

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

Contribution à l'analyse de la sécheresse dans le contexte du changement climatique en utilisant les copules.

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 6-0011-17

APA Citation (APA توثيق):

Bali, Nouria (2017). Contribution à l'analyse de la sécheresse dans le contexte du changement climatique en utilisant les copules[Thèse de master, ENSH].

The digital repository of the Higher National School for Hydraulics "Digital Repository of ENSH" is a platform for valuing the scientific production of the school's teachers and researchers.

Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...) and broadcasting it online.

Digital Repository of ENSH is built on the open DSpace software platform and is managed by the Library of the National Higher School for Hydraulics. <http://dspace.ensh.dz/jspui/>

المستودع الرقمي للمدرسة الوطنية العليا للري هو منصة خاصة بتمكين الإنتاج العلمي لأساتذة و باحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (أطروحات، مطبوعات، مبداعات، مقالات، الدوريات، كتب....) و بثه على الخط.

المستودع الرقمي للمدرسة مبني على المنصة المفتوحة DSpace و يتم إدارته من طرف مديرية المكتبة للمدرسة العليا للري.

كل الحقوق محفوظة للمدرسة الوطنية العليا للري.



Département Hydraulique Urbaine

MEMOIRE DE MASTER

Pour l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique

OPTION : Conception des Systèmes d'Alimentation en Eau Potable

THEME :

**Contribution à l'analyse de la sécheresse dans le contexte du
changement climatique en utilisant les copules**

Présenté par :

M^{elle} : BALI Nouria

DEVANT LES MEMBRES DU JURY

Nom et Prénom	Grade	Qualité
M ^{me} MEDDI Hind	M.C.B	Présidente
M ^r AMMARI Abdelhadi	M.C.B	Examinateur
M ^r BOUFEKANE Abdelmadjid	M.A.A	Examinateur
M ^{me} HOULI Samia	M.A.A	Examinatrice
M ^r ZEROUAL Ayoub	M.C.B	Promoteur

Mars 2017

Remerciements

Avant tout propos, nous remercions « Dieu » le tout puissant qui nous a donné sagesse et santé pour pouvoir réaliser ce travail.

Mon profond remerciement aux membres de jury pour avoir accepté d'examiner ce travail.

C'est avec un grand plaisir que j'exprime ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mon promoteur: Mr ZEROUAL. A. Je lui exprime ma reconnaissance pour ses précieux conseils qui m'ont permis de bénéficier de son expérience et d'acquérir de nombreuses connaissances tout le long de ce travail.

Également mes sincères reconnaissances et remerciements à Mr BOUKHLIFA. M pour sa bonne orientation.

Toute ma reconnaissance est adressée à tous les enseignants et le personnel de l'école nationale supérieure de l'hydraulique qui ont contribué à ma formation.

J'adresse mes remerciements les plus chaleureux à ma famille et ma belle-famille, pour son soutien et son encouragement durant mes études, sans oublier mon fiancé, qui n'a jamais hésité le moindre instant à se tenir à mes côtés afin de me soutenir, m'aider, et m'encourager.

Je remercie également Melle BOUABDELLI Senna et ma belle-sœur Leila pour leur soutien et leur aide précieux.

Enfin, tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, que ce soit par leur amitié, leur conseils ou leurs soutien moral, qui trouveront dans ces quelque lignes l'expression de mes remerciements les plus vifs et les plus sincères.

Dédicaces

A tous ceux qui me sont chers.

Nouria B

ملخص:

يعتبر الجفاف أحد المخاطر الطبيعية الأكثر شيوعاً في الجزائر مع آثاره السلبية على الزراعة والموارد المائية. تهدف هذه الدراسة إلى تحليل مخاطر الجفاف على مستوى حوضين مائيين متواجدين في شمال غرب الجزائر بالتحديد على مستوى مكثا وتفنا، اعتماداً على مؤشرين هما مؤشر هطول الأمطار (SPI) والمؤشر الهيدرومترى (SDI) ثم المقارنة بين خصائص الجفاف المتروولوجي والهيدروولوجي.

