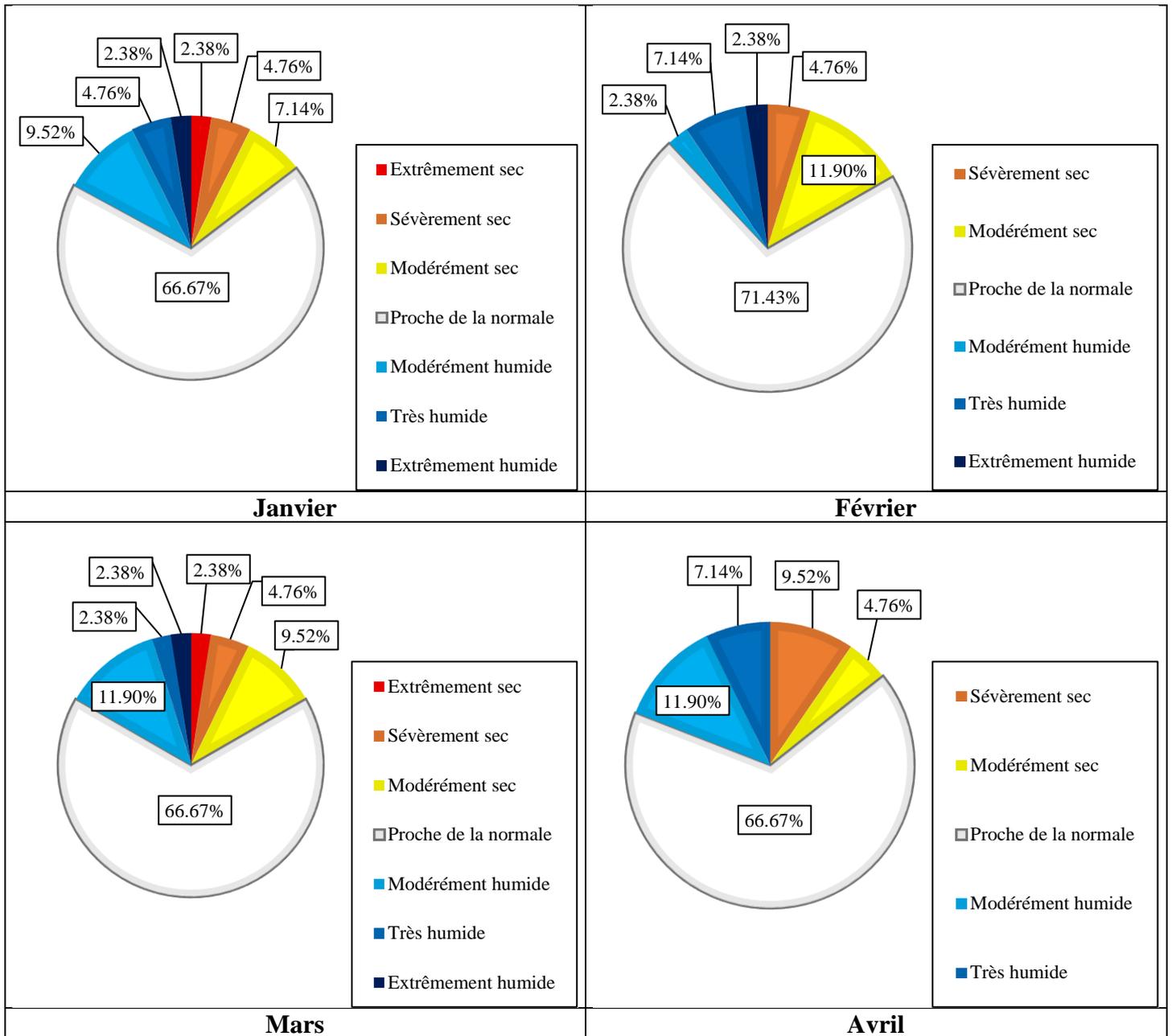
Figure VI.7 : Évolution du SPI à l'échelle de 6 mois pour la série des précipitations de la station de Sidi Bel Abbès (1977/1978-2018/2019)

Selon la répartition du SPI à l'échelle de 6 mois (fig.VI.8), notre série pluviométrique est caractérisée aussi par la dominance de la classe proche de la normale comme les pas de temps précédents, qui est définie par un pourcentage minimal de 54,76% en Mai, et un pourcentage maximal de 80,49% en Octobre.

Pour le reste des classes, le pourcentage nul caractérise les classes extrêmement sèches visibles pour les mois de Février, Avril et Mai, et sévèrement sèches pour les mois de Septembre, Octobre, Novembre, Juin et Août. Les pourcentages maximaux pour ces deux classes respectivement sont de l'ordre de 7,14% en Août, et 9,52% en Avril, de plus, le pourcentage de la classe modérément sèche varie entre 2,38% en Octobre et 14,29% en Mai.

En ce qui concerne la période humide, le pourcentage de l'humidité modérée est compris entre 2,38% en Février et 21,43% en Mai. Les classes très humide et extrêmement humide sont caractérisées par un pourcentage minimal qui est de 0% remarquable en Juin pour la première classe, et en Avril, Mai et Août pour la deuxième, le pourcentage maximal est respectivement de l'ordre de 7,14% en Février et Avril, et de 4,76% en Octobre.





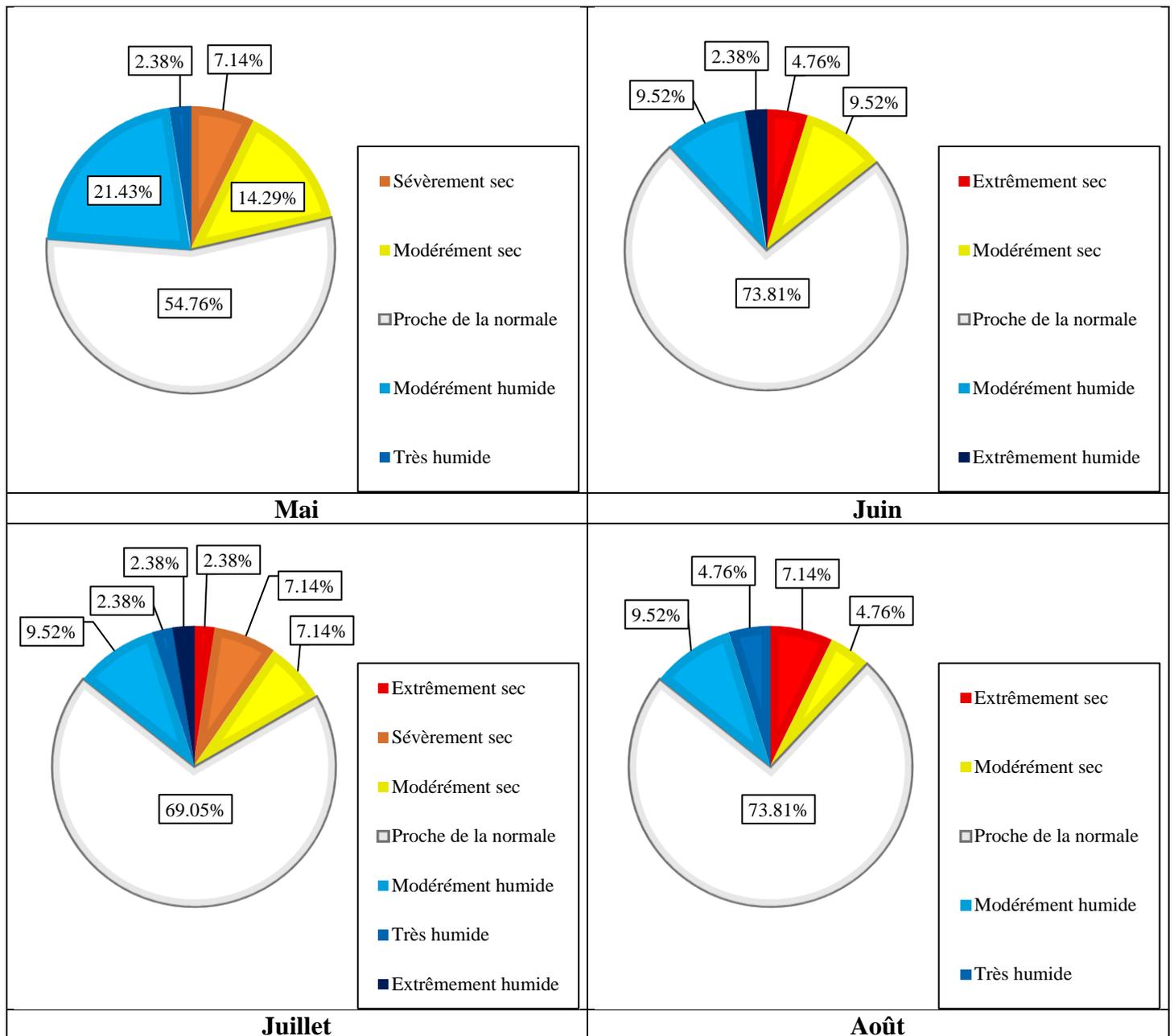


Figure VI.8 : Répartition du SPI à l'échelle de 6 mois pour la série des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

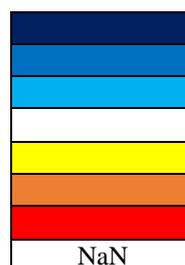
VI.2.5. À l'échelle de 9 mois

Tableau VI.8 : Résultats de calcul du SPI-9 mois pour la série des précipitations de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

Année	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
1977/1978	NaN	NaN										
1978/1979												
1979/1980												
1980/1981												
1981/1982												
1982/1983												
1983/1984												
1984/1985												
1985/1986												
1986/1987												
1987/1988												
1988/1989												
1989/1990												
1990/1991												
1991/1992												
1992/1993												
1993/1994												
1994/1995												
1995/1996												
1996/1997												
1997/1998												
1998/1999												
1999/2000												
2000/2001												
2001/2002												
2002/2003												
2003/2004												
2004/2005												
2005/2006												
2006/2007												
2007/2008												
2008/2009												
2009/2010												
2010/2011												
2011/2012												
2012/2013												
2013/2014												
2014/2015												
2015/2016												
2016/2017												
2017/2018												
2018/2019												

Légende

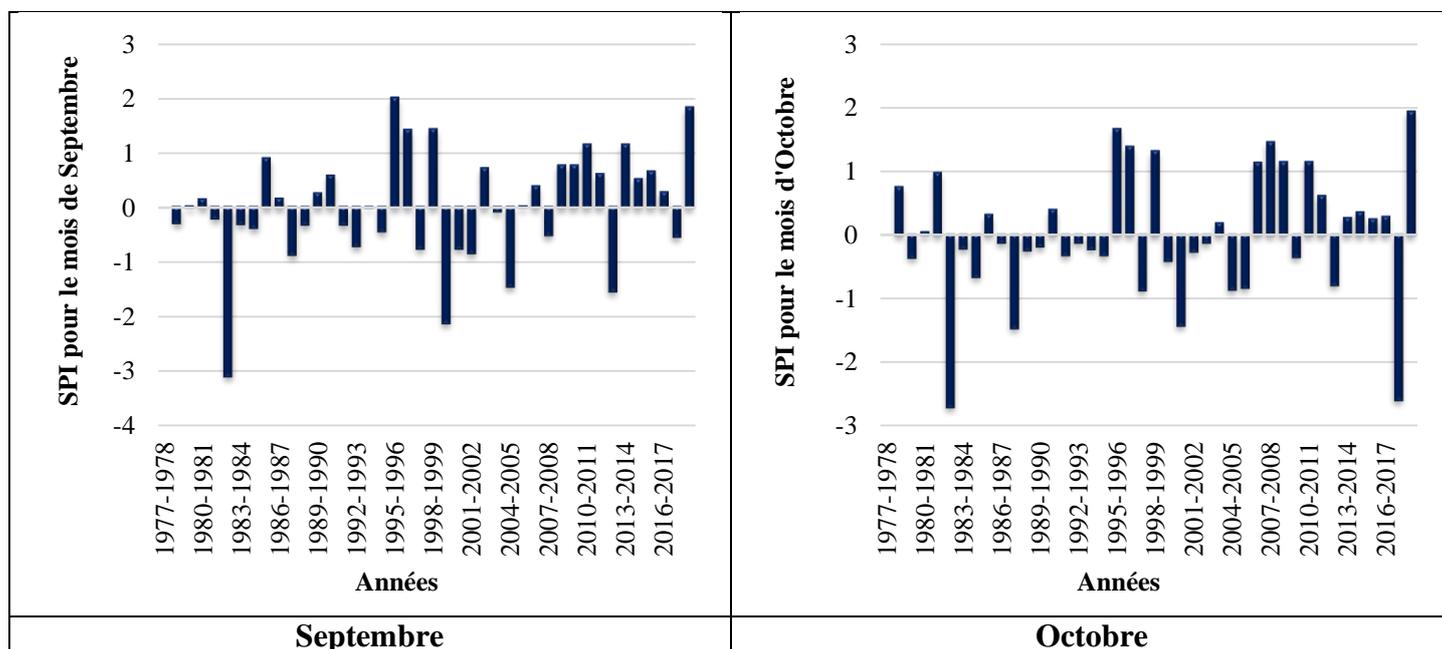
Extrêmement humide
 Très humide
 Modérément humide
 Proche de la normale
 Modérément sec
 Sévèrement sec
 Extrêmement sec
 Pas un nombre

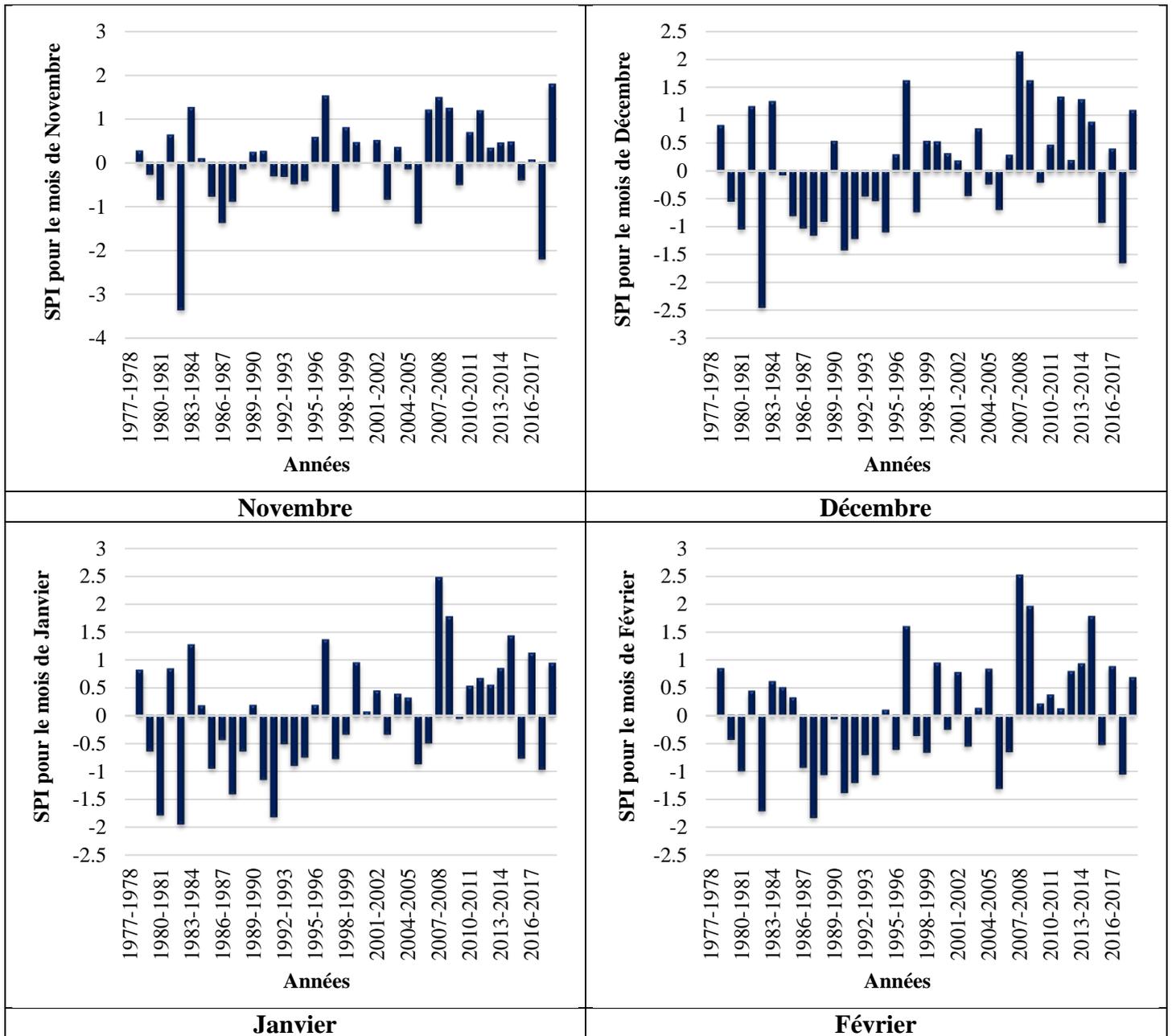


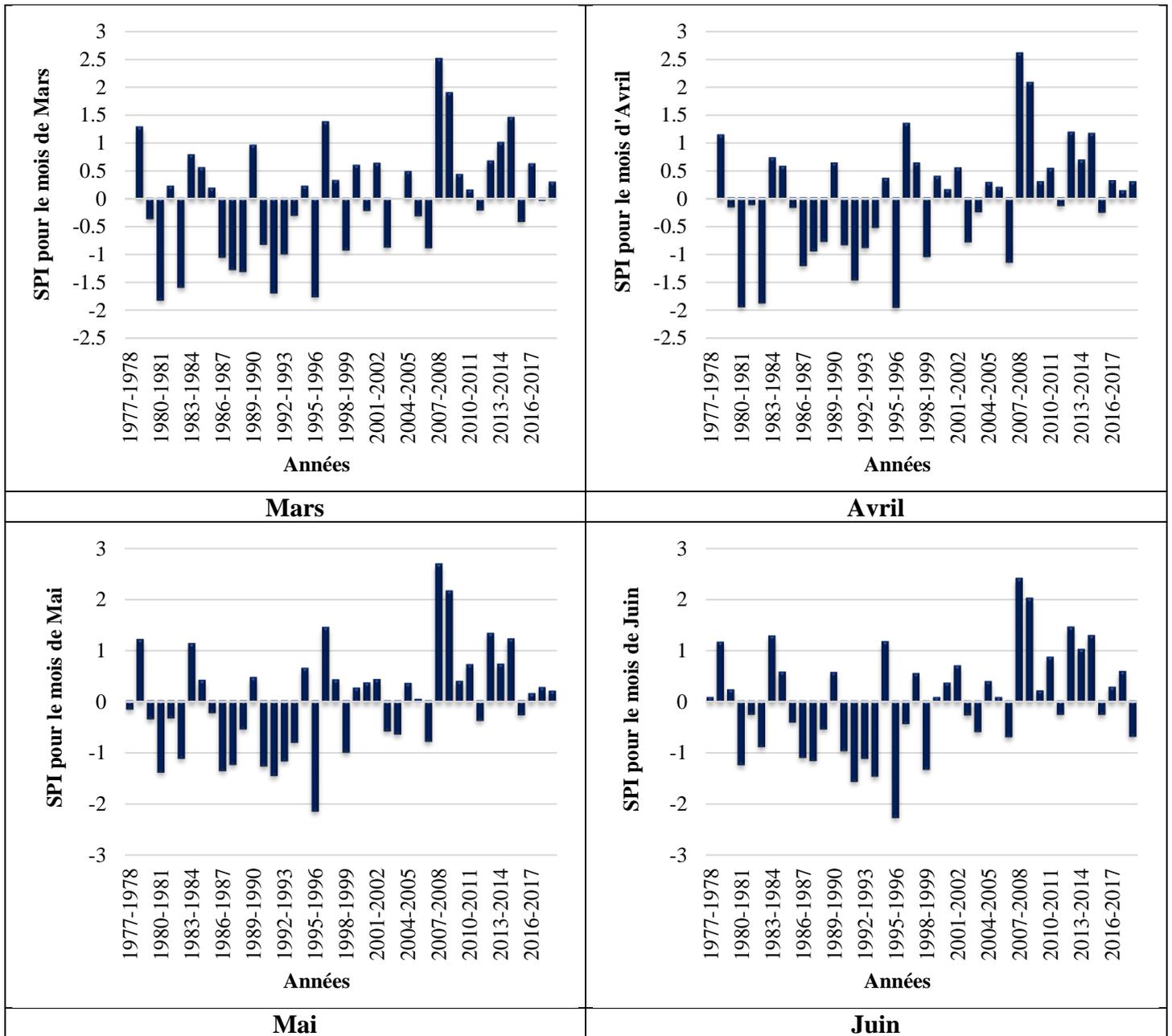
Selon le tableau VI.9 et la figure VI.9, notre série pluviométrique est caractérisée par l’alternance des épisodes secs et humides, la forte sécheresse est concentrée toujours aux années 80 et 90 pratiquement pour tous les mois. En plus, nous remarquons une sécheresse totale en 1987/1988 et de 1991/1992 à 1993/1994, observée pour tous les mois. D’autre part, aucune sécheresse n’est observée en 2008/2009, 2010/2011, 2013/2014, 2014/2015 et 2016/2017.

Tableau VI.9 : valeurs de SPI-9 maximaux et minimaux pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

Mois	Période humide		Période sèche	
	SPI max	Date	SPI min	Date
Septembre	2	1995/1996	-3,09	1982/1983
Octobre	1,93	2018/2019	-2,71	1982/1983
Novembre	1,78	2018/2019	-3,34	1982/1983
Décembre	2,11	2007/2008	-2,43	1982/1983
Janvier	2,46	2007/2008	-1,93	1982/1983
Février	2,5	2007/2008	-1,82	1987/1988
Mars	2,5	2007/2008	-1,81	1980/1981
Avril	2,6	2007/2008	-1,94	1995/1996
Mai	2,68	2007/2008	-2,13	1995/1996
Juin	2,4	2007/2008	-2,25	1995/1996
Juillet	1,68	1994/1995	-2,09	1995/1996
Août	2,07	1994/1995	-1,69	1998/1999







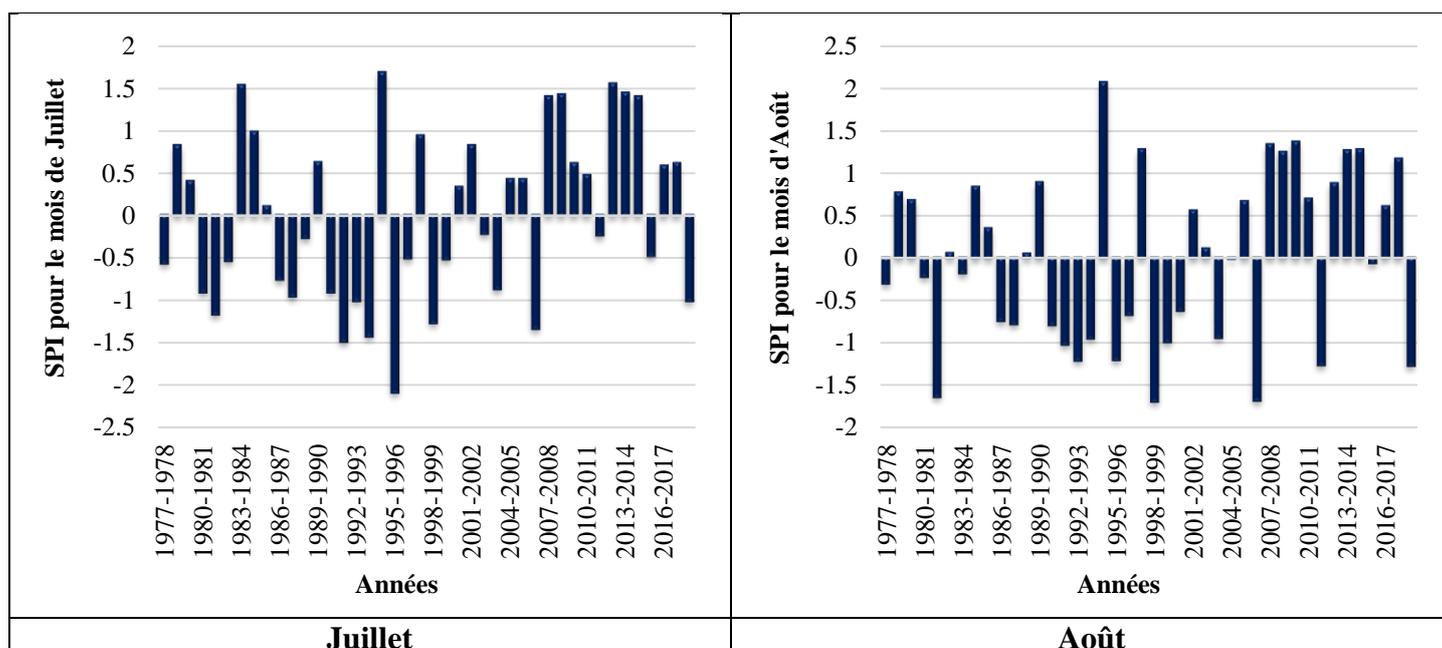


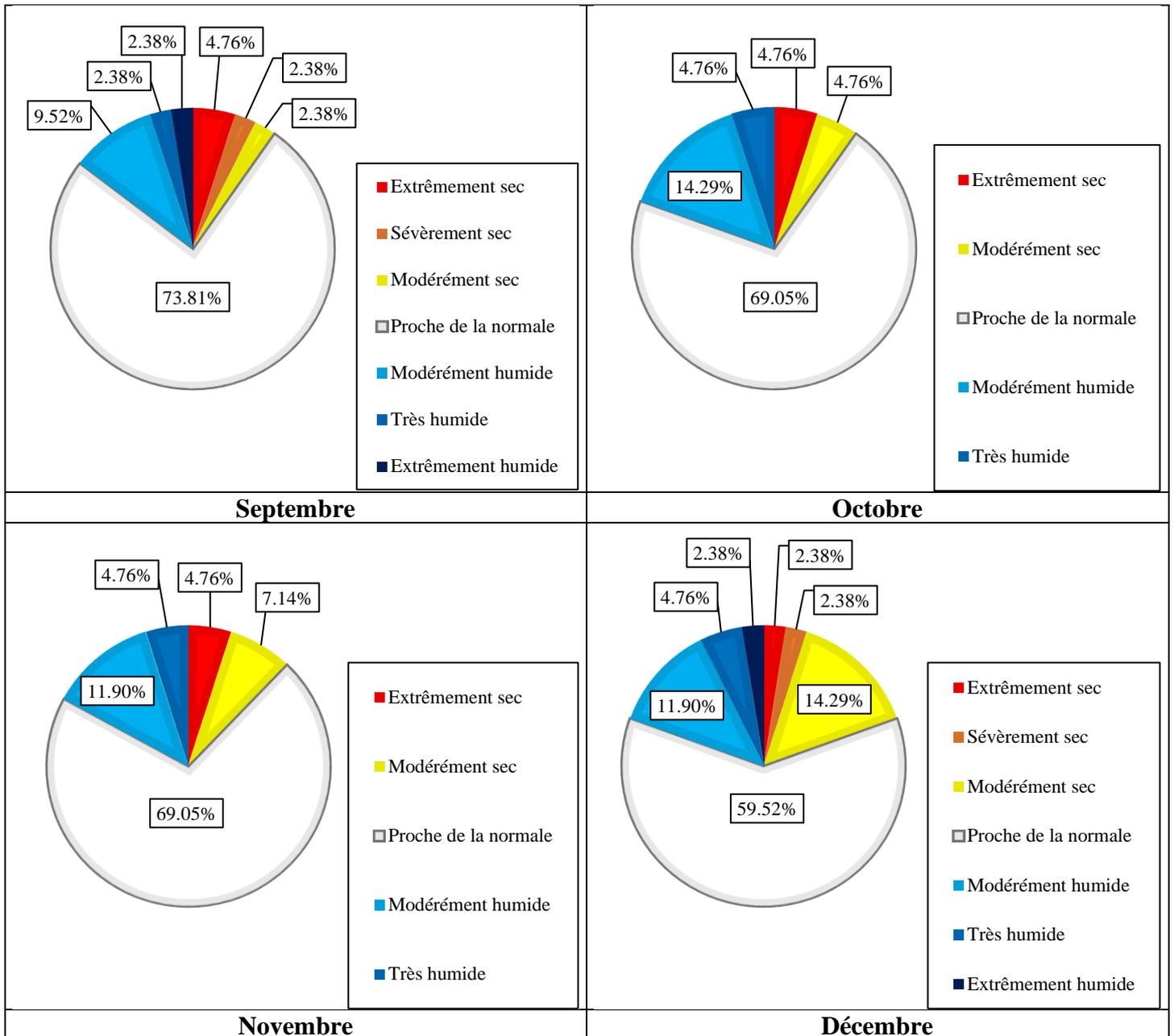
Figure VI.9 : Évolution du SPI à l'échelle de 9 mois pour la série de précipitations de la station de Sidi Bel Abbès (1977/1978-2018/2019)

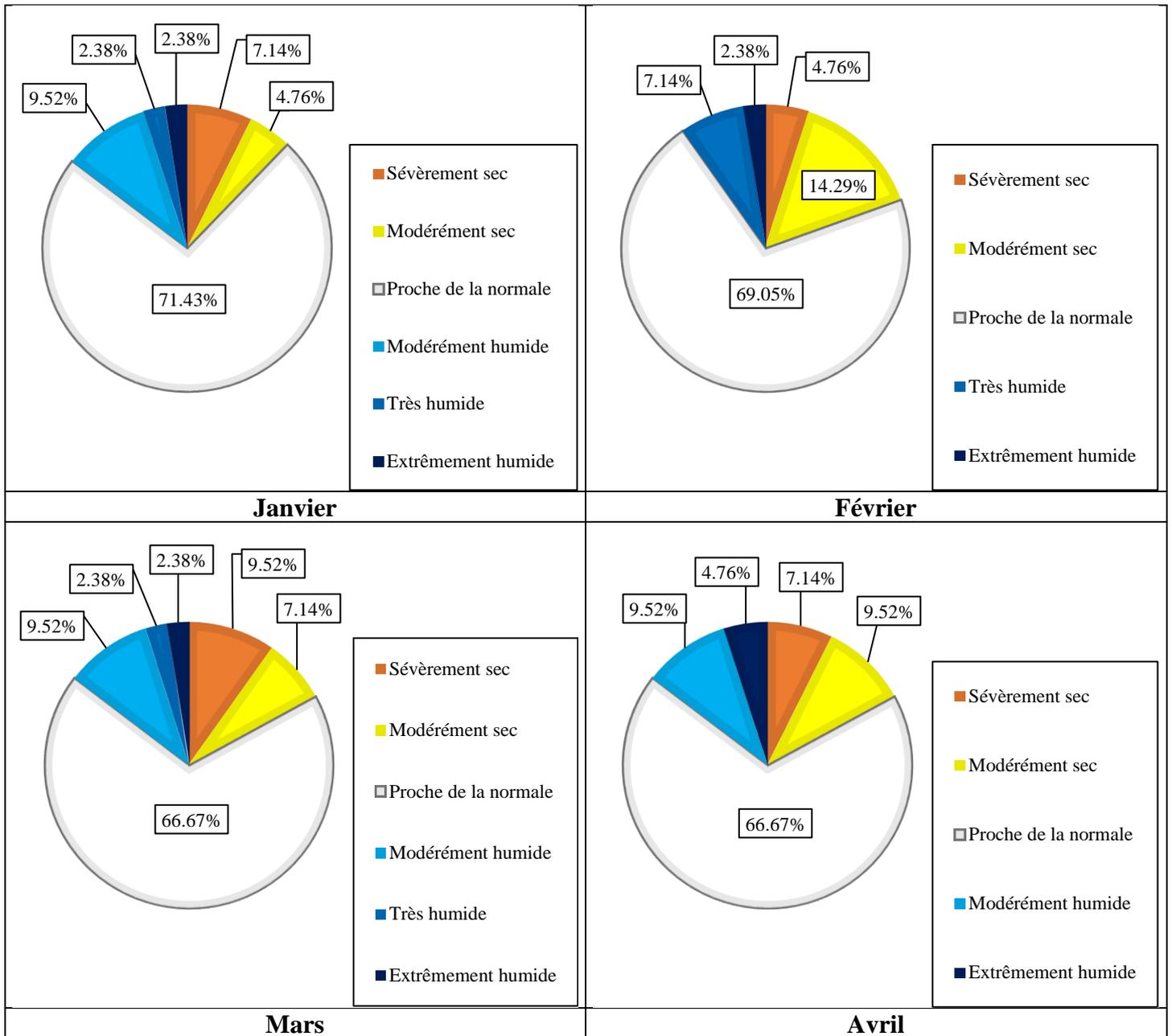
La répartition du SPI-9 (fig.VI.10) évoque le même résultat que précédemment concernant la dominance de la classe proche de la normale dont le pourcentage varie entre 59,52% en Décembre et 73,81% en Septembre.

Aussi, il n'a pas été enregistré de sécheresse extrême de Janvier jusqu'à Avril et en Août, et de sécheresse sévère en Octobre, Novembre, Mai et Juillet. De même, nous n'avons pas détecté d'humidité modérée en Février, ni très humide en Avril, Mai, Juin et Août, et d'humidité extrême en Octobre, Novembre et Juillet. Pour la classe restante (la sécheresse modérée), son pourcentage minimal de 2,38% est enregistré en Septembre.

En outre, nous citons le pourcentage maximal pour les classes suivantes :

- Extrêmement sec de 4,76% en Septembre, Octobre et Novembre,
- Sévèrement sec de 9,52% en Mars,
- Modérément sec de 16,67% en Mai et Juillet,
- Modérément humide de 16,67% en Août,
- Très humide de 7,14% en Février et Juillet,
- Extrêmement humide de 4,76% d'Avril jusqu'à Juin.





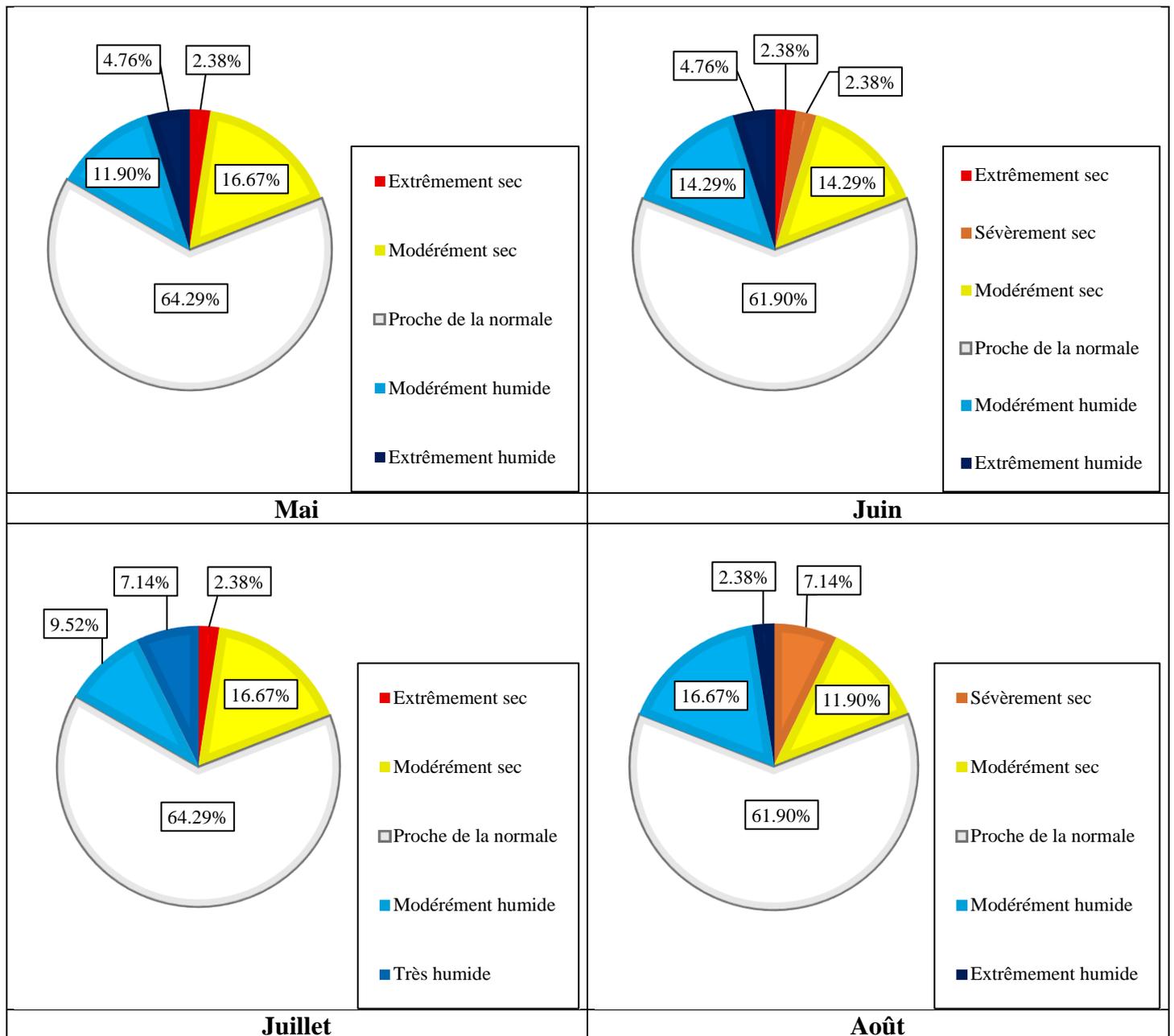


Figure VI.10 : Répartition du SPI-9 pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

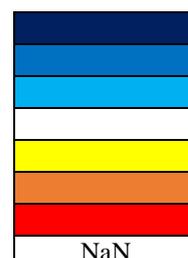
VI.2.6. À l'échelle de 12 mois

Tableau VI.10 : Résultats de calcul du SPI-12 mois pour la série des précipitations de la station de Sidi Bel Abbès (1977/1978-2018/2019)

Année	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
1977/1978	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN						
1978/1979												
1979/1980												
1980/1981												
1981/1982												
1982/1983												
1983/1984												
1984/1985												
1985/1986												
1986/1987												
1987/1988												
1988/1989												
1989/1990												
1990/1991												
1991/1992												
1992/1993												
1993/1994												
1994/1995												
1995/1996												
1996/1997												
1997/1998												
1998/1999												
1999/2000												
2000/2001												
2001/2002												
2002/2003												
2003/2004												
2004/2005												
2005/2006												
2006/2007												
2007/2008												
2008/2009												
2009/2010												
2010/2011												
2011/2012												
2012/2013												
2013/2014												
2014/2015												
2015/2016												
2016/2017												
2017/2018												
2018/2019												

Légende

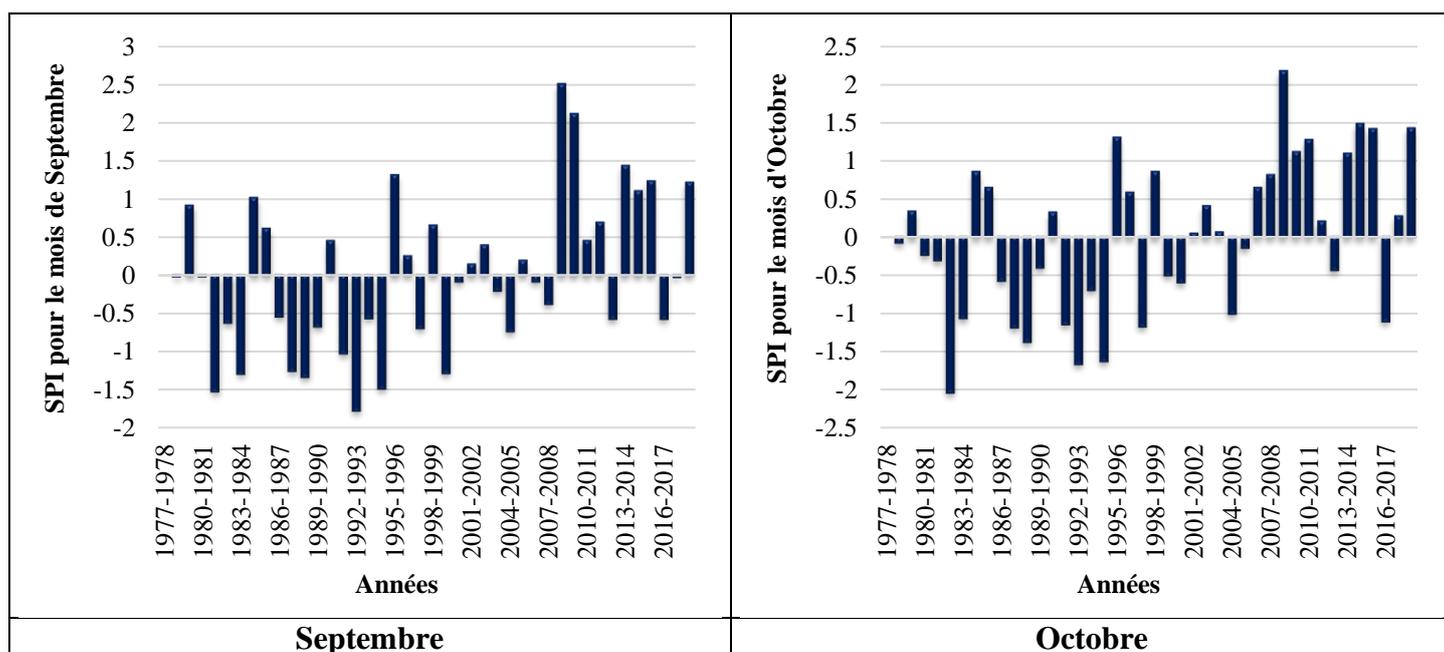
Extrêmement humide
 Très humide
 Modérément humide
 Proche de la normale
 Modérément sec
 Sévèrement sec
 Extrêmement sec
 Pas un nombre

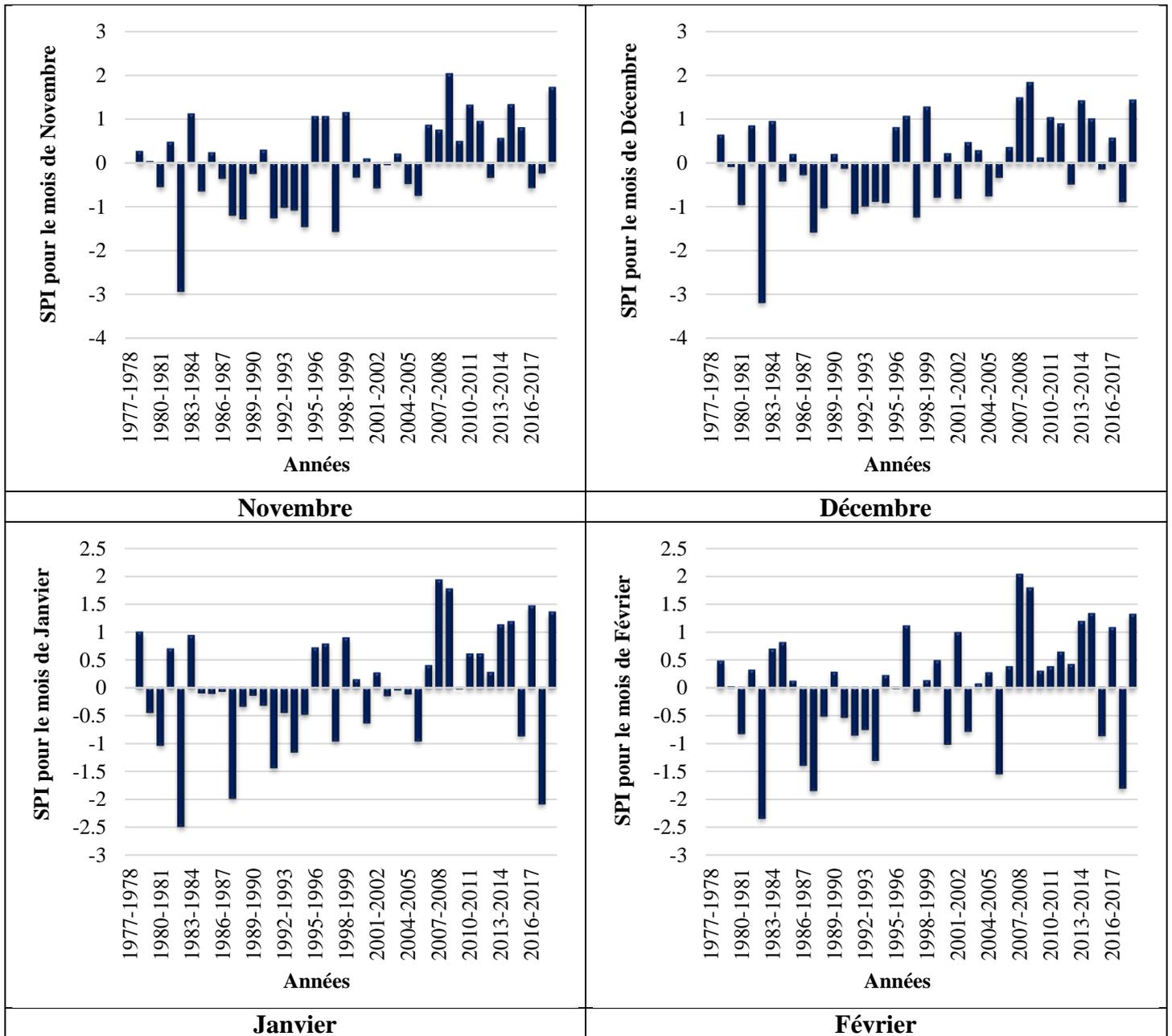


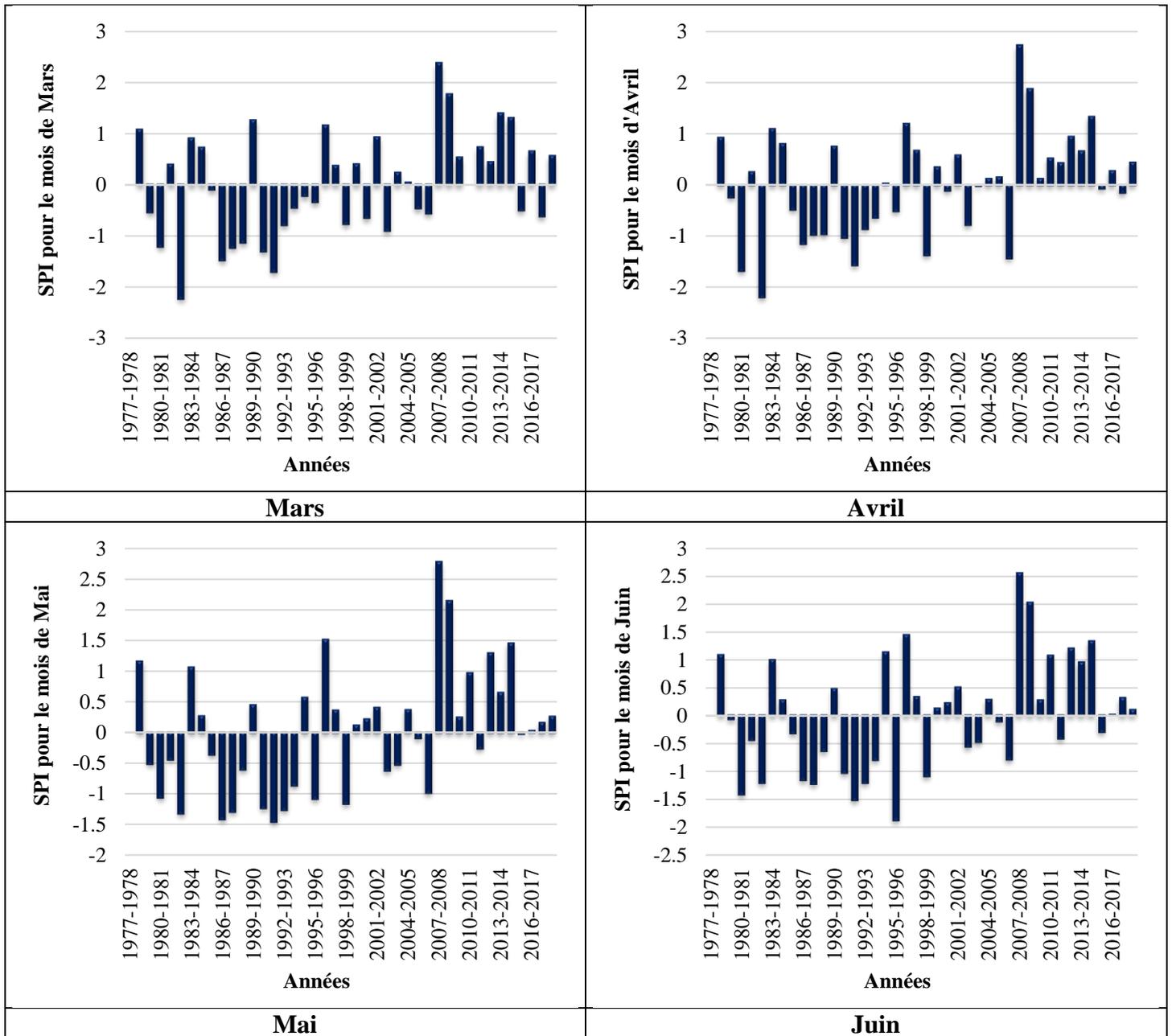
L'évolution du SPI à l'échelle de 12 mois pour la série des précipitations mensuelles de Sidi Bel Abbes pendant la période 1977/1978-2018/2019 (fig.VI.11) confirme que la succession des années humides et sèches est désordonnée, toutefois, une nette tendance vers la sécheresse est bien discernée dans notre série depuis l'année 1987/1988 jusqu'à 2006/2007, où nous avons noté les valeurs les plus basses de notre indice : en Septembre de -1,77 (1992/1993), Octobre de -2,03 (1982/1983), Novembre de -2,91(1982/1983), Décembre de -3,16 (1982/1983), Janvier de -2,47 (1982/1983), Février de -2,33 (1982/1983), Mars de -2,22 (1982/1983), Avril de -2,19 (1982/1983), Mai est de -1,45 (1991/1992), Juin de -1,88 (1995/1996), Juillet de -2,13 (1995/1996) et Août de -2,02 (1995/1996).

Pour la deuxième partie de notre série 2007/2008 à 2018/2019, la plupart des valeurs du SPI sont positives, ce qui indique une présence d'humidité. L'année (2008/2009), a engendré les valeurs les plus élevées pour les mois de Septembre (2,5), Octobre (2,17), Novembre (2,02) et Décembre (1,82).

Pour le reste des mois, les valeurs max sont enregistrées en (2007/2008) avec 1,9 en Janvier, 2,02 en Février, 2,37 en Mars, 2,72 en Avril, 2,77 en Mai, 2,55 en Juin, 2,51 en Juillet et 2,56 en Août.







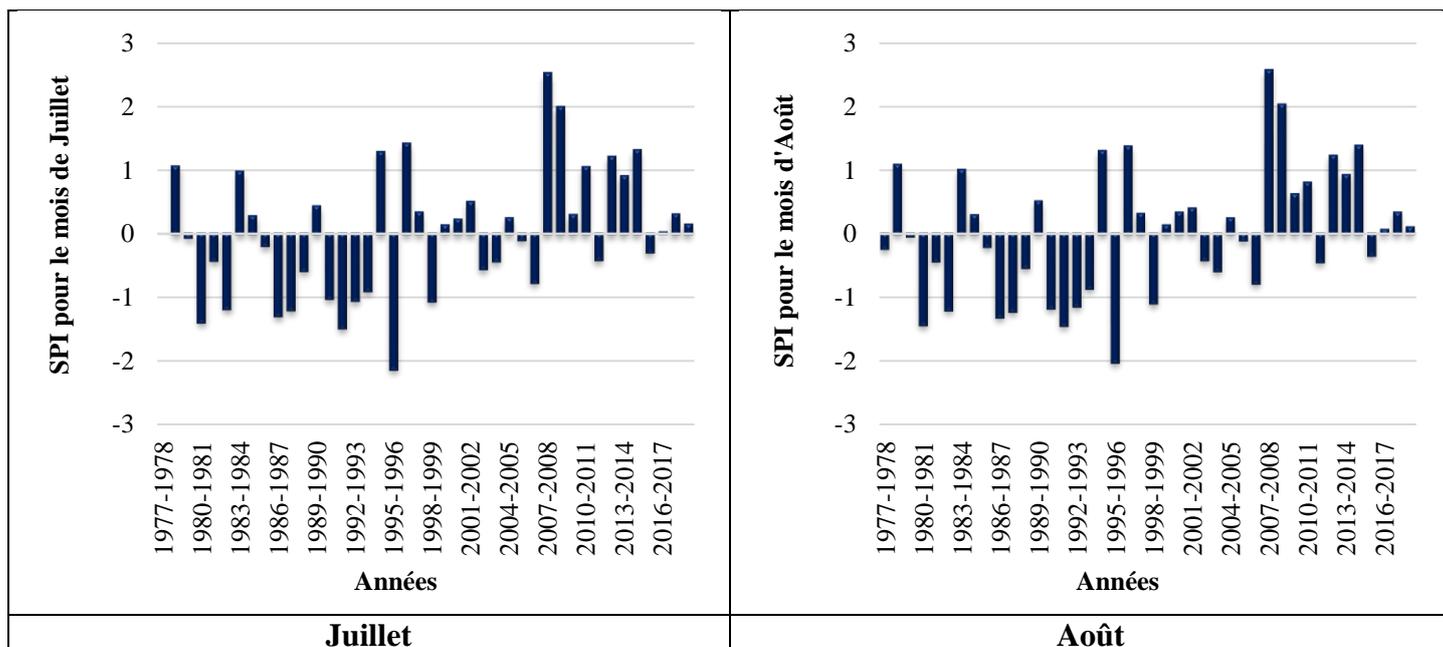
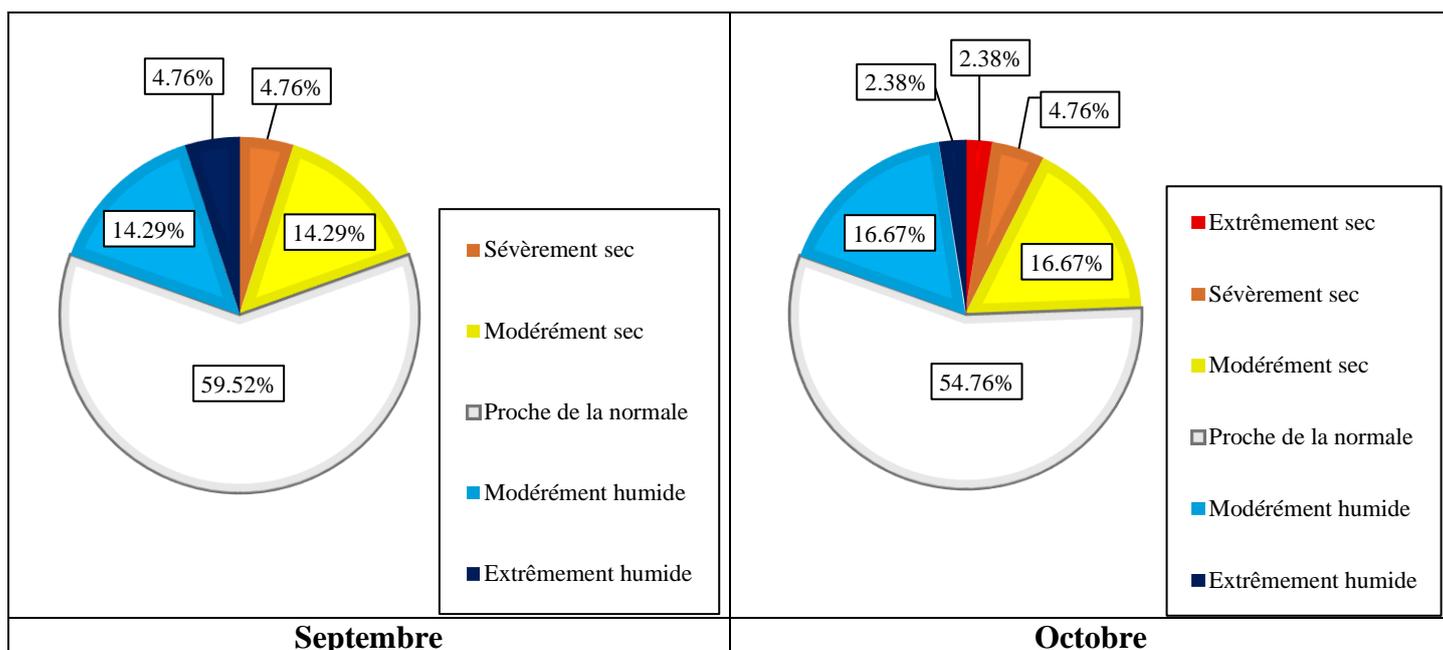


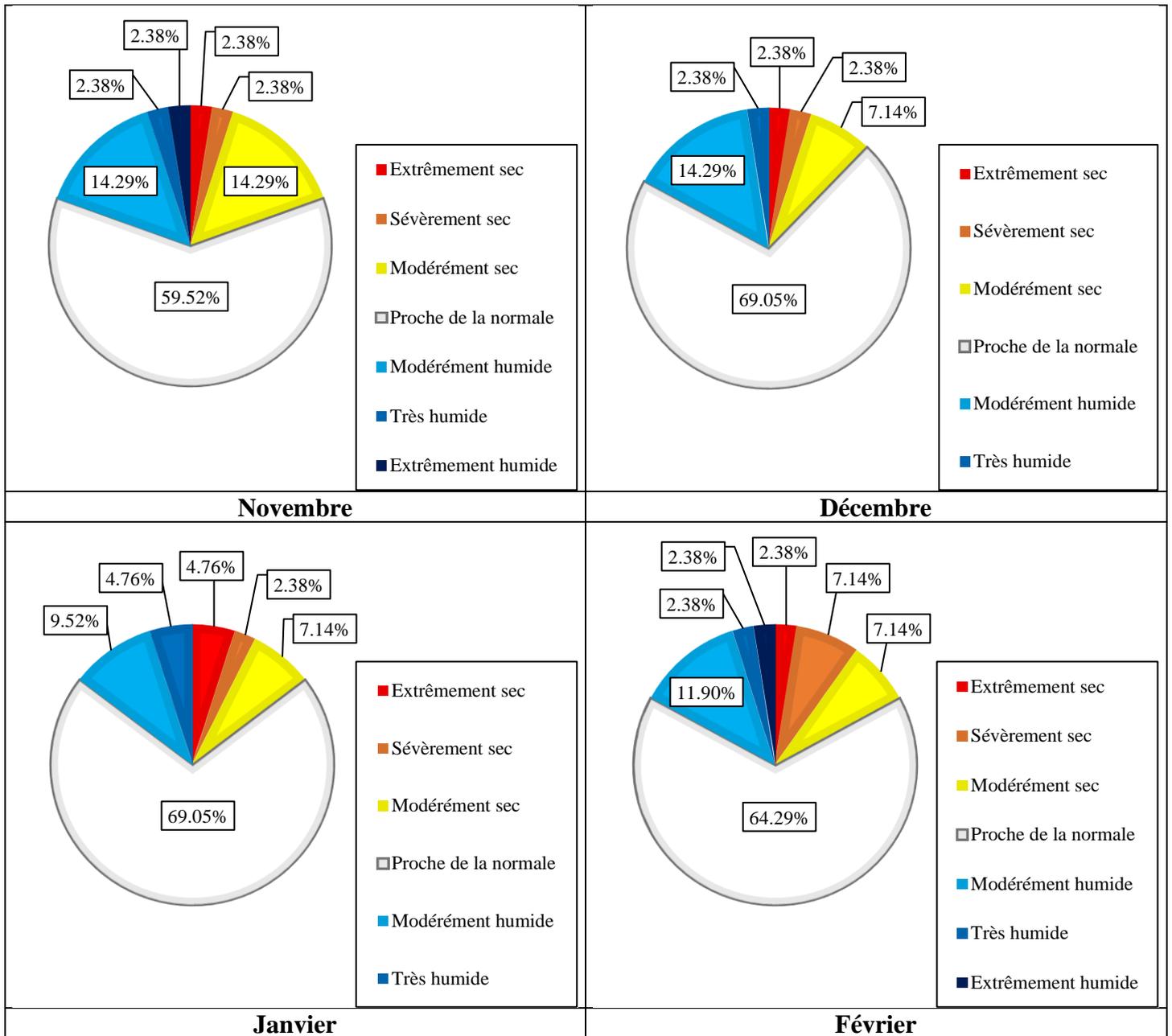
Figure VI.11 : Évolution du SPI à l'échelle de 12 mois pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

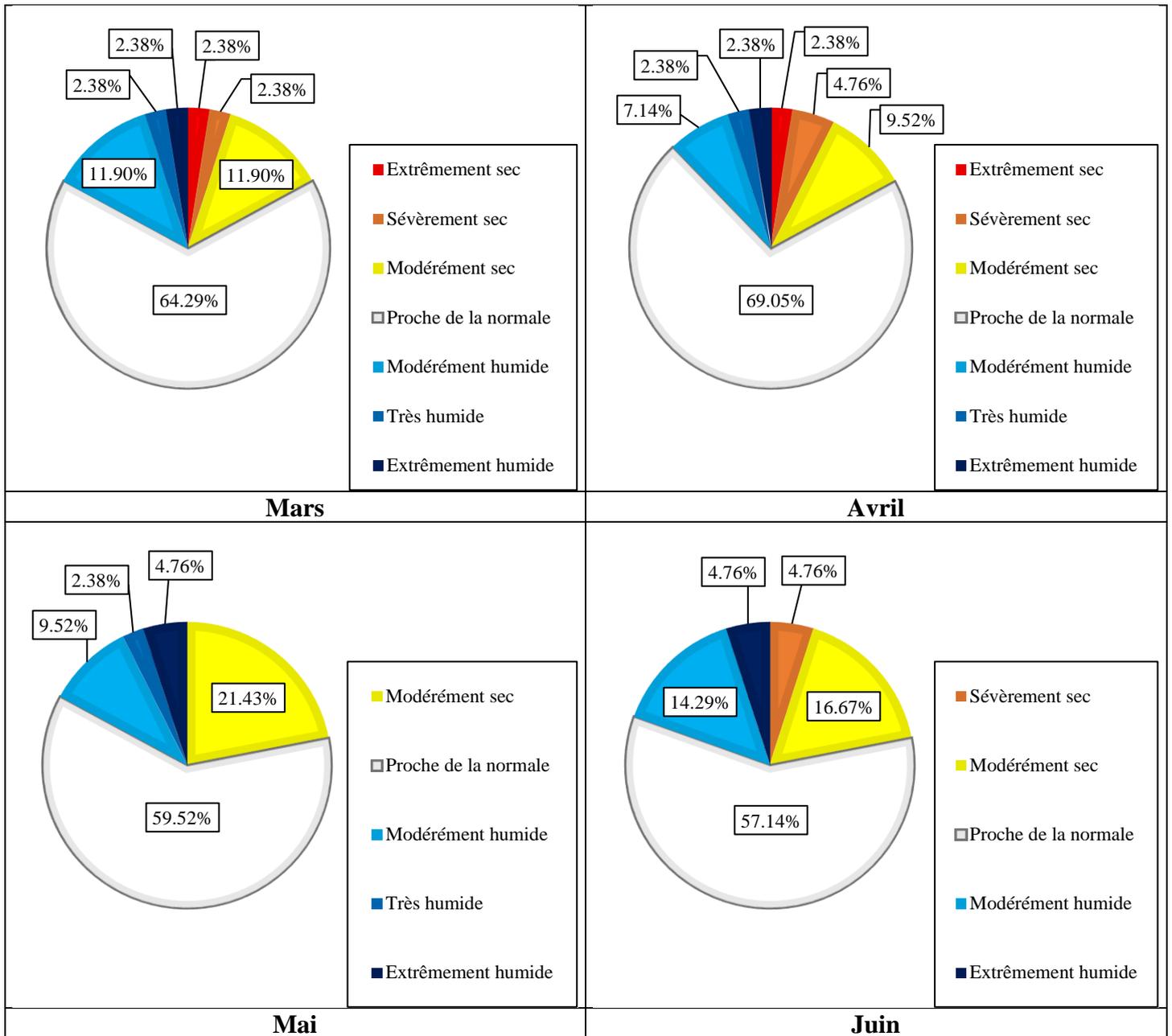
La répartition du SPI-12 (fig.VI.12) montre une dominance de la classe proche de la normale, elle atteint les 69,05% aux mois de Décembre, Janvier et Avril.