يتميز الجفاف بمجموعة من الخصائص هي المدة، الخطورة والشدة. على غرار معظم المشاكل الهيدروولوجية، المتغيرات مثل هذه الخصائص ليست مرتبطة، التناثبات كنموذج متعدد المتغيرات استخدمت مؤخراً في الاقتصاد، كما احتلت في الآونة الأخيرة مكانة كبيرة في الدراسة الهيدروولوجية. في هذا العمل قمنا بدراسة هذه الدالة لتحليل خصائص الجفاف اعتماداً على المؤشر الهيدرومترى حيث سمح لنا تطبيق هذه الدالة الثلاثية والمزدوجة بتقييم فترة عودة الجفاف في منطقة الدراسة. بعد ذلك قمنا بتقييم خصائص الجفاف في ظل تغيير المناخ باستخدام المعطيات المستقبلية المستخرجة من محاكاة النماذج المناخية الإقليمية كرادكس -أفريقيا.

Résumé :

La sécheresse est l'un des risques naturels les plus courants en Algérie avec des effets négatifs sur l'agriculture et les ressources en eau. L'analyse de la sécheresse consiste généralement à caractériser sa sévérité, durée et intensité. Cette étude vise à analyser le risque de sécheresse au Nord-Ouest de l'Algérie, particulièrement sur ses deux grands bassins hydrographiques ; la Tafna et la Macta, en se basant sur deux indices à savoir : l'indice métrologique (SPI) et l'indice hydrométrique (SDI). Les caractéristiques calculées à partir de ces deux indices seront utilisées pour comparer la sécheresse métrologique et la sécheresse hydrologique. Par la suite, les caractéristiques de sécheresse calculées à partir de l'SDI sont adaptées aux copules pour obtenir les périodes de retour, tandis que l'SPI est utilisé pour évaluer dans le futur projeté les caractéristiques de la sécheresse sous changement climatique. Ce dernier a été calculé à partir des sorties du meilleur modèle choisi parmi les huit (08) modèles climatiques régionaux Cordex-Africa sur deux périodes future avec deux scénarios d'émissions du gaz à effet de serre RCP 4.5 et RCP 8.5.

Abstract:

Drought is one of the most common natural hazards in Algeria with negative effects on agriculture and water resources. The drought analysis consists of characterizing its severity, duration and intensity. This study aims to analyze the drought risk in northwestern Algeria, particularly on its two major watershed; the Tafna and Macta, based on two indices: the metrological index (SPI) and the hydrometric index (SDI). The characteristics calculated from these two indices will be used to compare the two types of drought namely: metrological drought and hydrological drought. Subsequently, the drought characteristics calculated from the SDI are adapted to the copulas to obtain the return periods, while the SPI is used to evaluate the characteristics of the drought under climate change in the future projected. The latter was calculated using the output of the best model selected from the eight Cordex-Africa regional

climate models using two future periods (2006-2060 and 2045-2100) with two Representative Concentration Pathway (RCP 4.5 and RCP 8.5) scenarios.

Liste des tableaux

Chapitre I : Recherche bibliographique

Tableau I.1: Les avantages et les inconvénients de l'indice SPI.	7
Tableau I.2 : Les valeurs de l'indice des précipitations (SPI) (Mckee et al.1993).	11
Tableau I.3: Définition des états de sécheresse hydrologique à l'aide de l'indice SDI.	12
Tableau I.4: Modèles climatique régional et nom de l'institution des modèles de la circulation générale (Zeroual, 2010).	25

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

Tableau II.1 : Code et coordonnées des stations pluviométriques.	30
Tableau II.2: stations hydrométrique retenues dans l'étude.	31

Chapitre III : Analyse de la sécheresse hydrologique

Tableau III.1 : Comparaison de l'ajustement des différentes lois sur les données des apports à différentes échelles du temps.	35
Tableau III.2 : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 3 mois pour la station de beni bahdel.	43
Tableau III.3 : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pour la station de beni bahdel.	44
Tableau III.4: Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 12 mois pour la station de beni bahdel.	44
Tableau III.5: Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pour la station de Chouly.	45
Tableau III.6: Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pour la station d'El Haciabia.	45
Tableau III.6(suite): Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pour la station d'El Haciabia.	46
Tableau III.7: Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 12 mois pour la station d'El Haciabia.	46
Tableau III.8: Résultats de l'ajustement des caractéristiques de la sécheresse à l'échelle de 3 mois pour la station de Beni bahdel.	47
Tableau III.9: Résultats de l'ajustement des caractéristiques de la sécheresse à l'échelle de 6 mois pour la station de Beni bahdel.	49
Tableau III.10: Résultats de l'ajustement des caractéristiques de la sécheresse à l'échelle de 12 mois pour la station de Beni bahdel.	50
Tableau III.11: Résultats de l'ajustement des caractéristiques de la sécheresse à l'échelle de 6 mois pour la station de Chouly.	51
Tableau III.12: Résultats de l'ajustement des caractéristiques de la sécheresse à l'échelle de 6 mois pour la station d'El Haciabia.	52
Tableau III.13: Résultats de l'ajustement des caractéristiques de la sécheresse à l'échelle de 12 mois pour la station d'El Haciabia.	53

Liste des tableaux

Tableau III.14: Corrélation des caractéristiques de la sécheresse de la station de Beni bahdel.	53
Tableau III.15: Corrélation des caractéristiques de la sécheresse pour la station de Chouly. ...	55
Tableau III.16: Corrélation des caractéristiques de la sécheresse pour la station d’El Haciabia.	55
Tableau III.17: Estimation des paramètres de la copule tri-variée de Gumbel et t-copule.	56
Tableau III.18: Périodes de retour de chacune des caractéristiques de la sécheresse pour la station de beni bahdel.	57
Tableau III.19: Périodes de retour de chacune des caractéristiques de la sécheresse pour la station de Chouly.	58
Tableau III.20: Périodes de retour de chacune des caractéristiques de la sécheresse pour la station d’El Haciabia	58
Tableau III.21 : Comparaison entre la conjointe période de retour de tri-variée et la période de retour d'une une seule variable en utilisant t-copula pour la station de Chouly	64
Tableau III.22 : Comparaison entre la conjointe période de retour de tri-variée et la période de retour d'une une seule variable en utilisant t-copula pour la station d’El Haciabia	65
Tableau III.23: Comparaison entre la conjointe période de retour tri-variée et la période de retour d'une seule variable en utilisant t-copula pour la station de Beni bahdel.	63

Chapitre IV: Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

Tableau IV.1: Nombre des mois capturés par chaque modèle climatique	85
Tableau IV.2 : Les caractéristiques de la sécheresse à l’échelle 3mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP4.5 pour la station de Beni bahdel.	86
Tableau IV.2 (suite) : Les caractéristiques de la sécheresse à l’échelle 3 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP4.5 pour la station de Beni bahde.....	87
Tableau IV.2 (suite et fin) : Les caractéristiques de la sécheresse à l’échelle 3 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP4.5 pour la station de Beni bahdel.	88
Tableau IV.3 : Les caractéristiques de la sécheresse à l’échelle 6 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP4.5 pour la station de Beni bahdel.	88
Tableau IV.3 (suite et fin) : Les caractéristiques de la sécheresse à l’échelle 6 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP4.5 pour la station de Beni bahdel.	89
Tableau IV .4 : Les caractéristiques de la sécheresse à l’échelle 12 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP4.5 pour la station de Beni bahdel	90
Tableau IV .4 (suite et fin) : Les caractéristiques de la sécheresse à l’échelle 6 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP4.5 pour la station de Beni bahdel.	91
Tableau IV .5 : Les caractéristiques de la sécheresse à l’échelle 6 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP4.5 pour la station de chouly.	91
Tableau IV .5 (suite) : Les caractéristiques de la sécheresse à l’échelle 6 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP4.5 pour la station de chouly.	92
Tableau IV .5 (suite et fin) : Les caractéristiques de la sécheresse à l’échelle 6 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP4.5 pour la station de chouly.	93