Le pourcentage de la classe modérément sèche ne dépasse pas les 22%, il est de l'ordre de 19,05% en Juillet et Août et de 21,43% en Mai. En Septembre, Octobre et Novembre, la classe modérément sèche a la même valeur de 16,76% que modérément humide.

Le pourcentage maximal que la classe modérément humide a atteint de 16,67% apparaît en Octobre. Pour la classe sévèrement sèche, le max de 7,14% est atteint en Février.







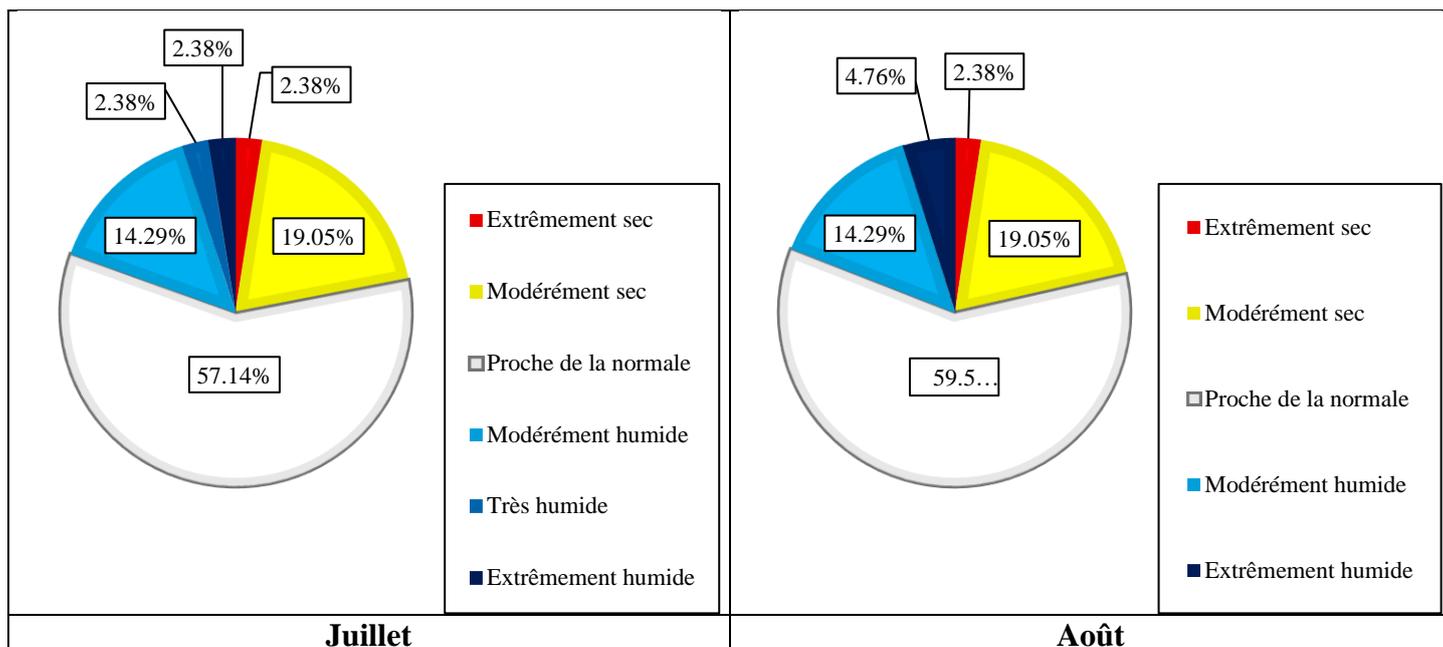


Figure VI.12 : Répartition du SPI à l'échelle de 12 mois pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

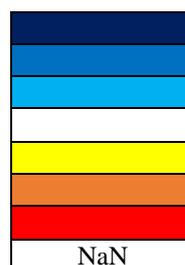
VI.2.7. À l'échelle de 18 mois

Tableau VI.11 : Résultats de calcul du SPI-18 mois pour la série des précipitations de la station de Sidi Bel Abbès (1977/1978-2018/2019)

Année	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
1977/1978	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN						
1978/1979	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN							
1979/1980												
1980/1981												
1981/1982												
1982/1983												
1983/1984												
1984/1985												
1985/1986												
1986/1987												
1987/1988												
1988/1989												
1989/1990												
1990/1991												
1991/1992												
1992/1993												
1993/1994												
1994/1995												
1995/1996												
1996/1997												
1997/1998												
1998/1999												
1999/2000												
2000/2001												
2001/2002												
2002/2003												
2003/2004												
2004/2005												
2005/2006												
2006/2007												
2007/2008												
2008/2009												
2009/2010												
2010/2011												
2011/2012												
2012/2013												
2013/2014												
2014/2015												
2015/2016												
2016/2017												
2017/2018												
2018/2019												

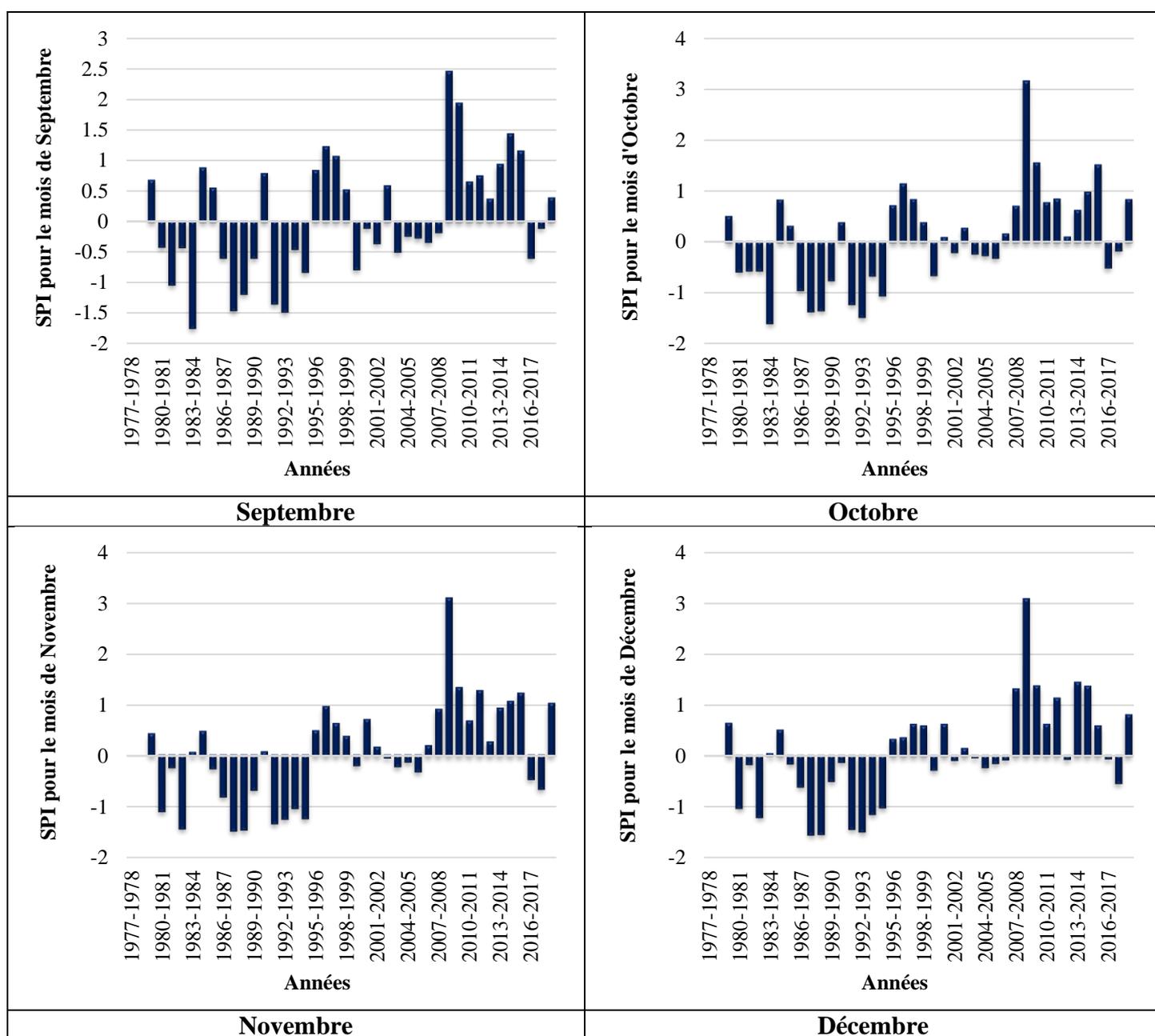
Légende

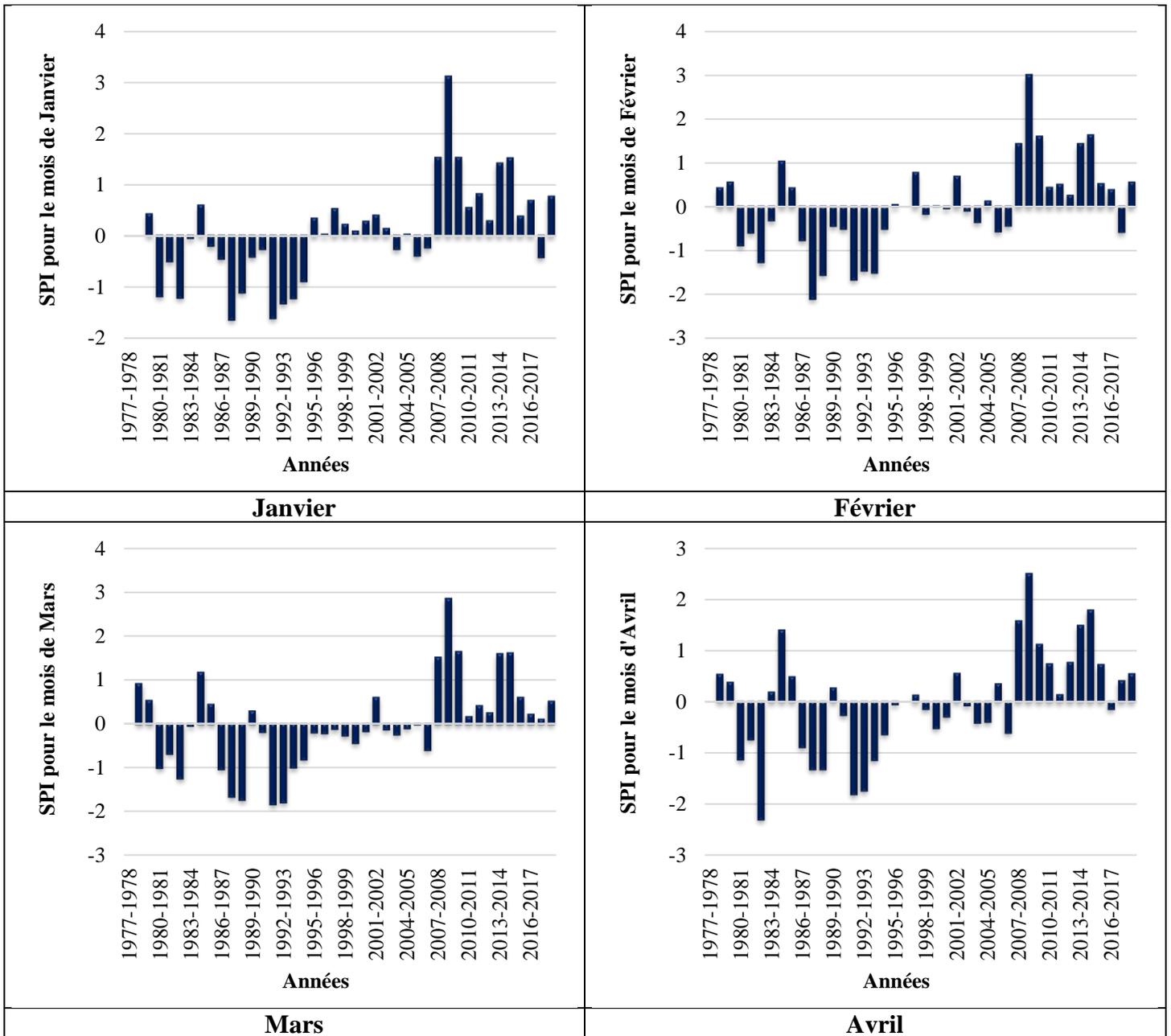
Extrêmement humide
 Très humide
 Modérément humide
 Proche de la normale
 Modérément sec
 Sévèrement sec
 Extrêmement sec
 Pas un nombre



La figure VI.13 représente les résultats de l'analyse de l'évolution du SPI à l'échelle de 18 mois pour la série des précipitations enregistrées au niveau de la station de Sidi Bel Abbès durant la période 1977/1978-2018/2019. L'analyse de cet indice montre que la période sèche s'étend sur 1979/1980 à 2007/2008, d'où les valeurs minimales du SPI-18 enregistrées aux mois de Septembre -1,74 (1983/1984), Octobre -1,59 (1983/1984), Novembre -1,47 (1987/1988), Décembre -1,48 (1987/1988), Janvier -1,64 (1987/1988), Février -2,09 (1987/1988), Mars -1,83 (1991/1992), Avril -2,3 (1982/1983), Mai -2,12 (1982/1983), Juin -2,7 (1982/1983), Juillet -2,34 (1982/1983) et Août -2,19 (1982/1983).

L'indice a atteint sa valeur maximale en 2008/2009, avec 2,45 en Septembre, de 3,16 en Octobre, 3,09 en Novembre, 3,08 en Décembre, 3,18 en Janvier, 2,99 en Février, 2,84 en Mars, 2,49 en Avril, 2,61 en Mai et 2,2 en Juin, mais en Juillet et Août, les valeurs maximales sont observées en 2007/2008 avec respectivement 2,2 et 2,25.





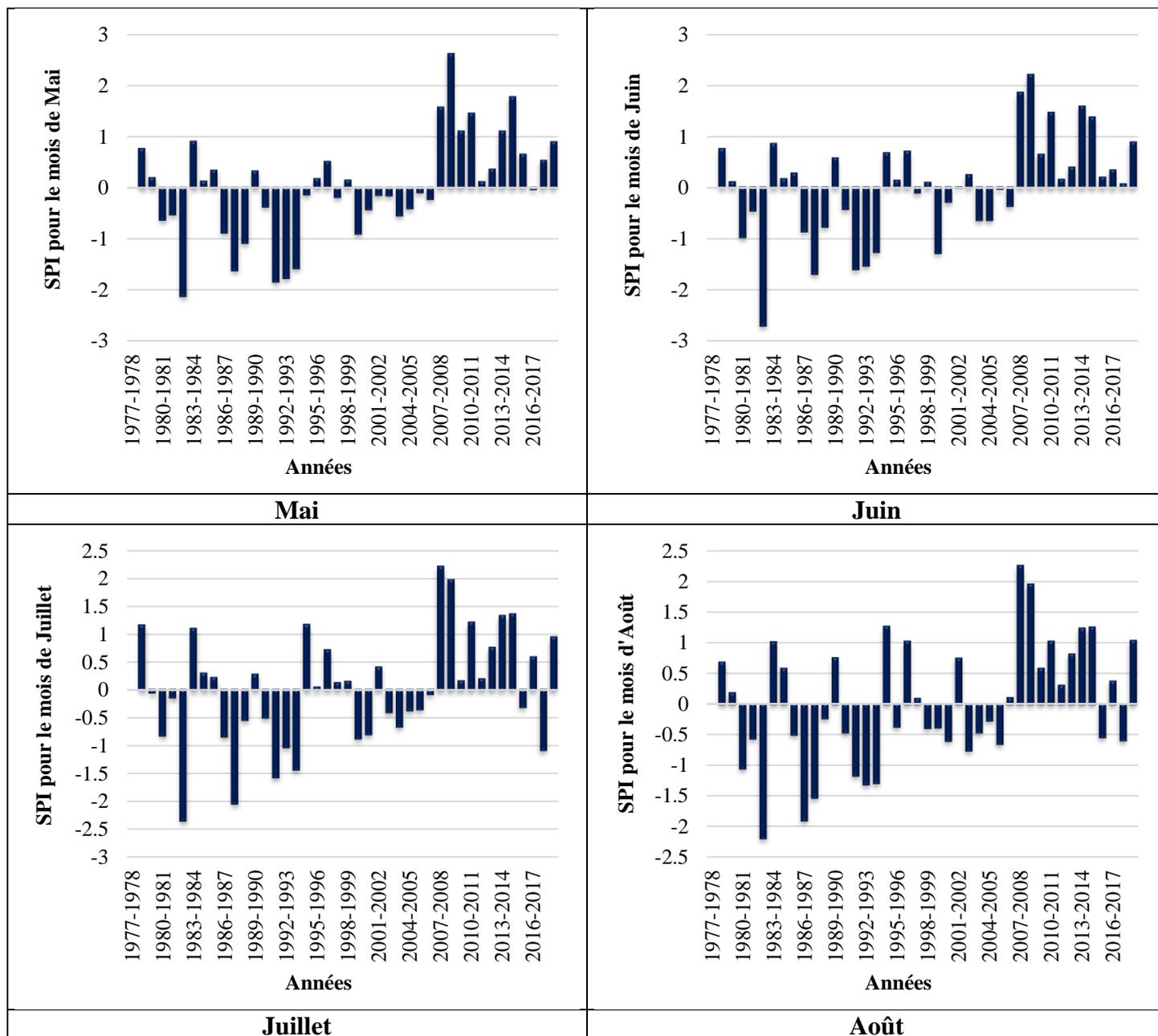
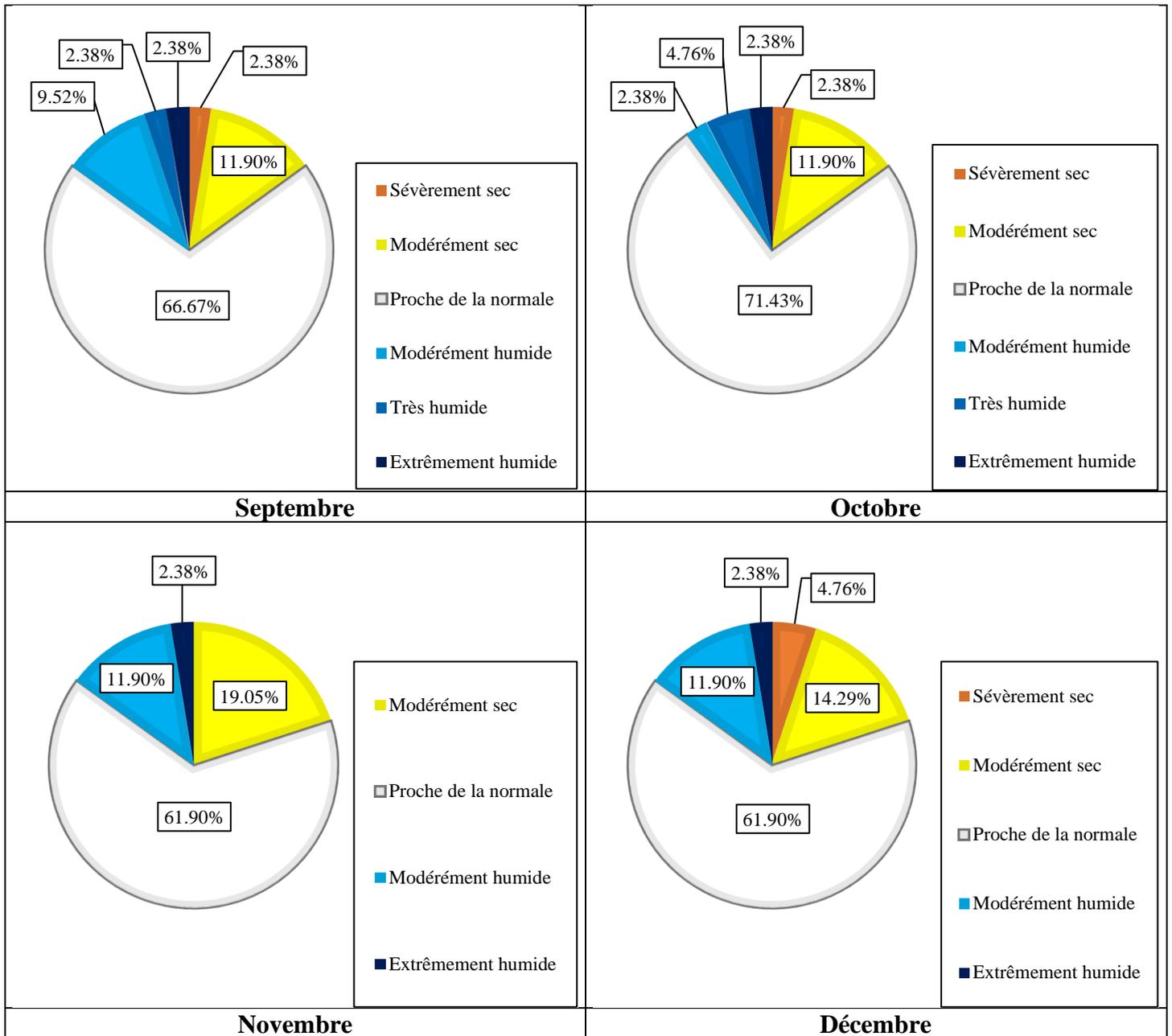
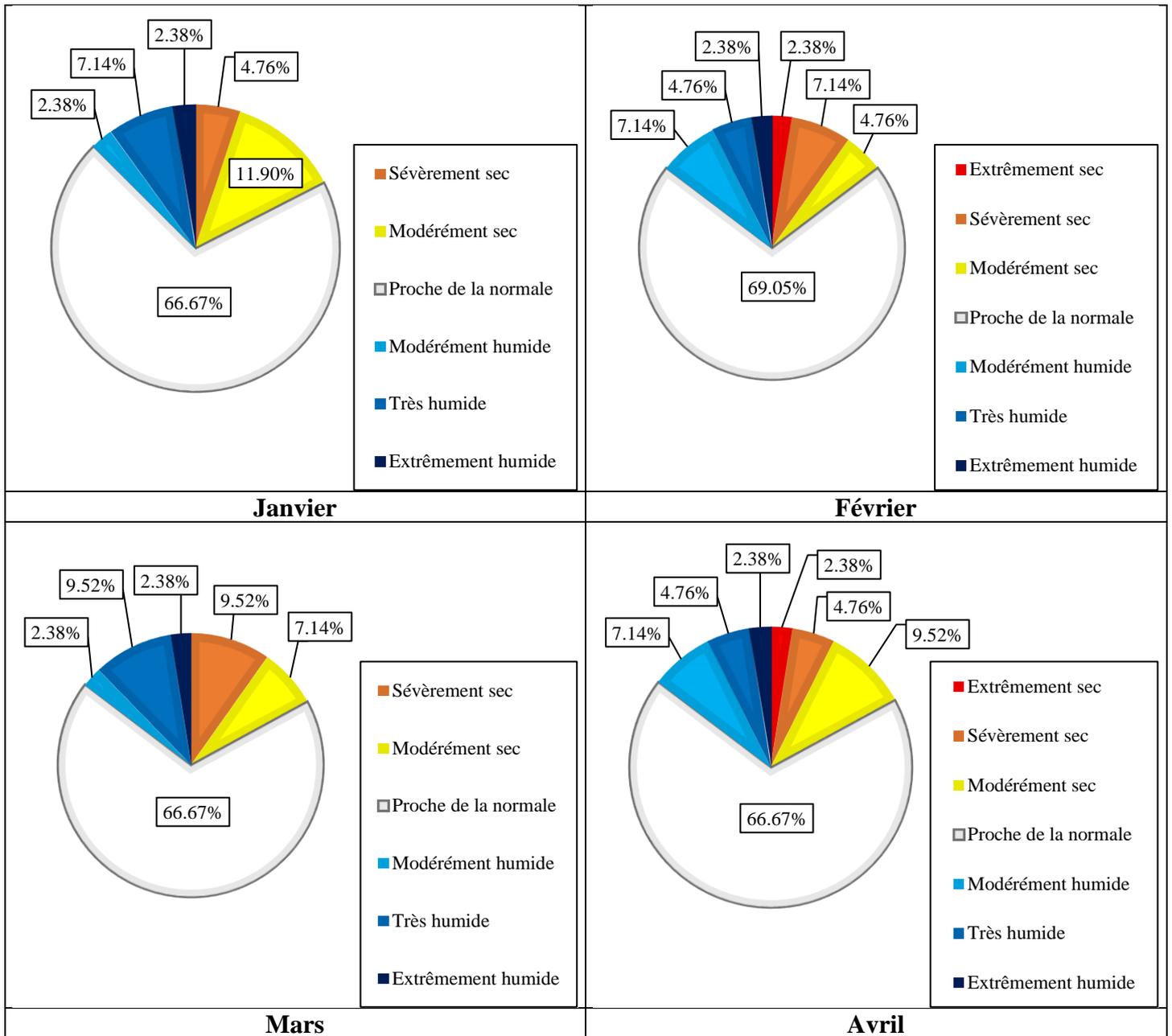


Figure VI.13 : Évolution du SPI à l'échelle de 18 mois pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

L'analyse de la répartition du SPI-18 représentée dans la figure VI.14, montre que la classe proche de la normale prédomine avec 59,52% à 71,43%. La classe modérément sèche représente entre 2,38% en Mai et 19,05% en Novembre, la classe sévèrement sèche atteint son maximum en Mars et Mai avec 9,52%, alors que la classe modérément humide s'affiche avec 2,38% à 16,87%.





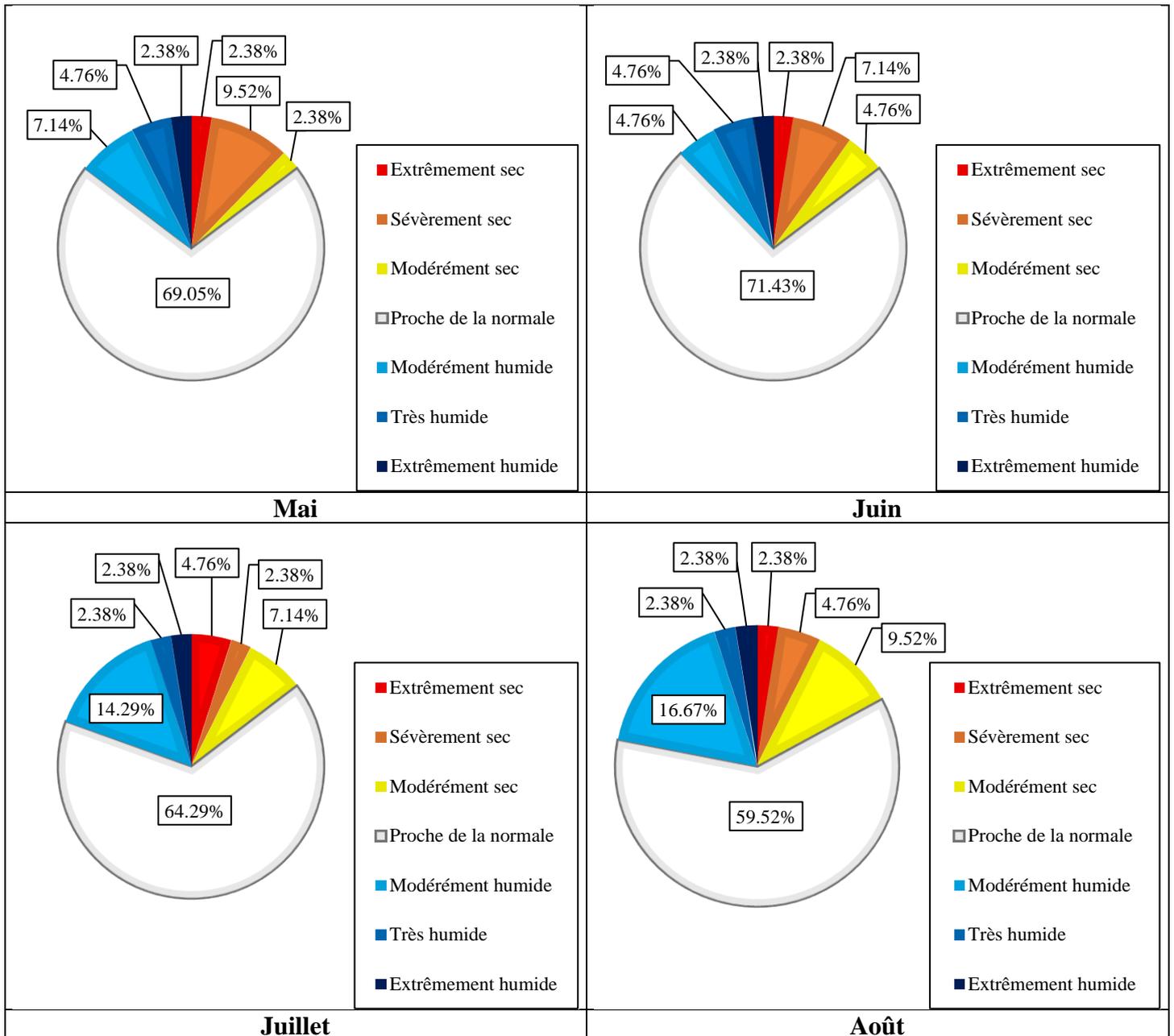


Figure VI.14 : Répartition du SPI à l'échelle de 18 mois pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

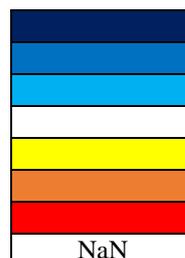
VI.2.8. À l'échelle de 24 mois

Tableau VI.12 : Résultats de calcul du SPI-24 mois pour la série des précipitations de la station de Sidi Bel Abbès (1977/1978-2018/2019)

Année	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
1977/1978	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN						
1978/1979	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN							
1979/1980												
1980/1981												
1981/1982												
1982/1983												
1983/1984												
1984/1985												
1985/1986												
1986/1987												
1987/1988												
1988/1989												
1989/1990												
1990/1991												
1991/1992												
1992/1993												
1993/1994												
1994/1995												
1995/1996												
1996/1997												
1997/1998												
1998/1999												
1999/2000												
2000/2001												
2001/2002												
2002/2003												
2003/2004												
2004/2005												
2005/2006												
2006/2007												
2007/2008												
2008/2009												
2009/2010												
2010/2011												
2011/2012												
2012/2013												
2013/2014												
2014/2015												
2015/2016												
2016/2017												
2017/2018												
2018/2019												

Légende

Extrêmement humide
 Très humide
 Modérément humide
 Proche de la normale
 Modérément sec
 Sévèrement sec
 Extrêmement sec
 Pas un nombre

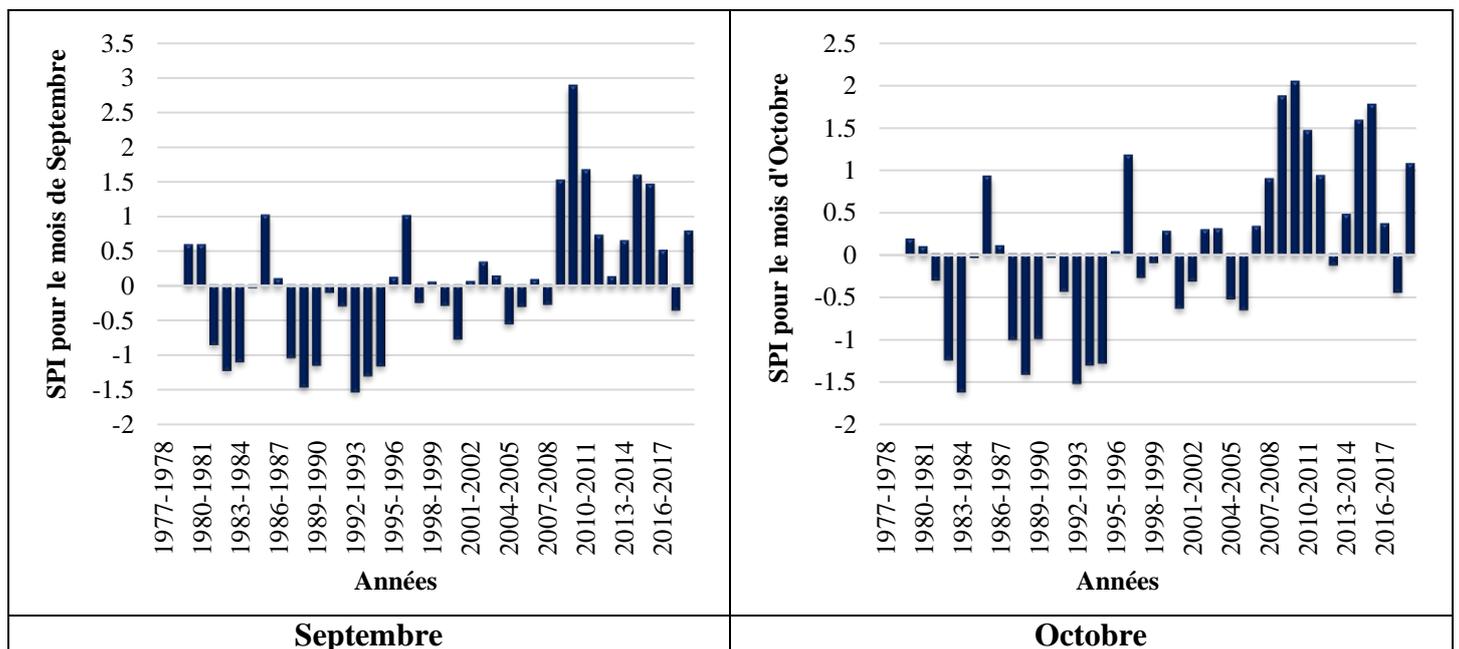


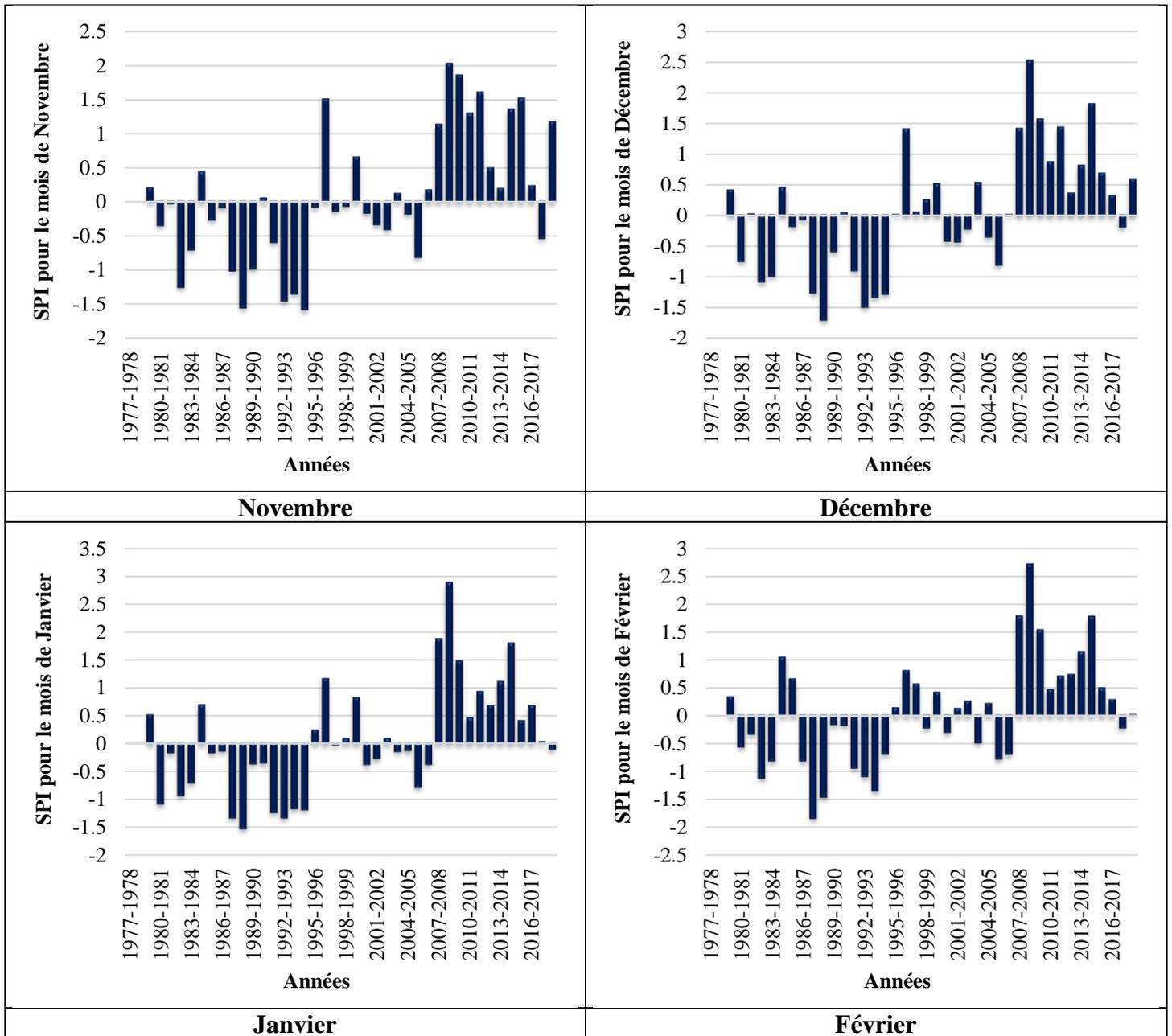
L'étude de l'évolution du SPI à l'échelle de 24 mois pour la série de précipitations enregistrées au niveau de la station de Sidi Bel Abbes au cours de la période 1977/1978-2018/2019 (fig.VI.15), indique la succession d'années sèches et d'années humides. Durant la période allant de 1979/1980 à 2007/2008, nous notons des années modérément sèches à extrêmement sèches, les valeurs minimales du SPI-24 mois pour chaque mois sont mentionnées dans le tableau VI.13.

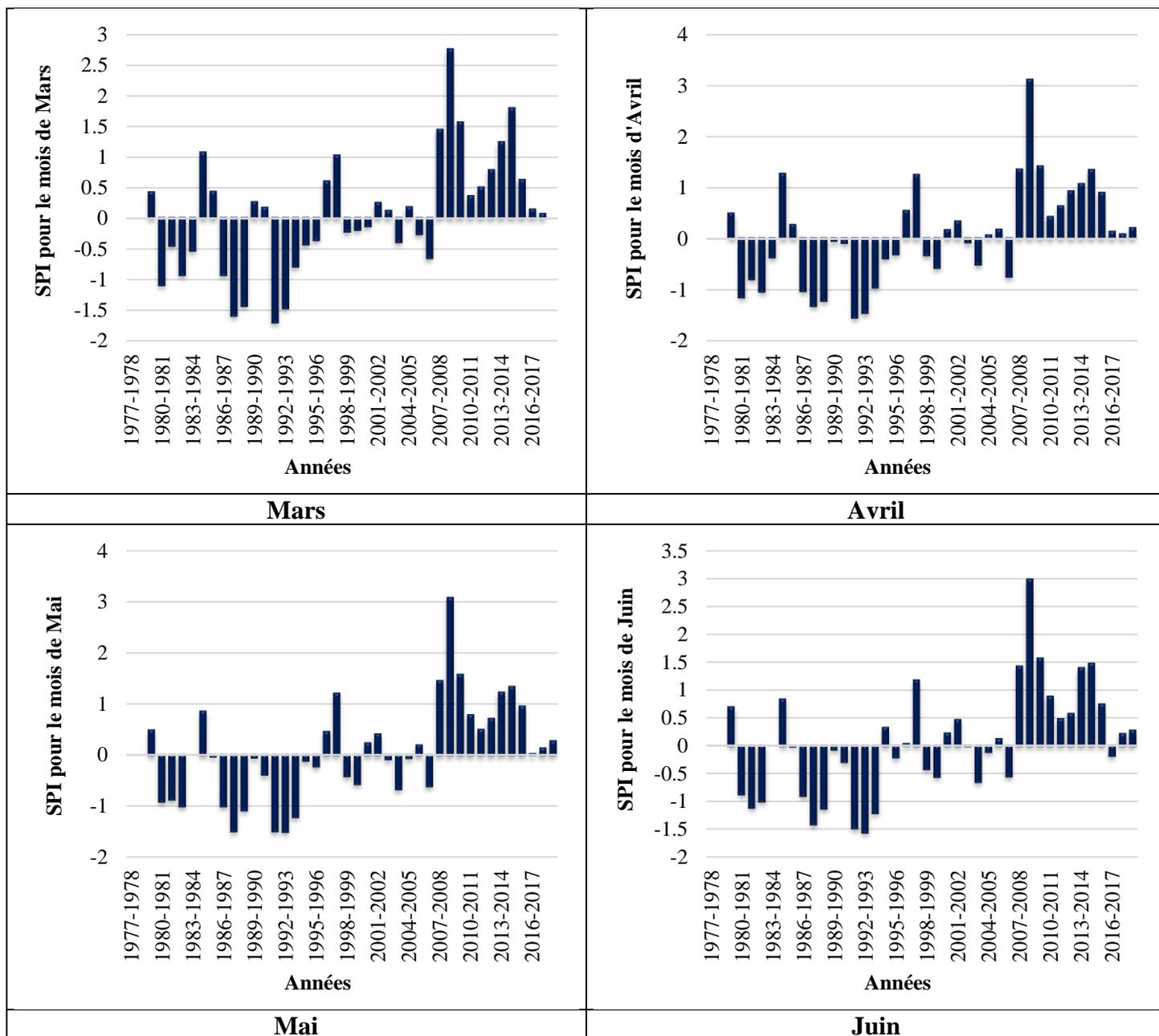
Alors que la période de 2008/2009 à 2018/2019 est caractérisée par la succession des années modérément humides à très humides, SPI-24 mois peut atteindre 2,87 en Septembre (2009/2010) et 2,04 en Octobre (2009/2010). L'année 2008/2009 est marquée par plus d'humidité avec un SPI-24 variant de 2,02 en Novembre à 3,1 en Avril.

Tableau VI.13 : Valeurs minimales du SPI-24 pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

Mois	SPI min	Période	Mois	SPI min	Période
Septembre	-1,52	1992/1993	Mars	-1,70	1991/1992
Octobre	-1,61	1983/1984	Avril	-1,55	1991/1992
Novembre	-1,58	1994/1995	Mai	-1,50	1992/1993
Décembre	-1,69	1988/1989	Juin	-1,56	1992/1993
Janvier	-1,52	1988/1989	Juillet	-1,49	1992/1993
Février	-1,83	1987/1988	Août	-1,76	1991/1992







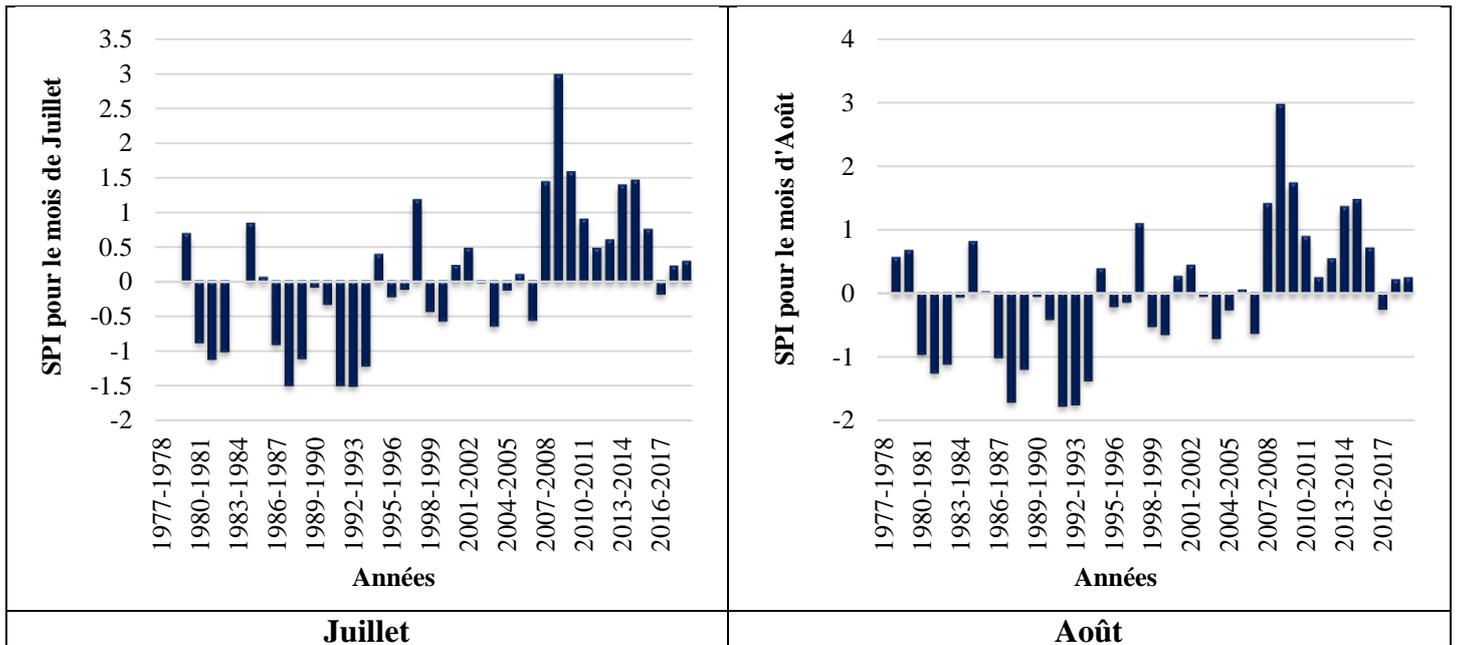
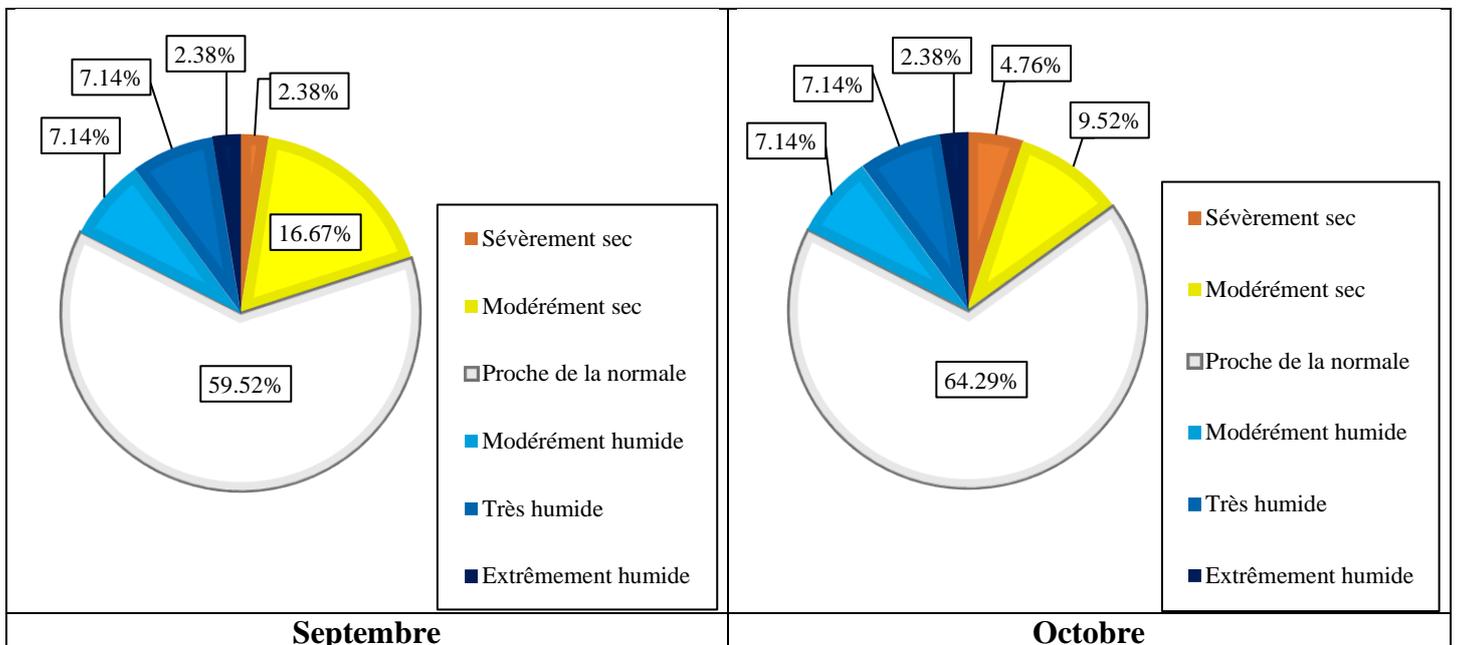
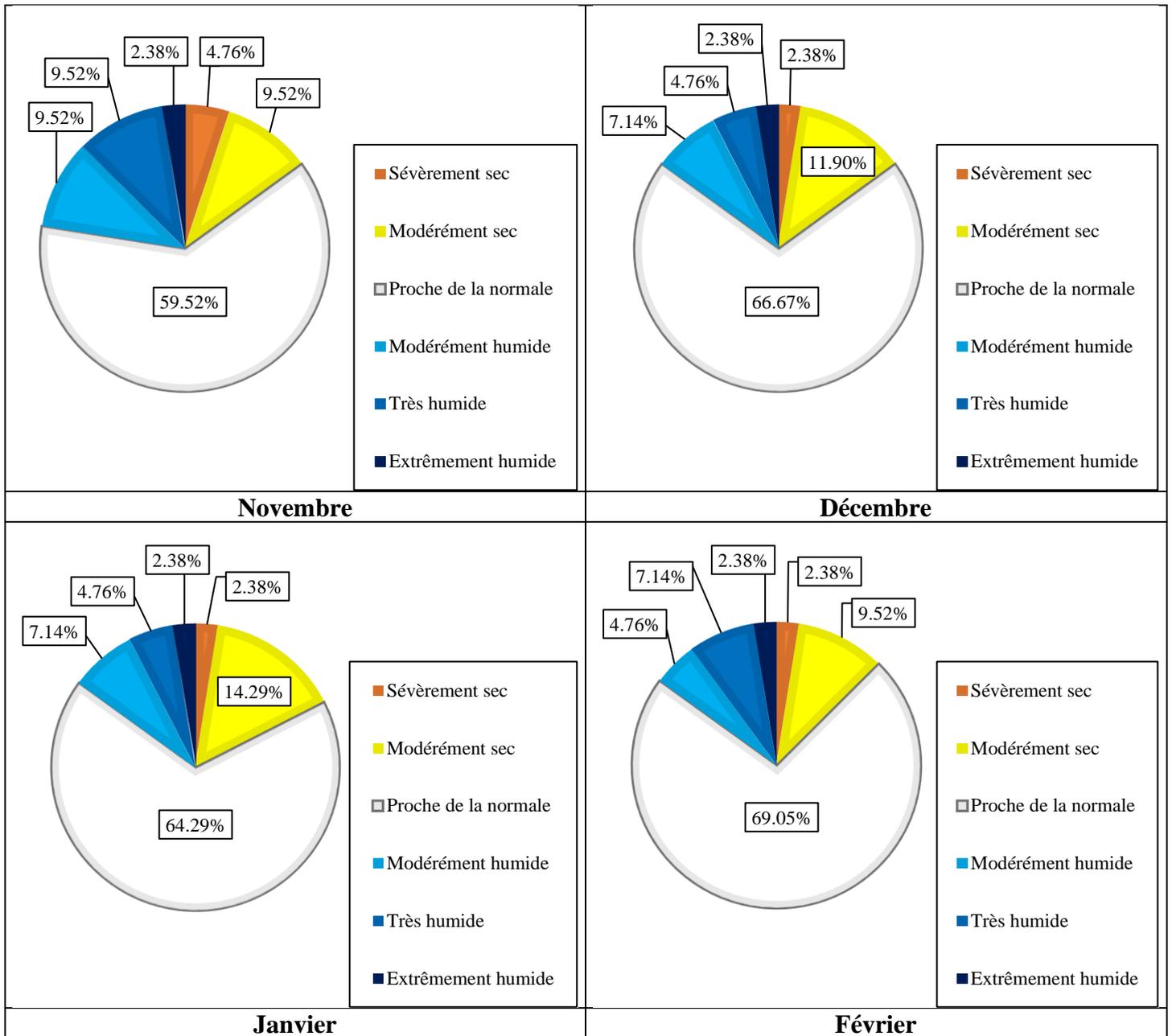
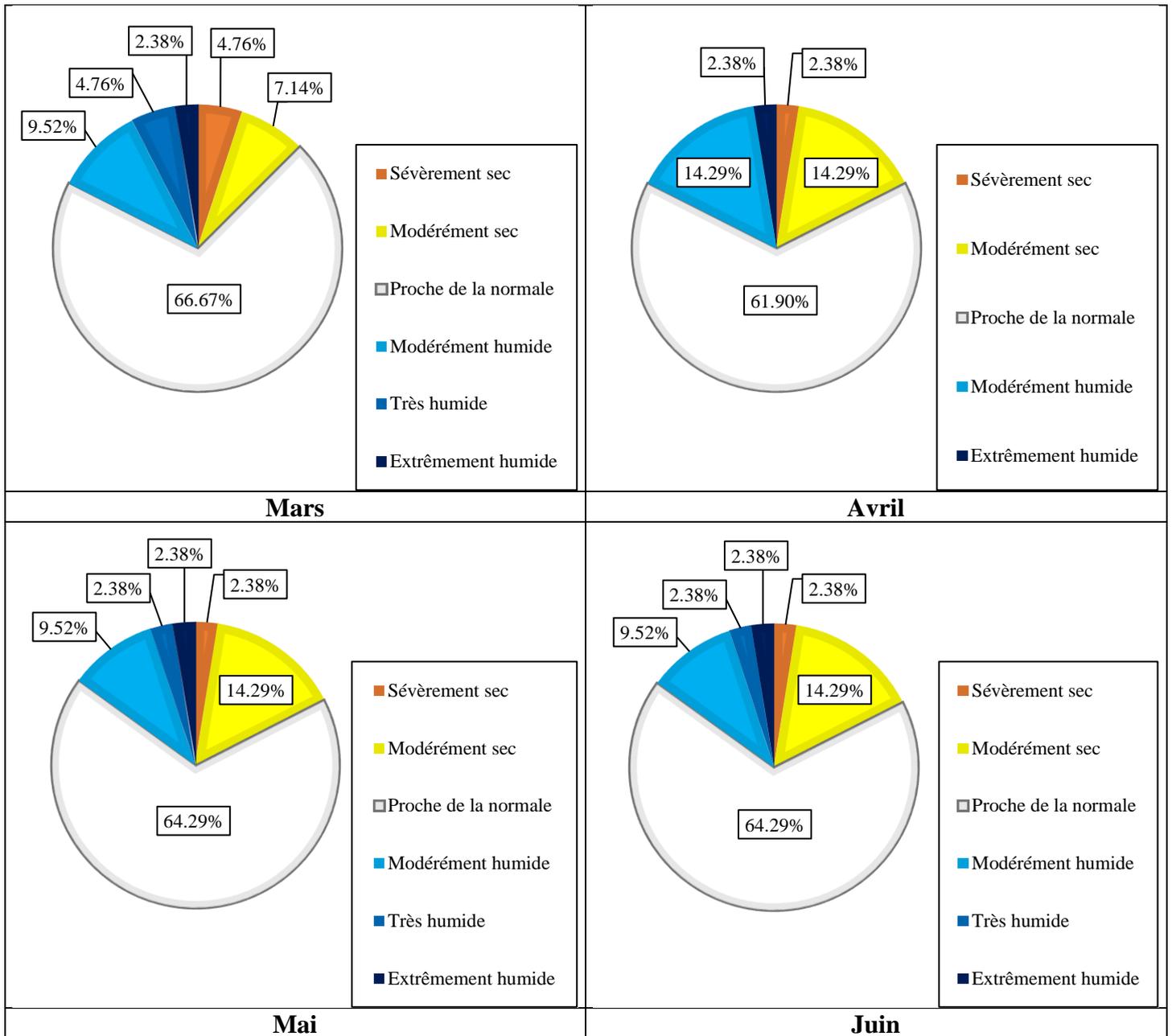


Figure VI.15 : Évolution du SPI à l'échelle de 24 mois pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

La figure VI.16 représentant la répartition du SPI à l'échelle de 24 mois à Sidi Bel Abbes, montre que la classe proche de la normale occupe de 59,62% à 69,05% des années de notre série, quant au seuil de sécheresse, le pourcentage de la classe modérément sèche ne dépasse pas les 17%, compris entre 7,14% en Mars et 16,67% en Septembre. Pour la classe sévèrement sèche, son intervalle est [2,38% ; 7,14%]. Quant aux seuils d'humidité, la classe modérément humide occupe 14,29% en Avril, et celle très humide 7,14% en Février.