Liste des tableaux

Tableau V.6 : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP4.5 pour la station d'El Haciabaa.....	93
Tableau V.6(suite et fin) : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP4.5 pour la station d'El hacaiba.	94
Tableau IV.7: Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 12 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP4.5 pour la station d'El hacaiba.	95
Tableau IV.8 : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 3 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP8.5 pour la station de Beni bahdel.	96
Tableau IV.8 (suite) : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 3 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP8.5 pour la station de Beni bahdel.	97
Tableau IV.8 (suite et fin) : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 3 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP8.5 pour la station de Beni bahdel.	98
Tableau IV.9: Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP8.5 pour la station de Beni bahdel.	98
Tableau IV.9 (suite) : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP8.5 pour la station de beni bahdel.	99
Tableau IV.9 (suite et fin): Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP8.5 pour la station de beni bahdel	100
Tableau IV.10: Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 12 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP8.5 pour la station de Beni bahdel.	100
Tableau IV.10 (suite et fin): Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 12 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP8.5 pour la station de Beni bahdel. ..	101
Tableau IV.11 : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pendant les périodes futures (2006-2060) pour le scénario RCP8.5 pour la station de chouly.	102
Tableau IV.11 (suite et fin) : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pendant les périodes futures (2006-2060) pour le scénario RCP8.5 pour la station de chouly.	103
Tableau IV.12 : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP8.5 pour la station d'El Haciabia.	104
Tableau IV.12 (suite et fin) : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP8.5 pour la station d'El Haciabia	105
Tableau IV.13 : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 12 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP8.5 pour la station d'El Haciabia.	107
Tableau IV.13 (suite et fin) : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 12 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP8.5 pour la station d'El Haciabia...	

Liste des figures

Chapitre I : Recherche bibliographique

Figure I.1: Relation entre les différents types de sécheresse (Source : Centre national de lutte contre la sécheresse, Université de Nebraska-Lincoln, États-Unis d'Amérique).....	5
Figure I.2: Exemple de transformation d'une fonction de répartition de la loi gamma en une distribution normal standardisée.	10
Figure I.3: Caractérisation des événements de sécheresse.	13
Figure I.4 : Teste de k-s.	20
Figure I.5 : Évolution temporelle du forçage radiatif anthropogénique entre 2000 et 2300 pour les scénarios RCP (lignes continues) et comparaison aux scénarios SRES utilisés dans l'AR4 (pointillé). (Tiré de IPCC 2013).....	22

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

Figure II.1 : Présentation des différents bassins étudiés.....	26
Figure II.2 : Bassin de la Tafna.	27
Figure II.3: Bassin de la Macta.	29