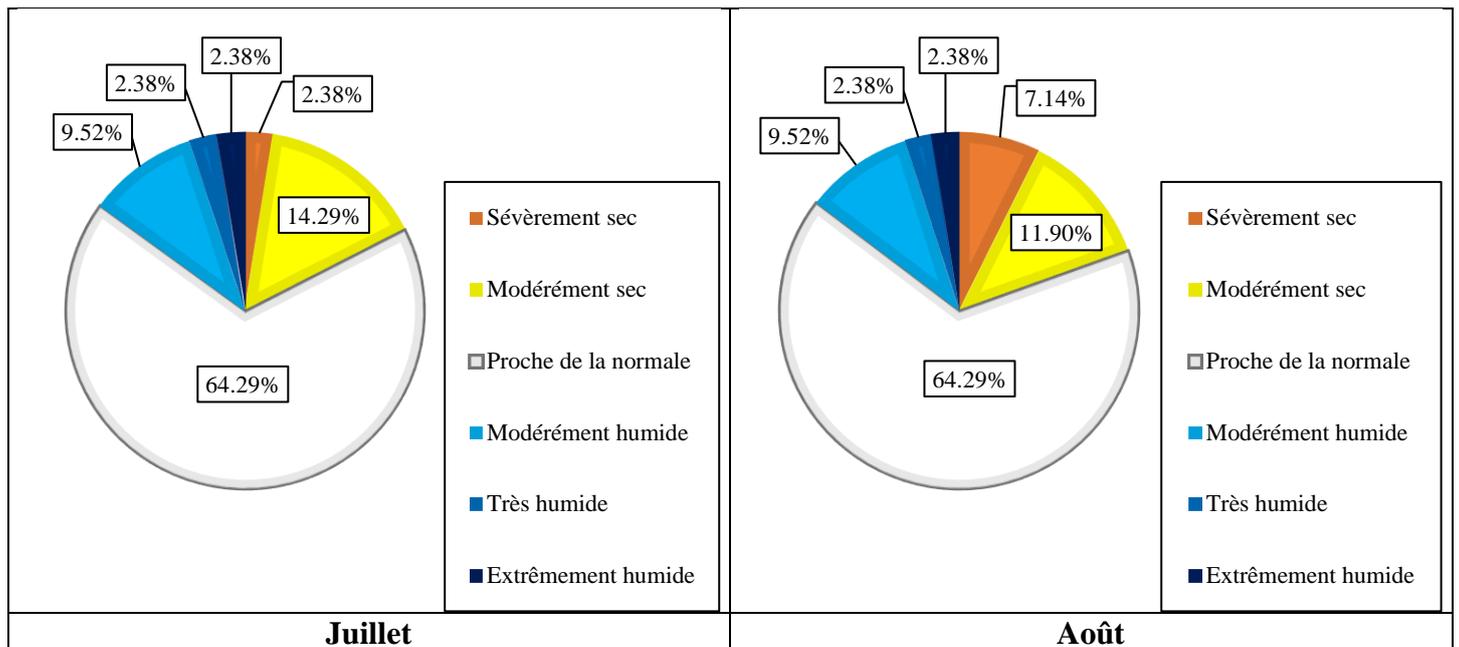


Figure VI.16 : Répartition du SPI à l'échelle de 24 mois pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

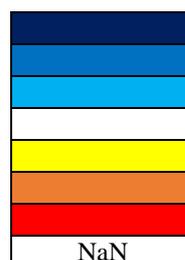
VI.2.9. À l'échelle de 48 mois

Tableau VI.14 : Résultats de calcul du SPI-48 mois pour la série des précipitations de la station de Sidi Bel Abbès (1977/1978-2018/2019)

Année	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
1977/1978	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN						
1978/1979	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN						
1979/1980	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN						
1980/1981	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN							
1981/1982												
1982/1983												
1983/1984												
1984/1985												
1985/1986												
1986/1987												
1987/1988												
1988/1989												
1989/1990												
1990/1991												
1991/1992												
1992/1993												
1993/1994												
1994/1995												
1995/1996												
1996/1997												
1997/1998												
1998/1999												
1999/2000												
2000/2001												
2001/2002												
2002/2003												
2003/2004												
2004/2005												
2005/2006												
2006/2007												
2007/2008												
2008/2009												
2009/2010												
2010/2011												
2011/2012												
2012/2013												
2013/2014												
2014/2015												
2015/2016												
2016/2017												
2017/2018												
2018/2019												

Légende

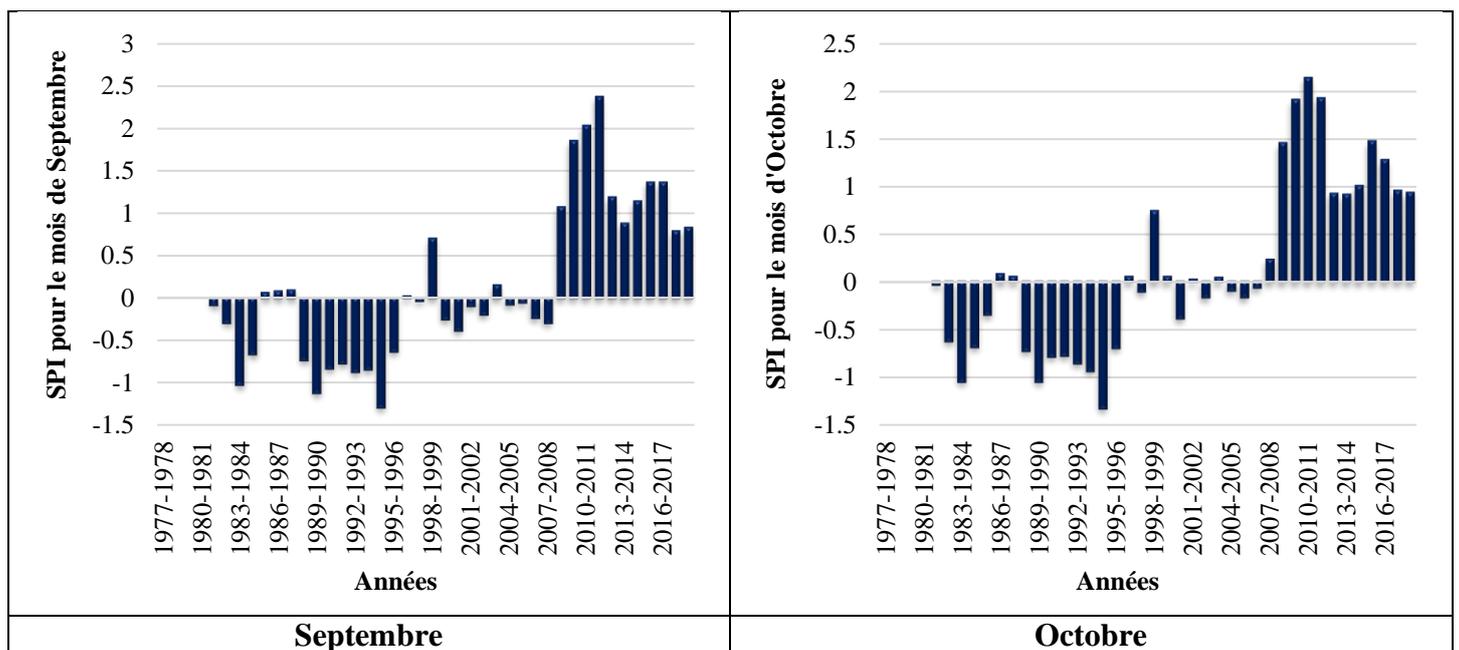
- Extrêmement humide
- Très humide
- Modérément humide
- Proche de la normale
- Modérément sec
- Sévèrement sec
- Extrêmement sec
- Pas un nombre

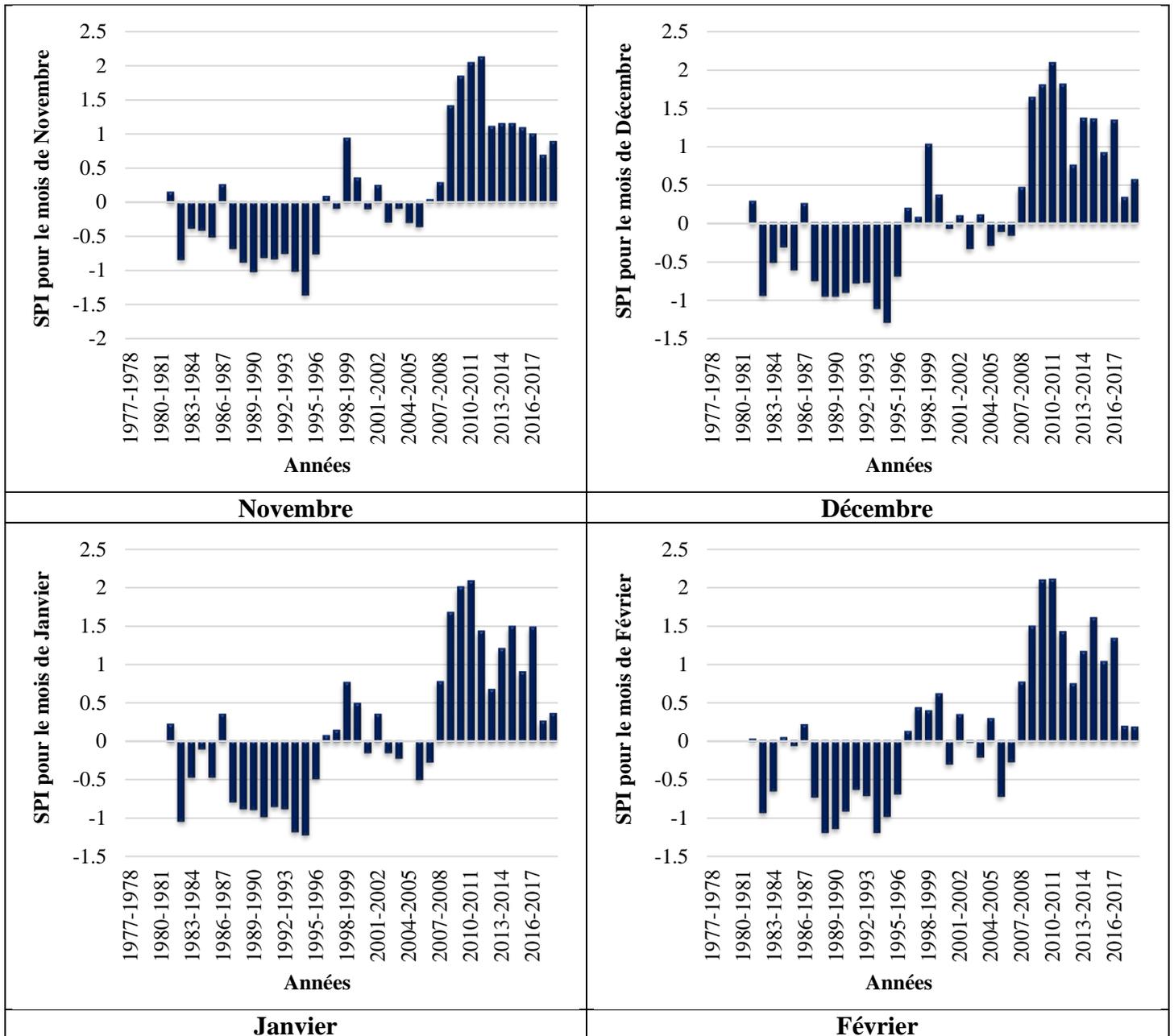


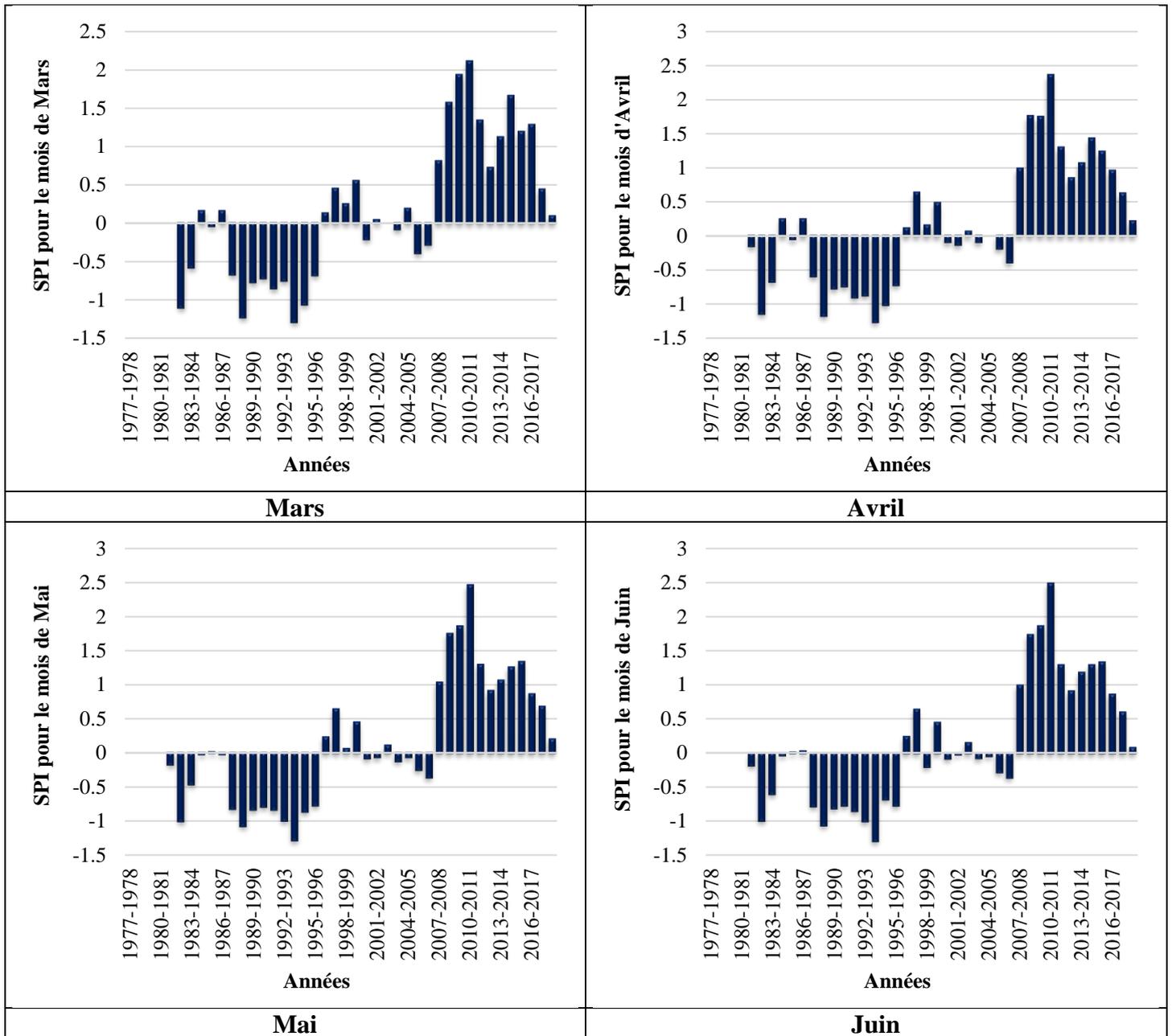
L'évolution du SPI à l'échelle de 48 mois pour la série des précipitations de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019) (fig.VI.17) laisse apparaître deux parties : la première contient des valeurs négatives du SPI-48 mois, et l'autre des valeurs positives. Pour Septembre et Octobre, la période négative est de 1981/1982 à 2007/2008, et celle positive est de 2008/2009 jusqu'à 2018/2019, pour les autres mois, la période humide s'étale de 1996/1997 à 1999/2000 et de 2007/2008 à 2018/2019, la période sèche de 1981/1982 à 1995/1996 et de 2000/2001 à 2006/2007.

L'humidité varie dans notre série de modérément humide à extrêmement humide. Les valeurs maximales du SPI-48 mois déterminées par MDM sont : en Septembre de 2,37 (2011/2012), pour les autres mois, l'année humide a été toujours en 2010/2011 avec des valeurs comprises entre 2,08 en Décembre et Janvier et 2,52 en Août.

N'empêche que des années particulières ont été de modérément sèche à extrêmement sèche avec des valeurs minimales en Septembre de -1,29 (1994/1995), Octobre de -1,31 (1994/1995), Novembre de -1,35 (1994/1995), Décembre de -1,28 (1988/1989 et 1993/1994). Les valeurs minimales pour le reste des mois sont enregistrées en 1993/1994 pour Janvier de -1,21, Février de -1,18, Mars de -1,29, Avril de -1,26, Mai de -1,28, Juin de -1,29, Juillet de -1,29 et Août de -1,47.







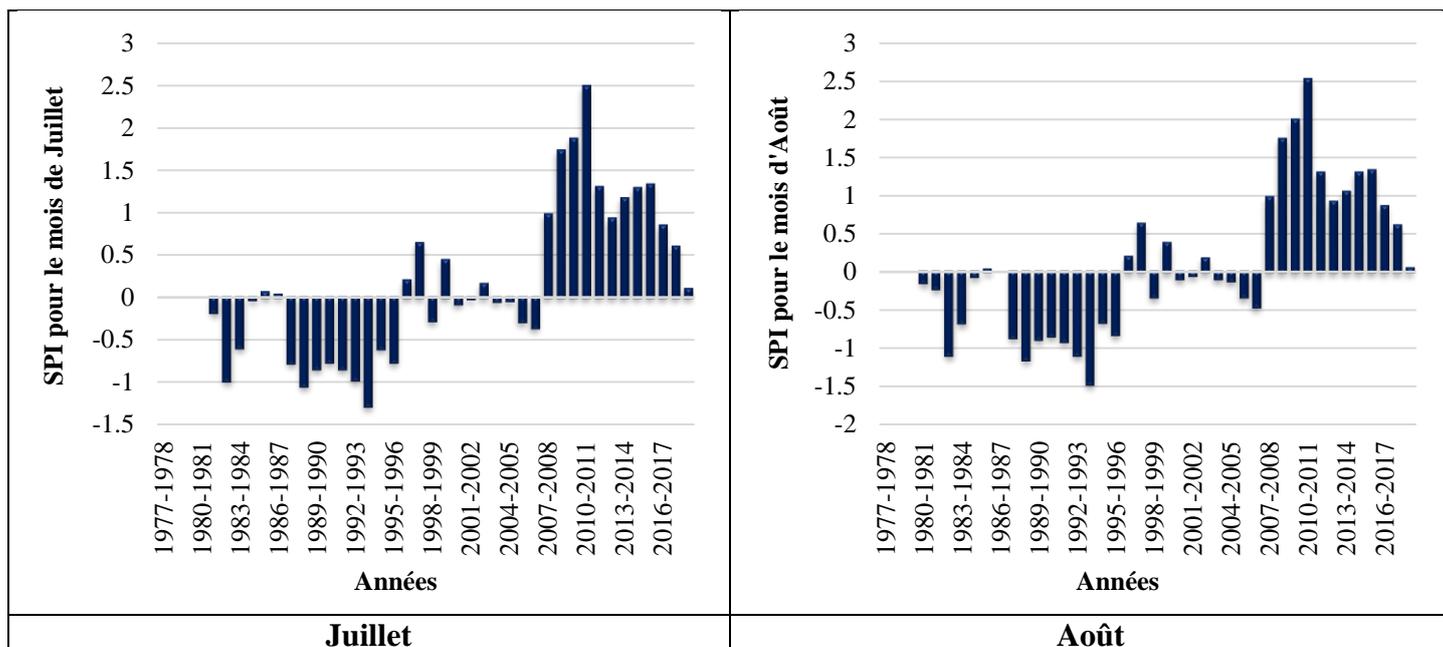
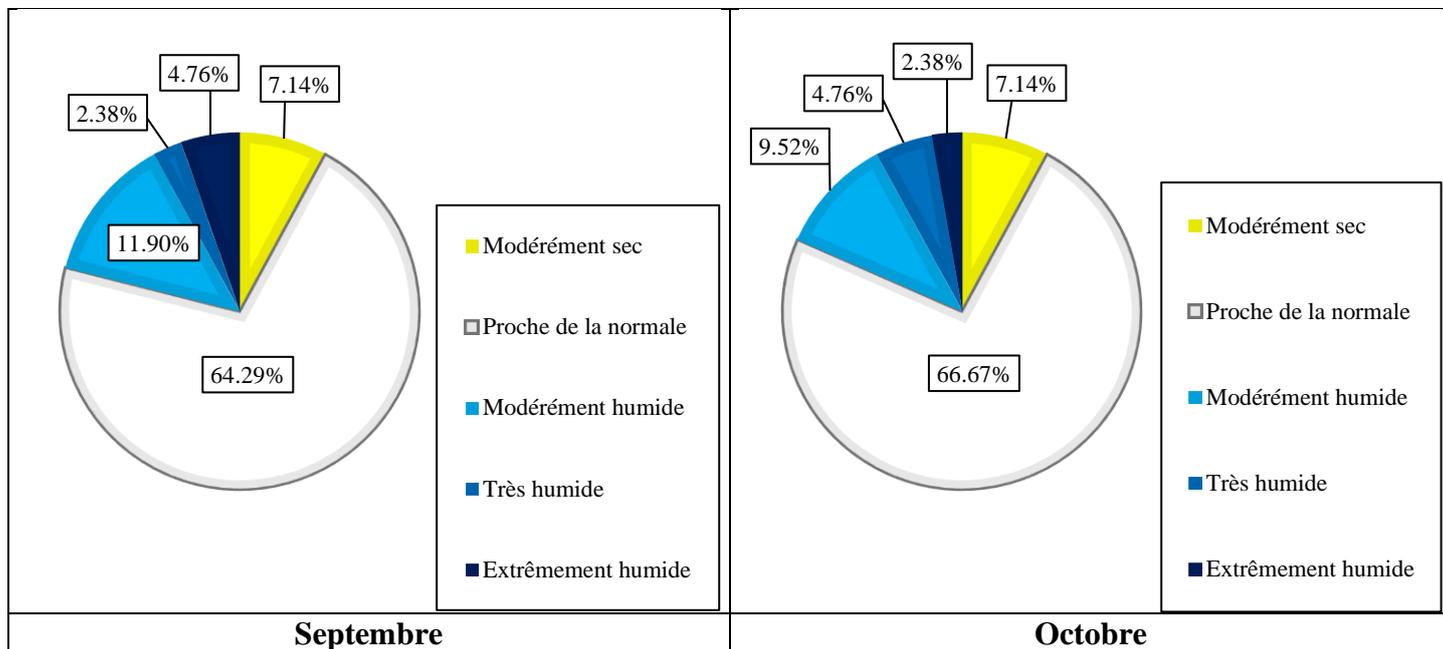
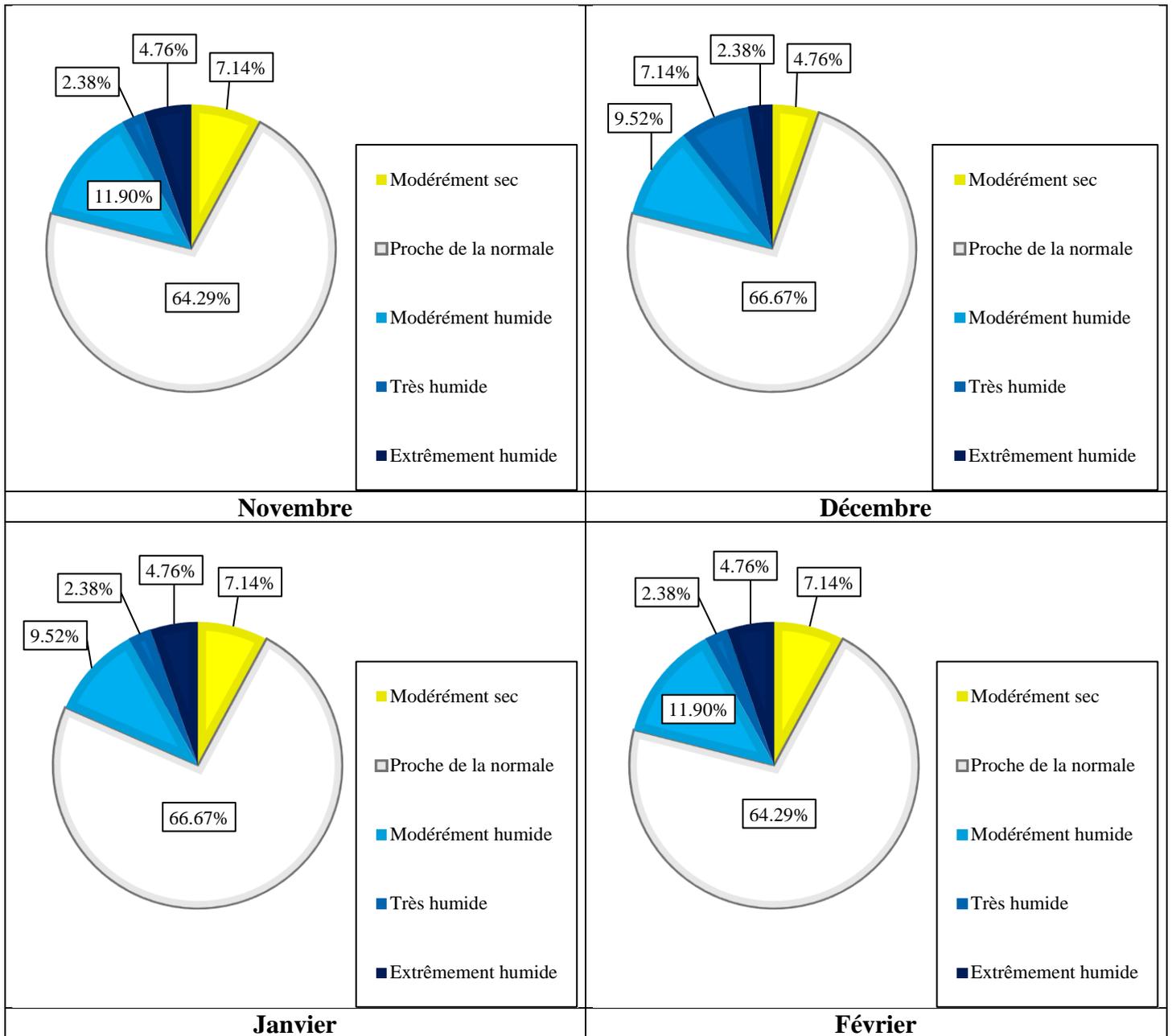
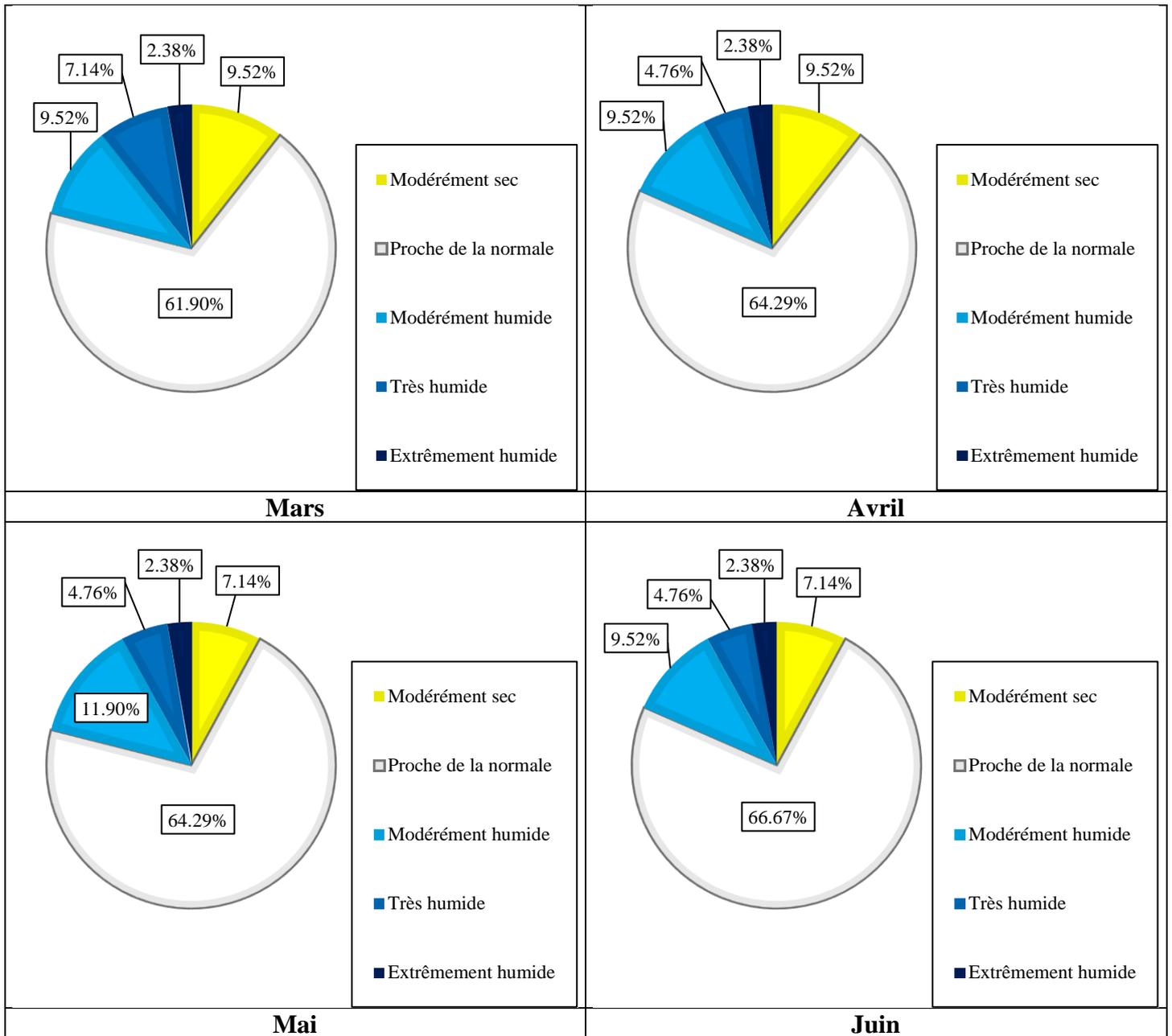


Figure VI.17 : Évolution du SPI à l'échelle de 48 mois pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

L'analyse de la répartition du SPI-48 mois (fig.VI.18) pour Sidi Bel Abbes pendant la période 1977/1978-2018/2019 indique que la période d'étude a été majoritairement occupée par la classe proche de la normale, avec 61 à 69%. En deuxième position, la classe modérément humide entre 9 et 12%, puis la classe modérément sèche entre 4 et 10%.







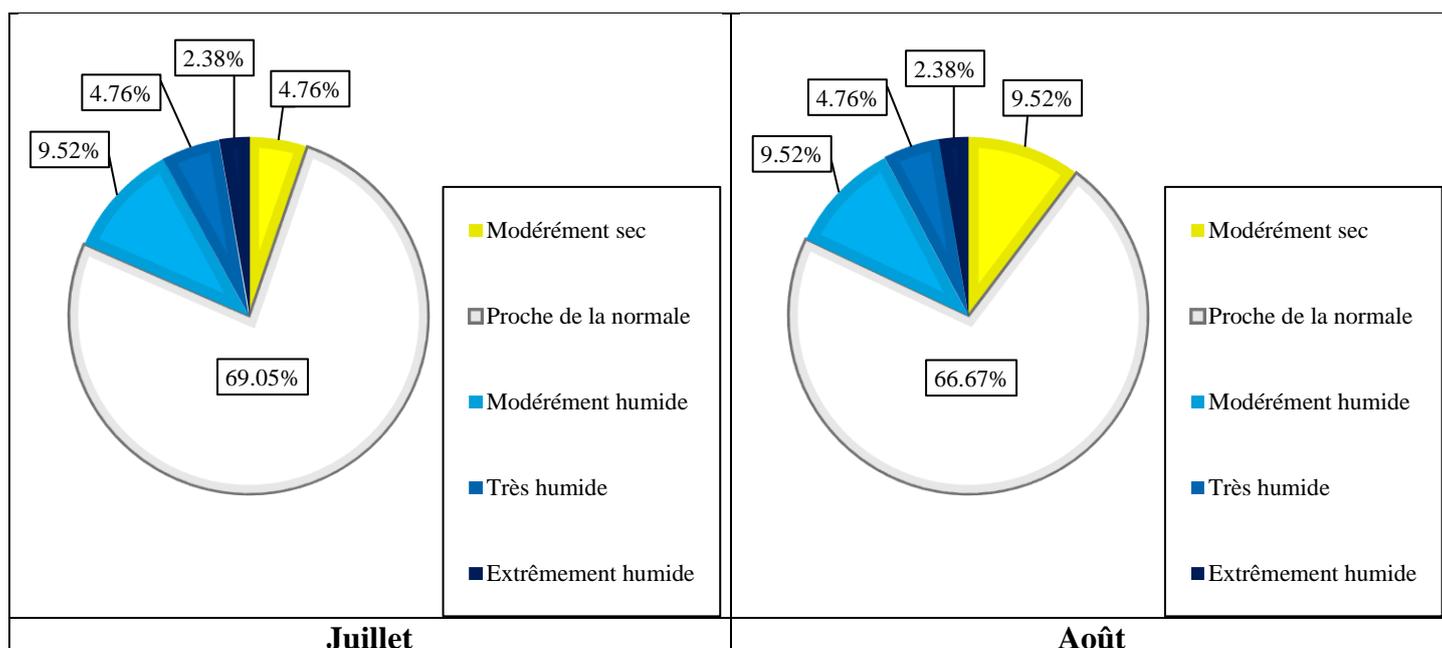


Figure VI.18 : Répartition du SPI à l'échelle de 48 mois pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

L'identification de l'indice du SPI a été effectuée pour prévoir et évaluer la sévérité de la sécheresse à un moment approprié, à court et à long terme, l'état du SPI dans un temps T peut être déterminé par l'un des deux cas : sec ou humide.

Les SPI à court terme (1 et 3 mois) surestiment l'intensité de la sécheresse, ce qui peut conduire à une évaluation erronée (Djellouli et al., 2016). Le choix du SPI permet différentes interprétations : le SPI de 1 mois reflète le court terme et les conditions de son application peuvent être liées étroitement à l'humidité du sol, le SPI de 3 mois fournit une évaluation saisonnière des précipitations, les SPI de 6 et 9 mois indiquent la tendance à moyen terme des précipitations. Quant aux SPI de 12 mois et plus, ils reflètent la tendance à long terme. Ils sont généralement liés aux écoulements dans les cours d'eau, aux taux de remplissage des réservoirs et même aux niveaux statiques des nappes souterraines (Khan et al., 2008).

VI.3. Calcul du PN (Indice du pourcentage des précipitations normale)

VI.3.1. À l'échelle annuelle

Tableau VI.15 : Résultats de calcul du PN annuel pour la série des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

Année	PN annuel	Année	PN annuel	Année	PN annuel
1977/1978		1991/1992		2005/2006	
1978/1979		1992/1993		2006/2007	
1979/1980		1993/1994		2007/2008	
1980/1981		1994/1995		2008/2009	
1981/1982		1995/1996		2009/2010	
1982/1983		1996/1997		2010/2011	
1983/1984		1997/1998		2011/2012	
1984/1985		1998/1999		2012/2013	
1985/1986		1999/2000		2013/2014	
1986/1987		2000/2001		2014/2015	
1987/1988		2001/2002		2015/2016	
1988/1989		2002/2003		2016/2017	
1989/1990		2003/2004		2017/2018	
1990/1991		2004/2005		2018/2019	

Légende

Humide
 Normale
 Faible sécheresse
 Sécheresse modérée
 Sécheresse sévère
 Sécheresse extrême



L'évolution du PN appliquée à la série des précipitations annuelles enregistrées au niveau de la station de Sidi Bel Abbes pendant la période 1977/1978-2018/2019 (fig.VI.19), nous montre que l'année la plus humide se manifeste en 2007/2008 correspondant à la valeur du PN la plus élevée de 180,9, en revanche, l'année la plus sèche se manifeste en 1995/1996 avec la plus basse valeur du PN de 53,8.

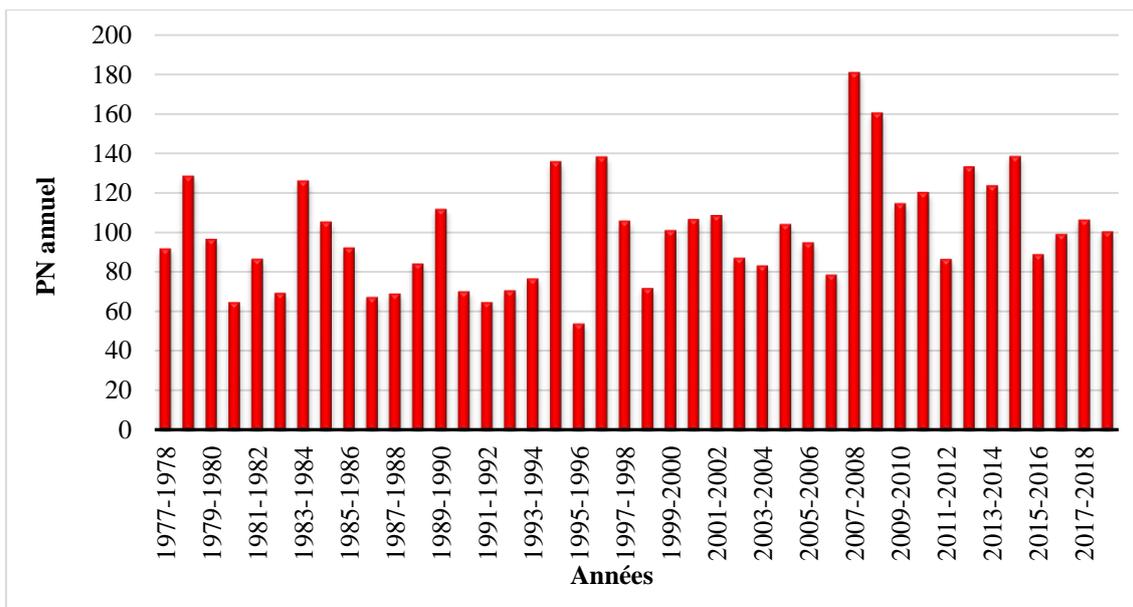


Figure VI.19 : Évolution du PN pour la série des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

D’après la répartition du PN (fig.VI.20), l’humidité occupe 47,62% de la période, par contre la sécheresse extrême n’occupe que 2,38%, et le pourcentage de la sécheresse sévère est nul.

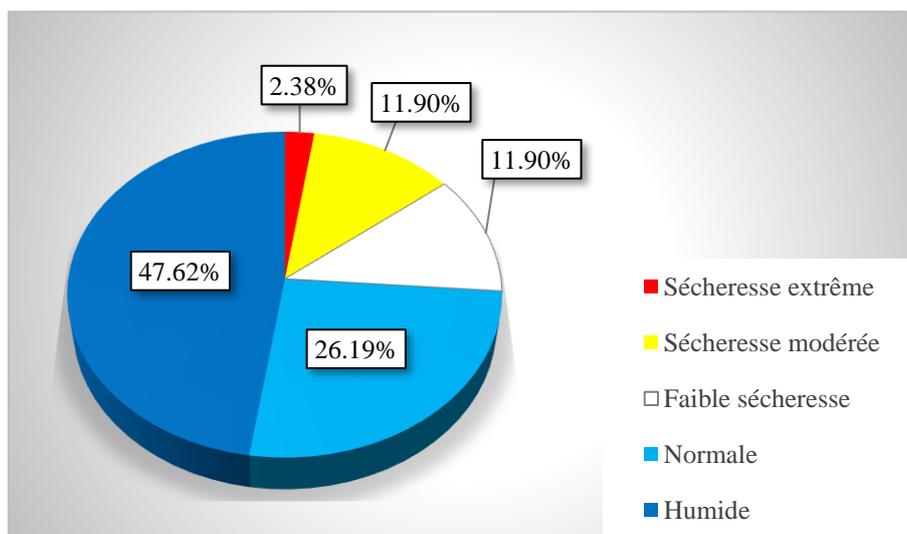


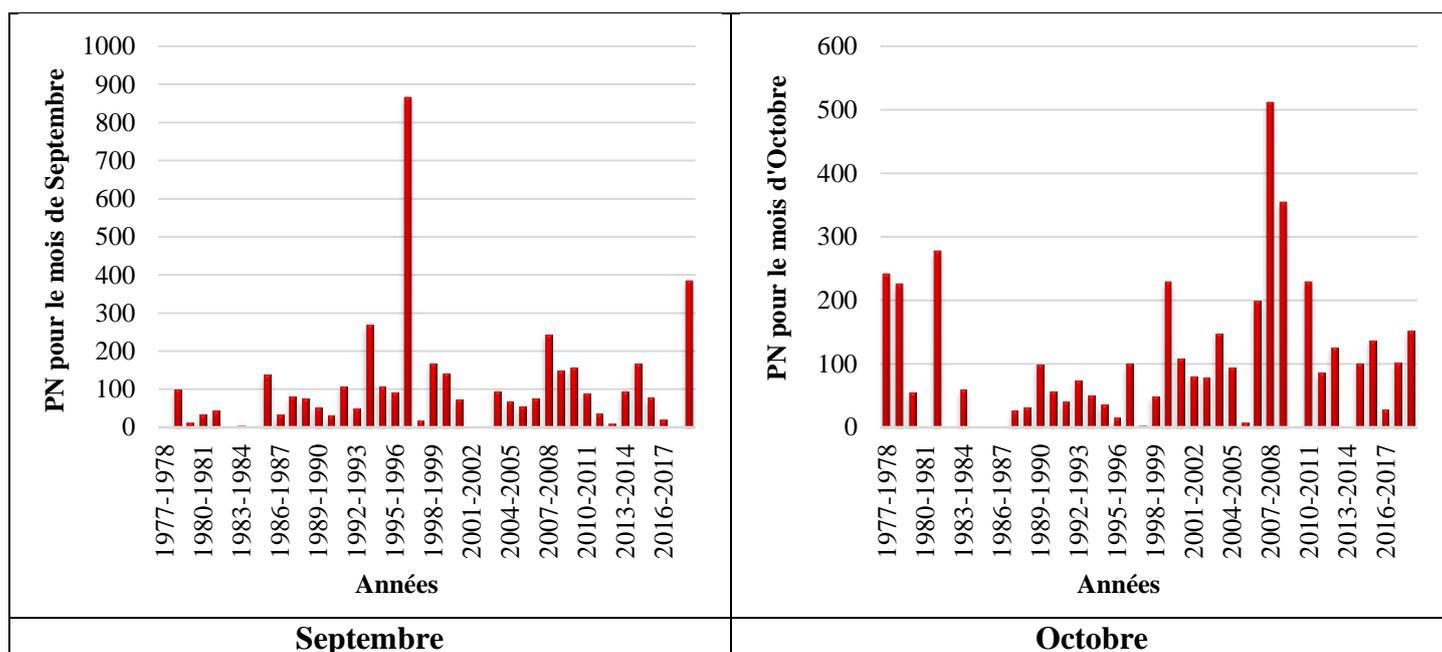
Figure VI.20 : Répartition du PN pour la série des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

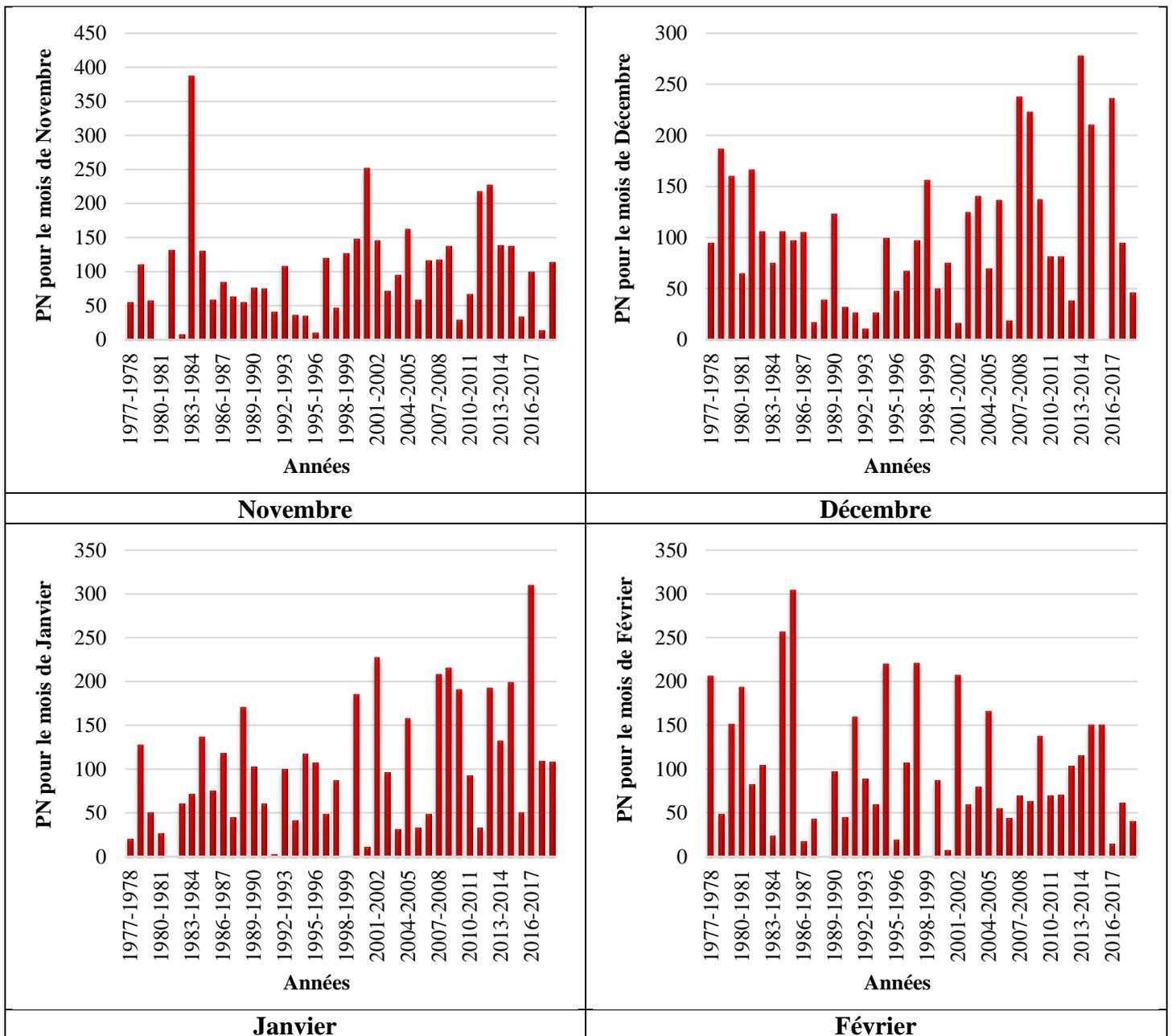
Les sécheresses survenues entre 1977/1978-2018/2019 ont été analysées par l'indice du pourcentage des précipitations normale (PN) sur 42 ans pour une échelle mensuelle représentée dans la figure VI.21. Les résultats indiquent que les sécheresses les plus remarquables par leur intensité et leur durée se sont produites durant les périodes :

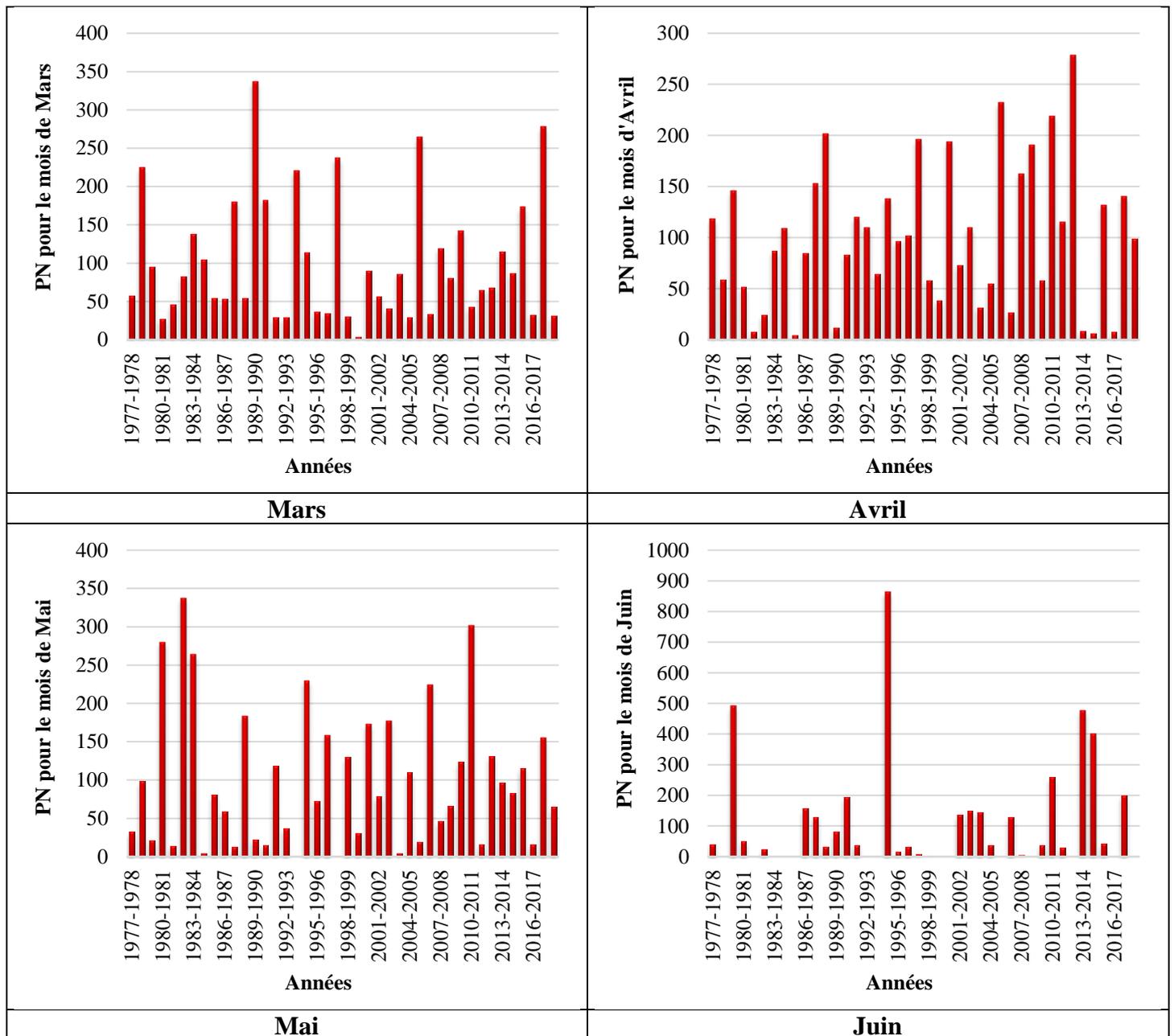
- **Septembre** : une dominance des années extrêmement sèches bien visibles, où l'indice PN peut atteindre moins de 40, ce qui explique l'existence des années de grande sécheresse (1977/1978, de 1979/1980 à 1984/1985, 1986/1987, 1990/1991, 2001/2002, 2002/2003, 2011/2012, 2012/2013, 2016/2017, 2017/2018), quant aux années humides, il existe 11 années dont le PN dépasse la valeur de 100, en particulier 1996/1997 avec une valeur de 866,8,
- **Octobre** : une dominance des années extrêmement sèches bien remarquable pendant les années (1980/1981, 1982/1983, de 1984/1985 à 1988/1989, 1991/1992, 1994/1995, 1995/1996, 1997/1998, 1998/1999, 2005/2006, 2009/2010, 2013/2014), où l'indice atteint moins de 40, aussi des valeurs de PN qui dépassent le 100 sont enregistrées en 2007/2008 pouvant atteindre 510,7,
- **Novembre** : une dominance des années extrêmement sèches pendant les périodes (1980/1981, 1982/1983, 1993/1994, 1994/1995, 1995/1996, 2009/2010, 2015/2016). Nous remarquons également que l'année 1983-1984 a enregistré une grande valeur de PN de 287,3 témoin d'une humidité extrême,
- **Décembre** : l'existence des années de grande sécheresse (1987/1988, 1988/1989, de 1990/1991 à 1993/1994, 2001/2002, 2006/2007, 2012/2013, 2015/2016). Nous notons aussi la présence de plusieurs années humides comme 2013/2014, avec un PN de 278,2,
- **Janvier** : les années de sécheresse où l'indice est inférieur à 40 dominant, (1977/1978, 1980/1981, 1981/1982, 1991/1992, 1998/1999, 2003/2004, 2005/2006). Des valeurs qui dépassent le 100 existent aussi indiquant une présence d'humidité, comme celle enregistrée en Janvier 2016/2017 de 309,8,
- **Février** : l'existence de la classe extrêmement sèche pendant (1983/1984, 1986/1987, 1987/1988, 1995/1996, 1998/1999, 2000/2001, 2017/2018) où l'indice PN peut atteindre moins de 40. Quant à la classe humide, il existe 17 années dont les valeurs du PN dépassent le 100, l'année 1985/1986 enregistre la plus grande valeur de 304,
- **Mars** : les périodes (1980/1981, 1991/1992, 1992/1993, 1995/1996, 1996/1997, 1998/1999, 1999/2000, 2004/2005, 2006/2007, 2016/2017, 2018/2019), sont caractérisées par des sécheresses. L'année 1989/1990 a marqué la plus grande d'humidité avec une valeur de 336,7,
- **Avril** : la dominance des années extrêmement sèches pendant les périodes (1981/1984, 1985/1986, 1989/1990, 1999/2000, 2006/2007, 2013/2015, 2016/2017). Nous remarquons également que l'année 2012/2013 est extrêmement humide, et sa valeur est de 278,8,
- **Mai** : l'alternance des années sèches et humides consécutives, nous avons noté qu'il y a eu 15 années extrêmement sèches et 17 années humides. 1982/1983 est une année notée extrêmement humide avec la plus grande de PN de 337,7,

- **Juin** : les années marquées comme extrêmement sèche sont (1978/1979, de 1981/1982 à 1985/1986, 1988/1989, de 1991/1992 à 1993/1994, de 1995/1996 à 2000/2001, 2004/2005, 2005/2006, 2007/2008, 2008/2009, 2009/2010, 2011/2012, 2012/2013, 2016/2017, 2018/2019). Quant à l'année la plus extrêmement humide, 1994/1995 a enregistré une valeur de 863,6,
- **Juillet** : les années extrêmement sèches PN < 40 sont (1978/1979 à 1984/1985, 1986/1987, 1987/1988, de 1989/1990 à 1991/1992, 1993/1994, de 1996/1997 à 2002/2003, 2004/2005, 2005/2006, 2006/2007, 2007/2008, 2013/2014, 2014/2015, 2015/2016, 2017/2018). Le nombre d'années extrêmement humides est de 8, et la valeur maximale enregistrée est de 1253,7 en 1994/1995,
- **Août** : 24 années de sécheresse extrême (PN < 40) (1977/1978, 1978/1979, 1980/1981, 1981/1982, 1982/1983, 1983/1984, 1985/1986, 1986/1987, 1987/1988, 1992/1993, 1998/1999, 1999/2000, 2001/2002, de 2003/2004 à 2008/2009, 2011/2012, 2012/2013, 2013/2014, 2015/2016, 2018/2019), et 12 années extrêmement humides avec un maximum de 1027 en 2009/2010.

Remarque : les mois de Juin, Juillet et Août sont les mois qui ont marqué le plus d'années extrêmement sèches à cause du manque des précipitations en Été.







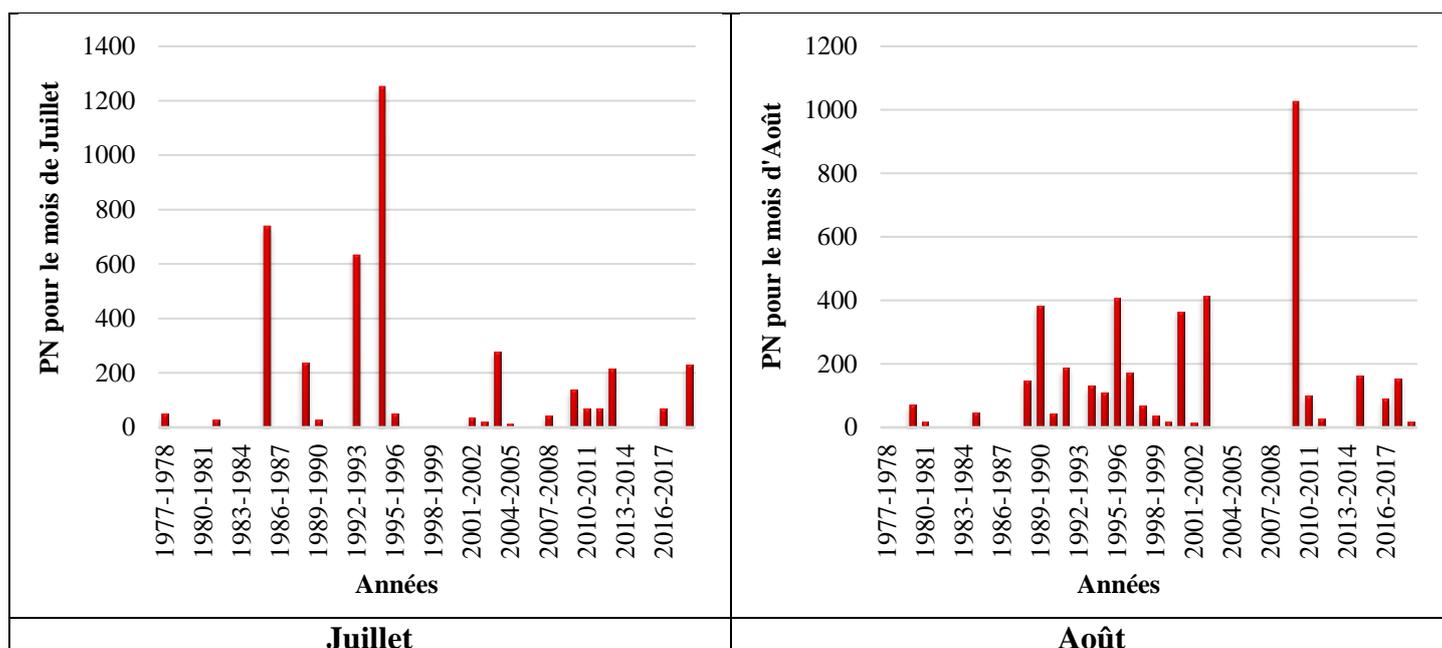
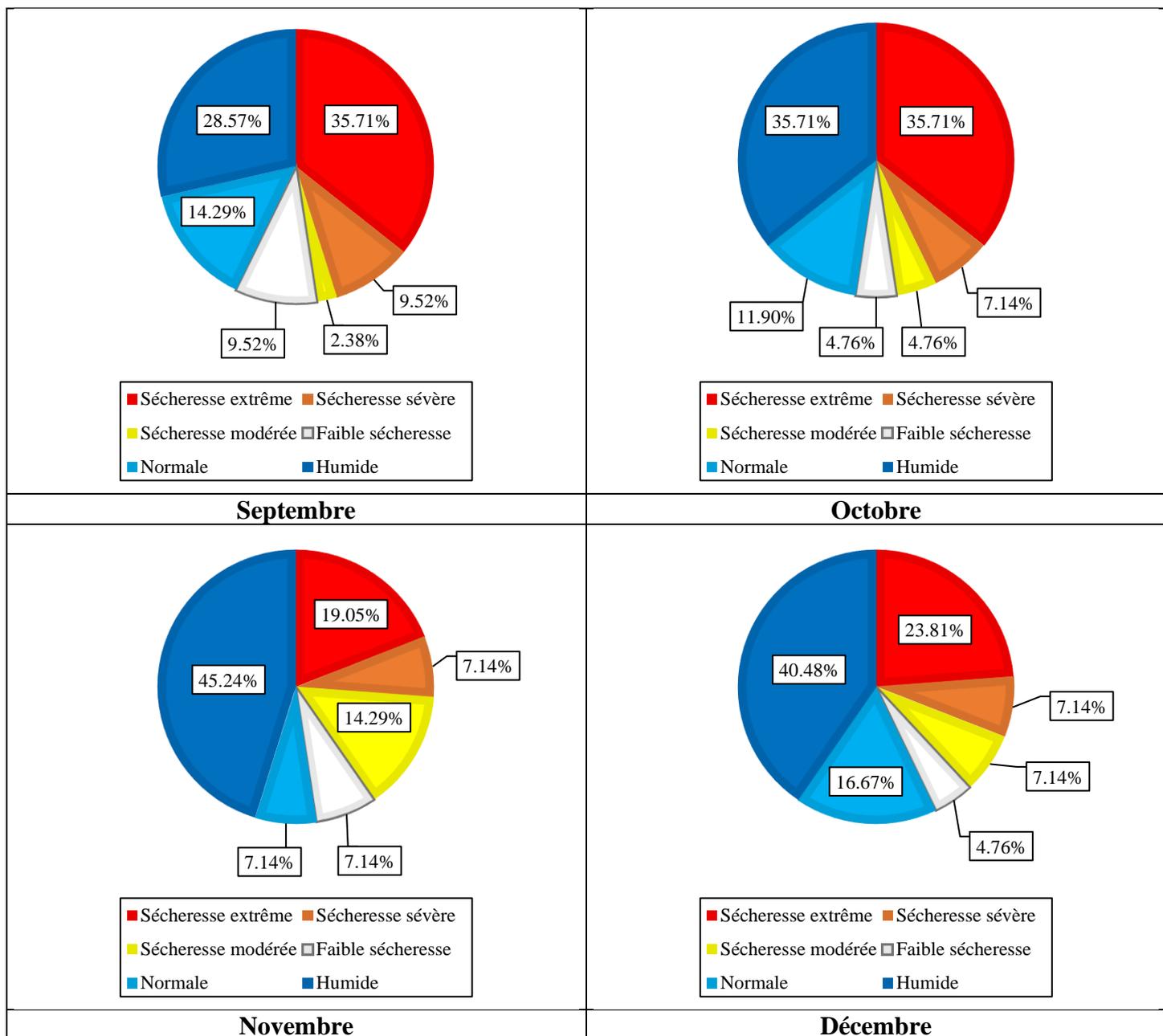


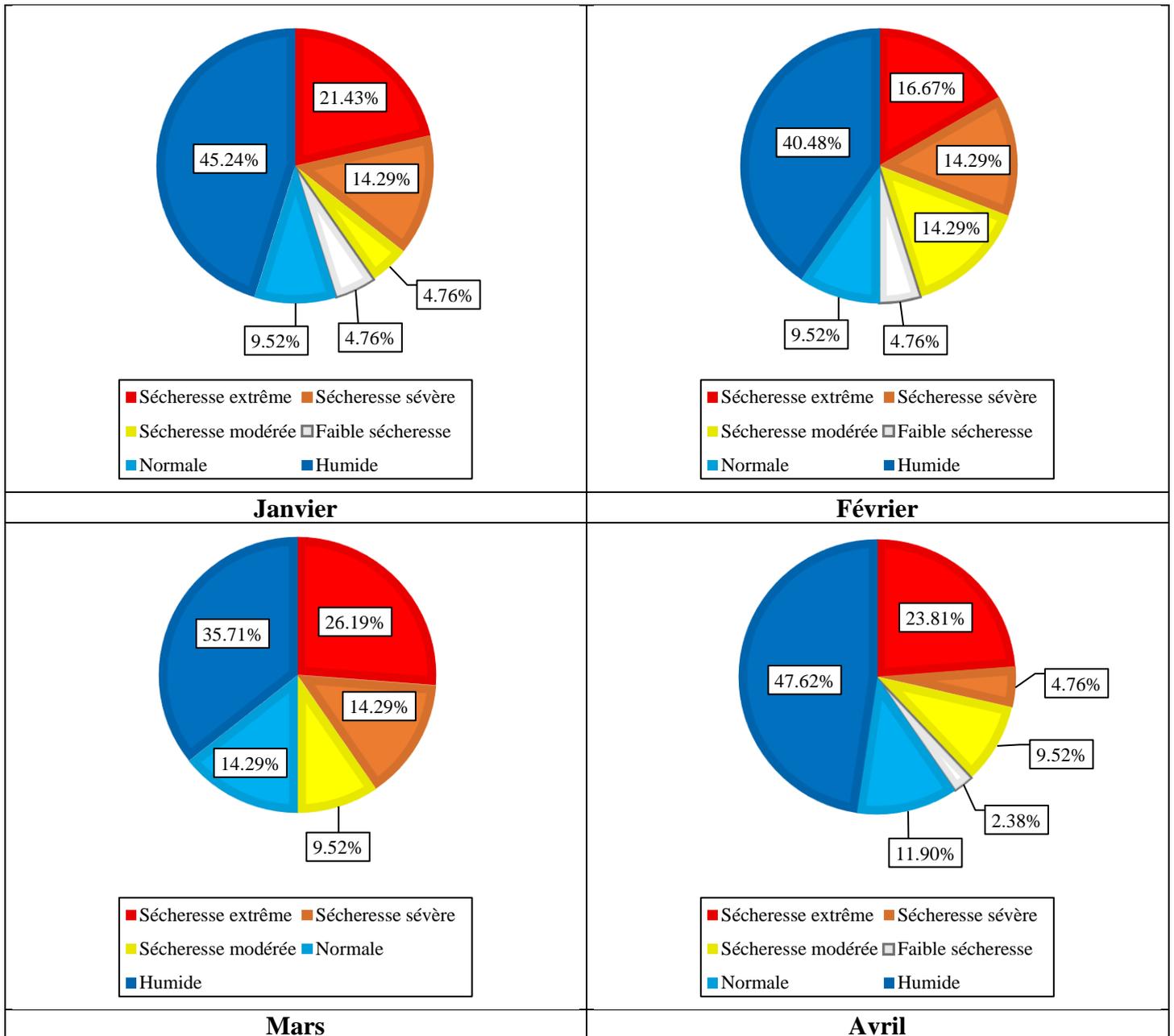
Figure VI.21 : Évolution du PN pour la série de précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

La figure VI.22 représente la répartition du PN pour la série de précipitations mensuelles enregistrées au niveau de la station de Sidi Bel Abbes au cours de la période 1977/1978-2018/2019.

La classe humide domine de Novembre à Mai, et elle a le même pourcentage que la sécheresse extrême en Septembre et Octobre, le pourcentage de la classe humide est compris entre 19,05% en Juillet et 47,62% en Avril, ce qui concerne la classe extrêmement sèche, elle domine de Juin à Août, et son intervalle est [16,67% ; 66,67%]. Ces deux dernières sont les classes qui ont le plus de présence dans notre série.

Nous remarquons l'absence de la classe faible sécheresse en Mars, Juin et en Juillet. L'absence de sécheresse modérée et sévère en Juin, et la classe normale en Juillet.





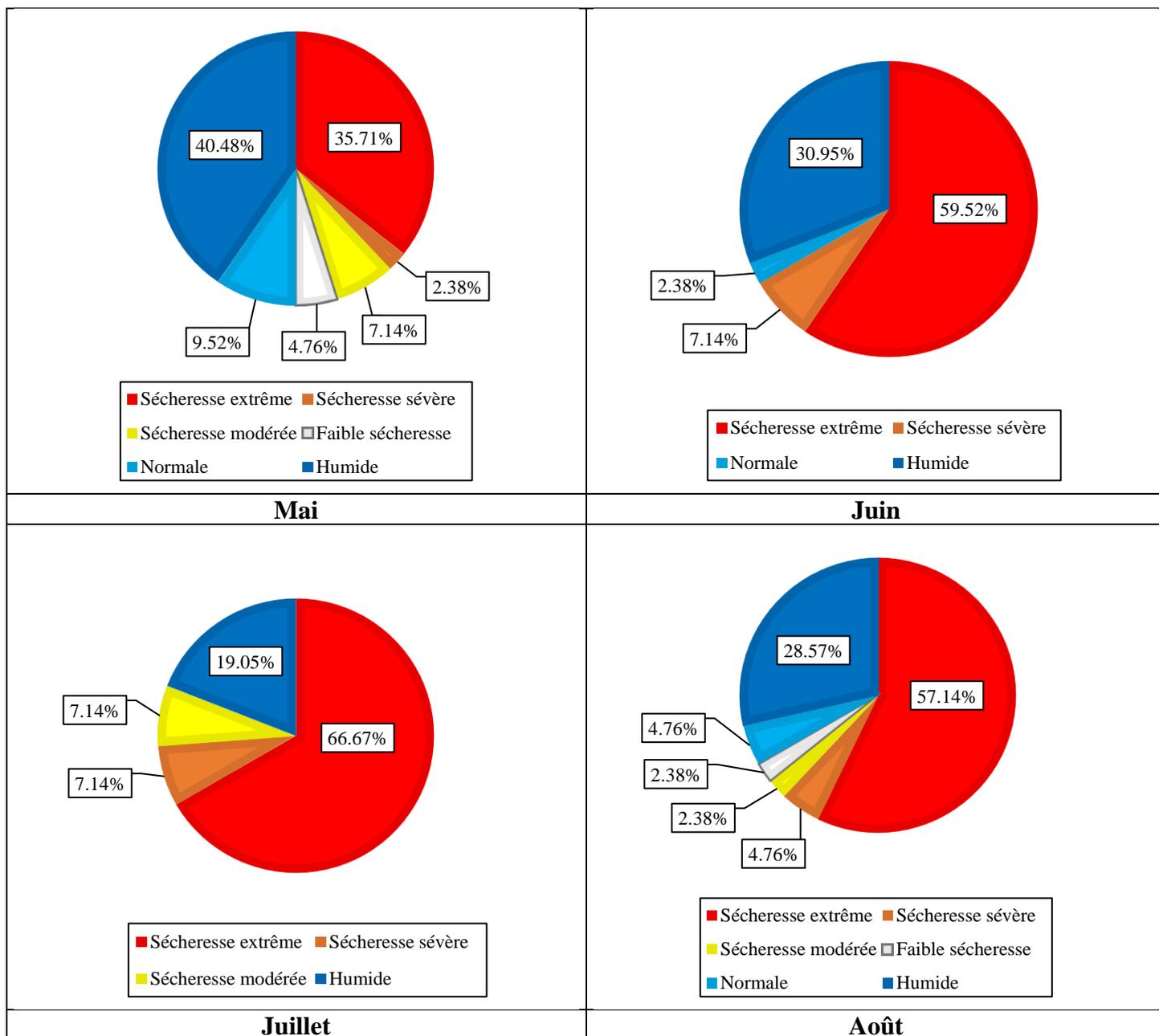


Figure VI.22 : Répartition du PN pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

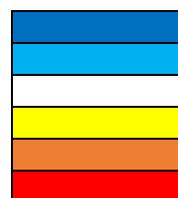
VI.3.3. À l'échelle saisonnière

Tableau VI.17 : Résultats de calcul du PN saisonnier pour la série des précipitations saisonnières de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

Année	Automne	Hiver	Printemps	Été	Année	Automne	Hiver	Printemps	Été
1977/1978					1998/1999				
1978/1979					1999/2000				
1979/1980					2000/2001				
1980/1981					2001/2002				
1981/1982					2002/2003				
1982/1983					2003/2004				
1983/1984					2004/2005				
1984/1985					2005/2006				
1985/1986					2006/2007				
1986/1987					2007/2008				
1987/1988					2008/2009				
1988/1989					2009/2010				
1989/1990					2010/2011				
1990/1991					2011/2012				
1991/1992					2012/2013				
1992/1993					2013/2014				
1993/1994					2014/2015				
1994/1995					2015/2016				
1995/1996					2016/2017				
1996/1997					2017/2018				
1997/1998					2018/2019				

Légende

Humide
Normale
Faible sécheresse
Sécheresse modérée
Sécheresse sévère
Sécheresse extrême



D'après l'évolution du PN appliquée à la série de précipitations saisonnières enregistrées au niveau de la station de Sidi Bel Abbes pendant la période 1977/1978-2018/2019 (fig.VI.23), nous remarquons que l'indice PN est faible en Été pour la majorité des années, avec une humidité la plus élevée distinguée dans cette saison de 720,3 en 1994/1995, et aucune sécheresse indiquée en 1978/1979, 1983/1984, 2005/2006 et 2008/2009. Pour les autres saisons, Automne, Hiver et Printemps, les valeurs du PN les plus élevées sont respectivement 273,6 en 1996/1997, 192,3 en 2016/2017 et 201,4 en 2017/2018, et les plus basses sont respectivement 4 en 1982/1983, 31,1 en 2000/2001 et 20 en 2016/2017.

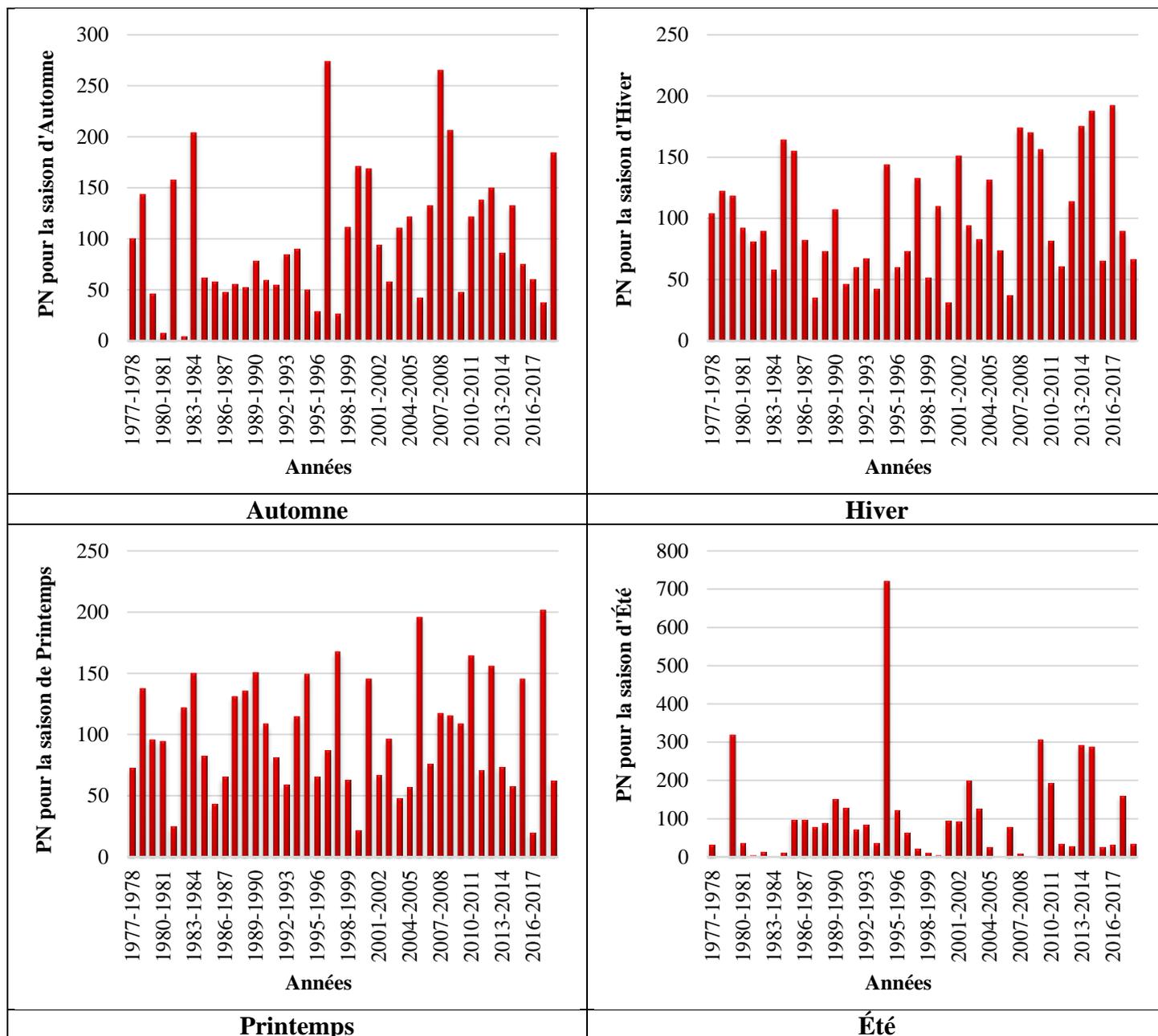


Figure VI.23 : Évolution du PN pour la série de précipitations saisonnières de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

Selon la répartition du PN (fig.VI.24), nous remarquons que la période humide est la plus dominante pour l’Automne (42,86%), l’Hiver (42,86%) et le Printemps (45,24%), mais pour l’Été, la sécheresse extrême occupe le plus grand pourcentage de 47,62%. Pour les pourcentages les plus faibles, nous citons : un pourcentage de faible sécheresse de 4,76% en Automne, un pourcentage de 7,14% en Hiver remarquable pour la sécheresse extrême, la sécheresse sévère et faible sécheresse, et enfin, le pourcentage de la sécheresse sévère est nul en Été, et aussi il est de l’ordre de 4,76% au Printemps.

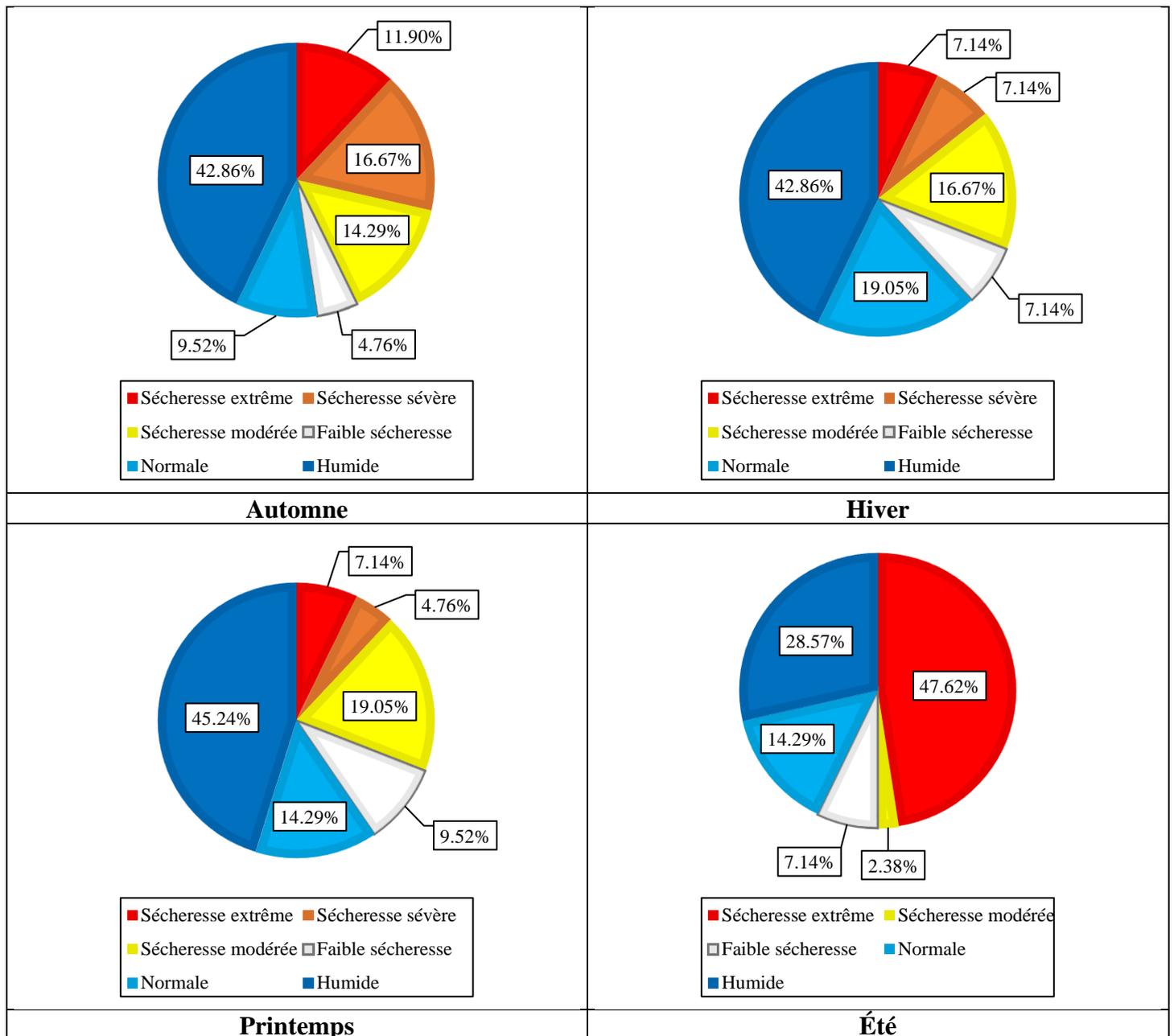


Figure VI.24 : Répartition du PN pour la série de précipitations saisonnières de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

VI.4. Calcul du DI (Indice décile)

VI.4.1. À l'échelle annuelle

Tableau VI.18 : Résultats de calcul du DI annuel pour la série des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

Année	DI annuel	Année	DI annuel	Année	DI annuel
1977/1978		1991/1992		2005/2006	
1978/1979		1992/1993		2006/2007	
1979/1980		1993/1994		2007/2008	
1980/1981		1994/1995		2008/2009	
1981/1982		1995/1996		2009/2010	
1982/1983		1996/1997		2010/2011	
1983/1984		1997/1998		2011/2012	
1984/1985		1998/1999		2012/2013	
1985/1986		1999/2000		2013/2014	
1986/1987		2000/2001		2014/2015	
1987/1988		2001/2002		2015/2016	
1988/1989		2002/2003		2016/2017	
1989/1990		2003/2004		2017/2018	
1990/1991		2004/2005		2018/2019	

Légende

Sécheresse extrême
 Sécheresse sévère
 Sécheresse modérée
 Faible sécheresse
 Pas de sécheresse



Selon l'analyse des résultats de l'indice décile (DI) appliquée à la série de précipitations annuelles enregistrées au niveau de la station de Sidi Bel Abbes sur 42 ans (1977/1978-2018/2019) représentée sur la figure VI.25, nous observons que pendant la période 1980/1981 jusqu'à 1995/1996, il y a une alternance entre les périodes extrêmement sèches et pas de sécheresse, les valeurs du DI varient entre 1 et 9, quant à l'intervalle de 1997/1998 à 2018/2019, la série varie entre une sécheresse modérée et pas de sécheresse. Dans cet intervalle, nous remarquons la présence de 4 années qui ont marqué la valeur maximale 10 du DI en 1996/1997, 2007/2008, 2008/2009 et 2014/2015.

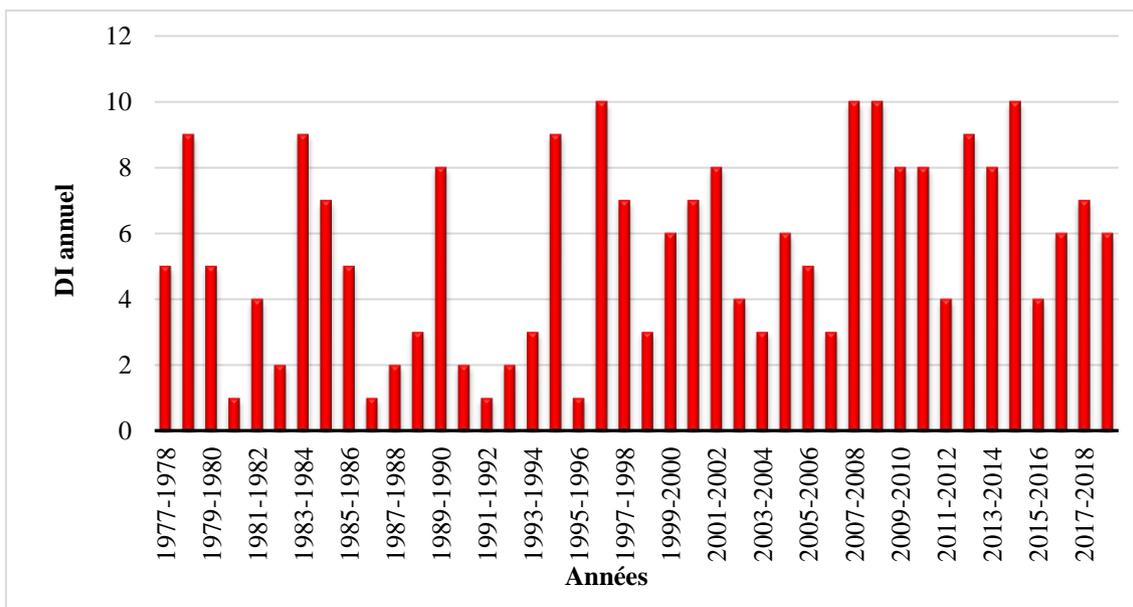


Figure VI.25 : Évolution du DI pour la série de précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbès (1977/1978-2018/2019)

La répartition de l'indice DI à l'échelle annuelle représentée dans la figure VI.26, montre la dominance de la classe pas de sécheresse avec 59,52%. Les quatre autres classes sont du même ordre, en effet les classes sécheresse faible, sévère et extrême occupent 9,52% et la sécheresse modérée 11,90% de la période.

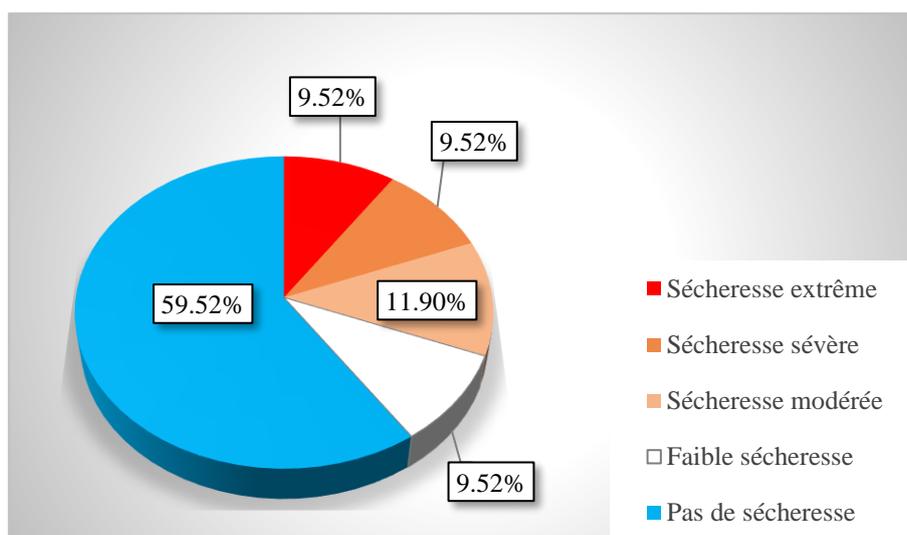


Figure VI.26 : Répartition du DI pour la série des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbès (1977/1978-2018/2019)

VI.4.2. À l'échelle mensuelle

Tableau VI.19 : Résultats de calcul du DI mensuel pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbès (1977/1978-2018/2019)

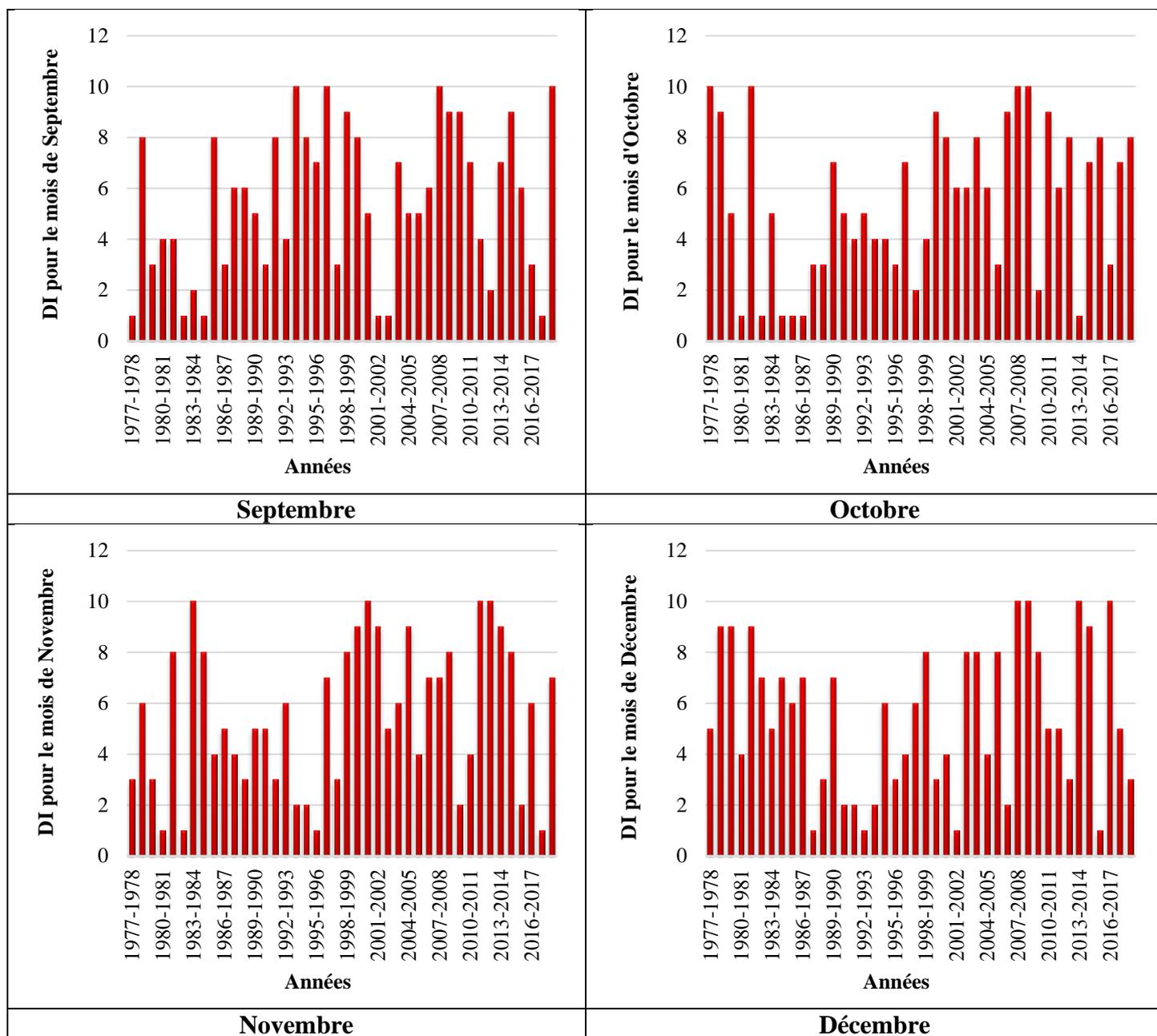
Année	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
1977/1978	Red	Blue	Orange	Blue	Orange	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue
1978/1979	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Orange	Blue	White	Blue	Red	Red	Red
1979/1980	Orange	Blue	Orange	Blue	White	Blue	Blue	Blue	Orange	Blue	Red	Blue
1980/1981	White	Red	Red	White	Orange	Blue	Red	Orange	Blue	Blue	Red	Blue
1981/1982	White	Blue	Blue	Blue	Red	Blue	White	Red	Orange	Red	Blue	Red
1982/1983	Red	Red	Red	Blue	White	Blue	Blue	Orange	Blue	Blue	Red	Blue
1983/1984	Orange	Blue	Blue	Blue	Blue	Orange	Blue	Blue	Blue	Red	Red	Red
1984/1985	Red	Red	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Red	Blue	Blue	Blue
1985/1986	Blue	Red	White	Blue	Blue	Blue	White	Red	Blue	Red	Blue	Red
1986/1987	Orange	Red	Blue	Blue	Blue	Orange	White	Blue	White	Blue	Red	Red
1987/1988	Blue	Orange	White	Red	Orange	Orange	Blue	Blue	Orange	Blue	Red	Red
1988/1989	Blue	Orange	Orange	Orange	Blue	Red	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
1989/1990	Blue	Orange	Orange	Blue	Blue	Blue						
1990/1991	Orange	Blue	Blue	Orange	White	Orange	Blue	Blue	Orange	Blue	Red	Blue
1991/1992	Blue	White	Orange	Orange	Red	Blue	Red	Blue	Blue	Blue	Red	Blue
1992/1993	White	Blue	Blue	Red	Blue	Blue	Red	Blue	White	Red	Blue	Red
1993/1994	Blue	White	Orange	Orange	Orange	White	Blue	White	Red	White	Red	Blue
1994/1995	Blue	White	Orange	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
1995/1996	Blue	Orange	Red	Orange	Blue	Orange	Orange	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
1996/1997	Blue	Blue	Blue	White	Orange	Blue	Orange	Blue	Blue	Blue	Red	Blue
1997/1998	Orange	Orange	Orange	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Red	White	Red	Blue
1998/1999	Blue	White	Blue	Blue	Red	Red	Orange	Orange	Blue	White	Red	Blue
1999/2000	Blue	Blue	Blue	Orange	Blue	Blue	Red	Orange	Orange	Red	Red	Blue
2000/2001	Blue	Blue	Blue	White	Red	Red	Blue	Blue	Blue	Red	Red	Blue
2001/2002	Red	Blue	Blue	Red	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue	Blue
2002/2003	Red	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Orange	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
2003/2004	Blue	Blue	Blue	Blue	Orange	Blue	Blue	Orange	Red	Blue	Blue	Red
2004/2005	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Red	Orange	Blue	Blue	Blue	Blue
2005/2006	Blue	Orange	White	Blue	Orange	Orange	Blue	Blue	Orange	Red	Red	Blue
2006/2007	Blue	Blue	Blue	Orange	Orange	Orange	Orange	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
2007/2008	Blue	White	White	Blue	Blue							
2008/2009	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue	Red	Red	Red
2009/2010	Blue	Orange	Orange	Blue	Blue	Blue	Blue	Orange	Blue	Blue	Blue	Blue
2010/2011	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue	Orange	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
2011/2012	White	Blue	Blue	Blue	Orange	Blue	Blue	Blue	Orange	Blue	Blue	Blue
2012/2013	Orange	Blue	Blue	Orange	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Red	Blue	Red
2013/2014	Blue	Red	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Orange	Blue	Blue	Red	Red
2014/2015	Blue	Red	Blue	Blue	Blue	Blue						
2015/2016	Blue	Blue	Orange	Red	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Red	Red
2016/2017	Orange	Orange	Blue	Blue	Blue	Red	Orange	Red	Orange	Red	Blue	Blue
2017/2018	Red	Blue	Red	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Red	Blue
2018/2019	Blue	Blue	Blue	Orange	Blue	Orange	Orange	Blue	Blue	Red	Blue	Blue

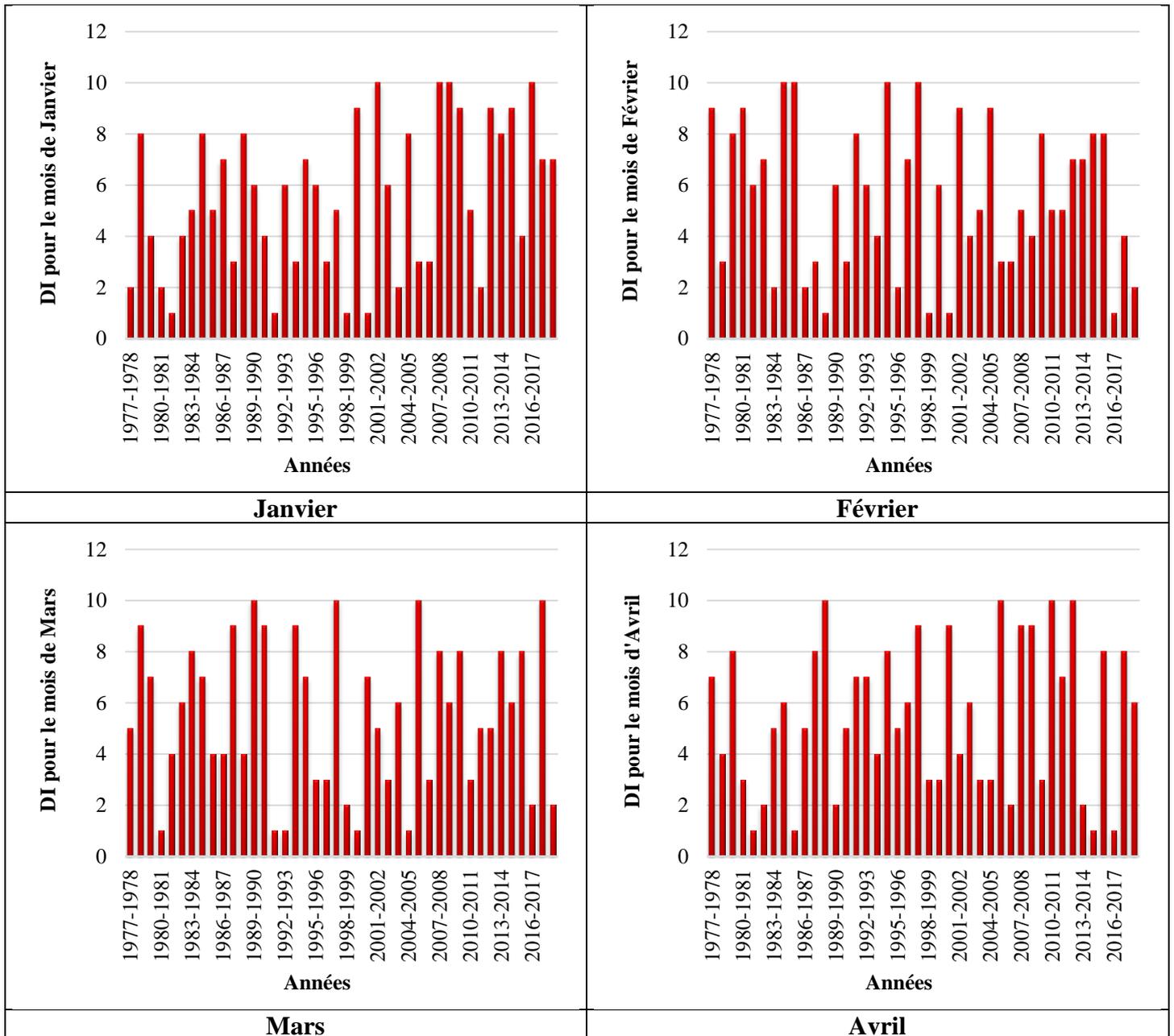
Légende

- Sécheresse extrême
- Sécheresse sévère
- Sécheresse modérée
- Faible sécheresse
- Pas de sécheresse



L'évolution du DI (fig.VI.27) nous indique que la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019), est caractérisée par l'émergence des épisodes humides beaucoup plus que sèches pour tous les mois.





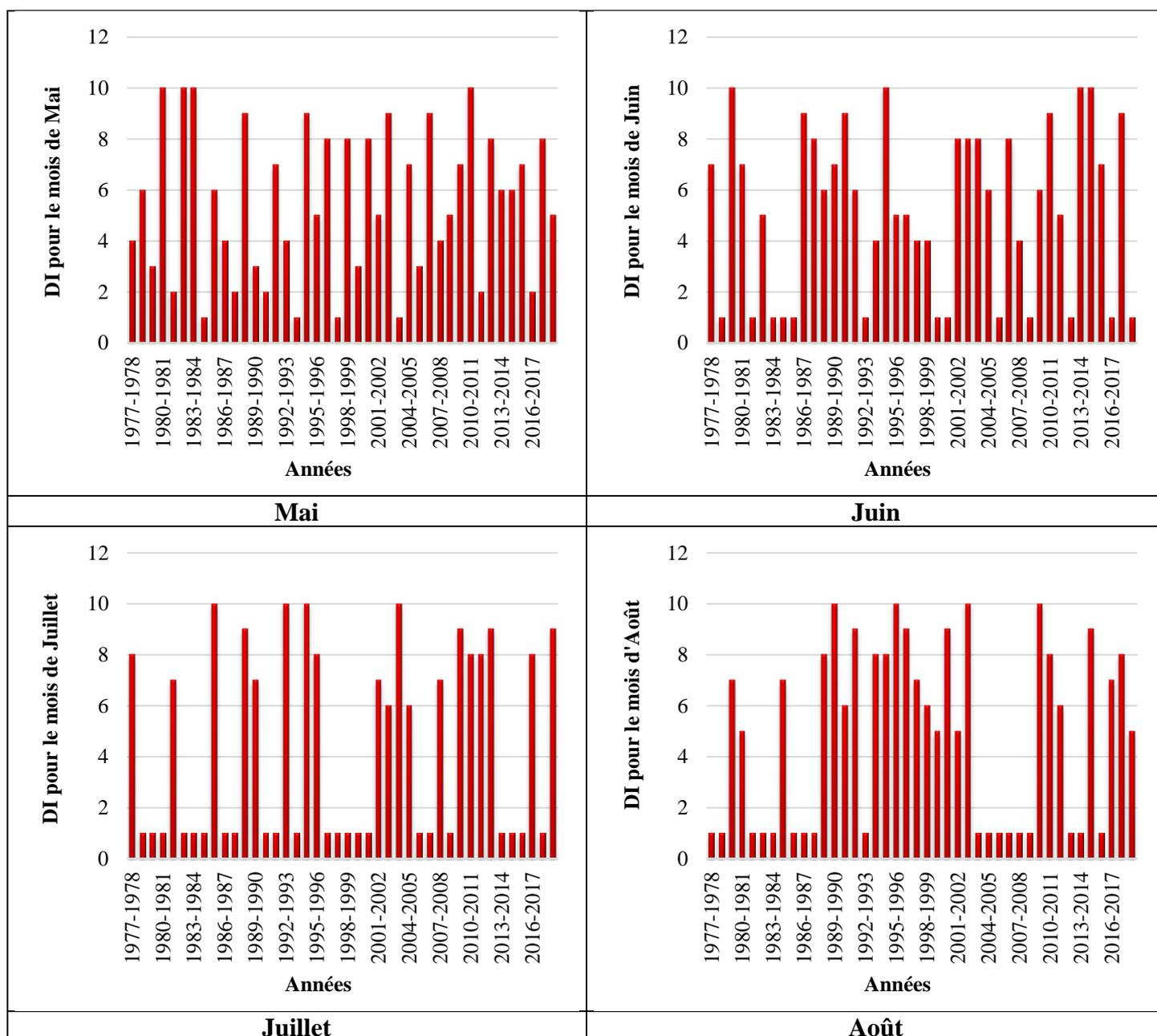
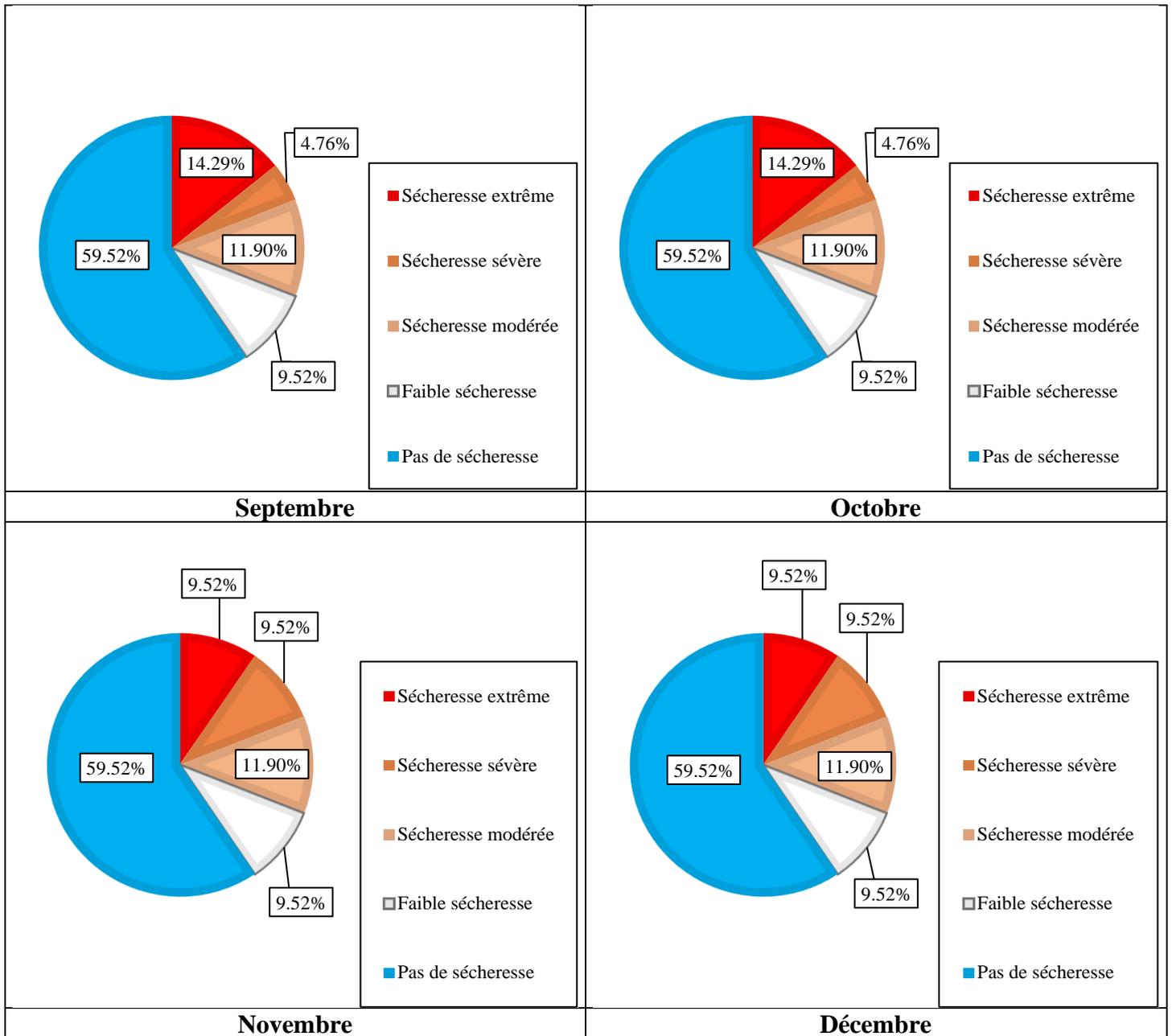
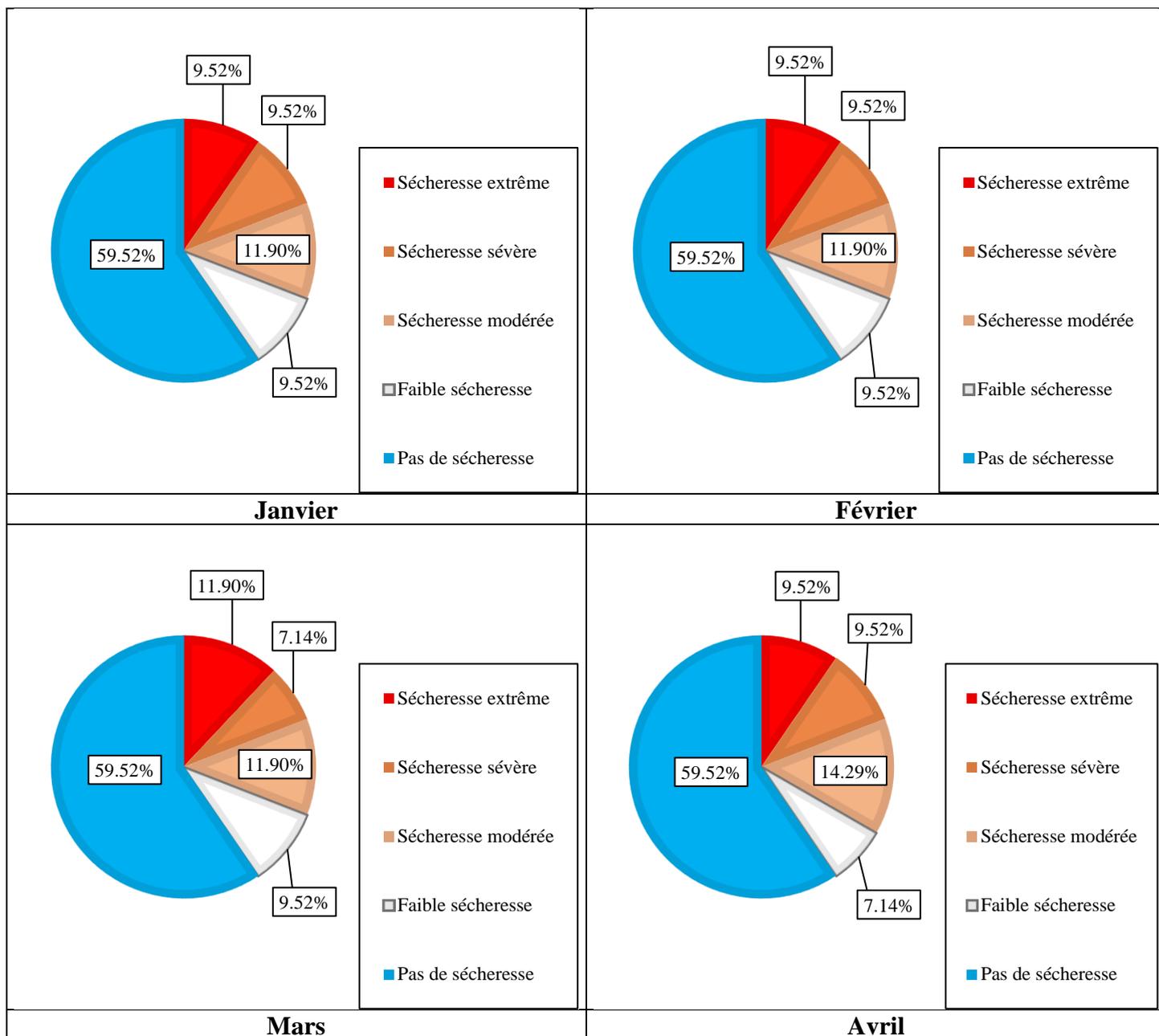


Figure VI.27 : Évolution du DI pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

Nous observons d’après la répartition du DI (fig.VI.28) que la classe pas de sécheresse est dominante par rapport aux autres classes avec un pourcentage de 59,52% remarquable pour Septembre jusqu’à Juin, et pour les mois de Juillet et Août, leurs pourcentages sont respectivement 45,24% et 57,14%.