Chapitre III : Analyse de la sécheresse hydrologique

Figure III.1: Apport cumulés à différentes échelles et leur fonction de distribution cumulative empirique (ecdf) pour La station de Beni Bahdel.	32
Figure III.2: Apport cumulés à différentes échelles et leur fonction de distribution cumulative empirique (ecdf) pour La station de Chouly.	32
Figure III.3: Apport cumulés à différentes échelles et leur fonction de distribution cumulative empirique (ecdf) pour La station de d'El Haciabia.	32
Figure III.4: A pport cumulés à différentes échelles et leur fonction de distribution cumulative empirique (ecdf) pour station de Sidi bel Abbés.	34
Figure III.5: Comparaison entre ECDF et PDF avec celles de la distribution log-normale à l'échelle de 3 mois pour la station de Beni bahdel.	36
Figure III.6 : Comparaison entre ECDF et PDF avec celles de la distribution log-normale à l'échelle de 6 mois pour la station de Beni bahdel.	37
Figure III.7 : Comparaison entre ECDF et PDF avec celles de la distribution Weibull à l'échelle de 12mois pour la station de Beni bahdel.	37
Figure III.8 : Comparaison entre ECDF et PDF avec celles de la distribution Gamma à l'échelle de 6 mois pour la station de Chouly.	37
Figure III.9: Comparaison entre ECDF et PDF avec celles de la distribution Weibull à l'échelle de 6 mois pour la station de Chouly.	37
Figure III.10 : Comparaison entre ECDF et PDF avec celles de la distribution log-normale à l'échelle de 6 mois pour la station de d'El Haciabia.	38
Figure III.11: Comparaison entre ECDF et PDF avec celles de la distribution log-normale à l'échelle de 12 mois pour la station de d'El Haciabia.	38
Figure III.12 : Variation mensuelle de l'indice SDI à l'échelle de 3 mois pour la période de temps de 1941-2009 pour la station de Beni bahdel.....	39

Liste des figures

Figure III.13 : Variation mensuelle de l'indice SDI à l'échelle de 6 mois pour la période de temps de 1941-2009 pour la station de Beni bahdel.....	39
Figure III.14 : Variation mensuelle de l'indice SDI à l'échelle de 12 mois pour la période de temps de 1941-2009 pour la station de Beni bahdel.....	40
Figure III.15: Variation mensuelle de l'indice SDI à l'échelle de 6 mois pour la période de temps de 1941-2009 pour la station de Chouly.....	40
Figure III.16: Variation mensuelle de l'indice SDI à l'échelle de 6 mois pour la période de temps de 1941-2009 pour la station d'El Haciabia.	41
Figure III.17: Variation mensuelle de l'indice SDI à l'échelle de 12 mois pour la période de temps de 1941-2009 pour la station d'El Haciabia	41
Figure III.18 : la période de retour conjoint TDS (à gauche) et TDS' (à droite) de la durée et la sévérité de la sécheresse en utilisant la copule de Gumbel pour la station de Beni bahdel (Cas 1 : 3 mois).	60
Figure III.19 : la période de retour conjoint TDS (à gauche) et TDS' (à droite) de la durée et la sévérité de la sécheresse en utilisant la copule de Gumbel pour la station de Beni bahdel (Cas 2 : 6 mois).	60
Figure III.20 : la période de retour conjoint TDS (à gauche) et TDS' (à droite) de la durée et la sévérité de la sécheresse en utilisant la copule de Gumbel pour la station de Beni bahdel (Cas 3 : 12 mois).	60
Figure III.21 : la période de retour conjoint TDS (à gauche) et TDS' (à droite) de la durée et la sévérité de la sécheresse en utilisant la copule de Gumbel pour la station de Chouly(Cas 1 : 6 mois).	61
Figure III.22 : la période de retour conjoint TDS (à gauche) et TDS' (à droite) de la durée et la sévérité de la sécheresse en utilisant la copule de Gumbel la station d'El Haciabia (Cas 1 : 6 mois).	62
Figure III.23 : la période de retour conjoint TDS (à gauche) et TDS' (à droite) de la durée et la sévérité de la sécheresse en utilisant la copule de Gumbel pour la station d'El Haciabia (Cas 2 : 12 mois).	62
Figure III.24 : Valeurs mensuelles de l'indice SPI à l'échelle de 3 mois pour la station de Beni bahdel.....	66
Figure III.25 : Valeurs mensuelles de l'indice SPI à l'échelle de 6 mois pour la station de Beni bahdel.....	67
Figure III.26 : valeurs mensuelles de l'indice SPI à l'échelle de 12 mois pour la station de Beni bahdel.	67
Figure III.27 : valeurs mensuelles de l'indice SPI à l'échelle de 6 mois pour la station de Chouly.....	68
Figure III.28 : valeurs mensuelles de l'indice SPI à l'échelle de 6 mois pour la station d'El Haciabia.	68
Figure III.29: valeurs mensuelles de l'indice SPI à l'échelle de 12 mois pour la pour la station d'El Haciabia.....	69
Figure III.30 : Comparaison entre les caractéristiques de la sécheresse métrologique et la sécheresse hydrologique à l'échelle de 3 ,6 et 12 mois pour la station de Beni bahdel.	70