Nous remarquons aussi l’apparition du pourcentage 9,52% pour toutes les classes de sécheresse. Ensuite, un autre pourcentage remarquable dans cette période qui est de 11,90%, pour la sécheresse extrême en Mars, pour la sécheresse sévère en Mai, et pour la sécheresse modérée, de Septembre jusqu’à Mars. Notons qu’en Juillet, la classe sécheresse extrême peut occuper jusqu’à 54,76%.





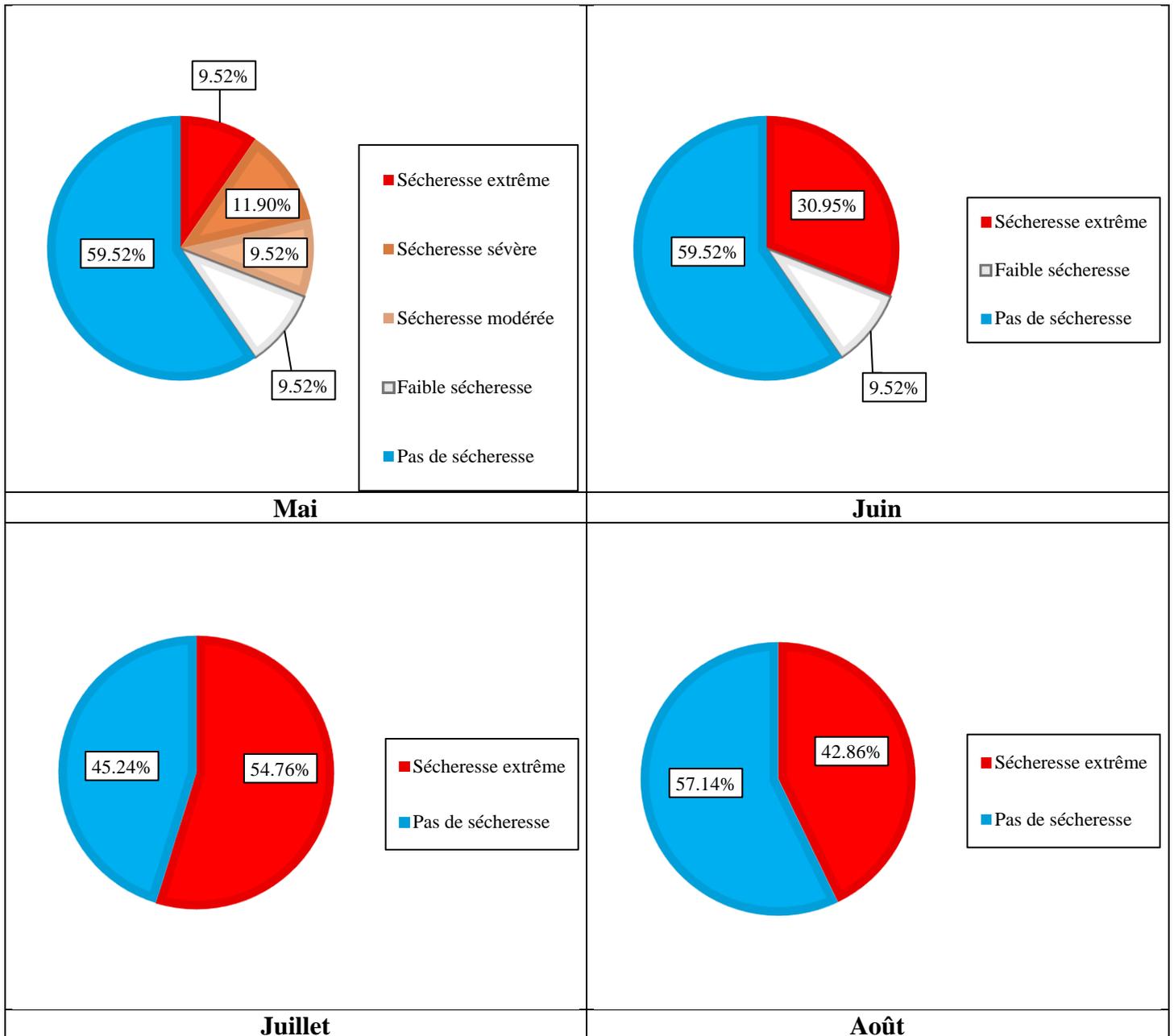


Figure VI.28 : Répartition du DI pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbès (1977/1978-2018/2019)

VI.4.3. À l'échelle saisonnière

Tableau VI.20 : Résultats de calcul du DI saisonnier pour la série des précipitations saisonnières de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

Année	Automne	Hiver	Printemps	Été	Année	Automne	Hiver	Printemps	Été
1977/1978					1998/1999				
1978/1979					1999/2000				
1979/1980					2000/2001				
1980/1981					2001/2002				
1981/1982					2002/2003				
1982/1983					2003/2004				
1983/1984					2004/2005				
1984/1985					2005/2006				
1985/1986					2006/2007				
1986/1987					2007/2008				
1987/1988					2008/2009				
1988/1989					2009/2010				
1989/1990					2010/2011				
1990/1991					2011/2012				
1991/1992					2012/2013				
1992/1993					2013/2014				
1993/1994					2014/2015				
1994/1995					2015/2016				
1995/1996					2016/2017				
1996/1997					2017/2018				
1997/1998					2018/2019				

Légende

Sécheresse extrême
 Sécheresse sévère
 Sécheresse modérée
 Faible sécheresse
 Pas de sécheresse



La figure VI.29 représente l'évolution du DI (décile index) pour la série des précipitations saisonnières à la station de Sidi Bel Abbes relatif à la période 1977/1978-2018/2019 montre que :

- **En Automne** : la série présente une alternance entre la classe extrêmement sèche (1980/1981, 1982/1983, 1995/1996, 1997/1998) et la classe pas de sécheresse. Cette alternance est bien visible dans la période de 1979/1980 à 1997/1998. La période de 1998/1999 à 2018/2019 est marquée par la dominance des années humides mais cela n'empêche pas la présence de pic sec,
- **En Hiver** : l'évolution de l'indice DI montre que pendant la période de 1977/1978 à 1981/1982, il n'y a pas de sécheresse enregistrée, de 1987/1988 à 2006/2007, nous notons une variation des différentes classes de DI. Pour les années dont l'Hiver est classé extrêmement sec, nous citons 1987/1988, 1993/1994, 2000/2001 et 2006/2007,
- **Au Printemps** : l'indice DI montre que la série de 1977/1978-2018/2019 est très variée, où nous notons une présence de sécheresse remarquable pendant les années 1981/1982, 1985/1986, 1999/2000, 2016/2017,

- **En Été** : l'analyse de l'évolution de cet indice DI met en évidence la présence d'une forte sécheresse focalisée dans les périodes suivantes : 1978/1979, 1983/1984, 2005/2006, 2008/2009. La période de 1985/1986 jusqu'à 1996/1997 n'a marqué aucune sécheresse.

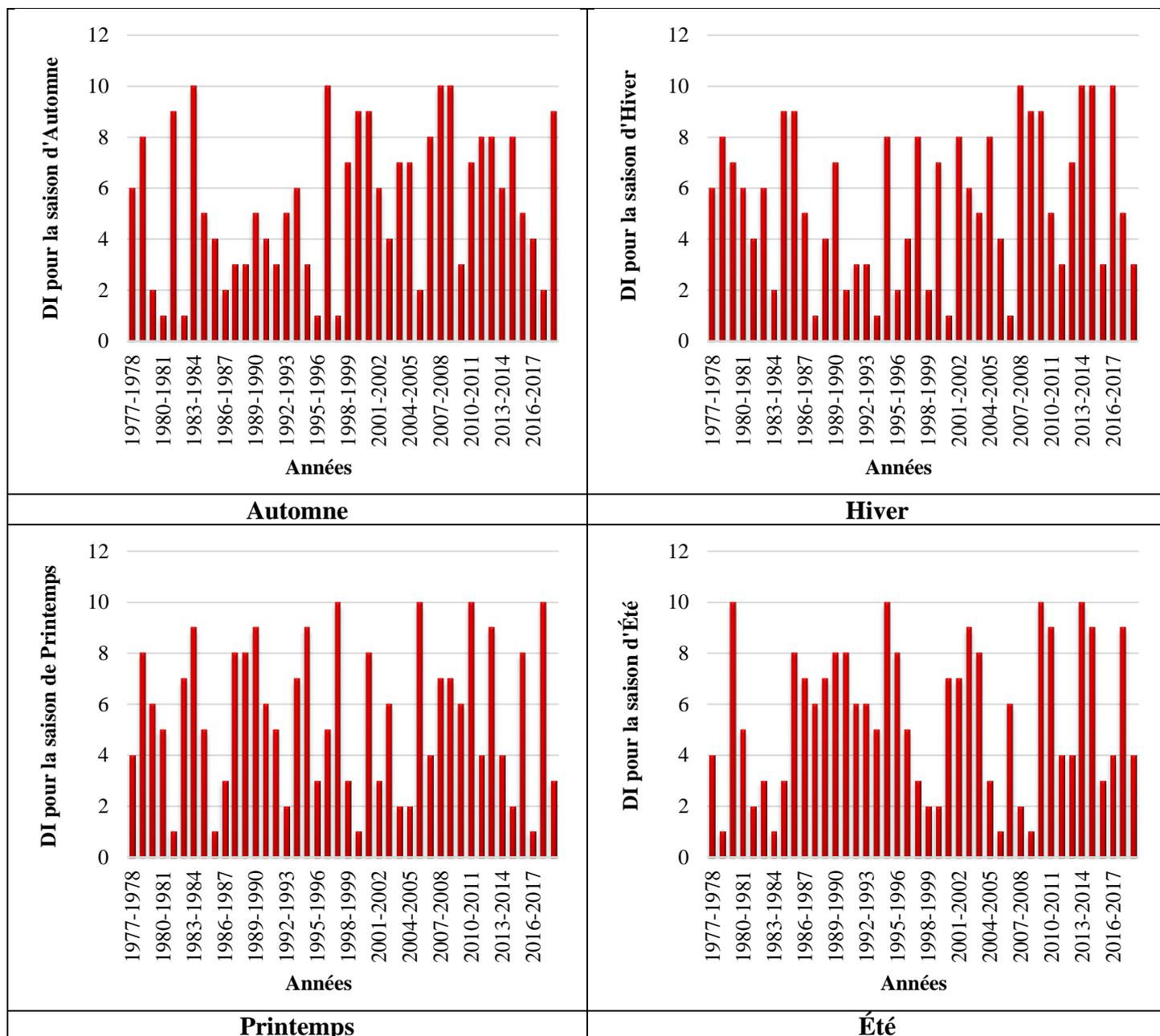


Figure VI.29 : Évolution du DI pour la série de précipitations saisonnières à la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

D'après la répartition de l'indice DI à l'échelle saisonnière (fig.VI.30), la classe pas de sécheresse prend de l'ampleur et domine dans les quatre saisons. Vient en deuxième position, la classe sécheresse modérée qui occupe 11,90%. Quant aux autres classes, elles représentent 9,52% de la période totale.

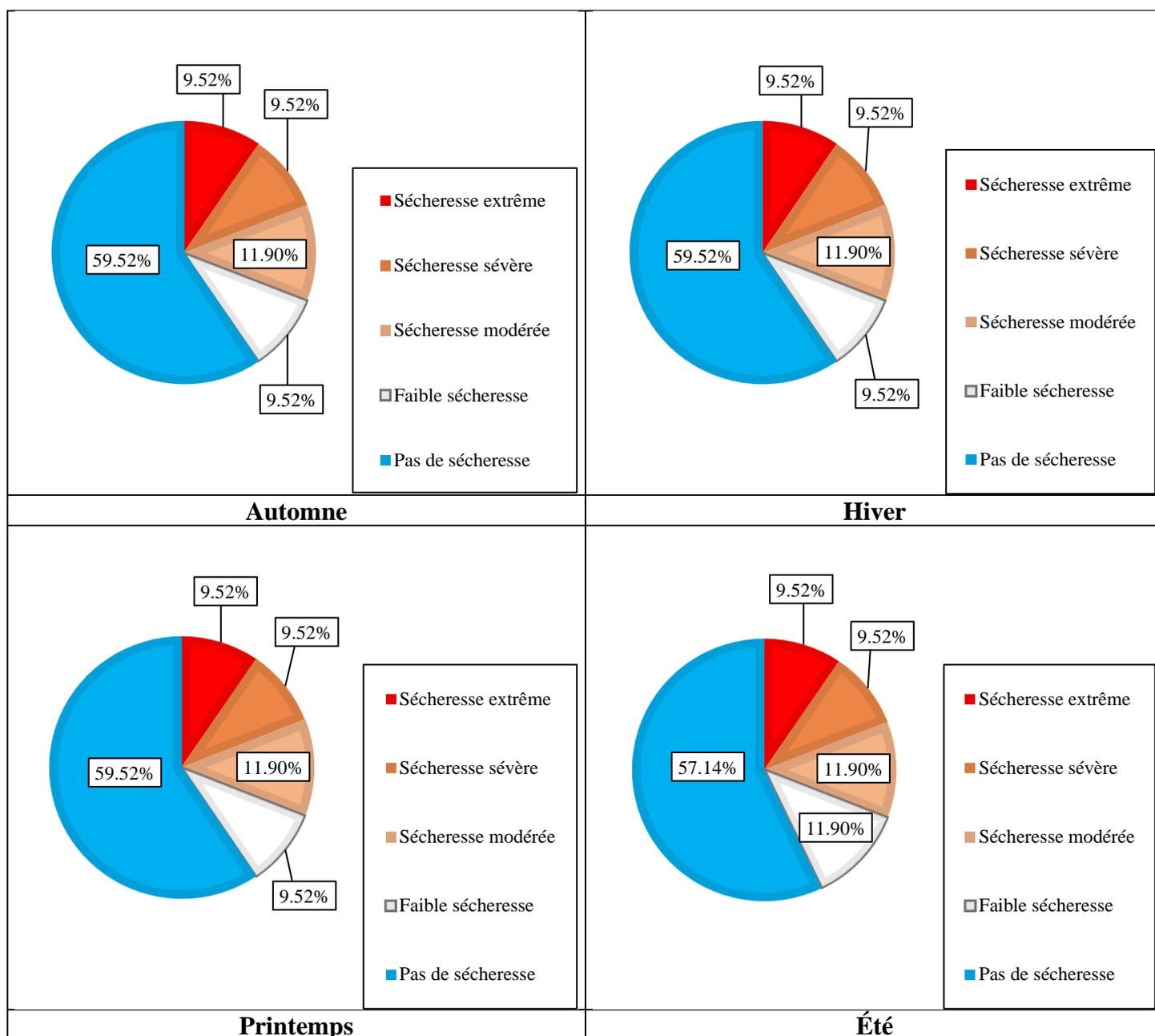


Figure VI.30 : Répartition du DI pour la série des précipitations saisonnières à la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

- *Remarque* : le calcul de l'indice EDI (l'indice de sécheresse effectif) n'a pas été effectué par le logiciel MDM, car il nécessite des données pluviométriques journalières que nous ne possédons pas.

VI.5. Calcul du CZI (Indice Z chinois)

Tableau VI.21 : Résultats de calcul du CZI pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

Année	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
1977/1978	NaN											
1978/1979												
1979/1980	NaN											
1980/1981			NaN									
1981/1982												
1982/1983	NaN		NaN									
1983/1984	NaN											
1984/1985	NaN											
1985/1986												
1986/1987												
1987/1988												
1988/1989												
1989/1990												
1990/1991												
1991/1992												
1992/1993												
1993/1994												
1994/1995												
1995/1996												
1996/1997												
1997/1998	NaN											
1998/1999												
1999/2000												
2000/2001												
2001/2002	NaN											
2002/2003	NaN											
2003/2004												
2004/2005												
2005/2006												
2006/2007												
2007/2008												
2008/2009												
2009/2010												
2010/2011												
2011/2012												
2012/2013	NaN											
2013/2014												
2014/2015												
2015/2016												
2016/2017	NaN											
2017/2018	NaN											
2018/2019												

Légende

- Extrêmement humide
- Très humide
- Modérément humide
- Proche de la normale
- Modérément sec
- Sévèrement sec
- Extrêmement sec
- Pas un nombre

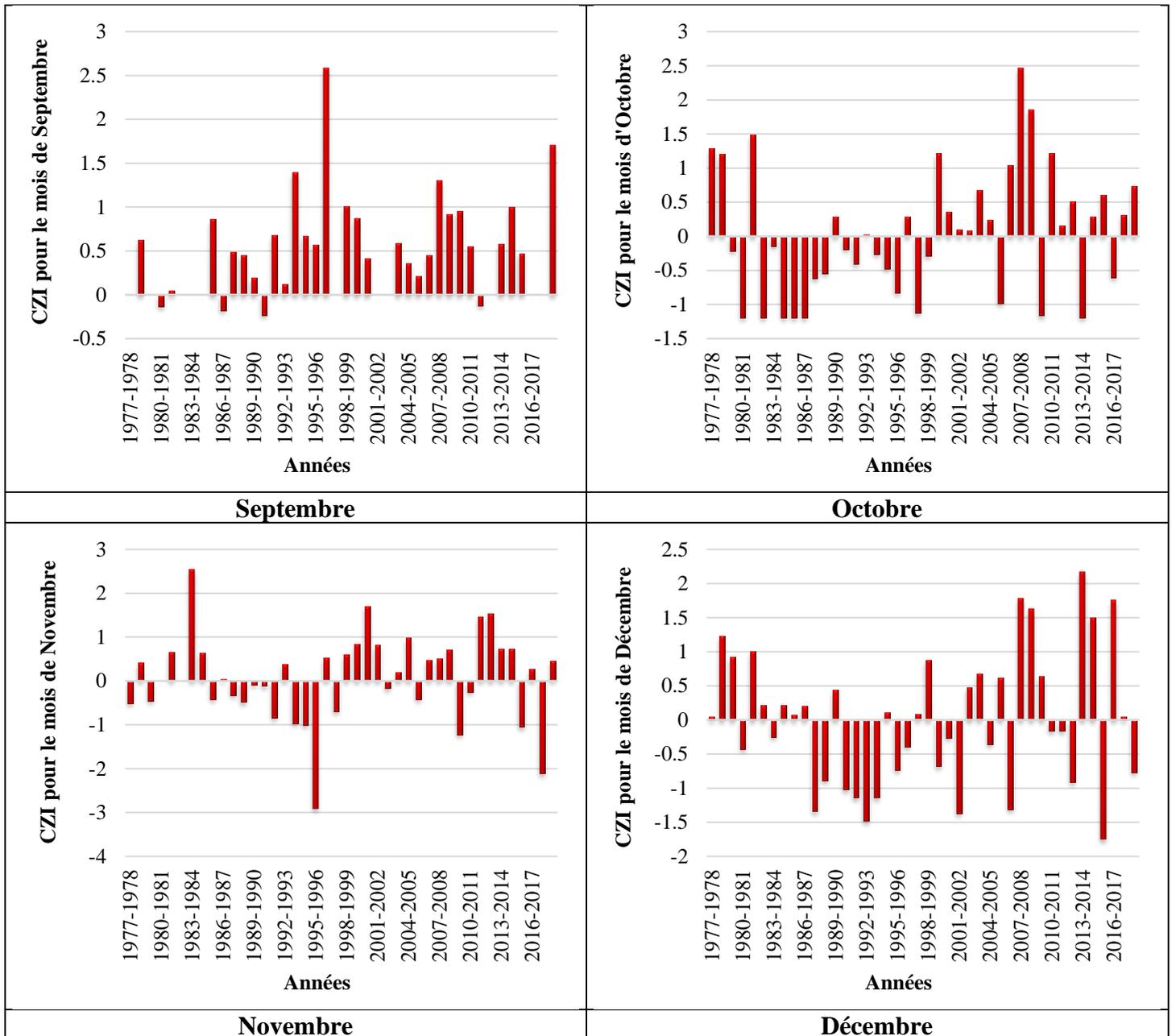


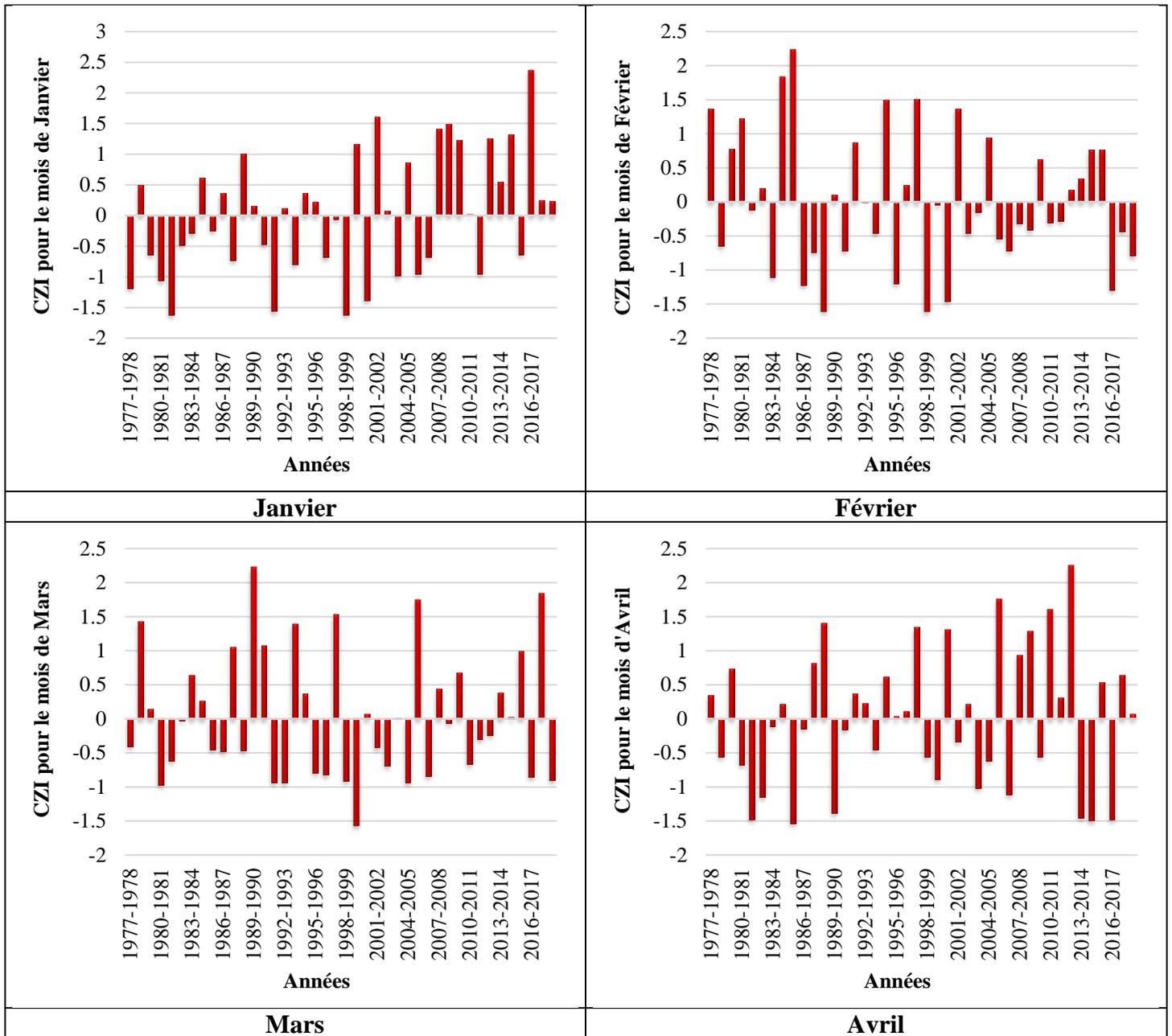
Selon l'évolution du CZI calculée pour la série des précipitations mensuelles enregistrées au niveau de la station de Sidi Bel Abbès au cours de la période 1977/1978-2018/2019 (fig.VI.31), nous remarquons que notre série étudiée est caractérisée par l'alternance d'épisodes humides et secs. Nous observons aussi que la forte sécheresse est concentrée en Octobre et de Décembre à Mai.

L'humidité la plus élevée est enregistrée en Septembre 1996/1997 correspondant à une valeur maximale du CZI de 2,58, d'autre part, la sécheresse la plus élevée est enregistrée en Novembre 1995/1996 correspondant à une valeur minimale du CZI de -2,91 (tab.VI.22).

Tableau VI.22 : CZI maximaux et minimaux pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbès (1977/1978-2018/2019)

Mois	Période humide		Période sèche	
	CZI max	Date	CZI min	Date
Septembre	2,58	1996/1997	-0,23	1990/1991
Octobre	2,46	2007/2008	-1,19	1980/1981, 1982/1983, 1984/1985 à 1986/1987, 2013/2014
Novembre	2,54	1983/1984	-2,91	1995/1996
Décembre	2,17	2013/2014	-1,75	2015/2016
Janvier	2,37	2016/2017	-1,62	1981/1982, 1998/1999
Février	2,24	1985/1986	-1,61	1988/1989, 1998/1999
Mars	2,23	1989/1990	-1,57	1999/2000
Avril	2,25	2012/2013	-1,53	1985/1986
Mai	2,14	1982/1983	-1,26	1993/1994
Juin	2,48	1994/1995	-0,44	1978/1979, 1981/1982, 1983/1984 à 1985/1986, 1992/1993, 1999/2000, 2000/2001, 2005/2006, 2008/2009, 2012/2013, 2016/2017, 2018/2019
Juillet	2,50	1994/1995	-0,04	1978/1979 à 1980/1981, 1982/1983 à 1984/1985, 1986/1987, 1987/1988, 1990/1991, 1991/1992, 1993/1994, 1996/1997 à 2000/2001, 2005/2006, 2006/2007, 2008/2009, 2013/2014 à 2015/2016, 2017/2018
Août	2,55	2009/2010	-0,38	1977/1978, 1978/1979, 1981/1982 à 1983/1984, 1985/1986 à 1987/1988, 1992/1993, 2003/2004 à 2008/2009, 2012/2013, 2013/2014, 2015/2016





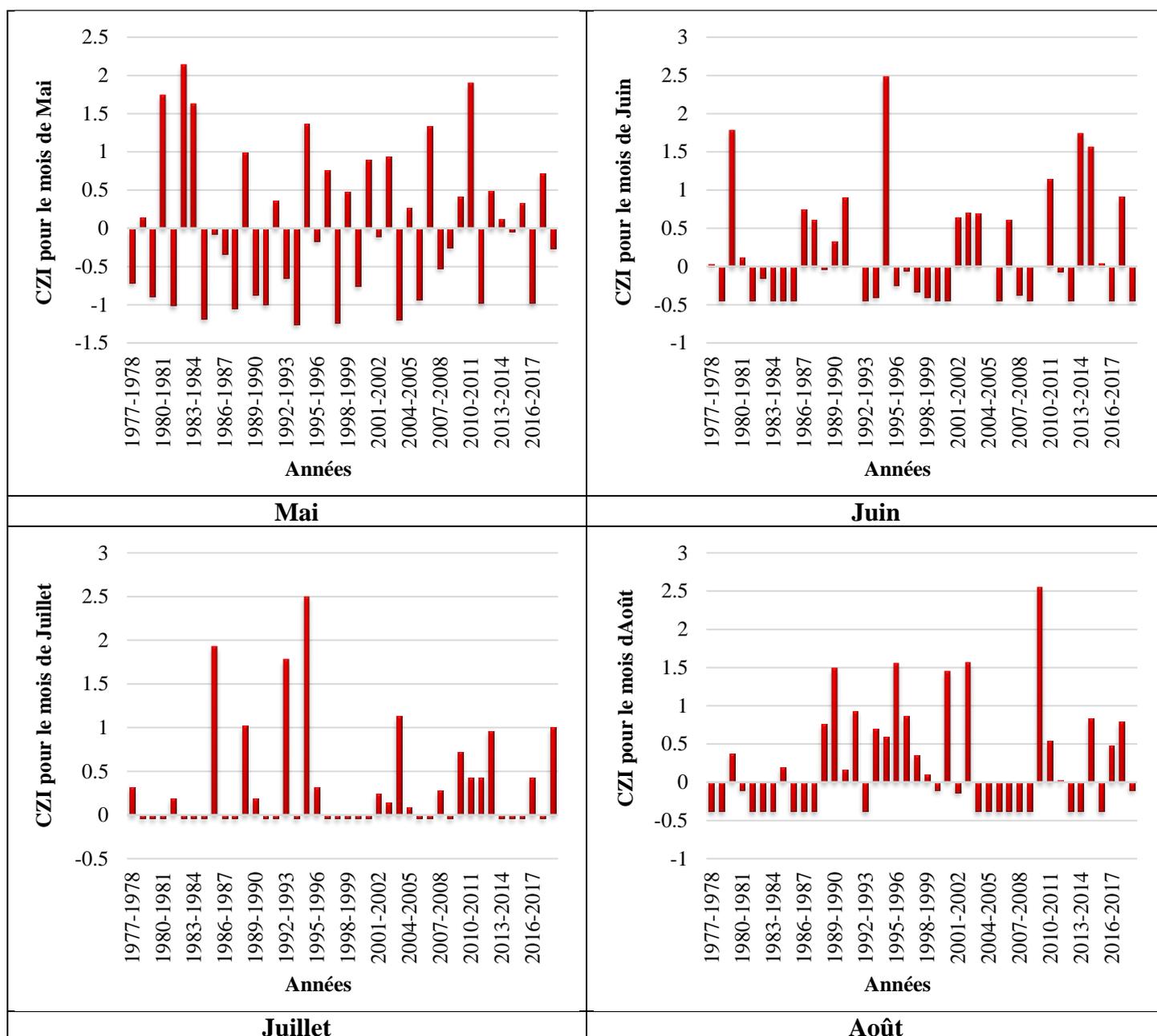
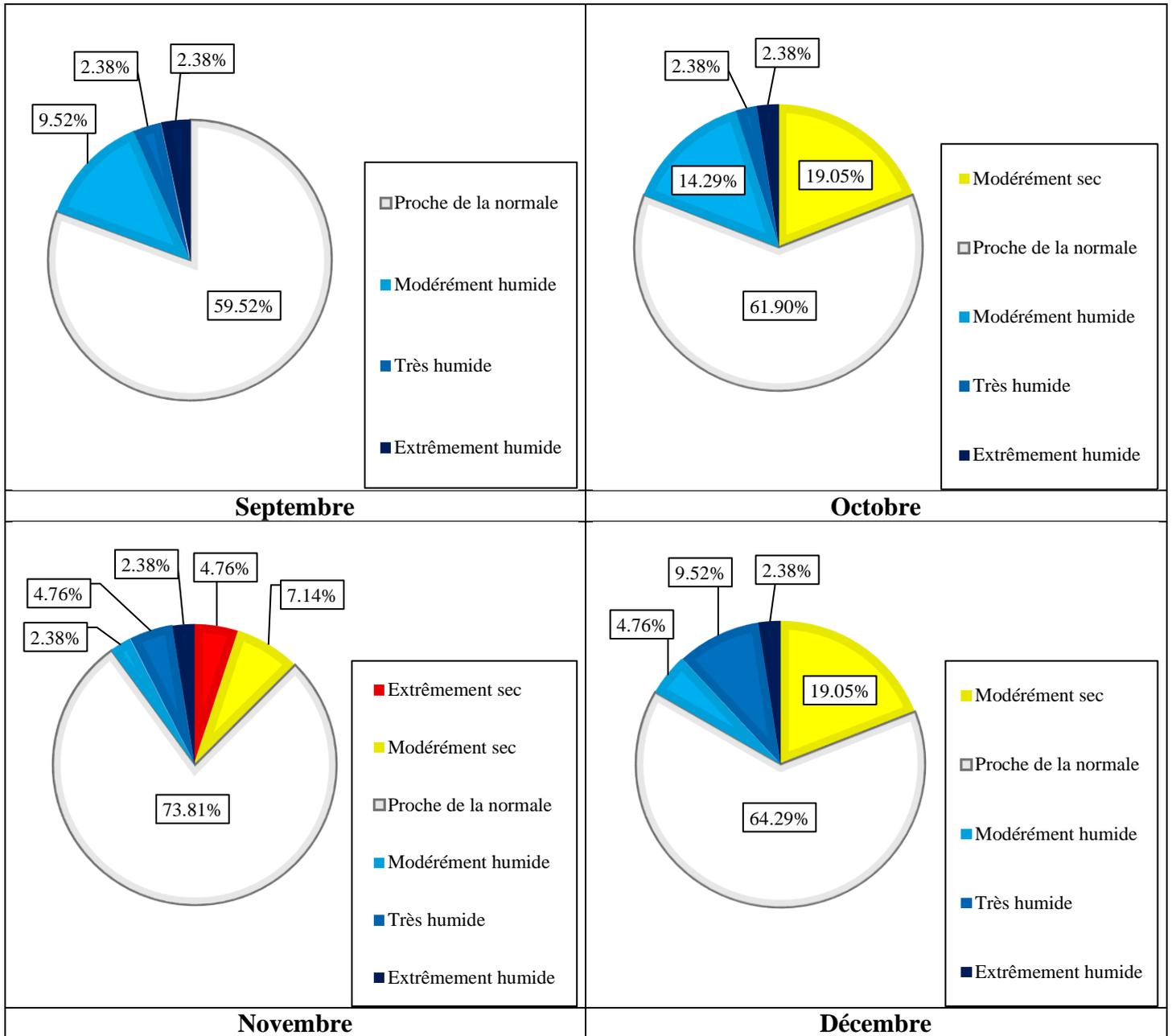


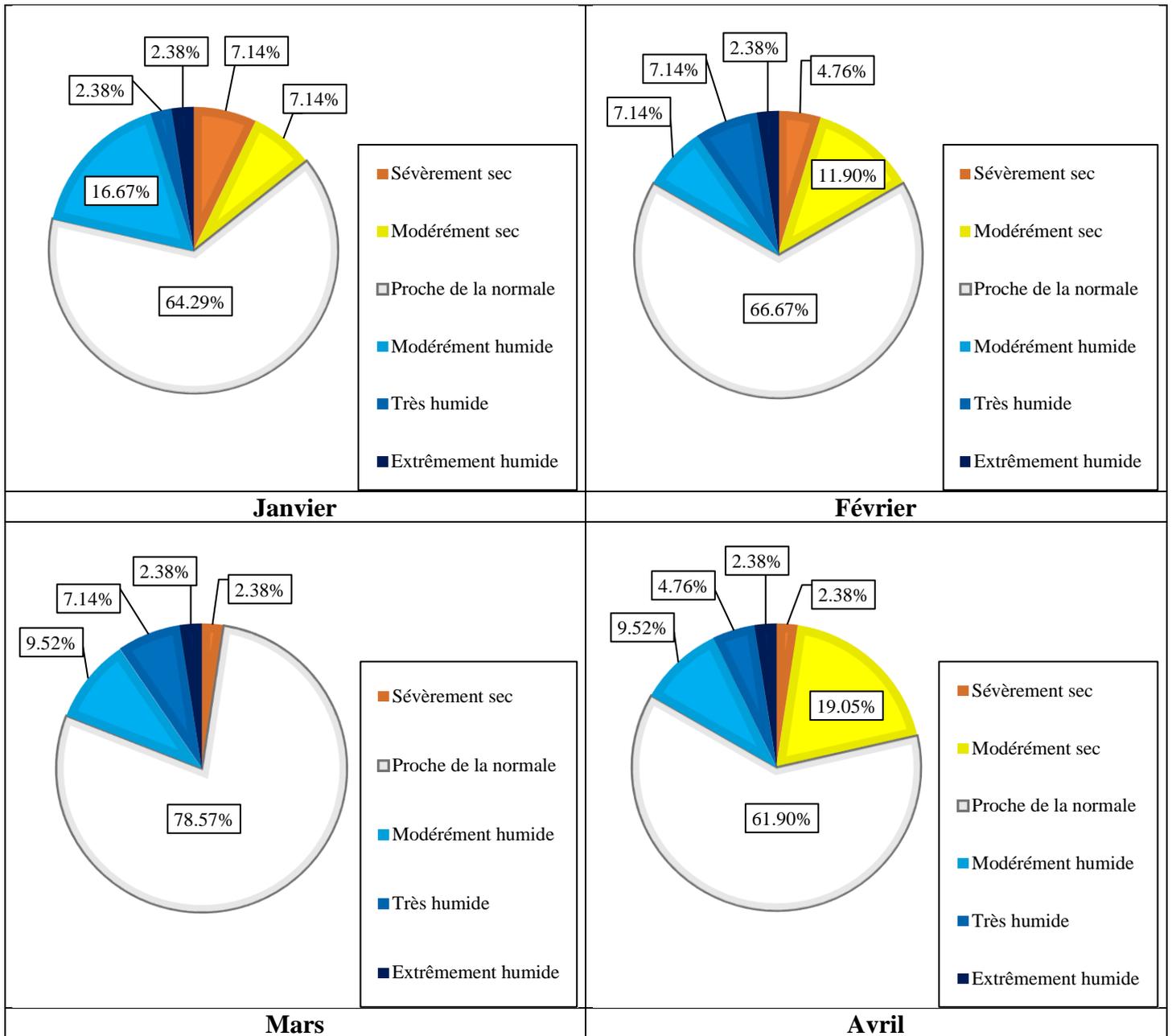
Figure VI.31 : Évolution du CZI pour la série des précipitations mensuelles à la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

D’après la répartition du CZI (fig.VI.32), nous observons que la classe proche de la normale domine la période étudiée et varie entre 59,52% en Septembre, et 88,10% en Juin et en Août.

La sécheresse extrême et sévère sont presque absentes durant toute la période, toutefois quelques mois présentent de faible présence (Novembre 4,76%, Janvier 7,14%, Février 4,76%, Mars et Avril 2,38%). Pour la sécheresse modérée, son absence est marquée juste en Septembre, Mars, Juin, Juillet et en Août, et sa présence maximale avec 19,05% est observée en Octobre, Décembre et en Avril. Par ailleurs, le pourcentage de la classe modérément humide est compris entre 2,38% en Novembre et en Juin, et 16,67% en Janvier, ensuite, le pourcentage de la classe très humide est compris entre 2,38% en Septembre, Octobre et en

Janvier, et 9,52% en Décembre, enfin, le pourcentage de la classe extrêmement humide est de l'ordre de 2,38% pour tous les mois.





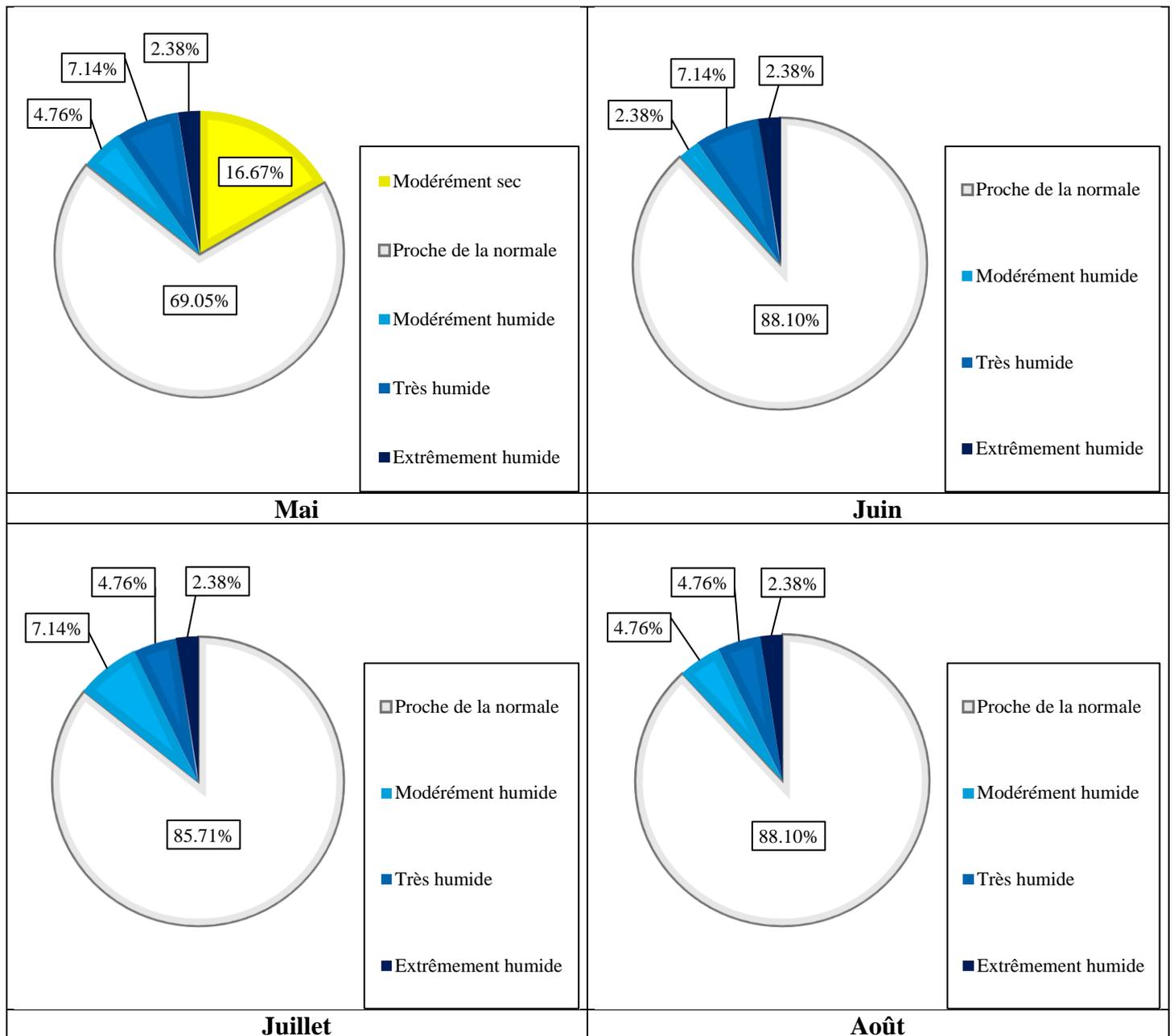


Figure VI.32 : Répartition du CZI pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

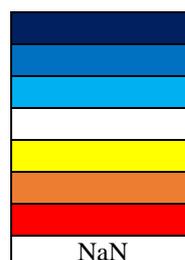
VI.5.1. Calcul du MCZI (Indice Z chinois modifié)

Tableau VI.23 : Résultats de calcul du MCZI pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

Année	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
1977/1978	NaN											
1978/1979												
1979/1980												
1980/1981			NaN									
1981/1982												
1982/1983	NaN		NaN									
1983/1984												
1984/1985	NaN											
1985/1986												
1986/1987												
1987/1988												
1988/1989												
1989/1990												
1990/1991												
1991/1992												
1992/1993												
1993/1994												
1994/1995												
1995/1996			NaN									
1996/1997												
1997/1998												
1998/1999												
1999/2000												
2000/2001												
2001/2002	NaN											
2002/2003	NaN											
2003/2004												
2004/2005												
2005/2006												
2006/2007												
2007/2008												
2008/2009												
2009/2010												
2010/2011												
2011/2012												
2012/2013												
2013/2014												
2014/2015												
2015/2016												
2016/2017												
2017/2018	NaN		NaN									
2018/2019												

Légende

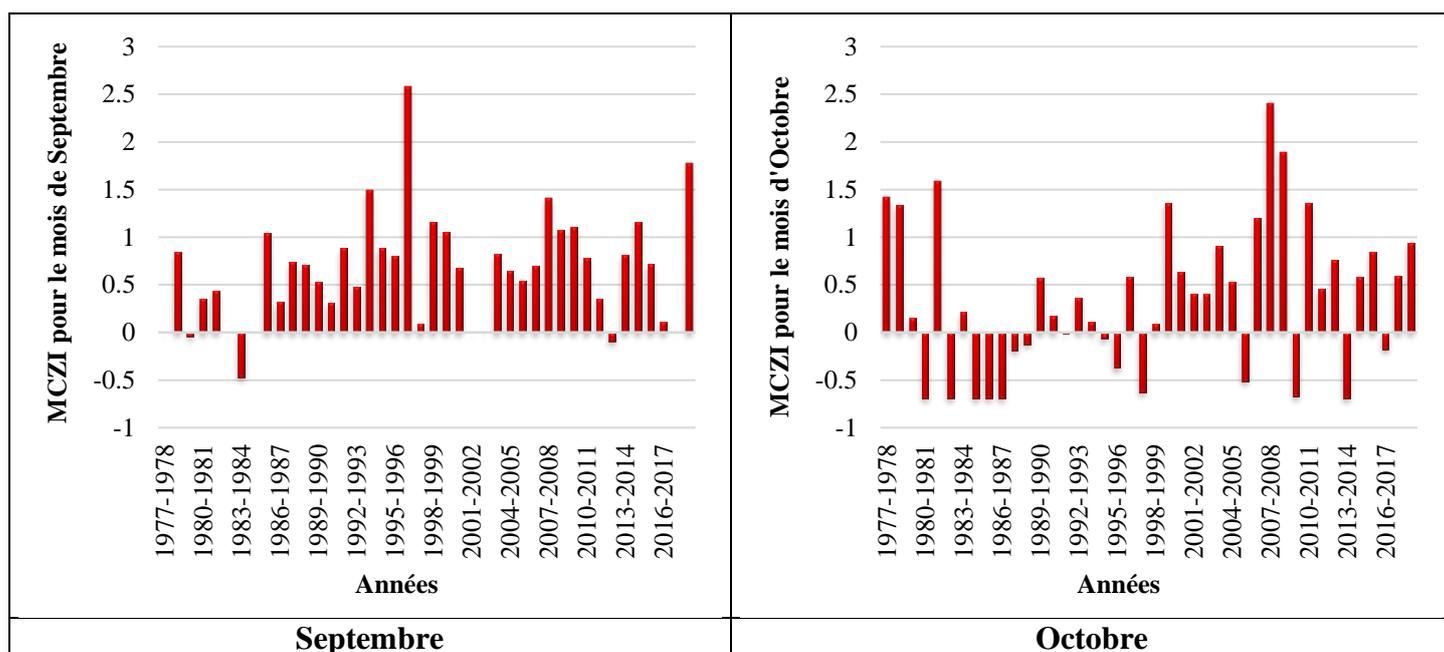
Extrêmement humide
 Très humide
 Modérément humide
 Proche de la normale
 Modérément sec
 Sévèrement sec
 Extrêmement sec
 Pas un nombre

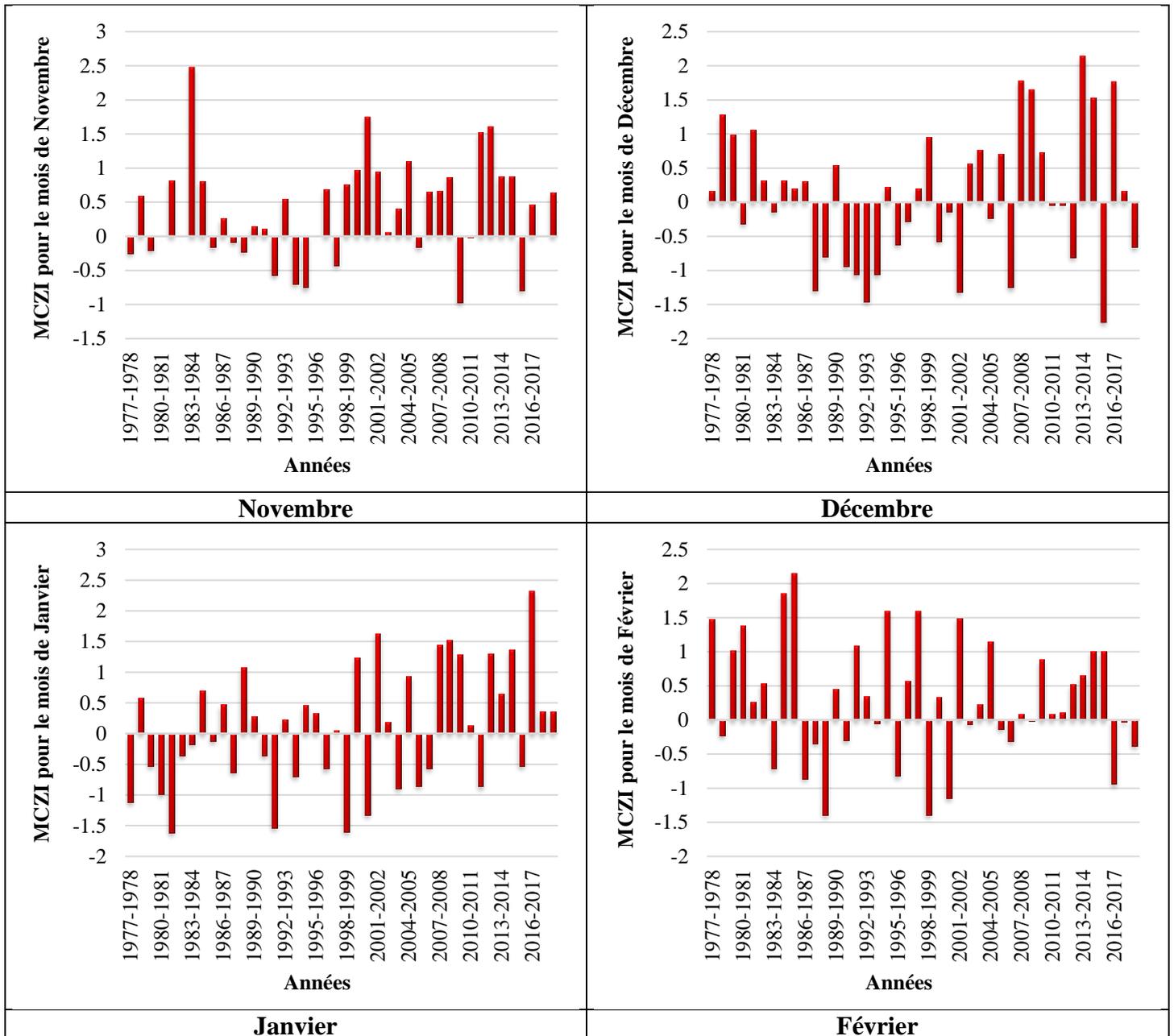


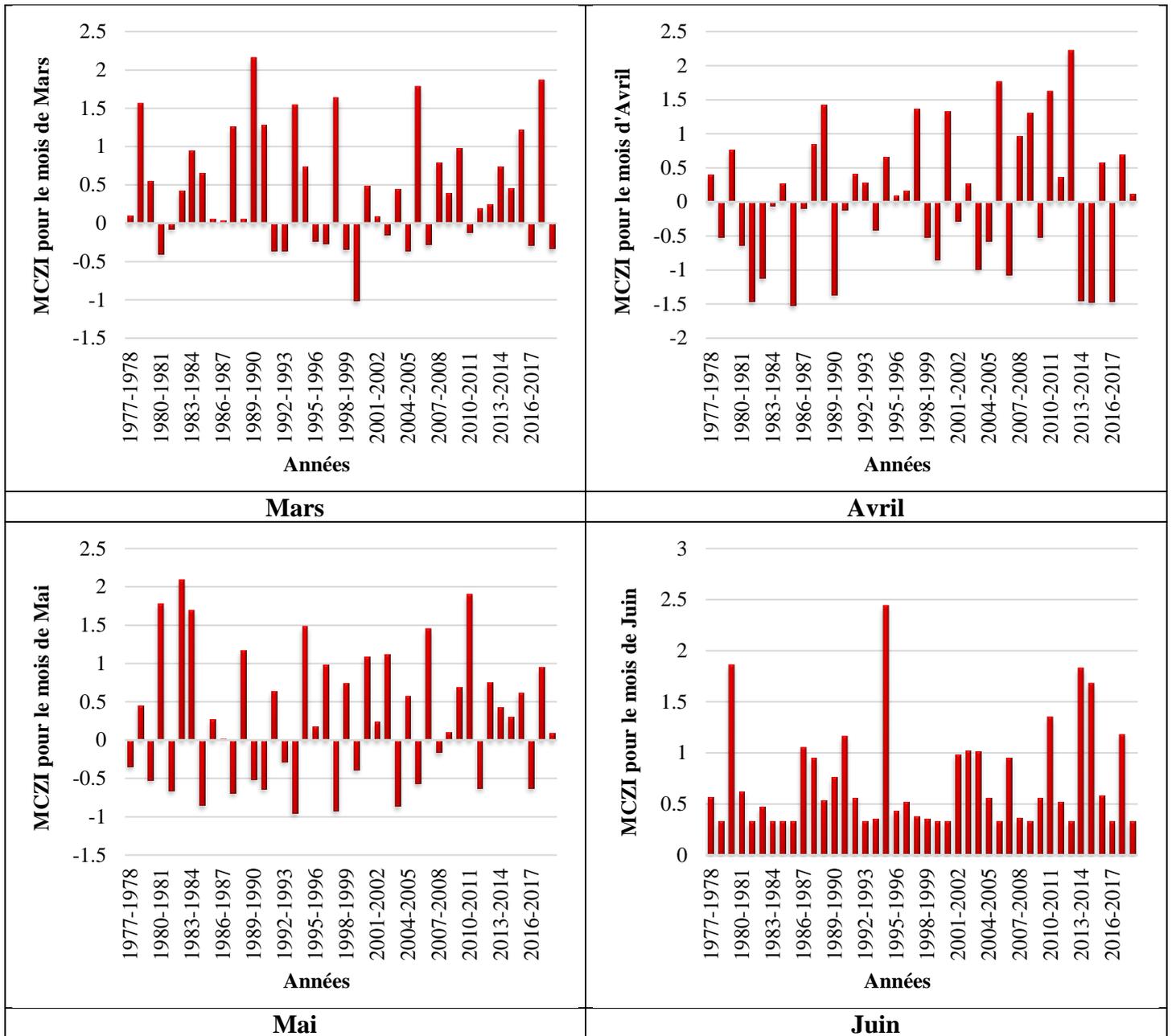
L'évolution du MCZI pour la série des précipitations mensuelles de Sidi Bel Abbes pendant la période 1977/1978-2018/2019 (fig.VI.33), montre qu'il y a une fluctuation entre les différentes classes de MCZI (sèche et humide). Les plus fortes valeurs d'humidité sont enregistrées en Septembre 2,58 (1996/1997), Octobre 2,4 (2007/2008), Novembre 2,48 (1983/1984), Décembre 2,14 (2013/2014), Janvier 2,32 (2016/2017), Février 2,15 (1985/1986), Mars 2,16 (1989/1990), Avril 2,23 (2012/2013), Mai 2,09 (1982/1983), Juin 2,44 (1994/1995), Juillet 2,49 (1994/1995) et Août 2,52 (1994/1995).

Les mois les plus humides, où on a enregistré une rareté des valeurs de classe sèche sont Septembre, Juin, Juillet et Août. En ce qui concerne les valeurs minimales atteintes pour chaque mois, nous citons : Septembre -0,47 (1983/1984), Octobre -0,69 (1980/1981, 1982/1983, 1984/1985 à 1986/1987, 2013/2014), Novembre -0,97 (2009/2010), Décembre -1,76 (2015/2016), Janvier -1,61 (1981/1982), Février -1,39 (1988/1989, 1998/1999), Mars -1,01 (1999/2000), Avril -1,52 (1985/1986) et Mai -0,95 (1993/1994).

Le nombre d'années humides et leurs valeurs sont beaucoup plus supérieurs qu'au nombre d'années sèches. En revanche, en Janvier, Avril et Décembre, nous notons une présence importante d'années sèches par rapport aux autres mois.







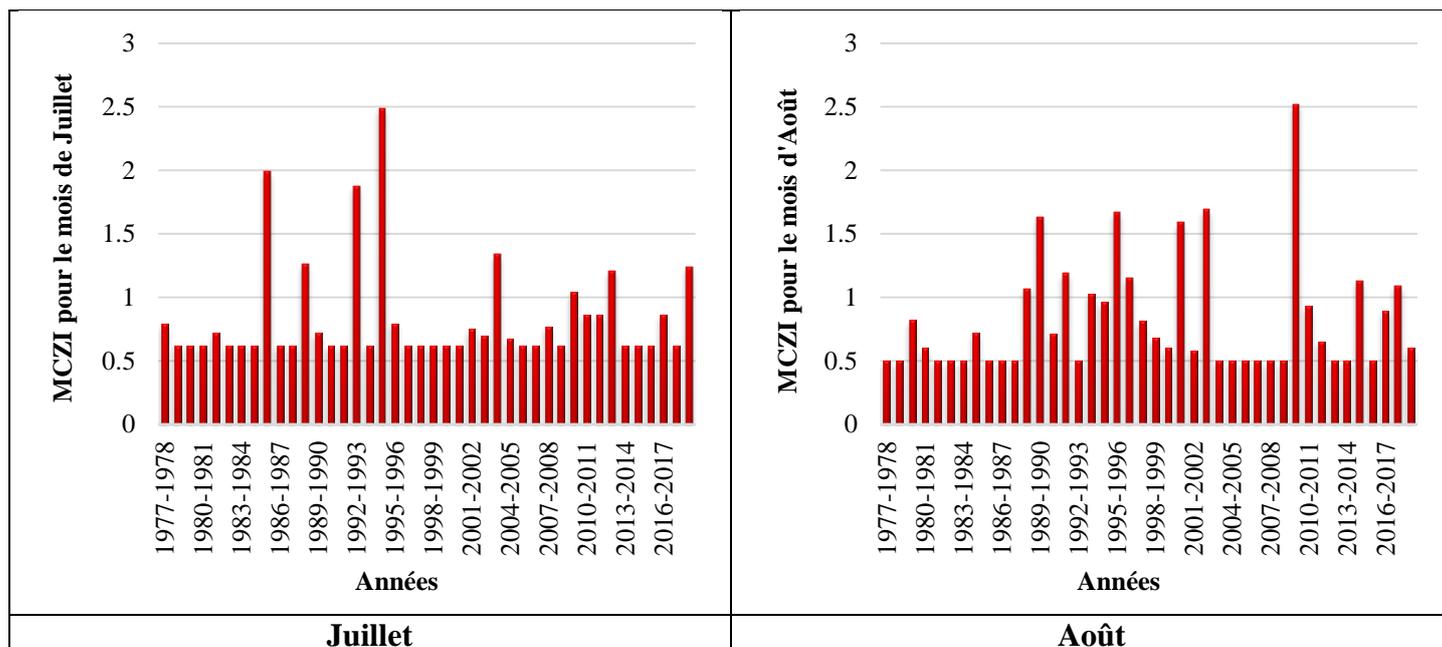
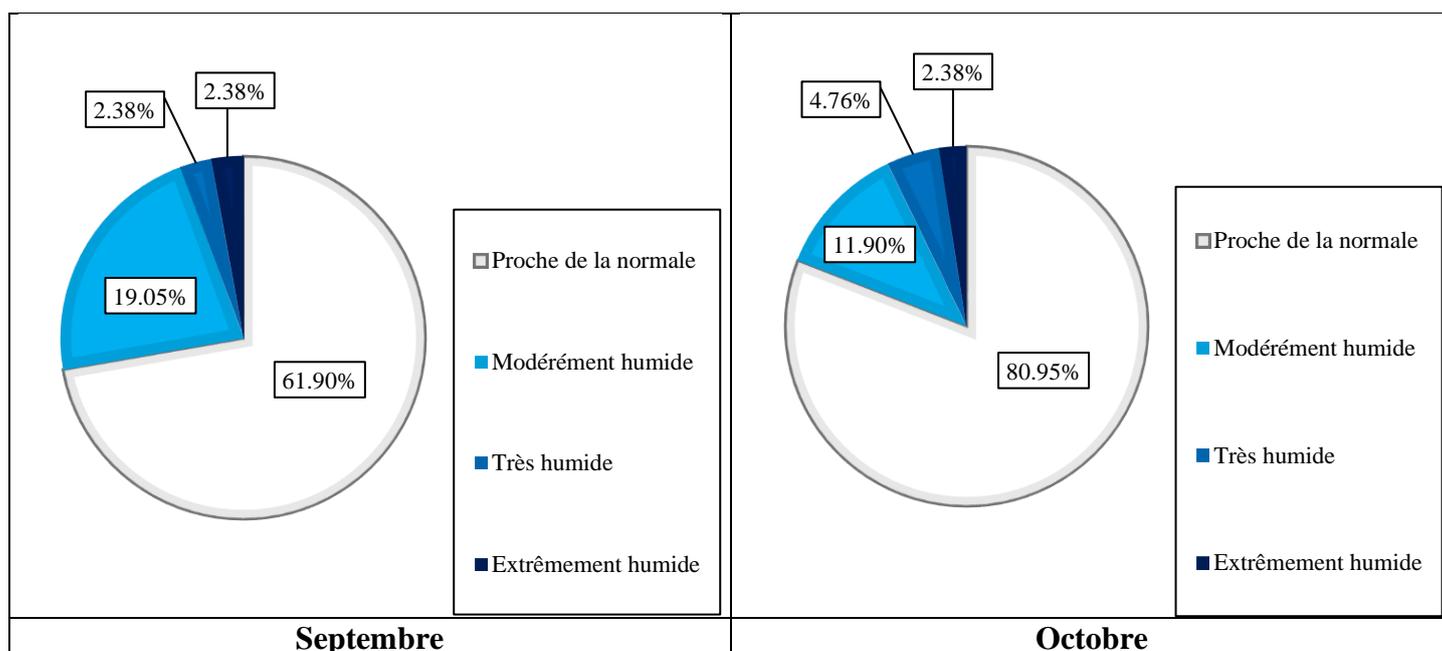


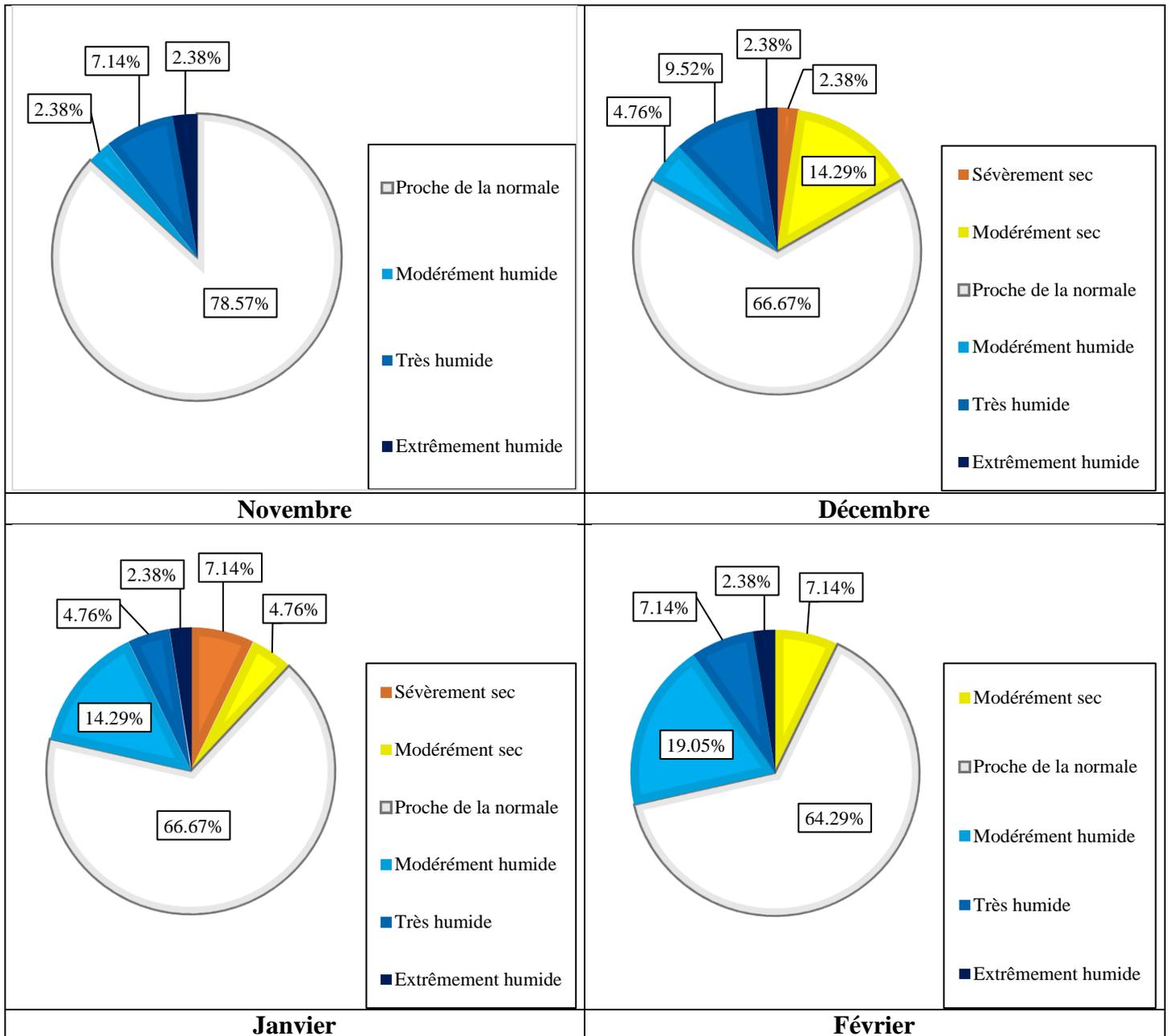
Figure VI.33 : Évolution du MCZI pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

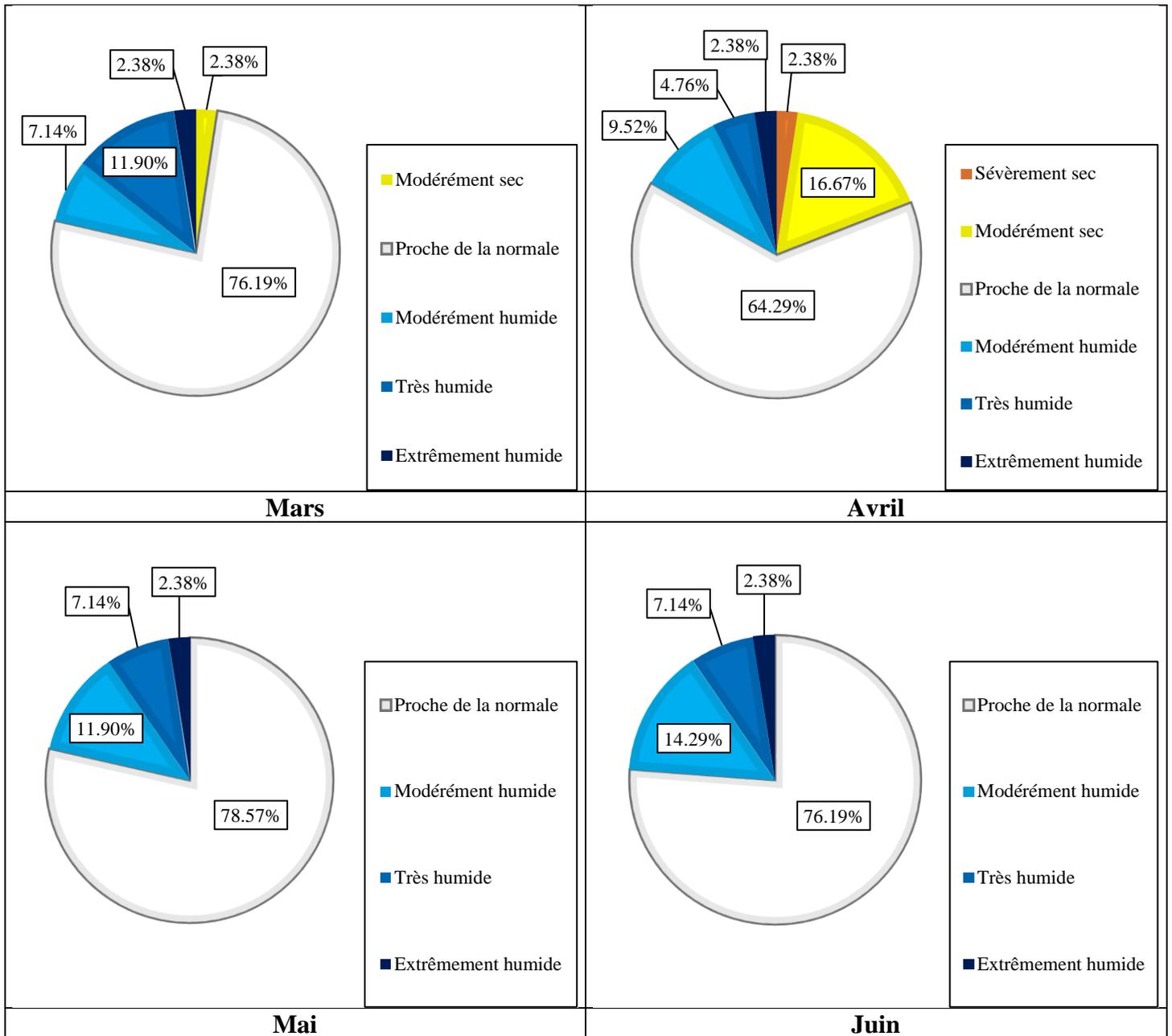
La répartition de l'indice MCZI (fig.VI.34) montre que la classe près de la normale domine pour tous les mois, le taux atteint les 80,95% en Octobre et Juillet.

Les mois de Septembre, Octobre, Novembre, Mai, Juin, Juillet et Août sont répartis en quatre classes : proche de la normale (entre 61,9% et 80,95%), modérément humide (entre 2,38% et 19,05%), très humide (entre 2,38% et 9,52%), extrêmement humide (2,38%).

Alors que pour les autres mois, il y a six classes, les classes précédentes plus celles sévèrement sèche (entre 2,38% et 7,14%) et modérément sèche (entre 2,38% et 16,67%).







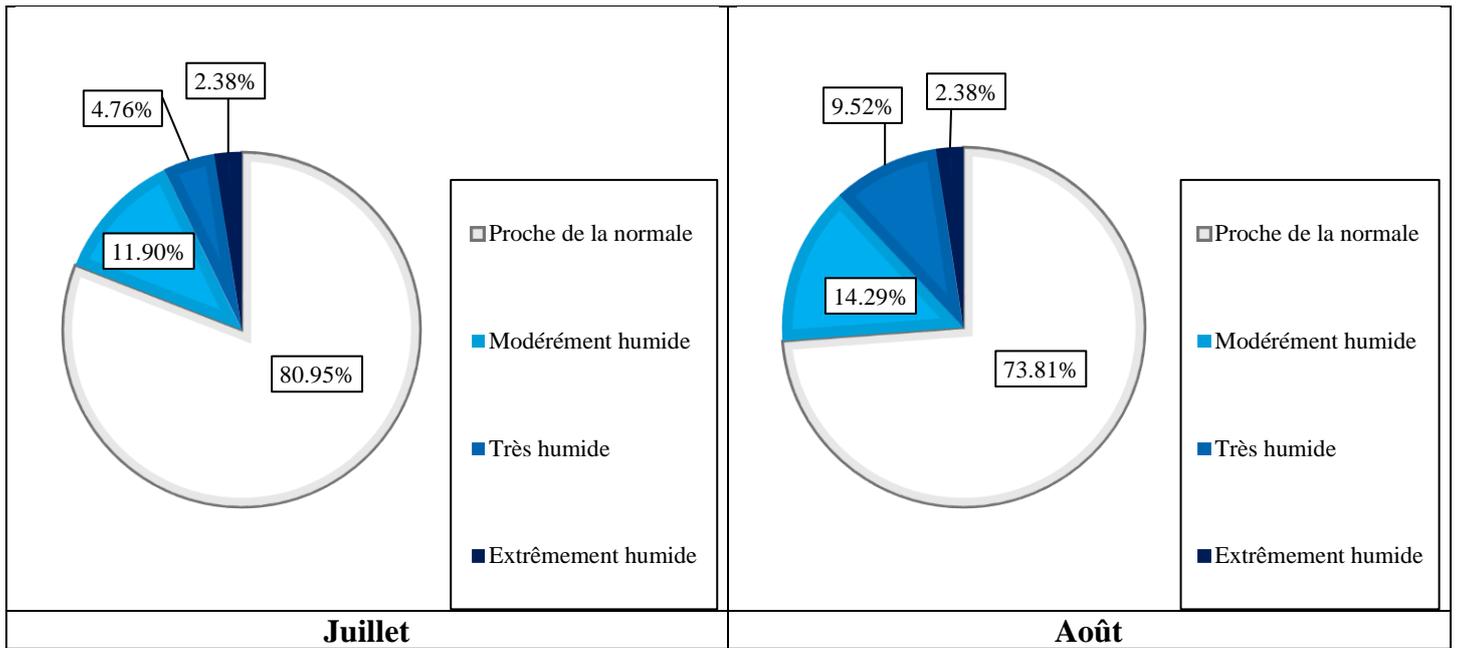
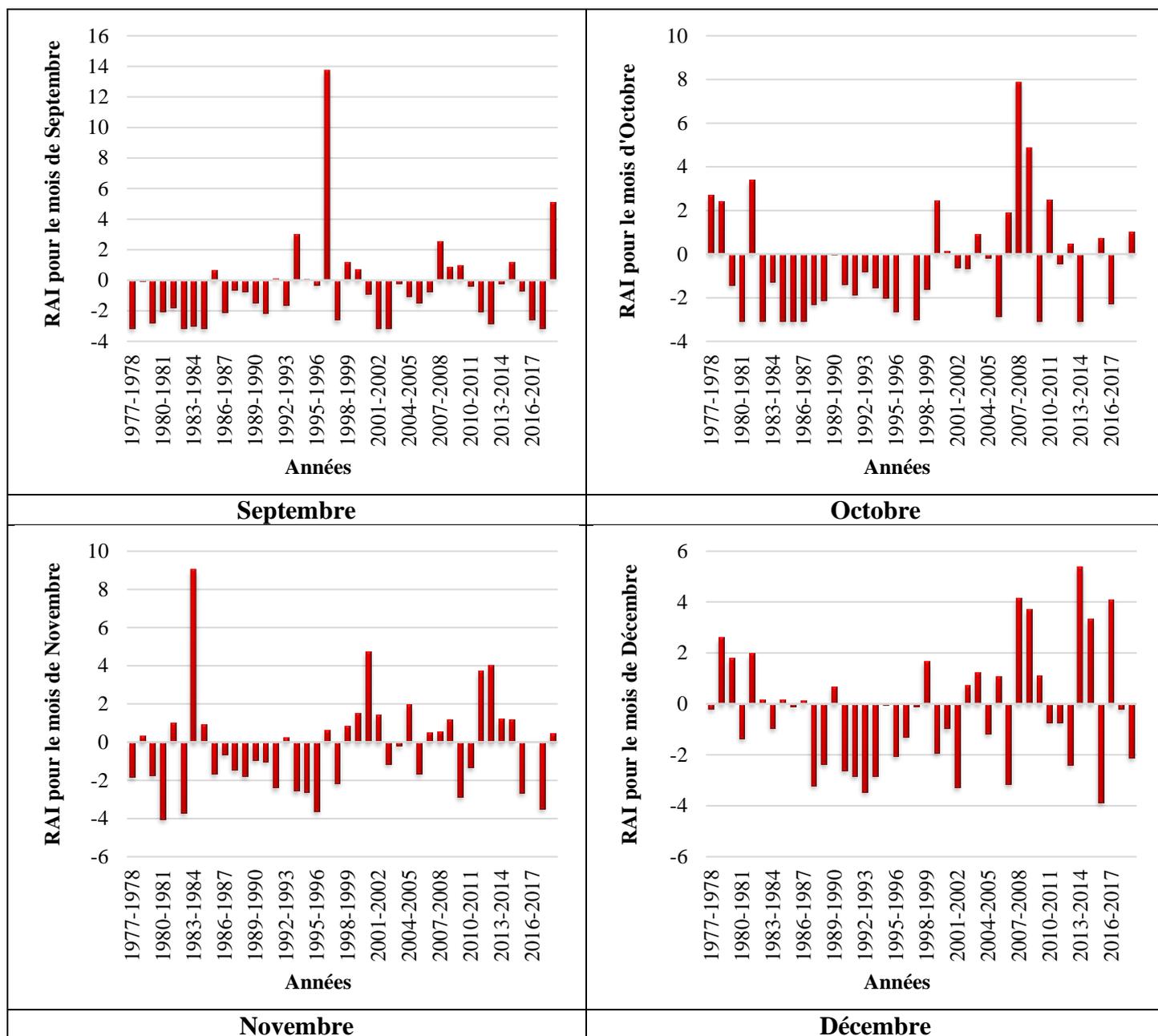
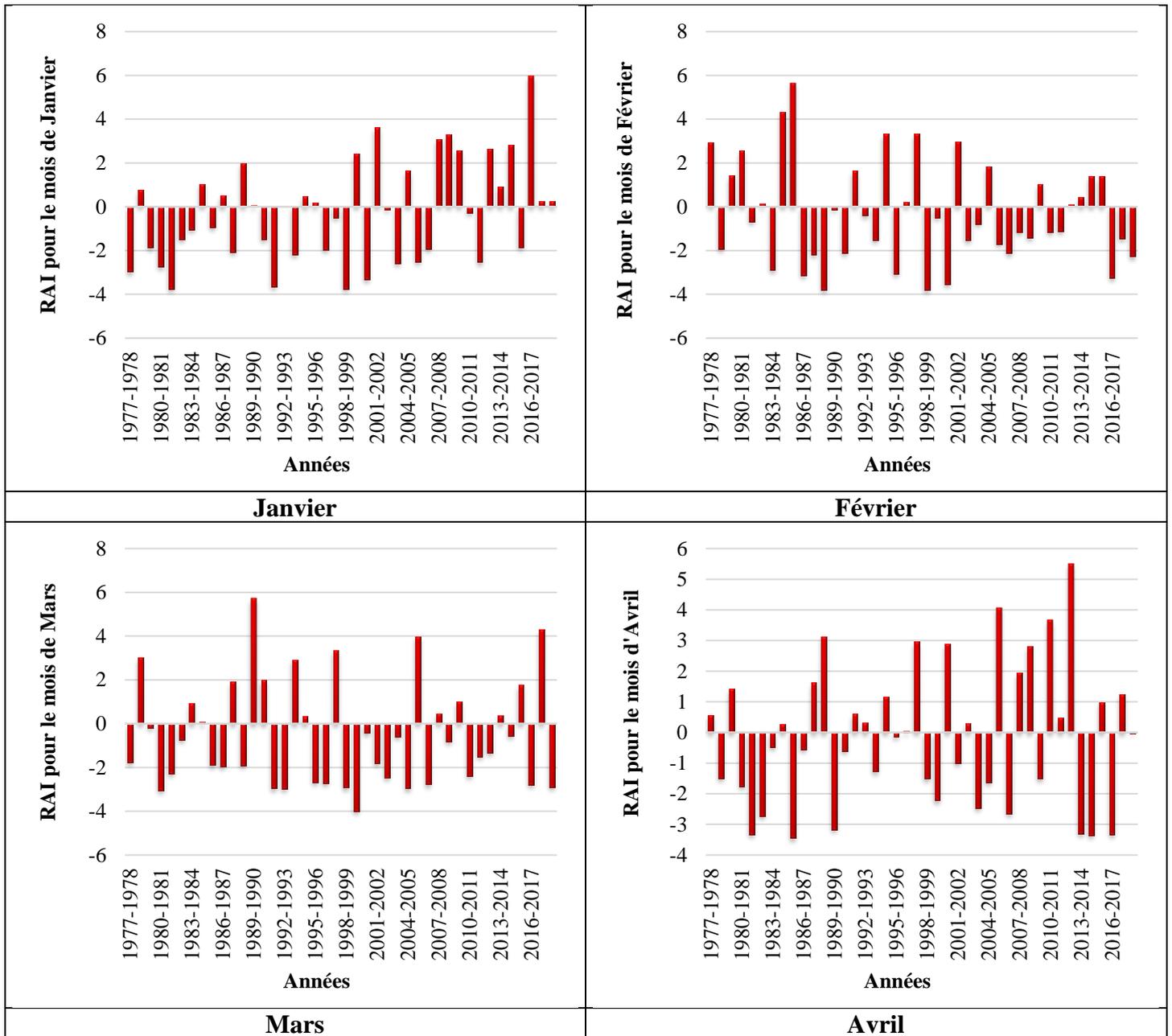


Figure VI.34 : Répartition du MCZI pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

Selon l'évolution du RAI appliquée à la série de précipitations mensuelles enregistrées à Sidi Bel Abbas pendant la période 1977/1978-2018/2019 (fig.VI.35), nous voyons l'existence d'alternance des séquences humides et des séquences sèches, de plus, la période sèche est distinguée beaucoup plus en Juin, Juillet et Août. L'intervalle du pic du RAI pour la période humide varie entre 5,36 en Mai 1982/1983 et 13,74 en Septembre 1996/1997, et pour la période sèche, il varie entre -4,02 en Novembre 1980/1981 et -3 en Juin, Juillet et Août 1978/1979, 1983/1984, 2005/2006 et 2008/2009 (dans ces années, la valeur -3 apparaît pour les trois mois, mais aussi dans d'autres années que nous n'avons pas mentionnées).





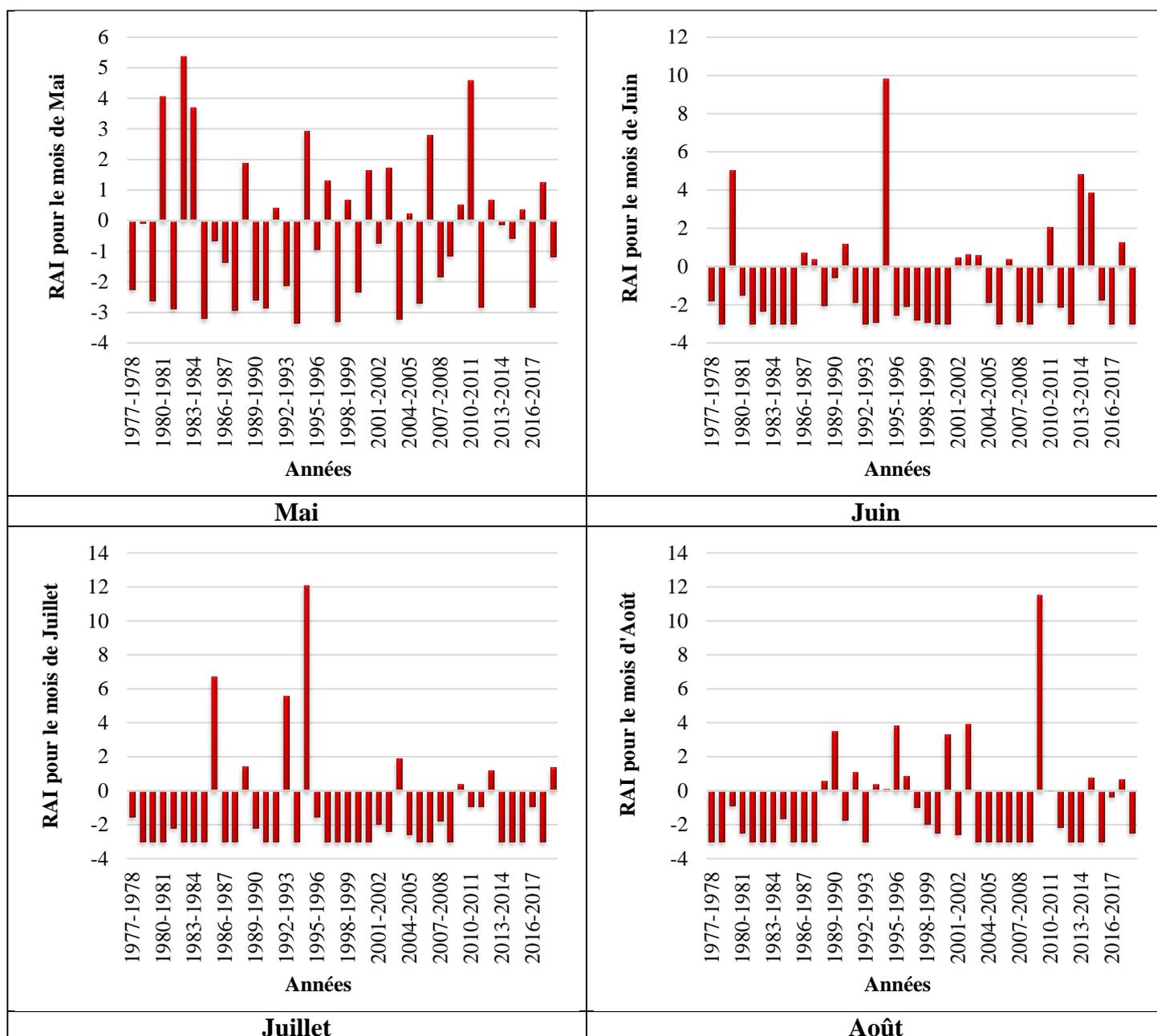
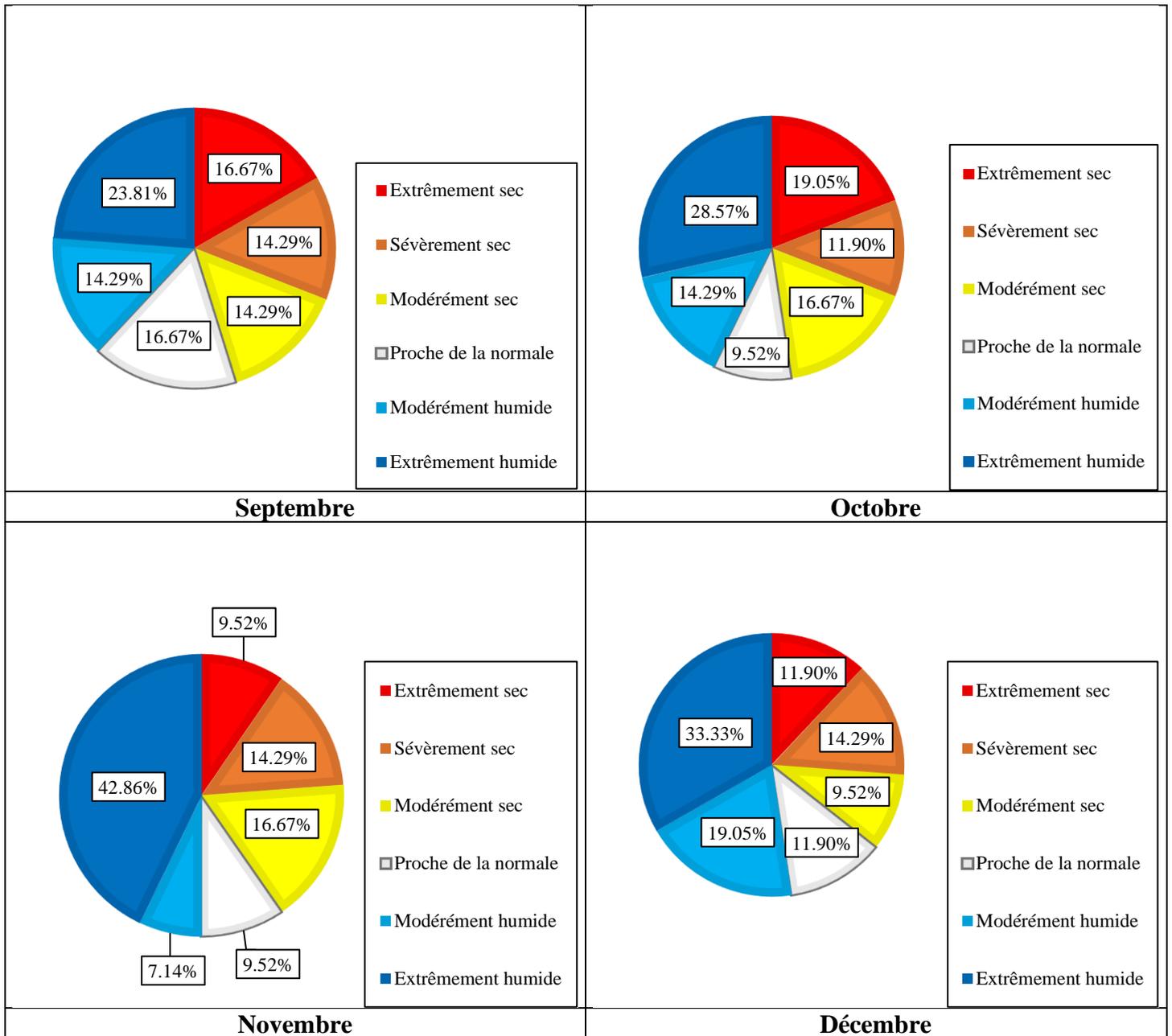


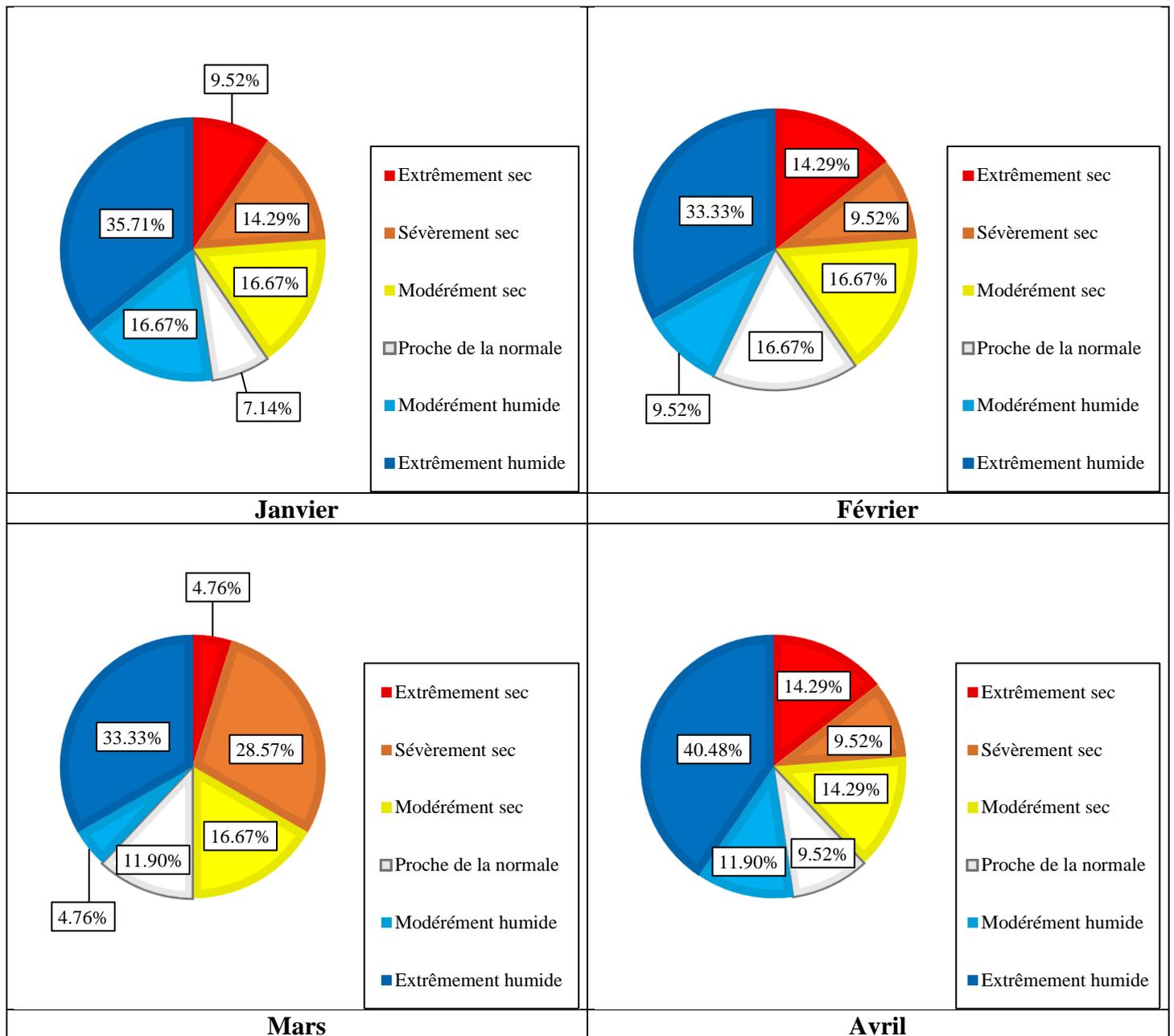
Figure VI.35 : Évolution du RAI pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

Les résultats de la répartition du RAI (fig.VI.36), ont mis en évidence la dominance de la classe extrêmement humide en Septembre, Octobre, Décembre, Janvier, Février, Mars, Avril et Mai, la valeur maximale de 42,86% pour cette classe est enregistrée en Novembre.

En Mars, les pourcentages de la classe extrêmement humide et sévèrement sèche sont presque égaux.

Pour les mois de Juin, Juillet et Août, c'est la classe sévèrement sèche qui domine puisque ces trois mois font partie de la période estivale, où on assiste à un manque de précipitations considérable, la valeur maximale enregistrée est de 64,29% en Juillet, en deuxième position la classe extrêmement humide atteint en Juin un pourcentage de 30,95%.





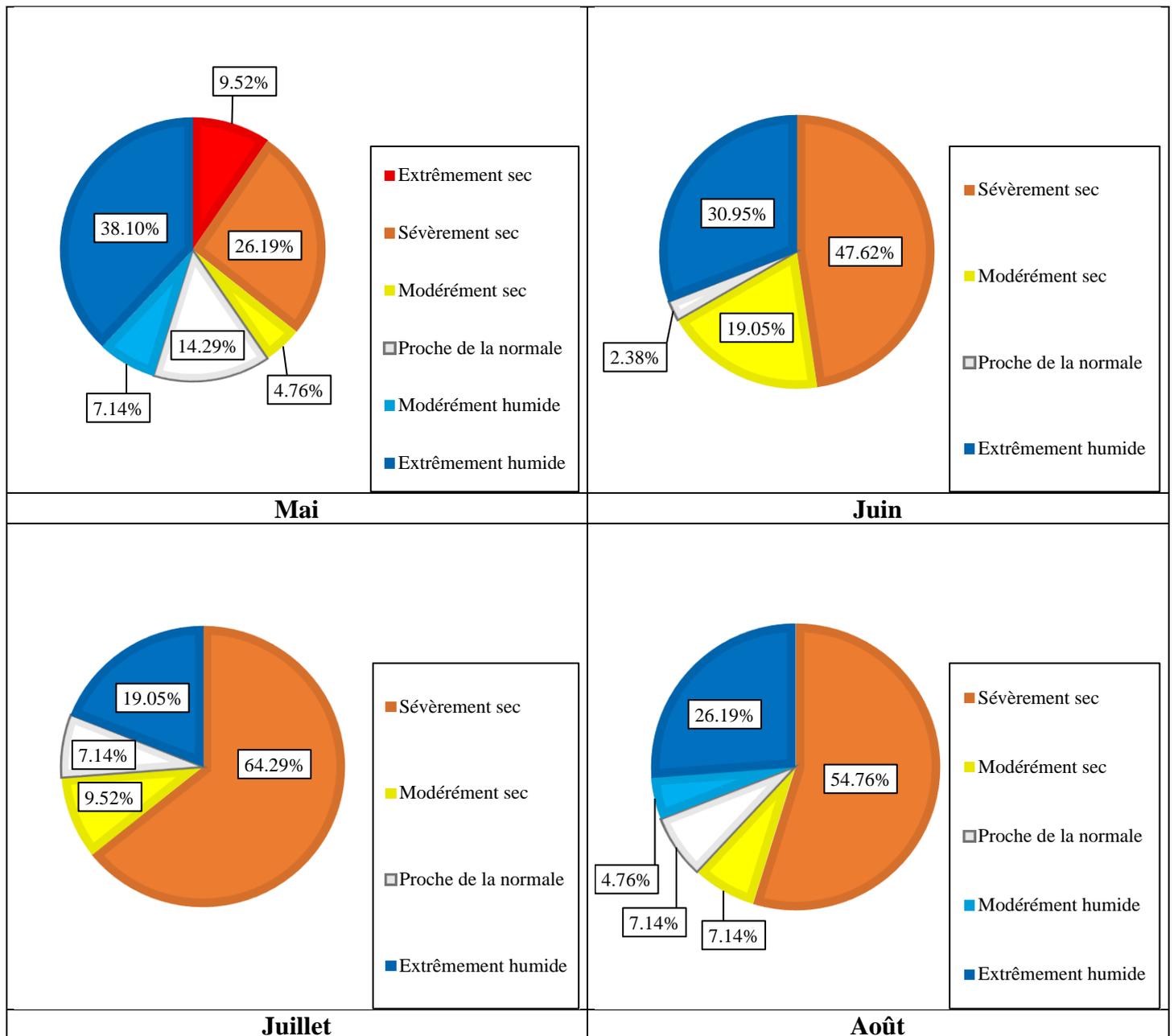


Figure VI.36 : Répartition du RAI pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

VI.7. Calcul du Z-Score

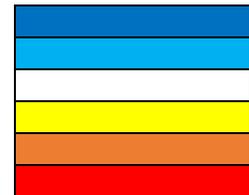
VI.7.1. À l'échelle annuelle

Tableau VI.25 : Résultats de calcul du Z-Score annuel pour la série des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

Année	Z-Score annuel	Année	Z-Score annuel	Année	Z-Score annuel
1977/1978		1991/1992		2005/2006	
1978/1979		1992/1993		2006/2007	
1979/1980		1993/1994		2007/2008	
1980/1981		1994/1995		2008/2009	
1981/1982		1995/1996		2009/2010	
1982/1983		1996/1997		2010/2011	
1983/1984		1997/1998		2011/2012	
1984/1985		1998/1999		2012/2013	
1985/1986		1999/2000		2013/2014	
1986/1987		2000/2001		2014/2015	
1987/1988		2001/2002		2015/2016	
1988/1989		2002/2003		2016/2017	
1989/1990		2003/2004		2017/2018	
1990/1991		2004/2005		2018/2019	

Légende

Pas de sécheresse
 Faible sécheresse
 Légère sécheresse
 Sécheresse modérée
 Sécheresse sévère
 Sécheresse extrême



L'évolution du Z-Score calculée pour les précipitations de Sidi Bel Abbas pendant la période 1977/1978-2018/2019 (fig.VI.37), montre une vaste sécheresse (les valeurs négatives) par rapport à l'humidité (les valeurs positives $> 0,25$) tout au long de la période étudiée. L'humidité la plus élevée correspond à une valeur maximale du Z-Score qui vaut 2,97 en 2007/2008, d'autre part, la sécheresse la plus élevée correspond à une valeur minimale du Z-Score de -1,70 en 1995/1996.

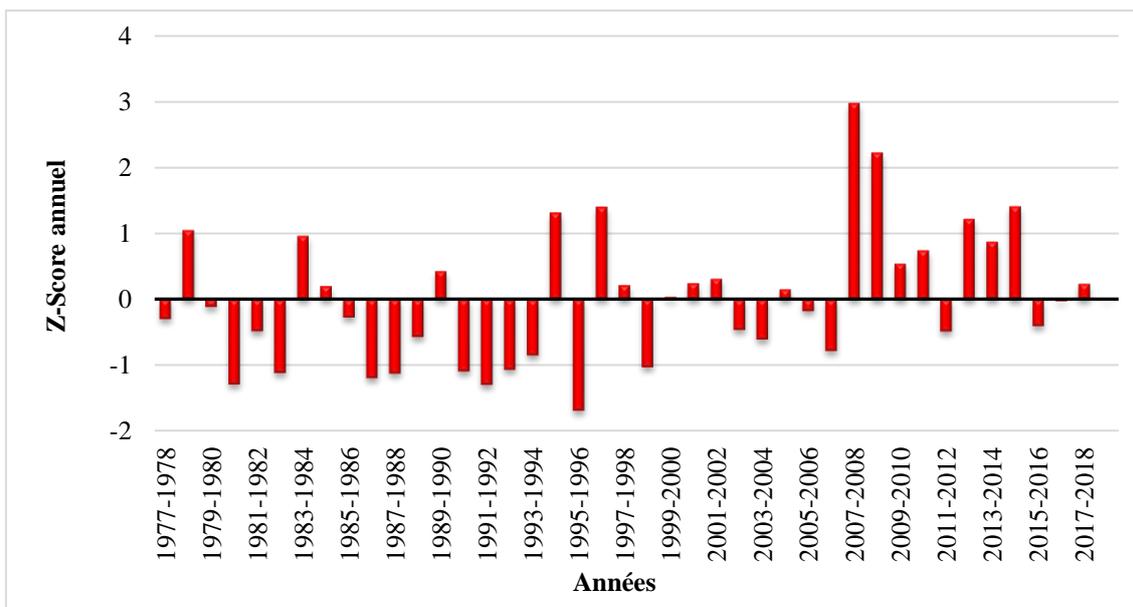


Figure VI.37 : Évolution du Z-Score pour la série de précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

La répartition du Z-Score (fig.VI.38) nous indique que la classe pas de sécheresse domine avec 30,95%, alors que les classes sécheresse extrême et modérée sont les moins répandues avec un taux de 7,14%.

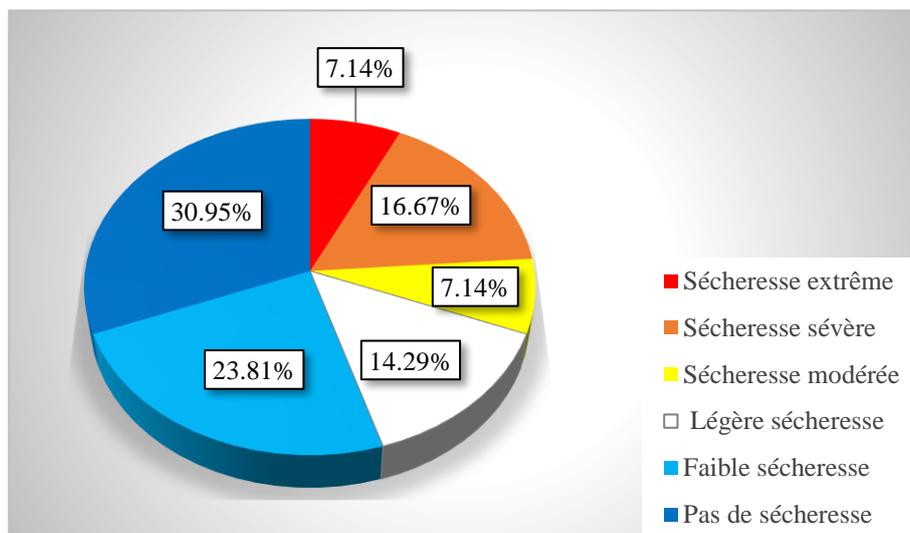


Figure VI.38 : Répartition du Z-Score pour la série des précipitations annuelles de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

VI.7.2. À l'échelle mensuelle

Tableau VI.26 : Résultats de calcul du Z-Score mensuel pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

Année	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
1977/1978	Jaune	Bleu	Jaune	Bleu	Orange	Bleu	Jaune	Bleu	Jaune		Bleu	Jaune
1978/1979	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu	Jaune	Bleu	Jaune	Bleu	Jaune		Jaune
1979/1980	Jaune		Jaune	Bleu	Jaune	Bleu	Bleu	Bleu	Orange	Bleu		Bleu
1980/1981		Orange	Rouge		Orange	Bleu	Orange	Jaune	Bleu			
1981/1982		Bleu	Bleu	Bleu	Rouge	Bleu	Jaune	Rouge	Orange	Jaune		Jaune
1982/1983	Jaune	Orange	Rouge	Bleu	Jaune	Bleu	Bleu	Orange	Bleu			Jaune
1983/1984	Jaune		Bleu			Orange	Bleu	Bleu	Bleu	Jaune		Jaune
1984/1985	Jaune	Orange	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu	Orange	Jaune		
1985/1986	Bleu	Orange	Jaune			Bleu	Jaune	Rouge	Bleu	Jaune	Bleu	Jaune
1986/1987		Orange	Bleu	Bleu	Bleu	Orange	Jaune	Bleu		Bleu		Jaune
1987/1988	Bleu	Jaune		Orange	Jaune		Bleu	Bleu	Orange	Bleu		Jaune
1988/1989	Bleu	Jaune	Jaune	Orange	Bleu	Rouge	Jaune	Bleu			Bleu	Bleu
1989/1990		Bleu		Bleu	Bleu	Bleu	Bleu	Rouge	Orange	Bleu	Bleu	Bleu
1990/1991				Orange	Jaune	Jaune	Bleu	Bleu	Orange	Bleu		
1991/1992	Bleu	Jaune	Jaune	Orange	Rouge	Bleu	Orange	Bleu	Bleu			Bleu
1992/1993		Bleu	Bleu	Rouge	Bleu		Orange	Bleu	Jaune	Jaune	Bleu	Jaune
1993/1994	Bleu		Orange	Orange	Jaune	Jaune	Bleu		Orange	Jaune		Bleu
1994/1995	Bleu	Jaune	Orange	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu
1995/1996	Bleu	Jaune	Orange	Jaune		Orange	Jaune	Bleu			Bleu	Bleu
1996/1997	Bleu	Bleu	Bleu		Jaune	Bleu	Jaune	Bleu	Bleu			Bleu
1997/1998	Jaune	Orange	Jaune	Bleu	Bleu		Bleu	Bleu	Orange	Jaune		Bleu
1998/1999	Bleu		Bleu	Bleu	Rouge	Rouge	Orange	Jaune	Bleu	Jaune		
1999/2000	Bleu	Bleu	Bleu	Jaune	Bleu	Bleu	Orange	Orange	Jaune	Jaune		
2000/2001	Bleu	Bleu	Bleu		Orange	Rouge	Bleu	Bleu	Bleu	Jaune		Bleu
2001/2002	Jaune	Bleu	Bleu	Orange	Bleu		Jaune		Bleu	Bleu		
2002/2003	Jaune	Bleu		Bleu	Bleu	Jaune	Jaune	Bleu	Bleu	Bleu		Bleu
2003/2004	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu	Orange		Bleu	Orange	Orange	Bleu	Bleu	Jaune
2004/2005	Bleu	Bleu	Bleu		Bleu	Bleu	Orange	Jaune	Bleu			Jaune
2005/2006		Orange	Jaune	Bleu	Orange	Jaune	Bleu	Bleu	Orange	Jaune		
2006/2007	Bleu	Bleu	Bleu	Orange	Jaune		Jaune	Orange	Bleu	Bleu		Jaune
2007/2008	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu		Bleu	Bleu	Jaune	Jaune	Bleu	Jaune
2008/2009	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu		Bleu	Bleu		Jaune	Jaune	Jaune
2009/2010	Bleu	Orange	Orange	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu	Jaune	Bleu		Bleu	Bleu
2010/2011	Bleu	Bleu			Bleu		Jaune	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu
2011/2012		Bleu	Bleu		Orange			Bleu	Orange		Bleu	
2012/2013	Jaune	Bleu	Bleu	Orange	Bleu	Bleu		Bleu	Bleu	Jaune	Bleu	Jaune
2013/2014	Bleu	Orange	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu	Rouge	Bleu	Bleu		Jaune
2014/2015	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu	Rouge	Bleu	Bleu		Bleu
2015/2016	Bleu	Bleu	Orange	Rouge	Jaune	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu			Jaune
2016/2017	Jaune	Jaune	Bleu	Bleu	Bleu	Orange	Orange	Rouge	Orange	Jaune	Bleu	Bleu
2017/2018	Jaune	Bleu	Orange	Bleu	Bleu	Jaune	Bleu	Bleu	Bleu	Bleu		Bleu
2018/2019	Bleu	Bleu	Bleu		Bleu	Jaune	Orange	Bleu		Jaune	Jaune	

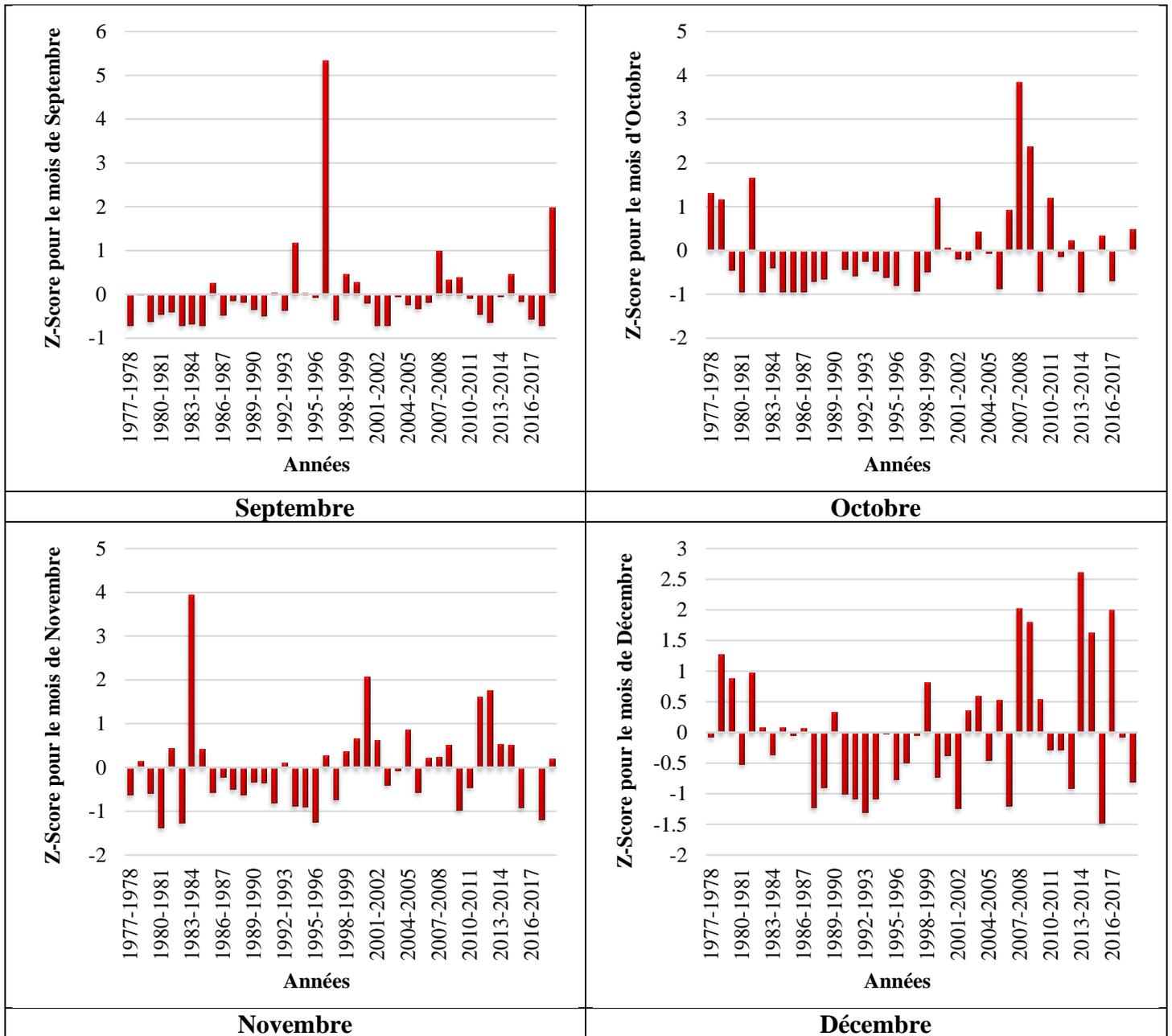
Légende

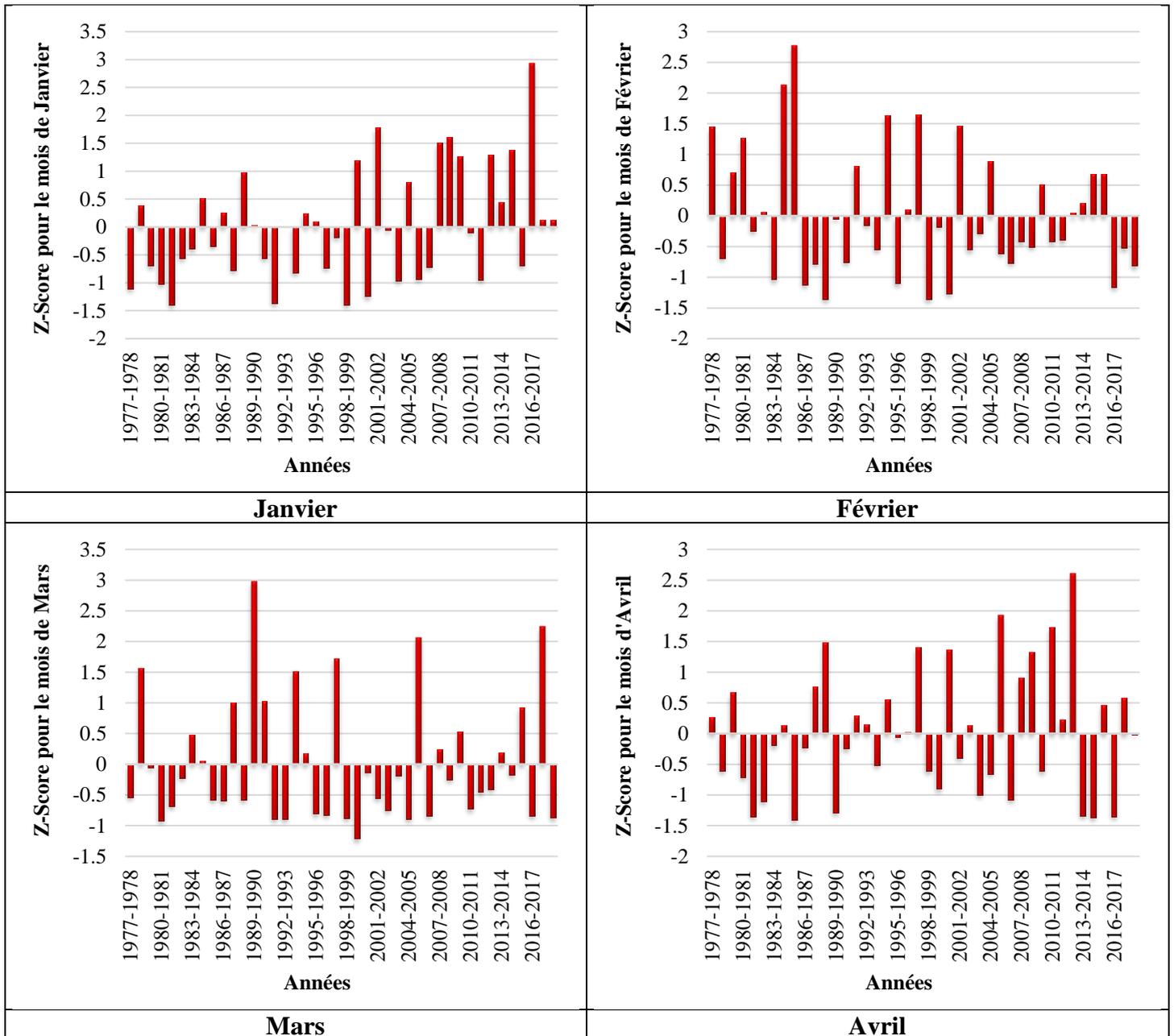
- Pas de sécheresse
- Faible sécheresse
- Légère sécheresse
- Sécheresse modérée
- Sécheresse sévère
- Sécheresse extrême



L'analyse de l'évolution de l'indice de sécheresse Z-Score pour la série de précipitations mensuelles de Sidi Bel Abbes pendant la période 1977/1978-2018/2019 (fig.VI.39), révèle que les valeurs positives supérieures à 0,25 ne représentent pas de sécheresse, alors que les valeurs inférieures à 0,25 indiquent la présence de cette dernière.