Liste des figures

Figure III.31 : Comparaison entre les caractéristiques de la sécheresse météorologique et la sécheresse hydrologique à l'échelle de 6 mois pour la station de Chouly et à l'échelle de 6, 12 mois pour la station d'El Haciabia.70

Chapitre IV: Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

Figure IV.1 : Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de Beni bahdel (rouge) et les simulations brutes des modèles CanESM2 (bleu).....73

Figure IV.2 : Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de Beni bahdel et les simulations brutes des modèles - CNRM-CM5 (bleu)74

Figure IV .3: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de Beni bahdel (rouge) et les simulations brutes des - CSIRO-Mk3 (bleu).....74

Figure IV .4: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de Beni bahdel (rouge) et les simulations brutes des modèles MIROC5 (bleu).74

Figure IV .5 :Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de Beni bahdel (rouge) et les simulations brutes des modèles HadGEM2-ES (bleu).75

Figure IV .6 : Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de Beni bahdel (rouge) et les simulations brutes des modèles MPI-ESM-LR (bleu).....75

Figure IV .7: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de Beni bahdel (rouge) et les simulations brutes des modèles NorESM1-M (bleu).75

Figure IV .8: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de Beni bahdel (rouge) et les simulations brutes des modèles GFDL-GFDL (bleu).....76

Figure IV .9: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de Chouly et les simulations brutes des modèles - CanESM2 (bleu).....77

Figure IV .10: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de Chouly et les simulations brutes des modèles CNRM-CM5 (bleu).....77

Figure IV .11: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de Chouly (rouge) et les simulations brutes des modèles CSIRO-Mk3 (bleu).78

Figure IV .12: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de Chouly (rouge) et les simulations brutes des modèles MIROC5 (bleu).78

Liste des figures

Figure IV .13 : Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de de Chouly (rouge) et les simulations brutes des modèles HadGEM2-ES (bleu).	79
Figure IV .14: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de de Chouly (rouge) et les simulations brutes des modèles MPI-ESM (bleu).	79
Figure IV .15: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de de Chouly (rouge) et les simulations brutes des NorESM1-M (bleu).	80
Figure IV .16: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de de Chouly (rouge) et les simulations brutes des modèles GFDL-ESM2M (bleu).	80
Figure IV .17: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station d'El Haciabia et les simulations brutes des modèles CanESM2 (bleu).	81
Figure IV .18: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station d'El Haciabia et les simulations brutes des modèles CNRM-CM5 (bleu).	81
Figure IV .19: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station d'El Haciabia et les simulations brutes des modèles CSIRO-Mk3 (bleu).	82
Figure IV .20: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station d'El Haciabia et les simulations brutes des modèles MIROC5 (bleu).	82
Figure IV .21: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station d'El Haciabia et les simulations brutes des modèles HadGEM2-ES (bleu).	83
Figure IV .22: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station d'El Haciabia et les simulations brutes des modèles MPI-ESM-LR (bleu).	83
Figure IV .23: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station d'EL hacaiba et les simulations brutes des modèles NorESM1-M (bleu).	84
Figure IV .24: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station d'El Haciabia et les simulations brutes des modèles GFDL-ESM2M (bleu).	84
Figure IV .25 :