- **Septembre** : la présence de sécheresse entre 1977/1978 et 1992/1993 et de 2000/2001 à 2006/2007, la valeur minimale du Z-Score atteinte est de -0,96 indiquant une sécheresse sévère. En 1996/1997, nous notons l'absence de sécheresse comme en témoigne la valeur maximale du Z-Score de 5,35 enregistrée,
- **Octobre** : la période qui a marqué plus de sécheresse est de 1982/1983 à 1998/1999, la valeur minimale du Z-Score pendant 1987/2019 est de -0,93 enregistrée sous la classe sécheresse sévère. La valeur maximale de 3,83 est enregistrée en 2007/2008,
- **Novembre** : de 1985/1986 à 1997/1998, présence de sécheresse qui varie entre sécheresse modérée à sévère. En 1980/1981 la valeur minimale du Z-Score atteinte de -1,31, est caractéristique de la classe sécheresse extrême. La valeur maximale de 3,93 caractéristique de l'absence de sécheresse est enregistrée en 1983/1984,
- **Décembre** : de 1982/1983 jusqu'à 1997/1998 est la plus longue période qui a marqué une sécheresse dans notre série, avec un minimum du Z-Score qui est de -1,46 évalué en 2015/2016, et un maximum de 2,61 (pas de sécheresse) en 2013/2014,
- **Janvier** : de 1977/1978 à 1998/1999, la plupart des années présente un Janvier avec des classes de sécheresse modérée, sévère et extrême (1981/1982, 1991/1992, 1998/1999). L'année 2016/2017 a marqué un Z-Score maximale de 2,93 lui donnant un mois de Janvier plutôt humide,
- **Février** : au cours de ce mois la série présente une alternance entre sécheresse et pas de sécheresse. La valeur maximale du Z-Score de 2,77 est enregistrée en 1985/1986, et la minimale de -1,36 en 1988/1989 et 1998/1999,
- **Mars** : nous remarquons dans notre série 14 ans d'absence de sécheresse, la valeur maximale est de 2,97 (1989/1990), alors que pour les autres années, la sécheresse varie de faible jusqu'à extrême, la valeur minimale du Z-Score enregistrée est de -1,21 (1999/2000),
- **Avril** : les résultats du Z-Score sont très instables pour ce mois. La valeur maximale est de 2,60 (2012/2013) et la minimale est de -1,39 (1985/1986),
- **Mai** : pour le mois de Mai, l'analyse montre une alternance entre les différentes classes allant de sécheresses extrêmes et modérées, et d'autre pas de sécheresse,
- **Juin, Juillet et Août** : puisque c'est la saison d'Été où on assiste à un manque de précipitations, alors la dominance est pour la sécheresse modérée et extrême.





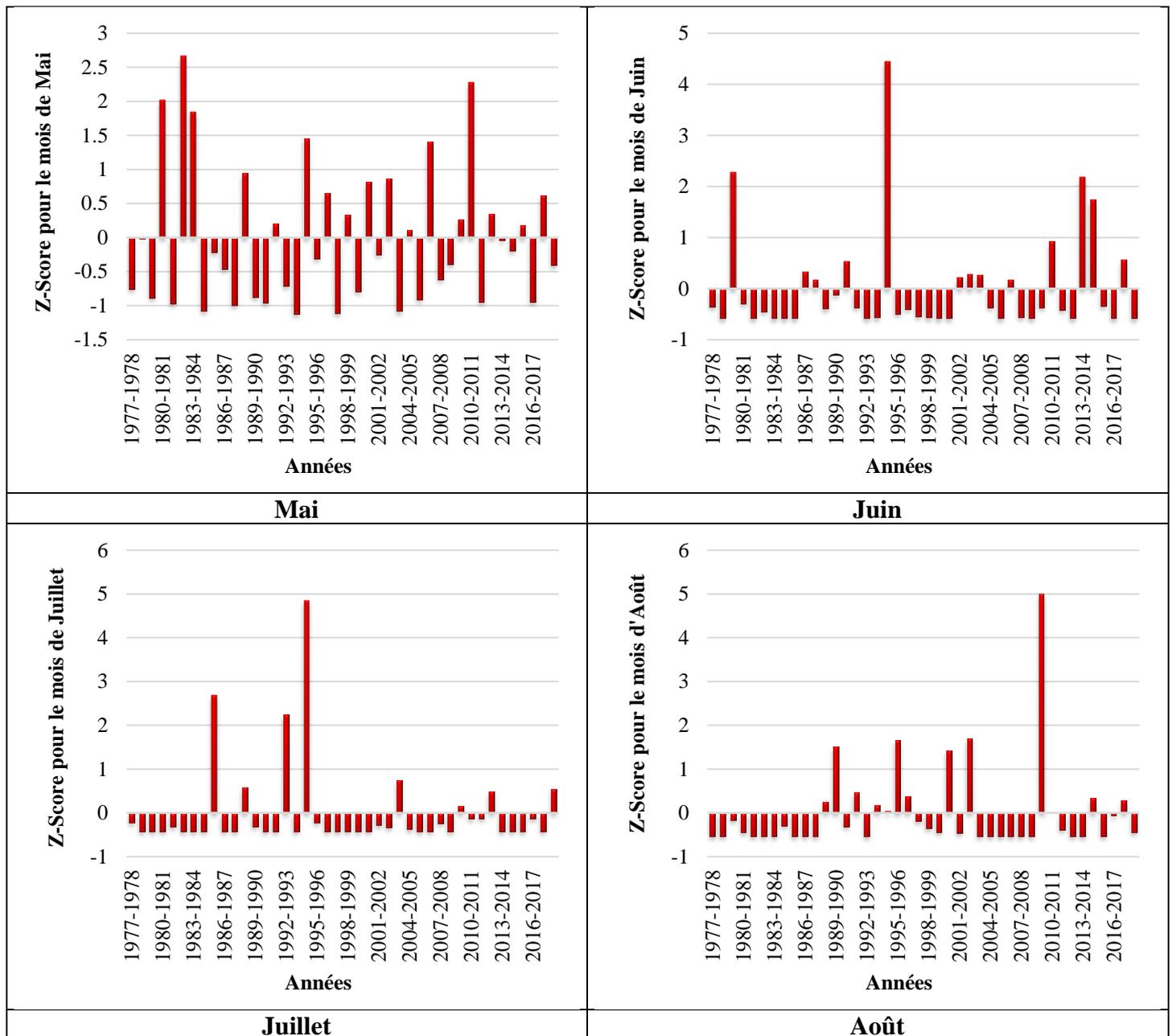
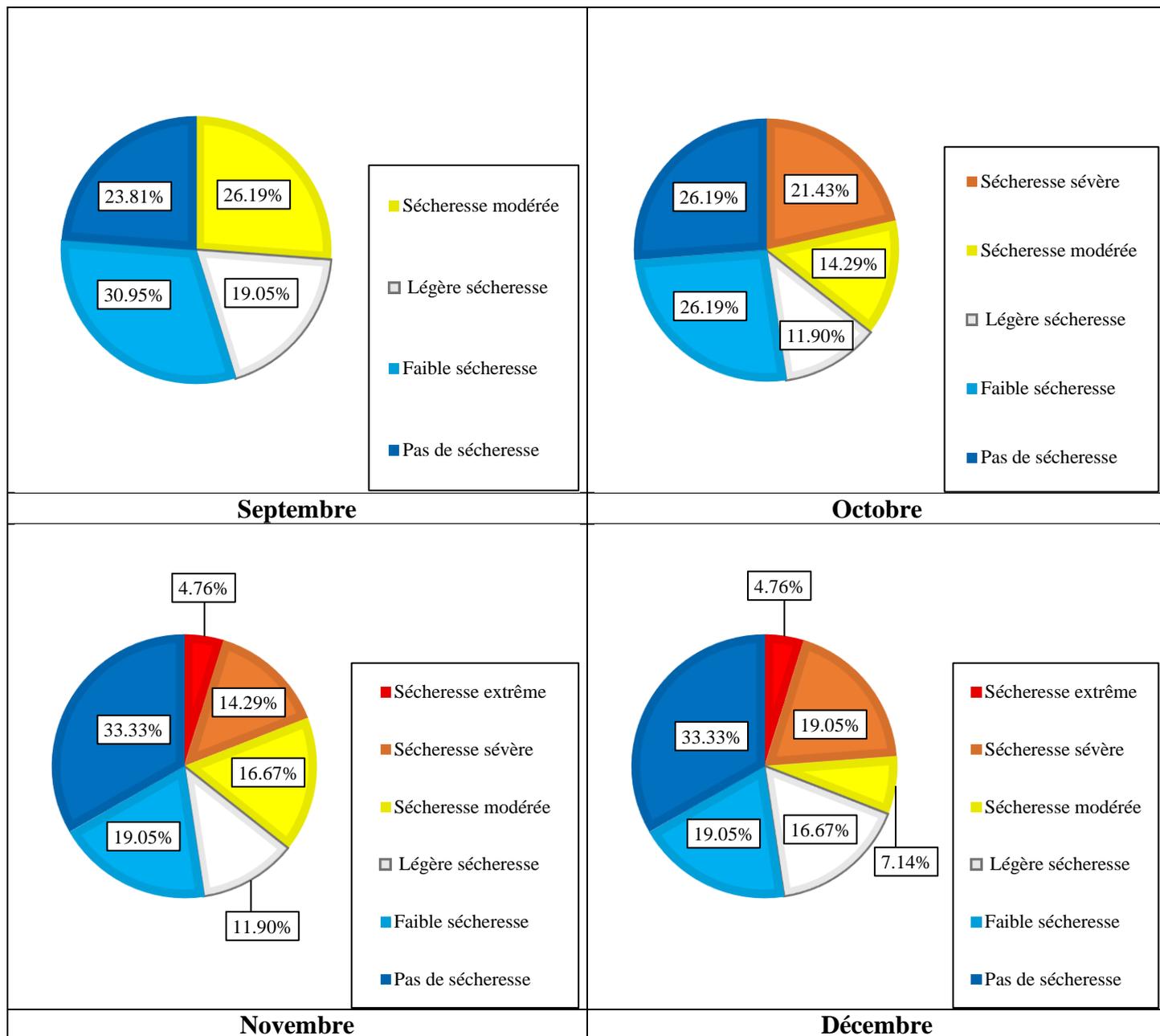


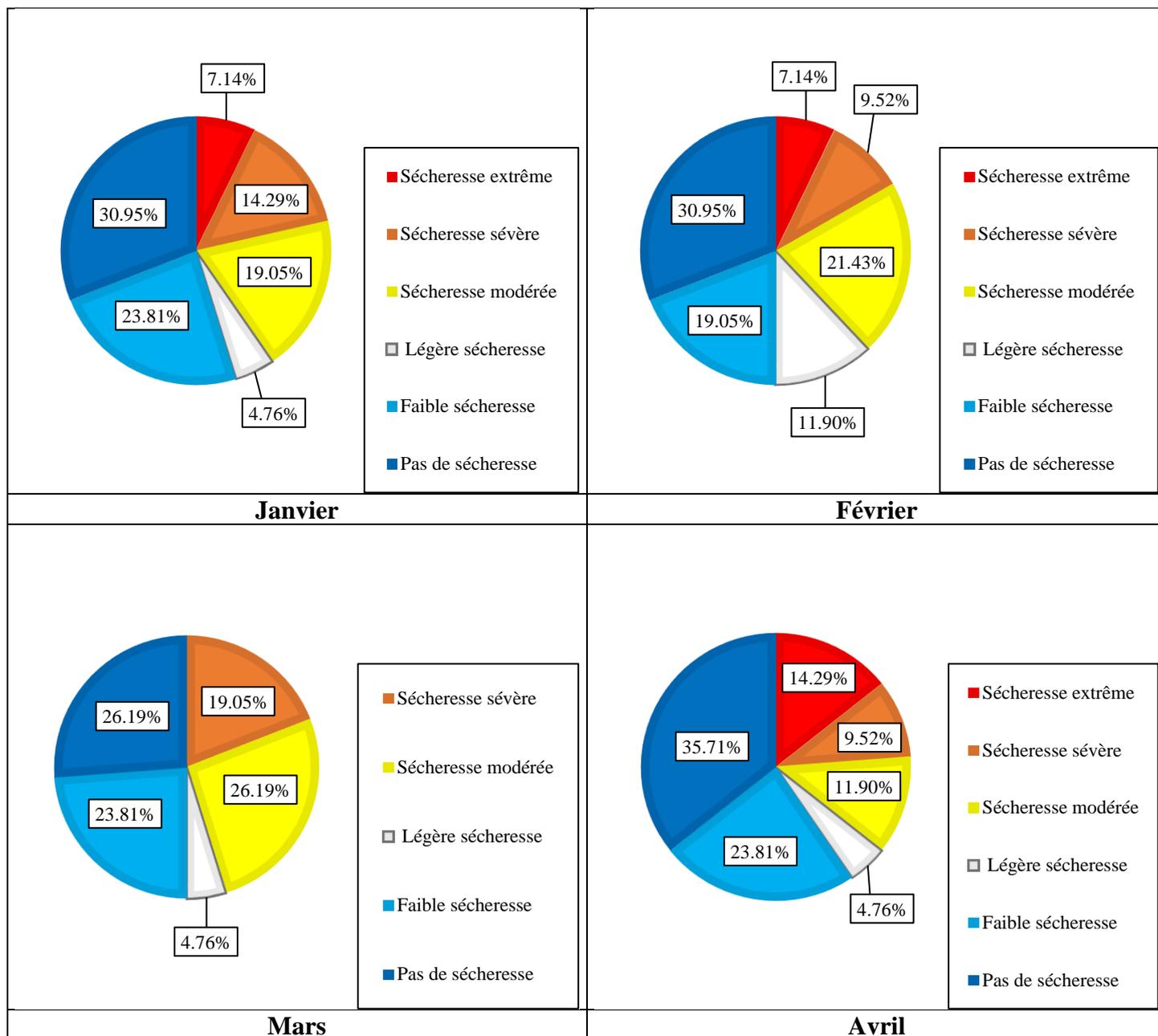
Figure VI.39 : Évolution du Z-Score pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbes (1977/1978-2018/2019)

La répartition de l'indice Z-Score à l'échelle mensuelle représentée sur la figure VI.40, nous indique qu'il y a une présence importante de toutes les classes dans les différents mois :

- Classe pas de sécheresse varie de 16,76% en Juillet à 35,71% en Avril,
- Classe faible sécheresse varie de 9,52% en Juin à 30,95% en Septembre,
- Sécheresse légère varie de 4,76% en Janvier et Avril à 66,76% en Juillet,
- Sécheresse modérée varie de 7,14% en Décembre à 42,86% en Août,
- Sécheresse sévère est nulle en Septembre, Juin, Juillet et Août, elle varie de 9,52% en Février et Avril à 28,57% en Mai,

➤ Sécheresse extrême varie de 4,67% en Novembre et Décembre à 14,29 % en Avril, cette classe n'existe pas en Septembre, Octobre et Mars.





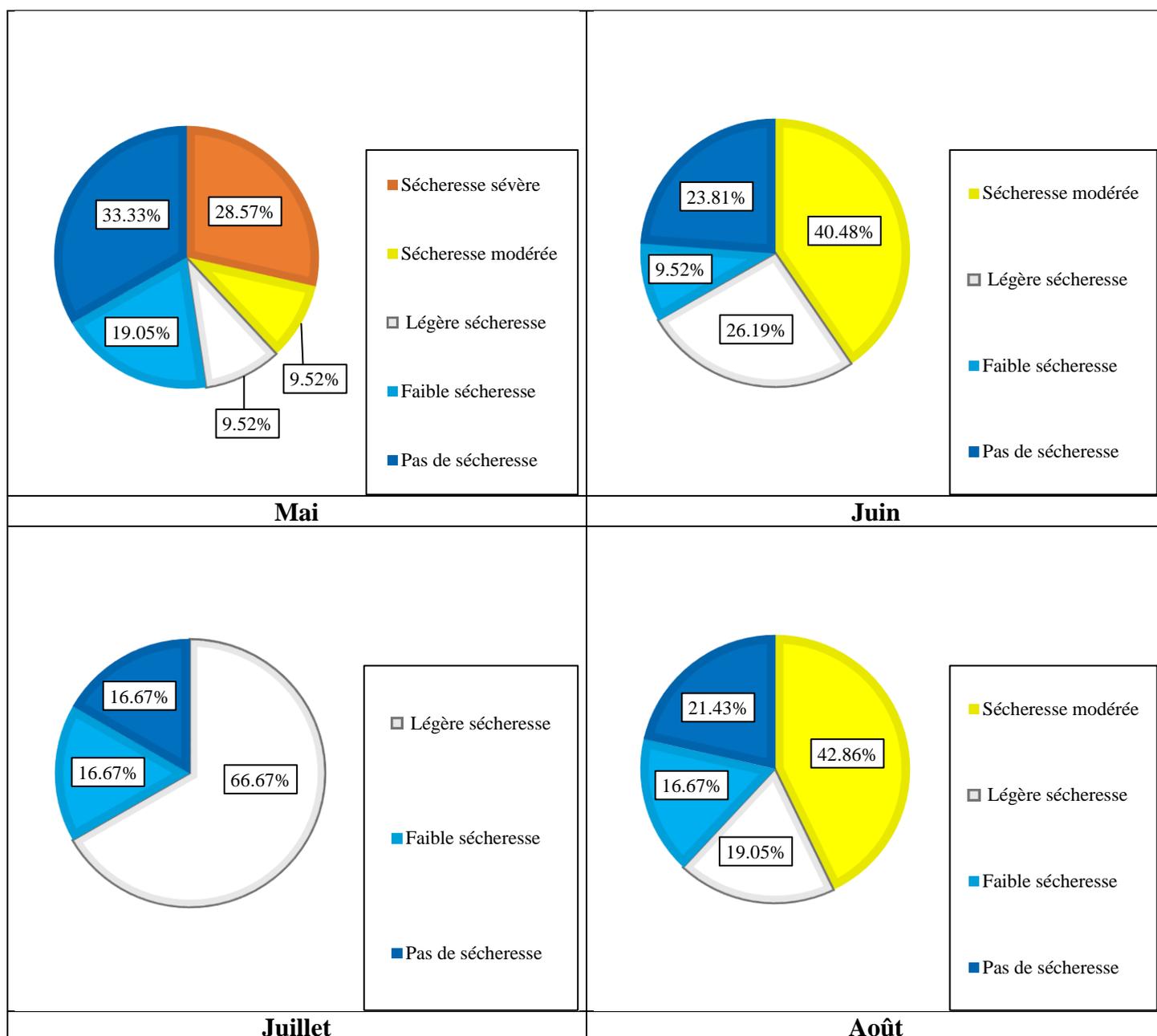


Figure VI.40 : Répartition du Z-Score pour la série des précipitations mensuelles de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

VI.8. Conclusion

L'identification des différents indices de sécheresse a été effectuée pour prévoir et évaluer la sévérité de cette dernière à un moment approprié (court et long terme), l'état de l'indice à un temps (t) peut être déterminé par l'un des trois cas : sec, humide (non sec) ou normale.

Sur les données de précipitations de 42 ans mis en étude, et de façon globale, l'application des indices à différentes échelles de temps a permis de détecter plusieurs séquences de sécheresses qui ont touché la région, les pics s'alternent entre les années sèche et humide. Pour SPI, PN, DI, CZI, MCZI, Z-Score et RAI, la sécheresse a longtemps sévi au cours des

décennies 80 et 90 et quelques années en 2000. Pour l'humidité, elle est souvent enregistrée dans les dernières 20 années entre 2007/2008 et 2013/2014, mais cela n'empêche pas l'existence des pics négatifs.

D'après les résultats de CZI et MCZI, le nombre d'années humides (ou pas de sécheresse) est beaucoup plus important que le nombre d'années sèches. La sécheresse pour l'échelle de temps saisonnière est souvent remarquable dans la saison estivale sauf pour MCZI où, en Été nous avons remarqué une humidité importante.

L'application du **logiciel MDM** aux données de la série pluviométrique nous permet de comparer les résultats des différents indices calculés.

- **À l'échelle annuelle :** nous constatons que le bassin versant de la basse Mekerra est caractérisé beaucoup plus par des séquences humides que sèches, ce qui apparait clairement en utilisant les indices PN, DI et Z-Score, d'autre part, l'indice SPI a classé notre bassin versant dans la classe proche de la normale.
- **À l'échelle mensuelle :** selon la classification de sécheresses, le SPI, CZI et MCZI ont caractérisé la zone d'étude par la classe proche de la normale. Par ailleurs, le PN et DI ont mis en évidence la dominance de l'humidité et la sécheresse extrême visibles au niveau de tous les mois, exception faite pour Septembre jusqu'à Mai où, DI a enregistré la dominance de la classe humide. L'indice Z-Score, à son tour, a montré que l'humidité caractérise les mois de Septembre à Mai, d'autre part, Juin et Août sont caractérisés par une sécheresse modérée et Juillet par une légère sécheresse. Enfin, pour l'indice RAI, il a classé les mois de Septembre jusqu'à Mai par une humidité extrême, et Juin, Juillet et Août par une sécheresse sévère.
- **À l'échelle saisonnière :** Pour le SPI-3 mois, la région d'étude est définie par la classe proche de la normale pour toutes les saisons. Par contre, le PN et le DI, leur attribuent la classe humide, excepté l'Été qui indique l'appartenance à la classe normale, selon le PN.

*Conclusión
générale*

Conclusion générale

La sécheresse définit l'état d'un environnement confronté à un manque d'eau significativement long et important pour qu'il ait des impacts sur la flore, la faune et les sociétés. La sécheresse a été imposée aux populations au cours des dernières décennies en raison des facteurs structurels du climat. Elle se produit sur une longue période de temps (généralement, pendant des décennies ou plus) et à grande échelle, elle est observée parfois en permanence dans des régions humides. Sa sévérité varie avec l'hétérogénéité spatiale de la pluie. En d'autres termes, elle peut varier en fonction des conditions géographiques et climatiques.

Dans les régions à climat semi-aride de l'Algérie, nous avons connu plusieurs périodes de sécheresse qui sont caractérisées par des pluviométries déficitaires et des écoulements très faibles des principaux oueds des bassins versants. Pendant les périodes sèches, les ressources en eau de surface et, par conséquent, les volumes stockés subissent une diminution très nette. Il devient parfois difficile de satisfaire la demande en eau potable, et aussi celle destinée à l'agriculture. Afin de mieux gérer une telle situation, la connaissance des facteurs climatiques et l'étude du phénomène de la sécheresse par l'estimation des indicateurs sont devenus indispensables.

Ce travail ayant pour objectif la caractérisation de la sécheresse par l'application des différents indices à des échelles de temps diverses au niveau de la basse Mekerra (Sidi Bel Abbès), nous a permis de définir les différents paramètres de sécheresse et d'essayer de caractériser les années en les spécifiant de normales, sèches ou humides.

L'étude des paramètres physiques montre que le bassin de l'aval Mekerra présente une forme assez allongée avec un indice de compacité $K_c = 1,85$ et 18h pour qu'une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée parvienne à l'exutoire. Le bassin est mal drainé ($D_d = 0,94 \text{ Km/Km}^2$), son relief est faible ($I_g = 0,0029$), son coefficient de torrencialité très faible équivaut $0,35 \text{ Km/Km}^2$.

La zone étudiée est caractérisée par une vaste superficie (grand bassin 1195 Km^2) et un climat méditerranéen semi-aride (Hivers doux et humides et Étés chauds et secs).

L'étude met en évidence l'irrégularité des précipitations avec une moyenne interannuelle de 326,6 mm calculée sur une période de 42 ans (1977/1978 - 2018/2019). La moyenne interannuelle des températures enregistrée pour la période (1989/1990 - 2018/2019) est de $17,6^\circ\text{C}$, avec une augmentation annuelle de l'ordre de $0,1^\circ\text{C}/\text{an}$. On y distingue :

- Le mois de Novembre comme le mois le plus pluvieux avec une valeur de 48,1 mm,
- Le mois de Janvier reste le mois le plus froid avec une valeur de $9,1^\circ\text{C}$,
- Juillet étant le mois le plus sec et le plus chaud avec 1,4 mm et $27,5^\circ\text{C}$,
- L'Hiver est la saison la plus pluvieuse et la plus froide enregistrant 125,9 mm et $9,9^\circ\text{C}$,
- L'Été par contre est la saison la plus sèche et la plus chaude avec 10,9 mm et $26,3^\circ\text{C}$.

Pour identifier le bilan hydrologique durant la période (1989/1990 - 2018/2019), nous avons trouvé que notre bassin versant est caractérisé par des précipitations annuelles de 339,4 mm,

Conclusion générale

un ruissellement de surface de 15,2 mm/an, l'évapotranspiration réelle est de 333,1 mm/an (selon Turc) ou bien 295,9 mm/an (selon Thornthwaite), et l'infiltration est nulle (selon Turc) ou bien 28,3 mm/an (selon Thornthwaite).

Une étude de détection de rupture a permis de trouver des changements au niveau des précipitations au cours de l'année 2006/2007 par différents tests, avec un déficit autour de 35% à 68%. Pour la température, les fortes ruptures sont remarquables au cours des périodes 1992/1993-2001/2002 et 2008/2009-2010/2011, avec une diminution de 3,88%.

Les traitements réalisés pour caractériser la sécheresse dans la zone d'étude, par l'application des différents indices aux données pluviométriques et à des échelles de temps différentes ont mis en lumière la sécheresse apparue au cours des décennies 80 et 90 et marquent quelques années en 2000, par ailleurs, l'humidité est souvent enregistrée dans les dernières 20 années entre 2007/2008 et 2013/2014. La comparaison entre le SPI, CZI et MCZI a permis de définir le climat du bassin versant comme étant proche de la normale, aussi, la comparaison entre le PN, DI et Z-Score a mis en évidence la dominance de l'humidité. D'autre part, la sécheresse soit légère, sévère ou bien extrême caractérise les mois de Juin, Juillet et Août.

L'étude de la sécheresse aide à prendre une bonne décision pour mieux gérer les ressources en eau, pour cela, cette étude ne peut être une fin en soi car elle pourra être poussée en considérant d'autres paramètres climatiques en considérant une échelle de temps plus fine (pas de temps journalier) et/ou l'utilisation de nouveaux indices pour détecter les épisodes secs.

Pour ce faire nous recommandons de :

- Élargir la base de données en incluant d'autres stations de mesure sur le bassin, permettant d'avoir des informations susceptibles de détecter la vulnérabilité à la sécheresse par l'établissement d'une carte de répartition des différents indices,
- Caractériser le changement de la variabilité climatique en terme de quantification des précipitations et évaluer l'impact sur l'agriculture.

*Références
bibliographiques*

- **Assani AA., Delisle F., Landry R., 2015.** Effects of Land Use on Flow Rate Change Indices. *Forests* 6: 4349-4359. Doi: 10.3390/f6114349.
- **Auterives C., 2002.** Impact du changement climatique sur la ressource en eau en région Languedoc-Roussillon. Paris : Université Pierre et Marie Curie, Université Paris-Sud, École des Mines de Paris & École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts. DEA Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie.
- **Bennabi F., Hamel L., Bouiadjra S.B., 2012.** Ressources hydriques sous tension et enjeux de développement durable dans la wilaya de Sidi Bel Abbes (Algérie occidentale), p. 108.
- **Boukhaly T.V., Ndiaye M.L., Mbow C., Malomar G., Sarr J., Beye A.C., Diaw A.T.,** « Khronostat Model as Statistical Analysis Tools in Low Casamance River Basin, Senegal » [en ligne], *World Environment* 2017, 7(1). DOI : 10.5923/j.env.20170701.02, p. 10-22. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/318281274_Khronostat_Model_as_Statistical_Analysis_Tools_in_Low_Casamance_River_Basin_Senegal
- **Byun H.R., Wilhite D.A., 1999.** Objective quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate*, 12(9): 2747–2756. Ceglar A, Toreti A, Balsamo G, et al. 2017. Precipitation over Monsoon Asia: a comparison of reanalyses and observations. *Journal of Climate*, 30(2), p. 465–476.
- **Chadli A., 2008.** Étude de la qualité des eaux usée traitée de la station d'épuration de la ville de Sidi Bel Abbes et leur utilisation en agriculture mémoire magister. Université SIDI Bel Abbés. Faculté des sciences.
- **Chloé L., 2013.** Impact du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne. *Géographie*. Université Rennes 2, 2013.
- **Djellouli F., Bouanani A., Baba Hamed K., 2016.** Efficiency of some meteorological drought indices in different time scales, case study: wadi Louza basin (NW-Algeria), p. 39.
- **Gibbs W., Maher J., 1967.** Rainfall Deciles as Drought Indicators. Melbourne: Bureau of Meteorology, p. 117.
- **Guttman N.B., 1998.** Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), p. 113-121.
- **Guttman N.B., 1999.** Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), p. 311-322.
- **Hallouche B., 2007.** Cartographie des zones inondables de la plaine de Sidi Bel Abbes par l'approche hydrogéomorphologique. Mémoire de Magister. U. Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes. 153p. 2007.
- **Hayes M.J., Wilhite D.A., Svoboda M.D., Wilhite D.A., Vanyarkho O.V., 1999.** Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Vol. 80. No. 3, p. 429–438.

- **Horton R.E., 1945.** Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. Bulletin of the Geological Society of America.
- **Ju X.S., Yang X.W., Chen L.J., Wang Y.M., 1997.** Research on determination of station indexes and division of regional flood/drought grades in China. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 8(1): 26–33. (In Chinese)
- **Kallis G., 2008.** Droughts. Annual review of environment and resources. Volume 33. p. 83–118.
- **Khan S., Gabriel H.F., Rana T., 2008.** Standard precipitation index to track drought and assess impact of rainfall on water tables in irrigation areas. Irrig Drainage Syst, 22, p. 159–177.
- **Larbi, 2016.** Contribution à la réhabilitation de la série III du massif forestier de touazizine (monts de Dhaya-wilaya de SIDI BEL ABBES), p. 22.
- **Mckee T.B., Doesken N.J., Kleist J., 1993.** The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Anaheim, CA. AMS, p. 179–184.
- **Mckee T.B., Doesken N.J., Kleist J., 1995.** Drought monitoring with multiple time scales. In: Proceedings of the 9th Conference on Applied Climatology, AMS, Dallas, TX, p. 233–236.
- **McKee T.B., Doesken N.J., Kleist J.** Drought monitoring with multiple time scales. In Proceedings of 9th Conference on Applied Climatology, Dallas, TX, USA, 15–20 January 1995, p. 233–236.
- **Meddi M., Sadeuk Ben Abbes A., 2013.** Analyse statistique et prévision des débits de crues dans le bassin versant de l'Oued Mekerra (Ouest de l'Algérie), Revue « Nature & Technologie ». C- Sciences de l'Environnement, n°10/Janvier 2014, p 21-31.
- **Mekki F.Z., 2017.** Contribution à l'étude phytoécologique et anatomique de quelques espèces reboisées dans la région steppique de la wilaya de Sidi Bel Abbés (Cas Ras El Ma), p. 18.
- **Miller V.C., 1959.** A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area Virginia and Tennessee. Teach. Report no.3. Dept of Geology Columbia Univ. New York.USA.
- **OMM, 2008.** Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation [en ligne], WMO-No. 8, p. I.2–1. Disponible à l'adresse : <https://www.weather.gov/media/epz/mesonet/CWOP-WMO8.pdf>
- **OMM, 2012.** Standardized Precipitation Index User Guide, OMM- No. 1090, p. 7-10.
- **OMM, 2016.** Organisation météorologique mondiale, le Manuel des indicateurs et indices de sécheresse OMM- No. 1173.
- **OMM, 2018.** Guide to Climatological [en ligne], WMO-No. 100, p. 1. Disponible à l'adresse : https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5541,%20page%201
- **OMM, 2020.** Organisation Météorologique Mondiale guide climat & eau journée Météorologique Mondiale - 23 MARS 2020.

- **Otmane A., Baba Hamed K., Bouanani A., 2019.** Apport de la variabilité spatiale des caractéristiques physiques du bassin versant dans la modélisation hydrologique et les sous-produits du bilan hydrologique : cas du bassin versant de l'aval Mekerra, Algérie (2019), *Revue des Sciences de l'Eau* 32(2) (2019), p. 117-144.
- **Otmane A., 2015.** Prédétermination des valeurs de pluies et crues extrêmes dans le bassin versant de l'Oued Mekerra (2015) thèse magister université d'Oran 2, p. 5-19.
- **Paturel J.E., Servat E., Kouame B., Boyer J.F., Lubes Niel H., Masson J.M.,** « Procédures d'identification de ruptures dans des séries chronologiques - modification du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest non sahélienne » [en ligne], *L'hydrologie tropicale : géoscience et l'outil pour le développement : (Actes de la conférence de Paris, mai 1995). IAHS Publi. No. 238. 1996, p. 99-110.* Disponible à l'adresse : https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers09-03/010009805.pdf
- **Sankara Bakari T., 2010.** Variabilité climatique et gestion des ressources naturelles. Cas de la forêt classée et réserve partielle de faune de Gonse au Burkina Faso. Mémoire de Master. Univ de Ouagadougou. 85p.
- **Sebbar A., 2013.** Étude de la variabilité et de l'évolution de la pluviométrie au Maroc (1935-2005) : Réactualisation de la carte des précipitations [en ligne]. Casablanca : Université Hassan II Mohammeda-Faculté des Sciences Ben M'Sik. Thèse de Doctorat. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/273259756_Etude_de_la_variability_et_de_l'evolution_de_la_pluviometrie_au_Maroc_1935-2005_Reactualisation_de_la_carte_des_precipitations
- **Soro T.D., Soro N., Oga Y.M.S., Lasm T., Soro G., Ahoussi K.E., Biémi J.,** « La variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le degré carré de Grand-Lahou (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) » [en ligne], *Géographie Physique et Environnement*, 2011, p. 55-73. Disponible à l'adresse : <https://journals.openedition.org/physio-geo/1581>
- **Tachi A. & Bentrard M., 2018.** Prédiction De Débit Solide Dans La Période De Crue Par l'Utilisation Des Réseaux De Neurones Artificiels : Étude De Cas De l'Oued Mekerra - Sidi Bel Abbes – Algérie, p. 38-44.
- **Talatizi A., 2014.** Étude des infiltrations à travers une digue de barrage en terre Cas d'un barrage algérien, Université Mouloud Mammeri.
- **Tatar H., Regad N., 2015.** Variabilité climatique et ressources en eau en milieu semi-aride : cas des bassins versant des Oueds Chemora, Reboa et Gueiss (hauts plateaux constantinois, Algérie), p. 19.
- **Willeke G., Hosking J.R.M., Wallis J.R., Watson T.J., 1994.** The national drought atlas. In: Institute for Water Resources. Report 94-NDS-4. U.S Army Corp of Engineers, CD-ROM. Norfolk, VA.
- **Wu H., Hayes M.J., Weiss A., Hu Q., 2001.** An evaluation of the Standardized Precipitation Index, the China-Z Index and the statistical Z-Score. *International Journal of Climatology*, 21(6), p. 745-758.

Références bibliographiques

- **Yousfi S., 2008.** Hydrodynamique et modélisation de la nappe alluviale de la plaine de Sidi Bel Abbes (nord-ouest Algérien). Mémoire de magister. Univ Tlemcen. 156p.

Webographie

- [1] <https://fr.maps-algeria.com/1%27algérie-carte-climatique>
- [2] http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/faq/faq_doc_en.html
- [3] <https://hydrologie.org/glu/FRDIC/DICPRECI.HTM>
- [4] <https://www.cieau.com/connaitre-leau/secheresse-comment-agir/>
- [5] <https://www.eartheclipse.com/natural-disaster/types-causes-effects-of-droughts.html>
- [6] https://www.notre-planete.info/terre/risques_naturels/secheresse.php#types
- [7] Bilan hydrique - Bilan hydrologique. Hydrologie [en ligne]. Décembre 1996 [Consulté le 10 aout 2020]. Disponible à l'adresse : <https://hydrologie.org/glu/FRDIC/DICBILAN.HTM#:~:text=Le%20Glossaire%20International%20d'Hydrologie,des%20sorties%20plus%20la%20variation%2C>
- [8] <https://gmao.gsfc.nasa.gov/research/subseasonal/atlas/SPI-html/SPI-description.html>
- [9] [https://agrimetsoft.com/faq/What%20is%20difference%20between%20CZI%20\(C hina-Z%20Index\)%20and%20MCZI%20\(Modified%20CZI\)](https://agrimetsoft.com/faq/What%20is%20difference%20between%20CZI%20(C hina-Z%20Index)%20and%20MCZI%20(Modified%20CZI))

Annexes

Annexe III.1 : Table de fréquence au non dépassement de μ

$F(u) = \text{Prob}(U \leq u)$

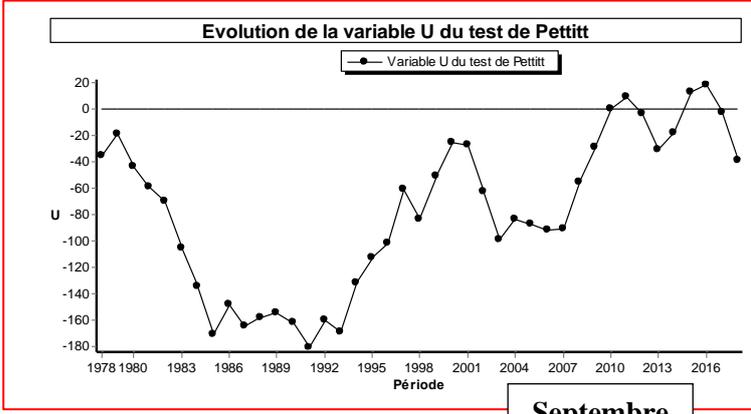
u	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0	0,5000	0,5040	0,5080	0,5120	0,5160	0,5199	0,5239	0,5279	0,5319	0,5359
0,1	0,5398	0,5438	0,5478	0,5517	0,5557	0,5596	0,5636	0,5675	0,5714	0,5753
0,2	0,5793	0,5832	0,5871	0,5910	0,5948	0,5987	0,6026	0,6064	0,6103	0,6141
0,3	0,6179	0,6217	0,6255	0,6293	0,6331	0,6368	0,6406	0,6443	0,6480	0,6517
0,4	0,6554	0,6591	0,6628	0,6664	0,6700	0,6736	0,6772	0,6808	0,6844	0,6879
0,5	0,6915	0,6950	0,6985	0,7019	0,7054	0,7088	0,7123	0,7157	0,7190	0,7224
0,6	0,7257	0,7290	0,7324	0,7357	0,7389	0,7422	0,7454	0,7486	0,7517	0,7549
0,7	0,7580	0,7611	0,7642	0,7673	0,7704	0,7734	0,7764	0,7794	0,7823	0,7852
0,8	0,7881	0,7910	0,7939	0,7967	0,7995	0,8023	0,8051	0,8078	0,8106	0,8133
0,9	0,8159	0,8186	0,8212	0,8238	0,8264	0,8289	0,8315	0,8340	0,8365	0,8389
1	0,8413	0,8438	0,8461	0,8483	0,8508	0,8531	0,8554	0,8577	0,8599	0,8621
1,1	0,8643	0,8665	0,8686	0,8708	0,8729	0,8749	0,8770	0,8790	0,8810	0,8830
1,2	0,8849	0,8869	0,8888	0,8907	0,8925	0,8944	0,8962	0,8980	0,8997	0,9013
1,3	0,9032	0,9049	0,9066	0,9082	0,9099	0,9115	0,9131	0,9147	0,9162	0,9177
1,4	0,9192	0,9207	0,9222	0,9236	0,9251	0,9265	0,9279	0,9292	0,9306	0,9319
1,5	0,9332	0,9345	0,9357	0,9370	0,9382	0,9394	0,9406	0,9418	0,9429	0,9441
1,6	0,9452	0,9463	0,9474	0,9484	0,9495	0,9505	0,9515	0,9525	0,9535	0,9545
1,7	0,9554	0,9564	0,9573	0,9582	0,9591	0,9599	0,9608	0,9616	0,9625	0,9633
1,8	0,9641	0,9649	0,9656	0,9662	0,9671	0,9678	0,9686	0,9693	0,9699	0,9706
1,9	0,9713	0,9719	0,9726	0,9732	0,9738	0,9744	0,9750	0,9756	0,9761	0,9767
2	0,9772	0,9779	0,9783	0,9788	0,9793	0,9798	0,9803	0,9808	0,9812	0,9817
2,1	0,9821	0,9826	0,9830	0,9834	0,9838	0,9842	0,9846	0,9850	0,9854	0,9857
2,2	0,9861	0,9864	0,9868	0,9871	0,9875	0,9878	0,9881	0,9884	0,9887	0,9890
2,3	0,9893	0,9896	0,9898	0,9901	0,9904	0,9906	0,9909	0,9911	0,9913	0,9916
2,4	0,9918	0,9920	0,9922	0,9925	0,9927	0,9929	0,9931	0,9932	0,9934	0,9936
2,5	0,9938	0,9940	0,9941	0,9943	0,9945	0,9946	0,9948	0,9949	0,9951	0,9952
2,6	0,9953	0,9955	0,9956	0,9957	0,9959	0,9960	0,9961	0,9962	0,9963	0,9964
2,7	0,9965	0,9966	0,9967	0,9968	0,9969	0,9970	0,9971	0,9972	0,9973	0,9974
2,8	0,9974	0,9975	0,9976	0,9977	0,9977	0,9978	0,9979	0,9979	0,9980	0,9981
2,9	0,9981	0,9982	0,9982	0,9983	0,9984	0,9984	0,9985	0,9985	0,9986	0,9986
3	0,9987	0,9987	0,9987	0,9988	0,9988	0,9989	0,9989	0,9989	0,9990	0,9990
3,1	0,9990	0,9991	0,9991	0,9991	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9993	0,9993
3,2	0,9993	0,9993	0,9994	0,9994	0,9994	0,9994	0,9994	0,9995	0,9995	0,9995
3,3	0,9995	0,9995	0,9995	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9997
3,4	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9998

Annexe III.2 : Table de Khi carré (χ^2)

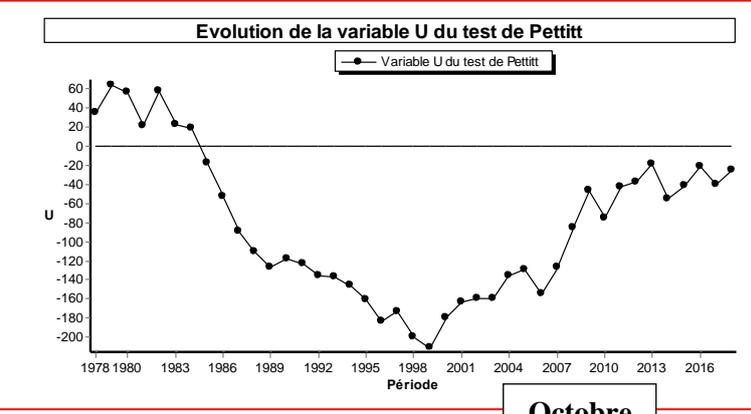
v / α	0.1	0.05	0.025	0.01	v / α	0.1	0.05	0.025	0.01
1	2.71	3.84	5.02	6.63	16	23.54	26.30	28.84	32.00
2	4.61	5.99	7.38	9.21	17	24.77	27.59	30.19	33.41
3	6.25	7.81	9.35	11.34	18	25.99	28.87	31.53	34.80
4	7.78	9.49	11.14	13.28	19	27.20	30.14	32.85	36.19
5	9.24	11.07	12.83	15.09	20	28.41	31.41	34.17	37.57
6	10.64	12.59	14.45	16.81	21	29.61	32.67	35.48	38.93
7	12.02	14.07	16.01	18.47	22	30.81	33.92	36.78	40.29
8	13.36	15.51	17.53	20.09	23	32.01	35.17	38.08	41.64
9	14.68	16.92	19.02	21.67	24	33.20	36.41	39.37	42.98
10	15.99	18.31	20.48	23.21	25	34.38	37.65	40.65	44.31
11	17.27	19.67	21.92	24.72	26	35.56	38.88	41.92	45.64
12	18.55	21.03	23.34	26.22	27	36.74	40.11	43.19	46.96
13	19.81	22.36	24.74	27.69	28	37.92	41.34	44.46	48.28
14	21.06	23.68	26.12	29.14	29	39.09	42.56	45.72	49.59
15	22.31	25.00	27.49	30.58	30	40.26	43.77	46.98	50.89

v : le nombre de degré de liberté. α : le risque d'erreur.

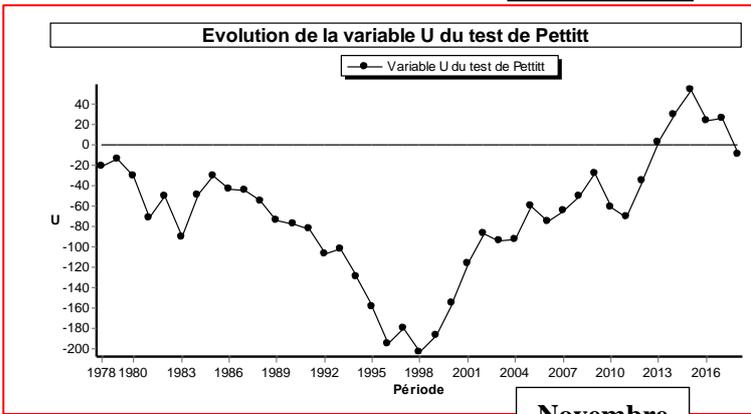
Annexe IV.1 : Évolution de la variable U du test de Pettitt pour les variations mensuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)



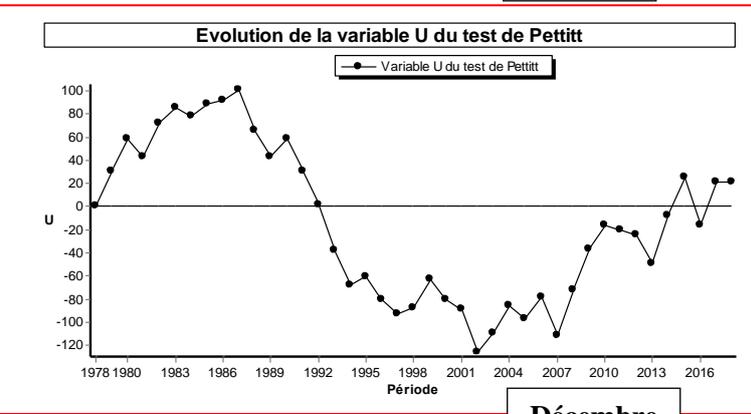
Septembre



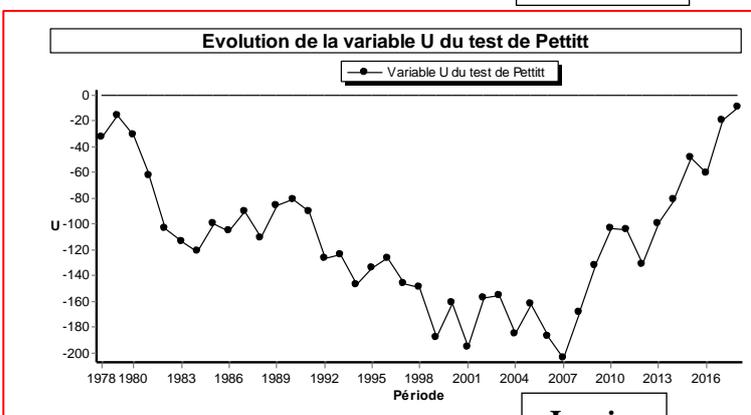
Octobre



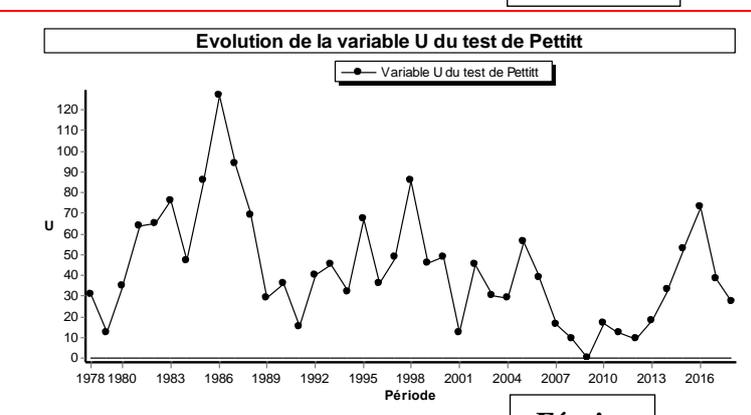
Novembre



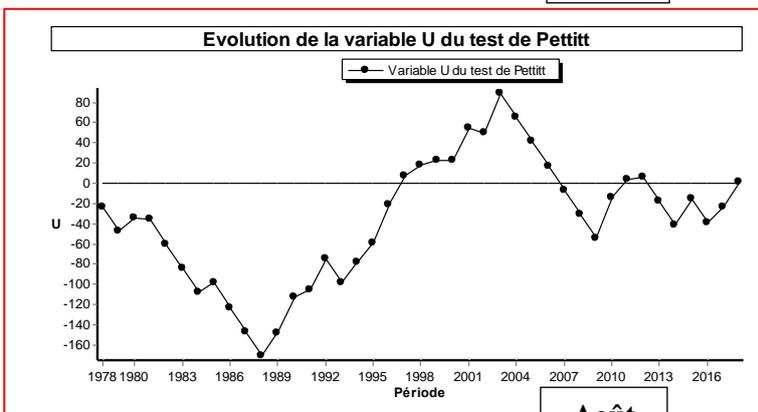
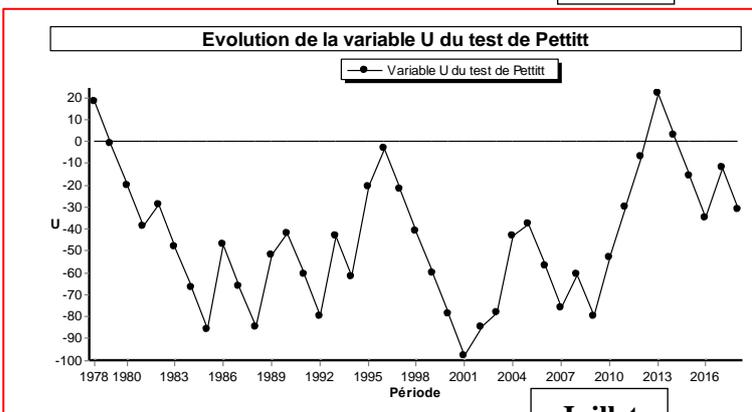
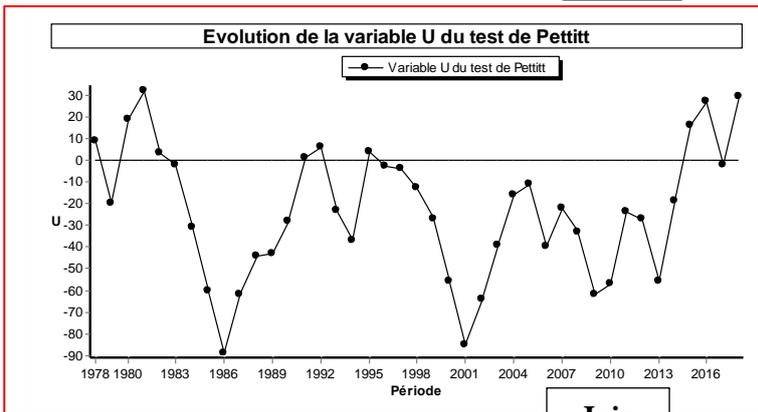
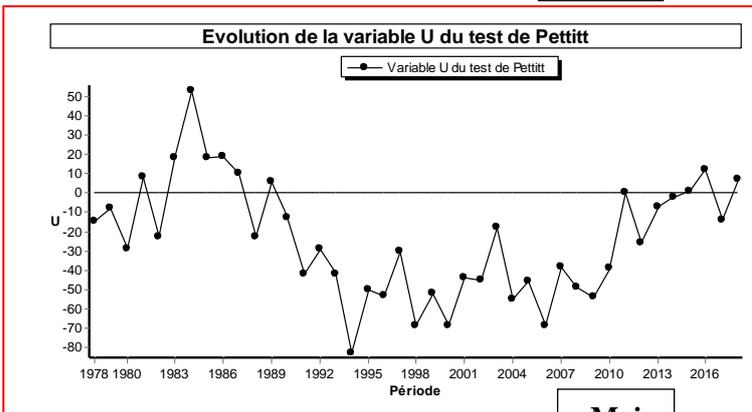
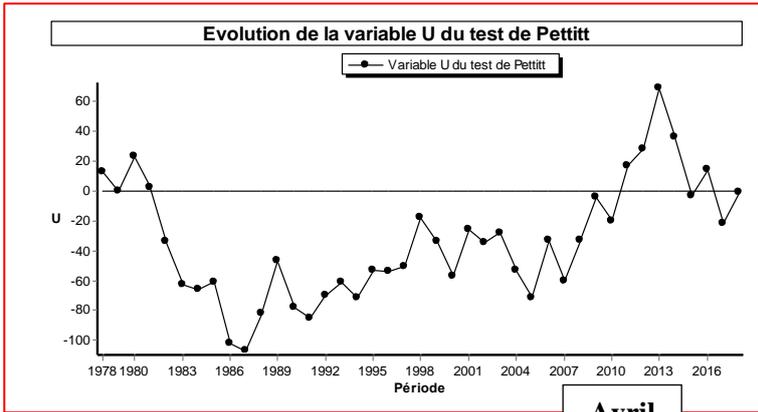
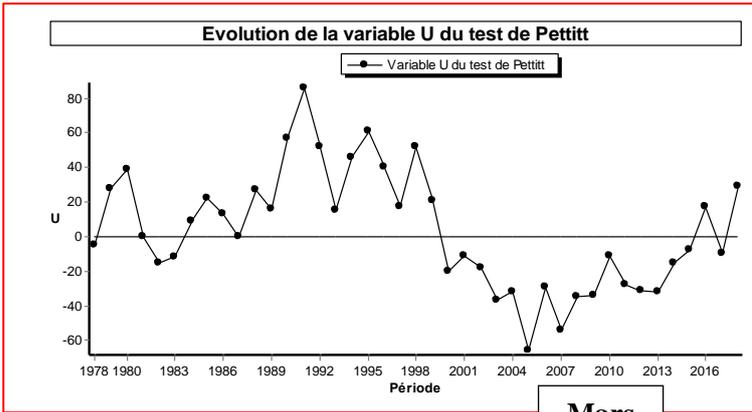
Décembre



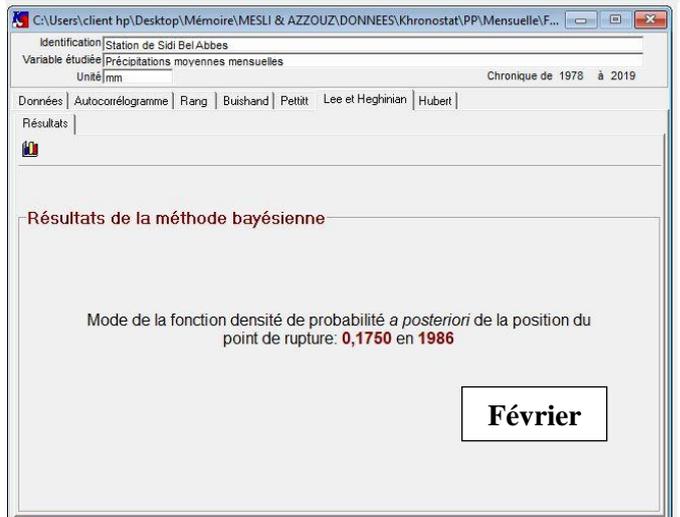
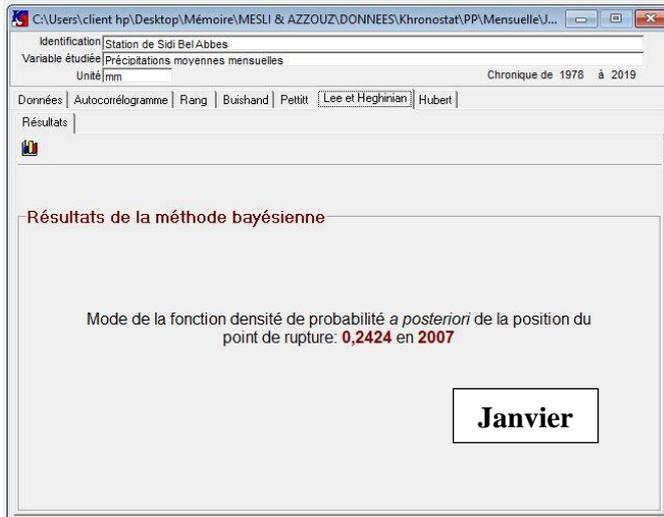
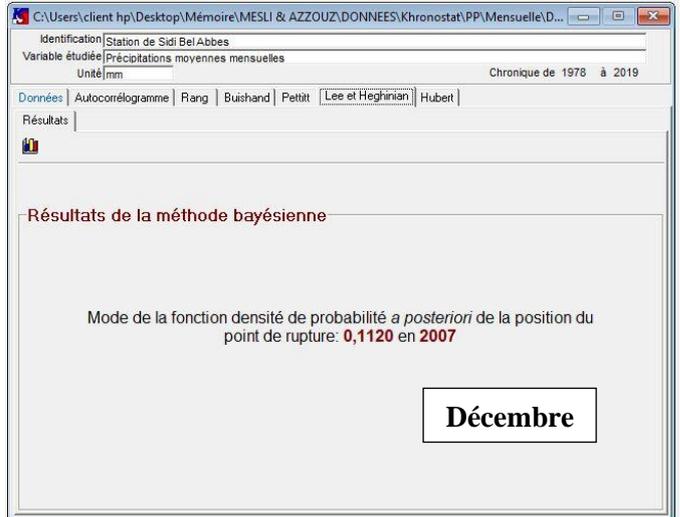
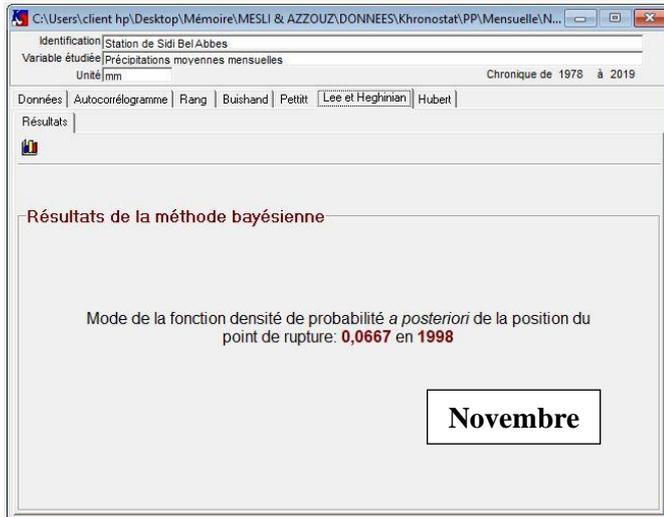
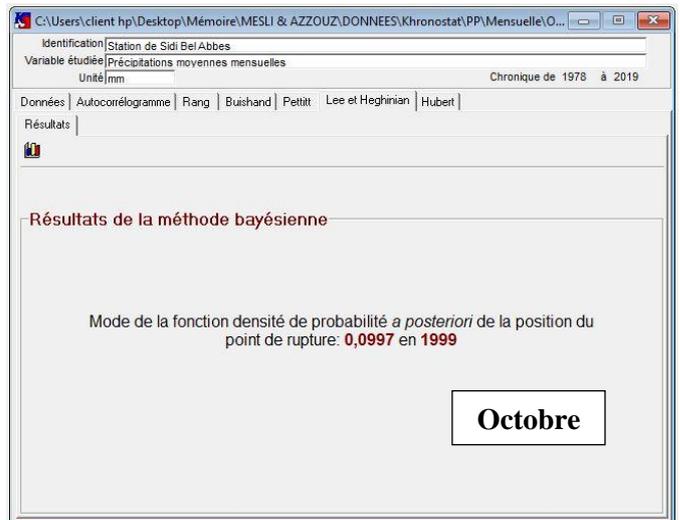
Janvier

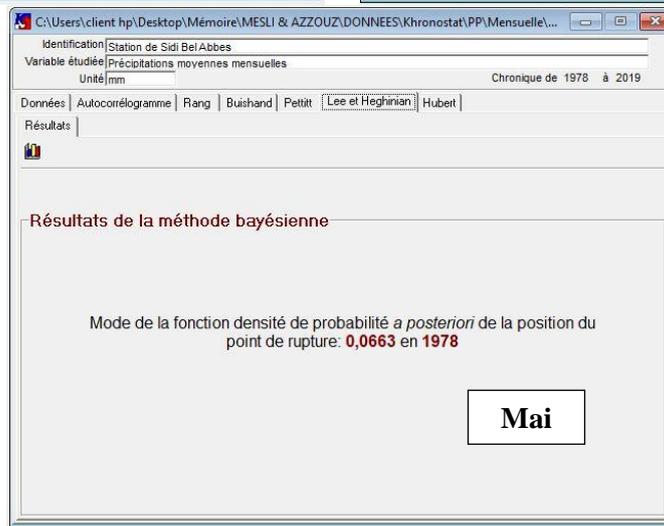
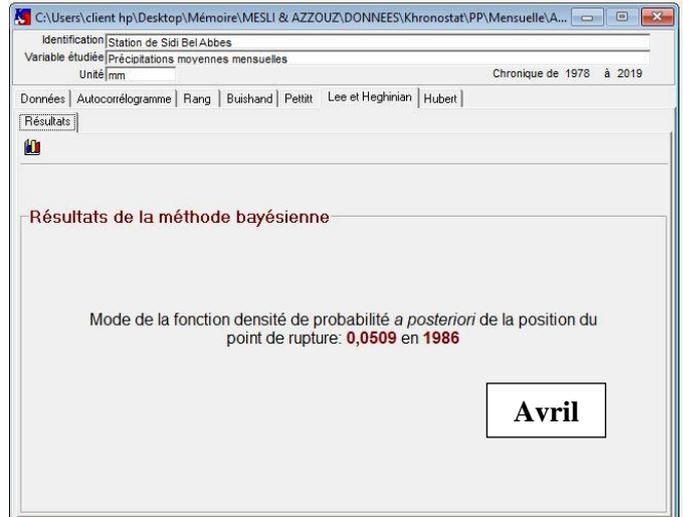


Février

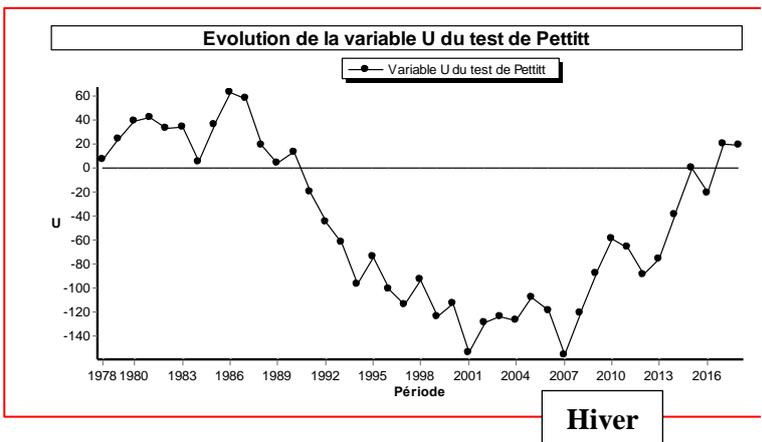
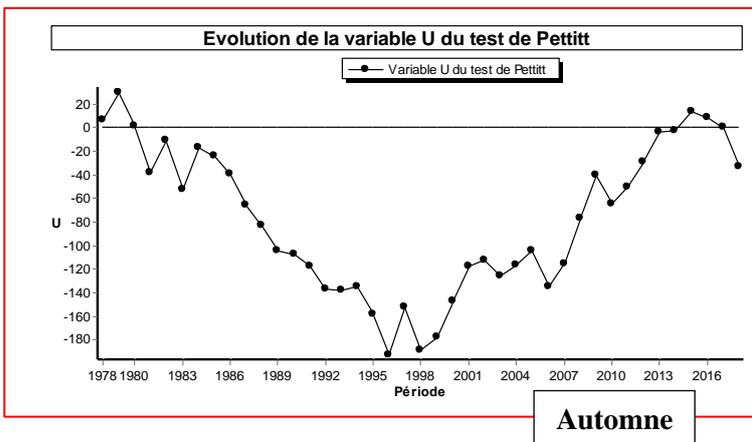


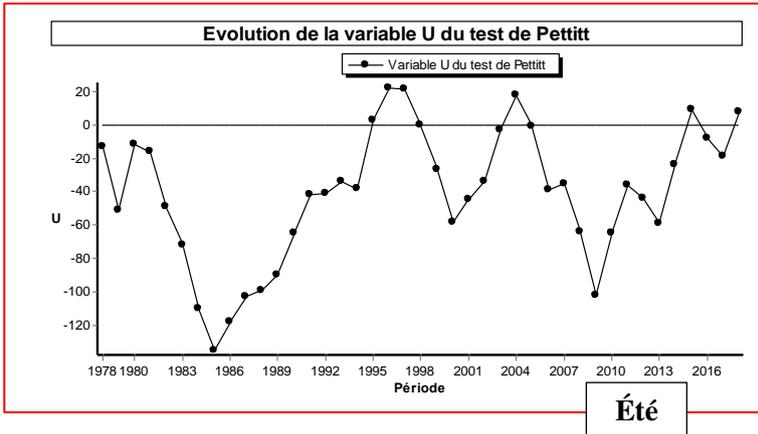
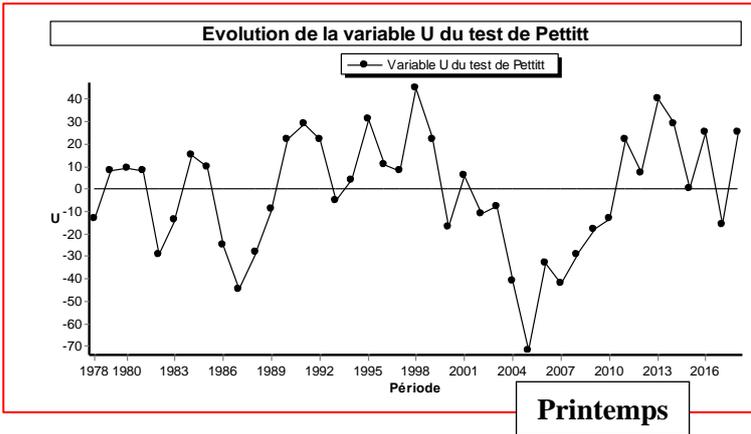
Annexe IV.2 : Résultats de la méthode bayésienne de Lee et Heghinian pour les variations mensuelles des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)



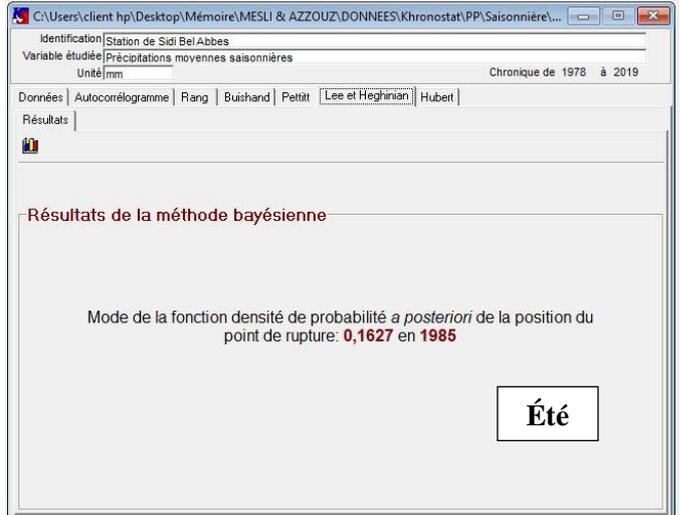
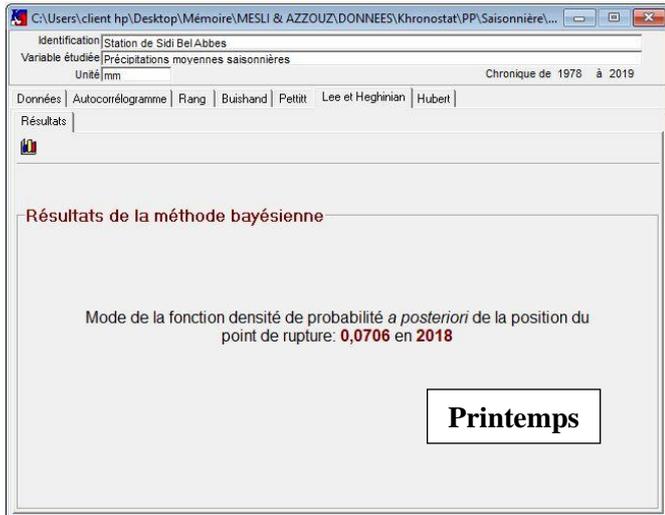
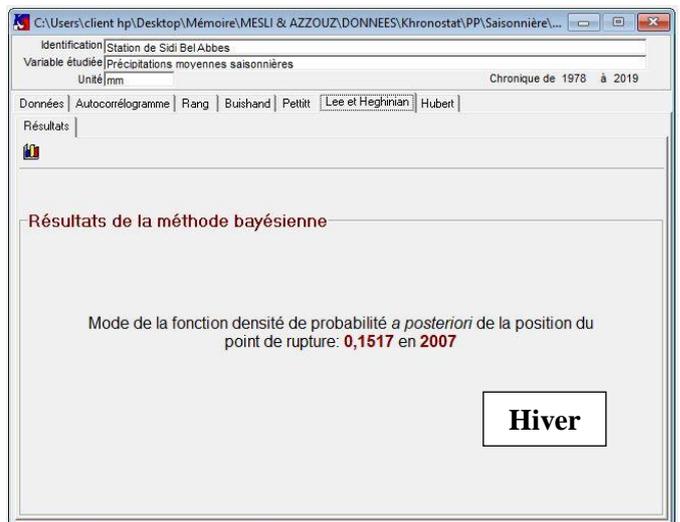
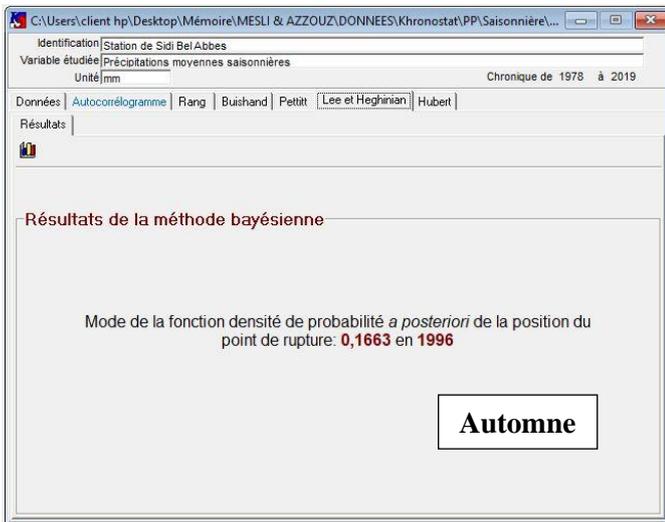


Annexe IV.3 : Évolution de la variable U du test de Pettitt pour les variations saisonnières des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)

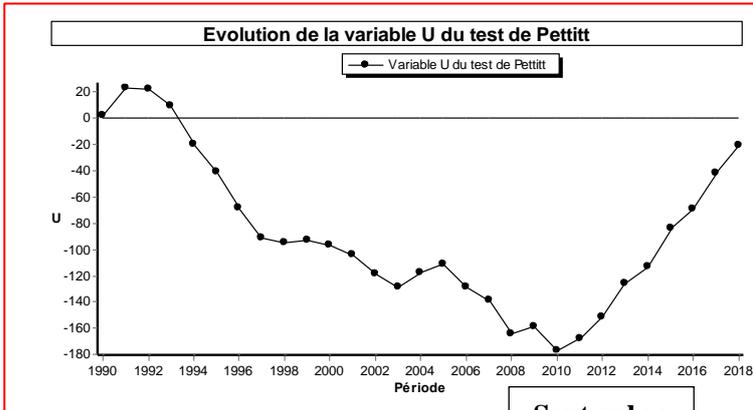




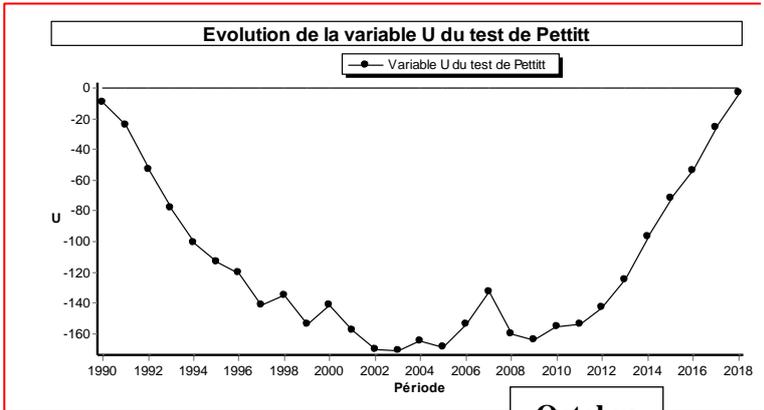
Annexe IV.4 : Résultats de la méthode bayésienne de Lee et Heghinian pour les variations saisonnières des précipitations de la station de Sidi Bel Abbas (1977/1978-2018/2019)



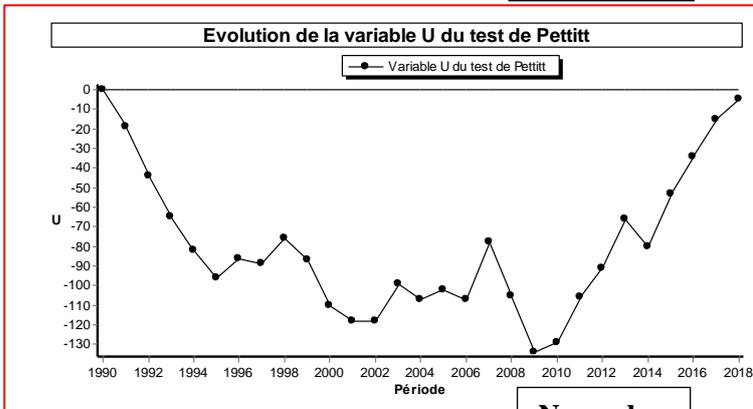
Annexe IV.5 : Évolution de la variable U du test de Pettitt pour les variations moyennes mensuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbas (1989/1990-2018/2019)



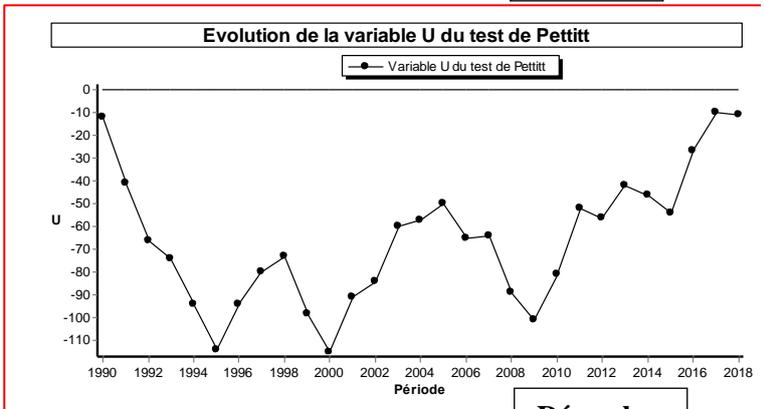
Septembre



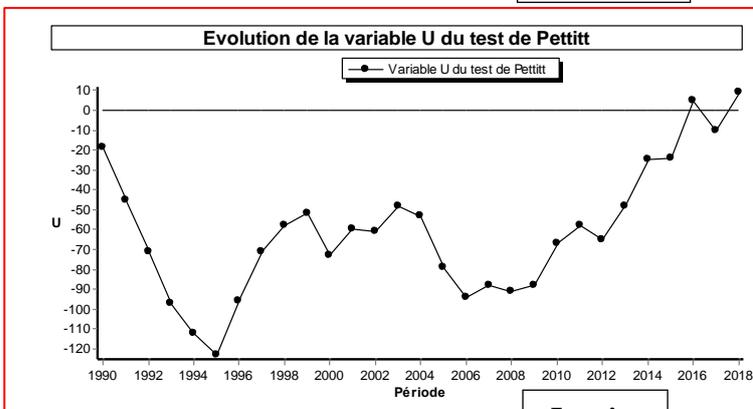
Octobre



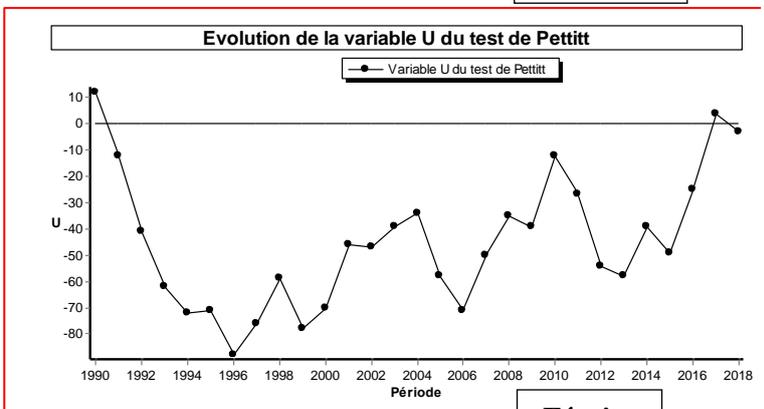
Novembre



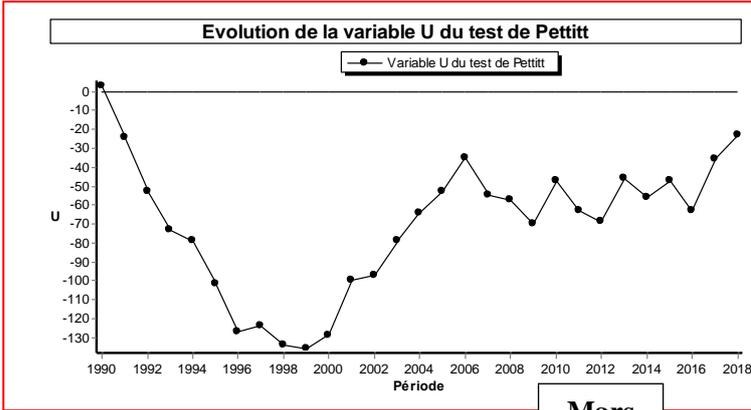
Décembre



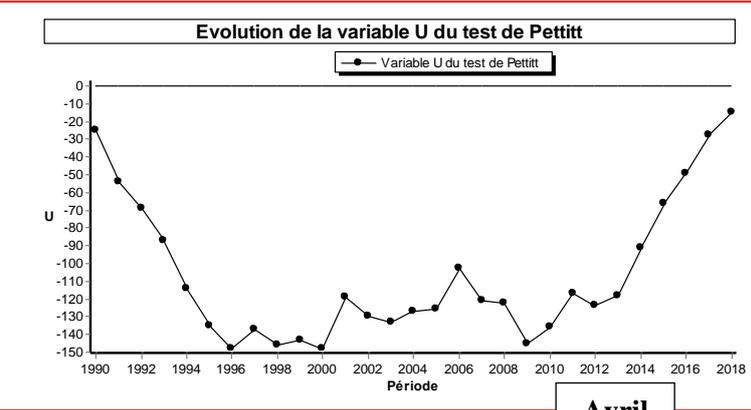
Janvier



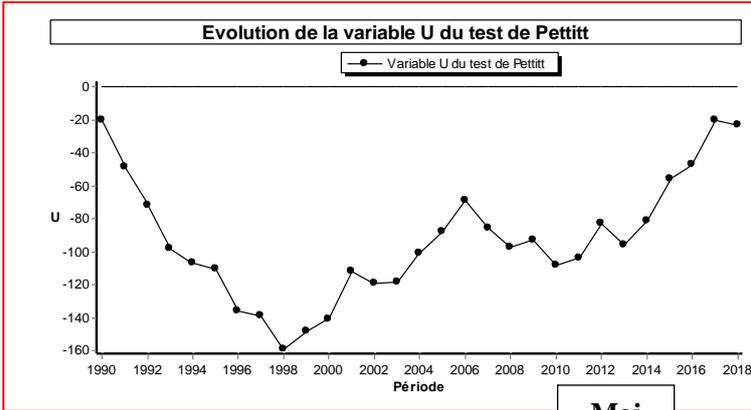
Février



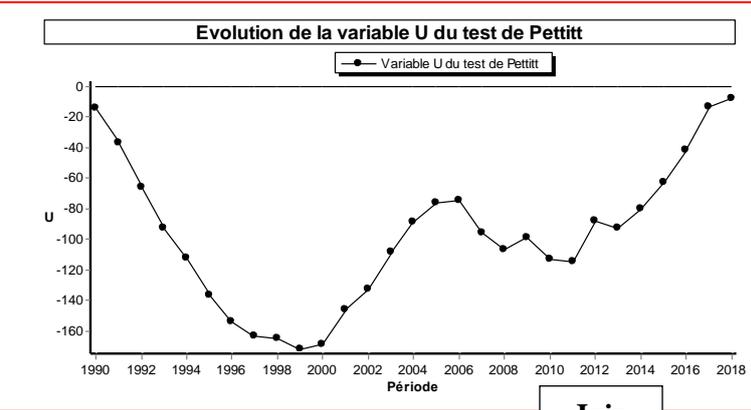
Mars



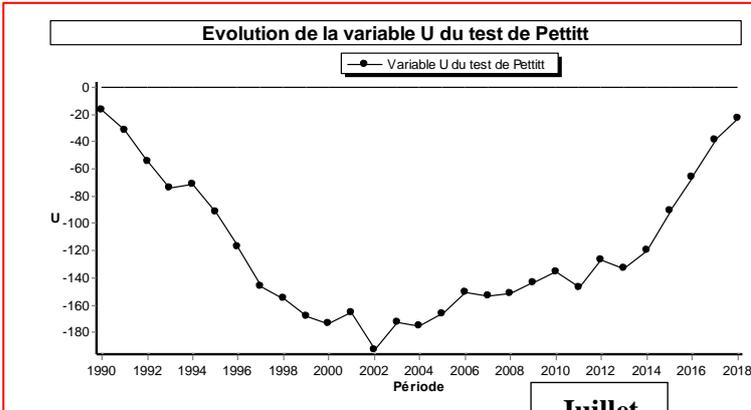
Avril



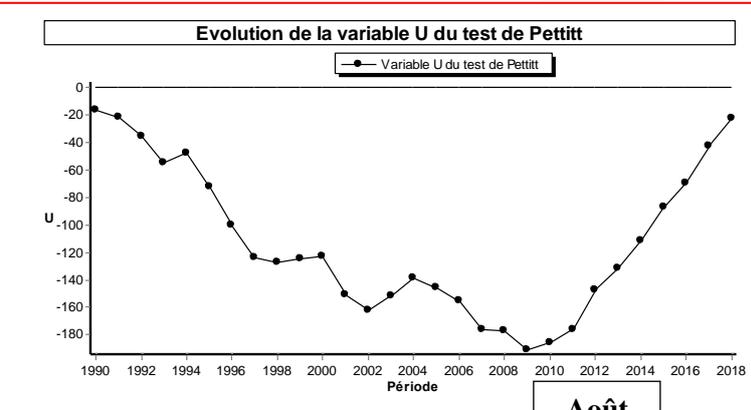
Mai



Juin

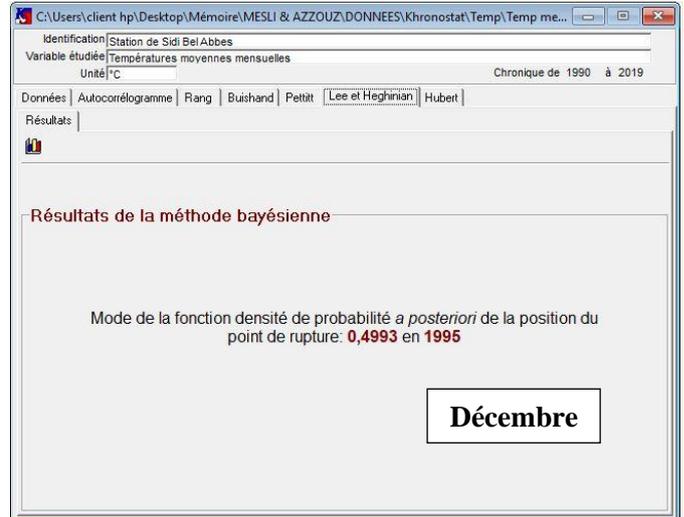
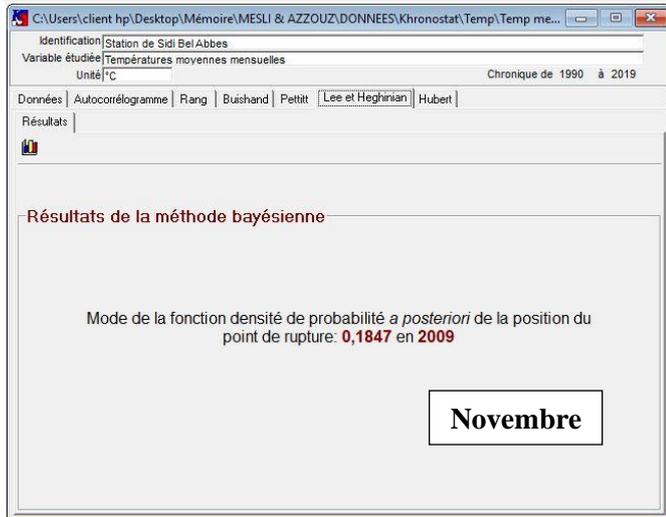
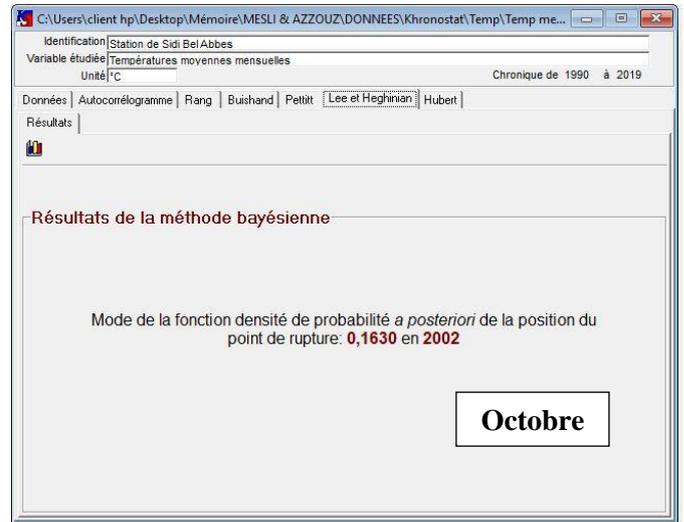
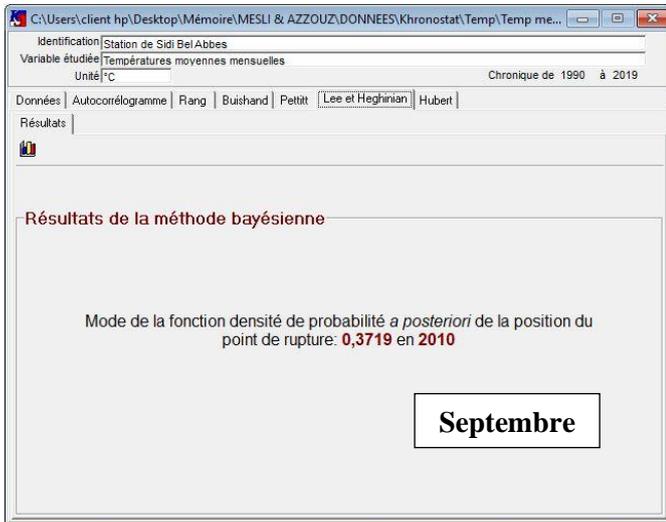


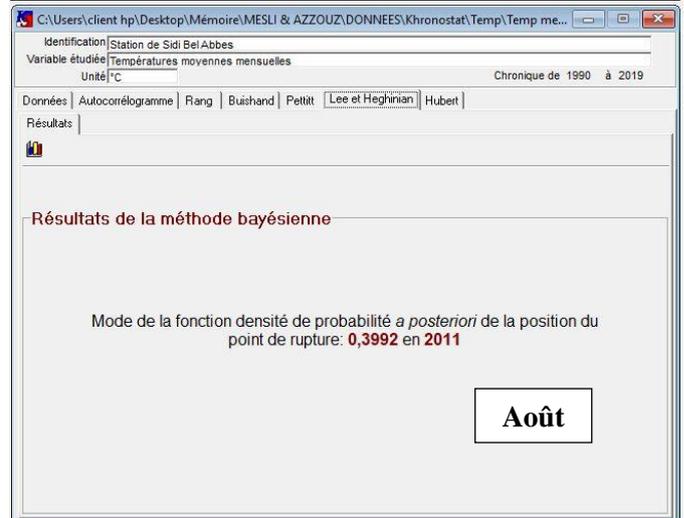
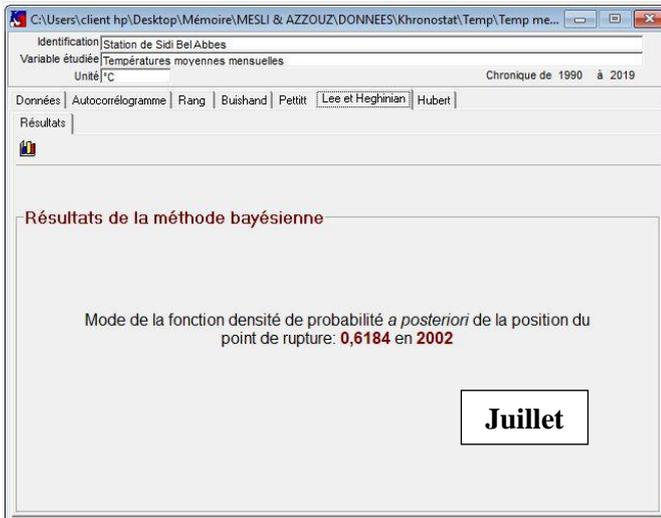
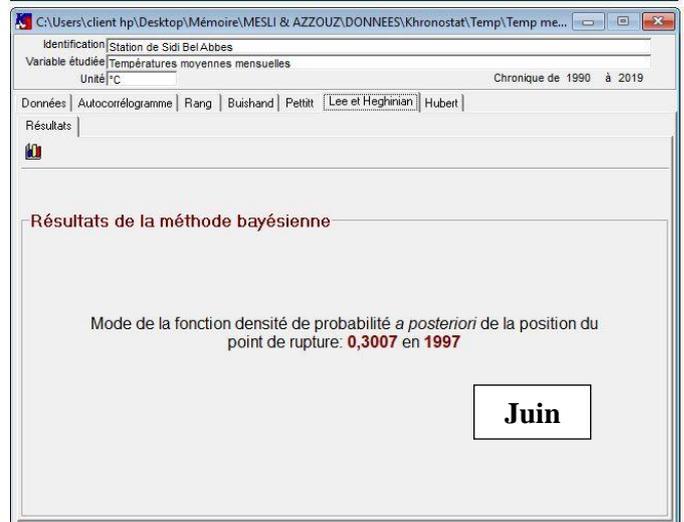
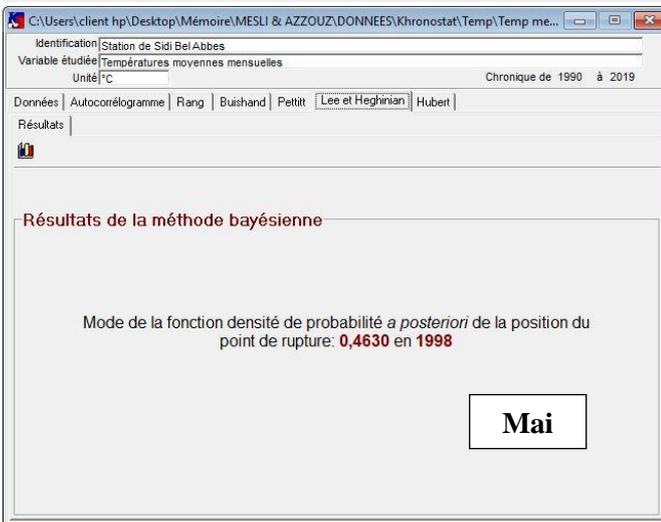
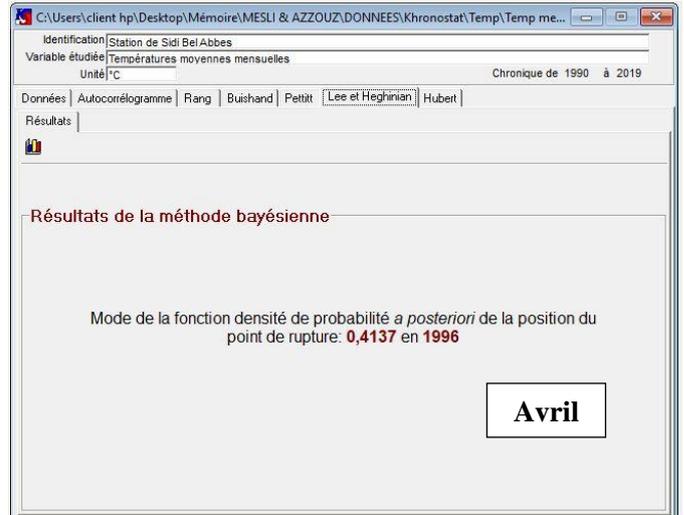
Juillet



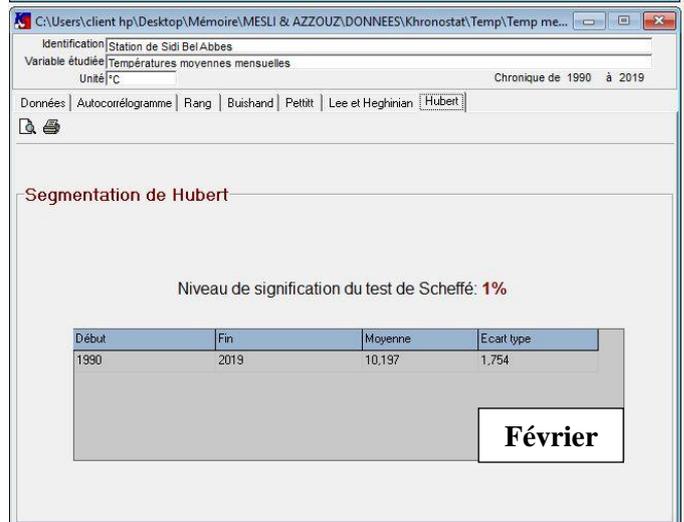
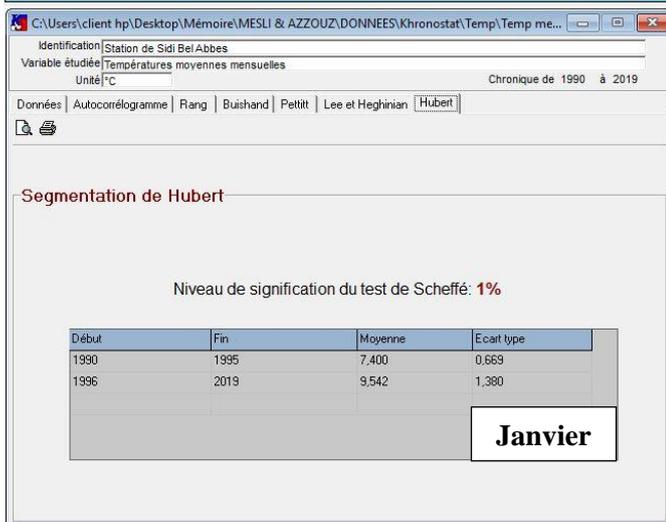
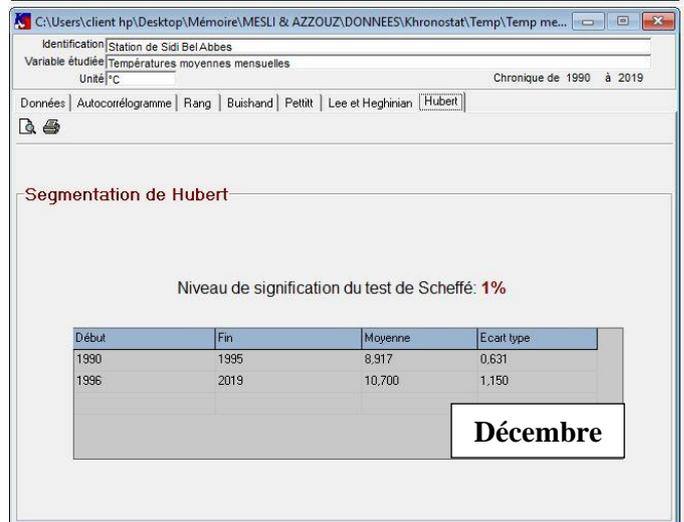
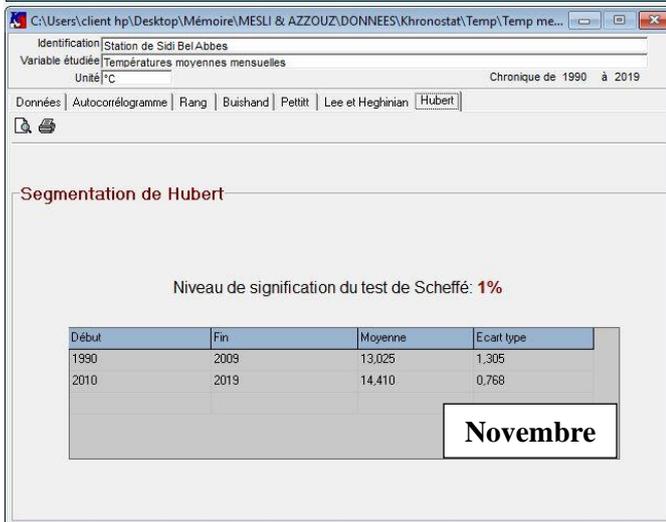
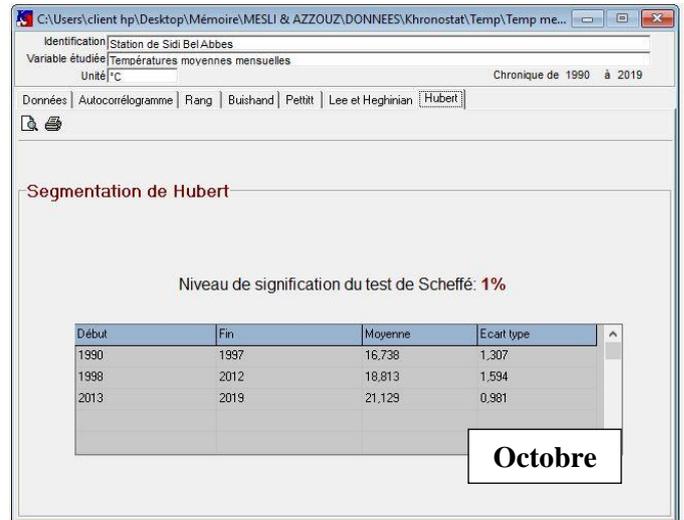
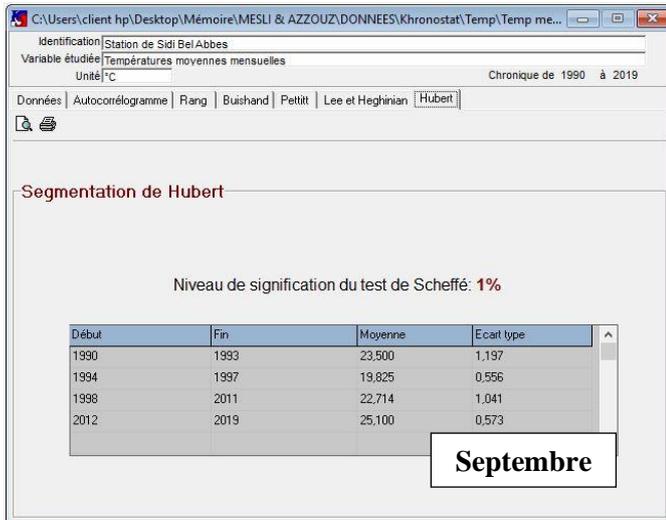
Août

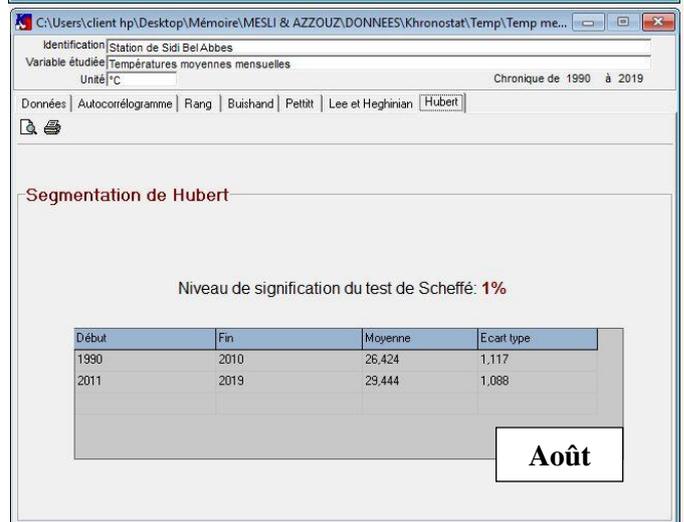
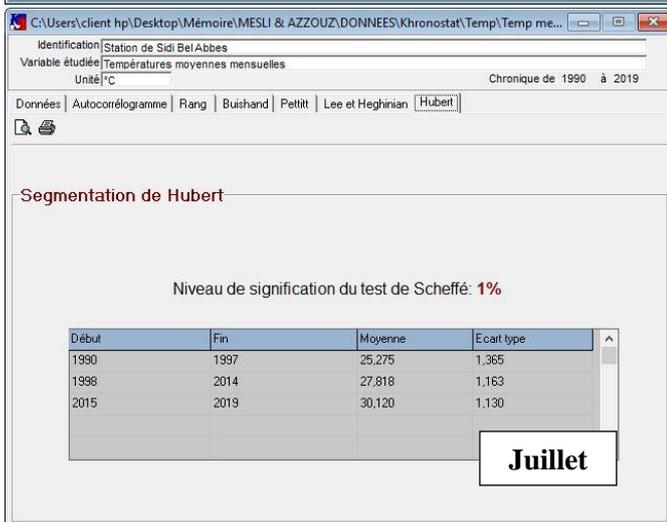
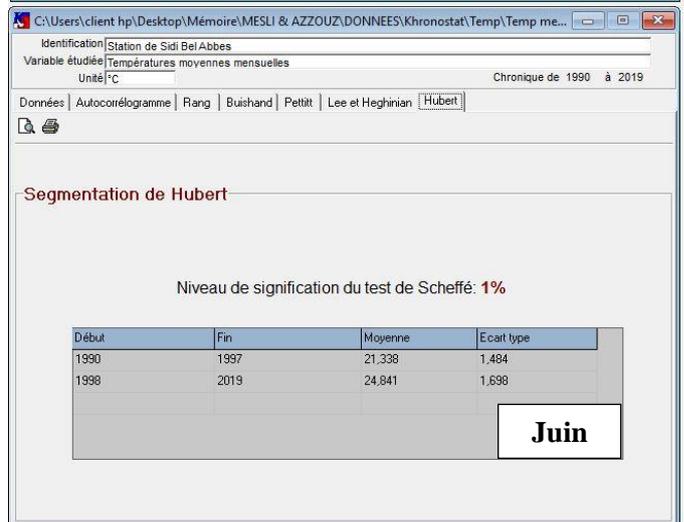
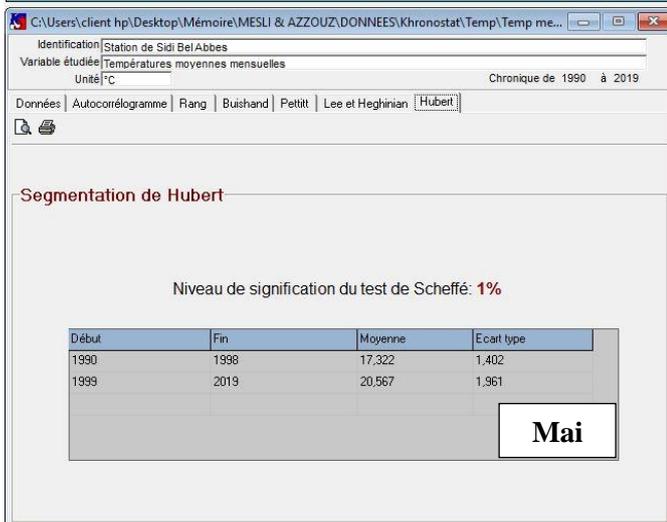
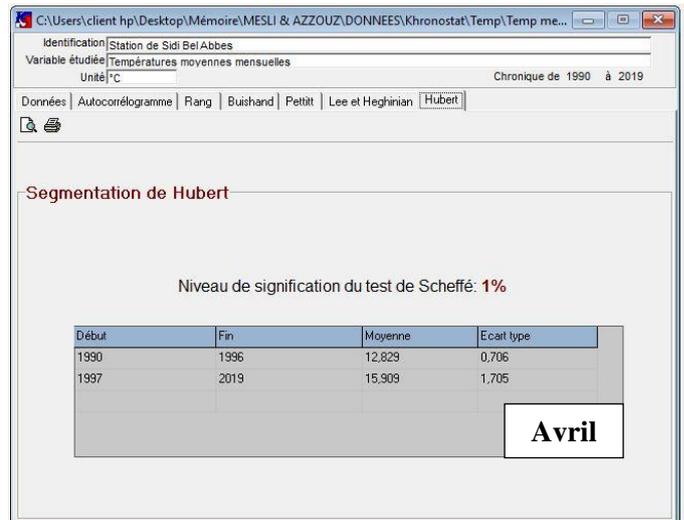
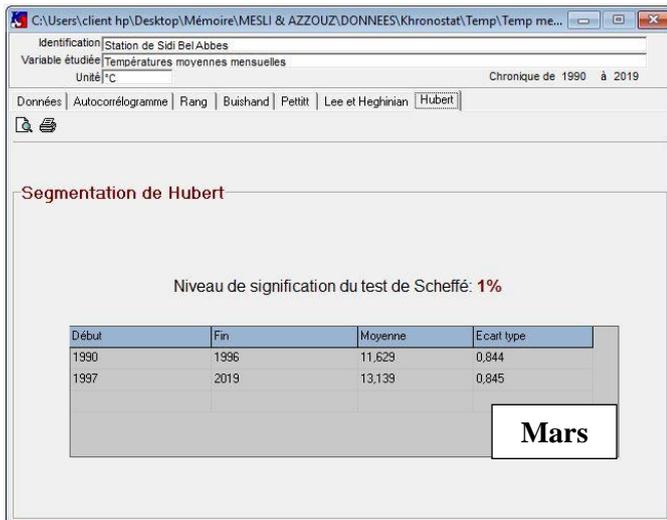
Annexe IV.6 : Résultats de la méthode bayésienne de Lee et Heghinian sur les variations moyennes mensuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbas (1989/1990-2018/2019)



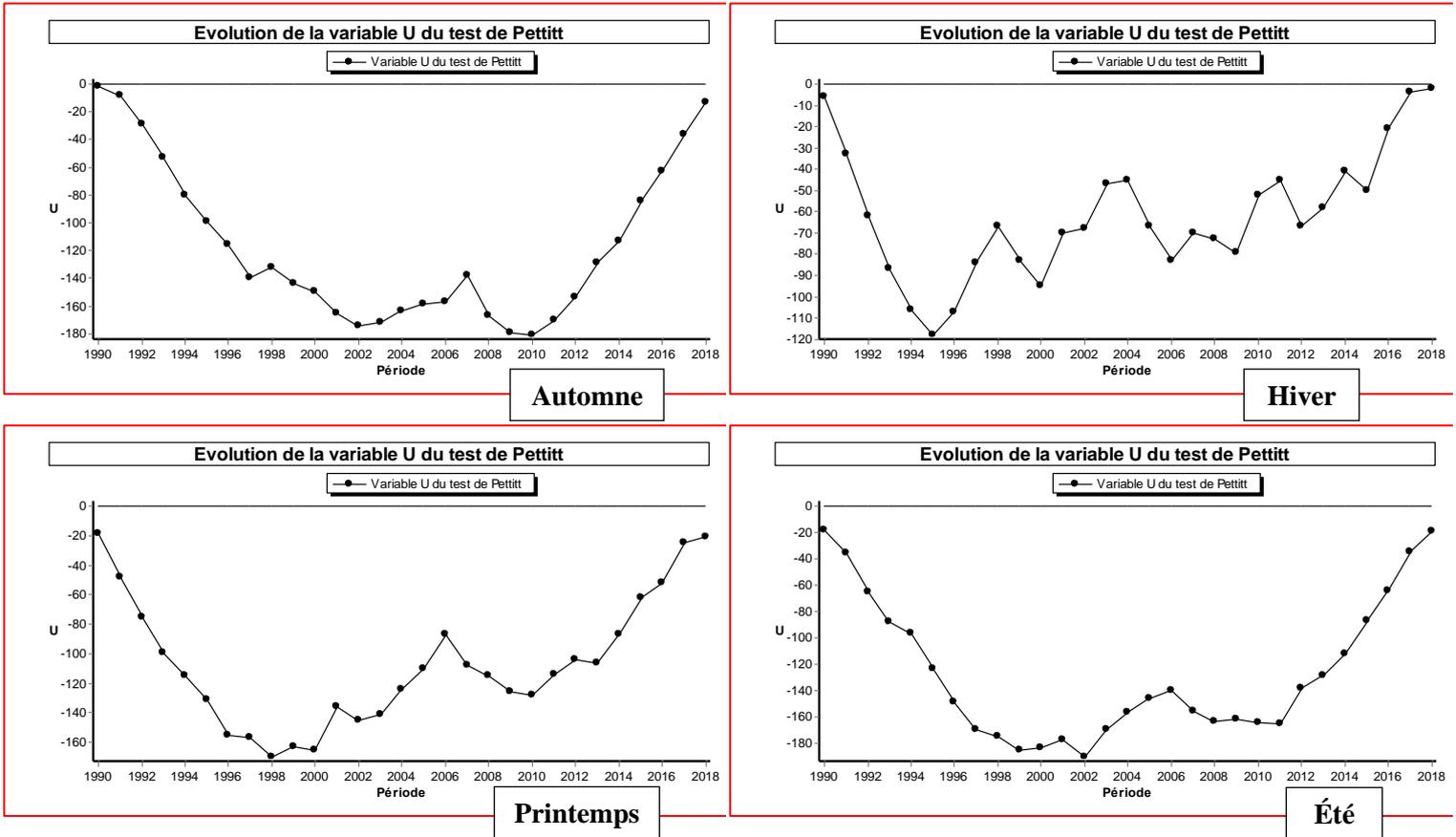


Annexe IV.7 : Segmentation d'Hubert pour les variations moyennes mensuelles des températures de la station de Sidi Bel Abbès (1989/1990-2018/2019)

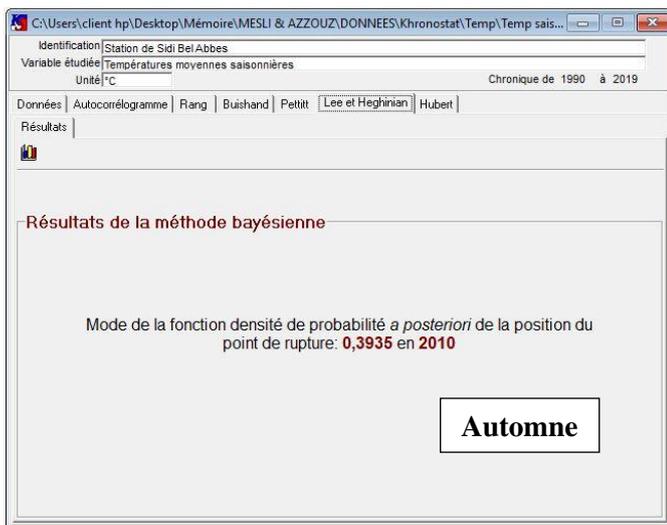


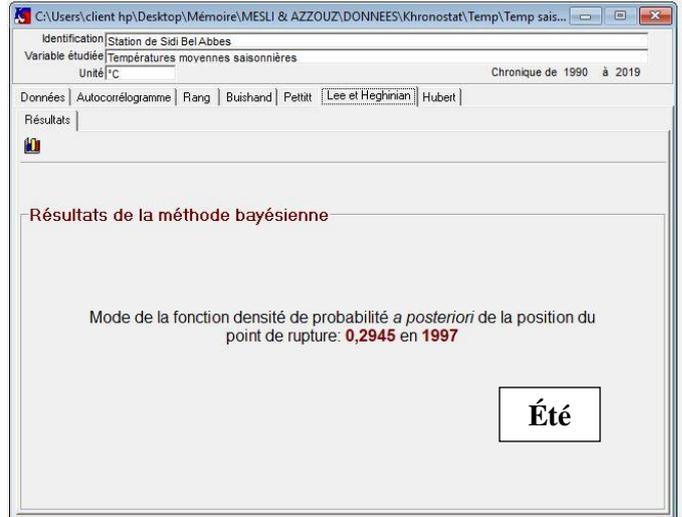
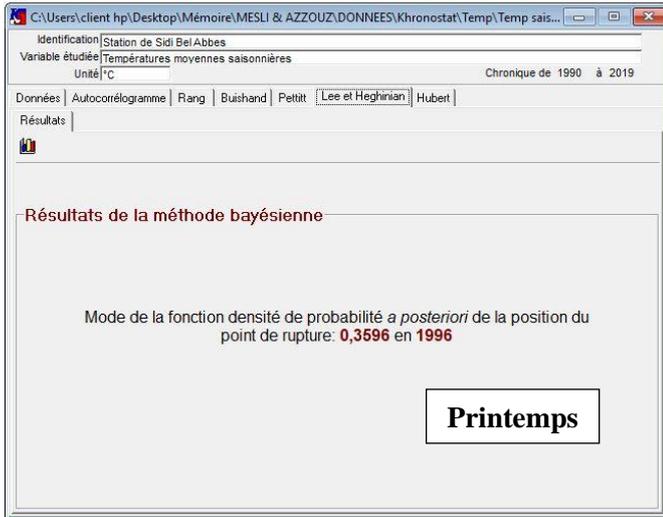


Annexe IV.8 : Évolution de la variable U du test de Pettitt pour les variations moyennes saisonnières des températures de la station de Sidi Bel Abbas (1989/1990-2018/2019)



Annexe IV.9 : Résultats de la méthode bayésienne de Lee et Heghinian sur les variations moyennes saisonnières des températures de la station de Sidi Bel Abbas (1989/1990-2018/2019)





Annexe IV.10 : Segmentation d’Hubert pour les variations moyennes saisonnières des températures de la station de Sidi Bel Abbes (1989/1990-2018/2019)

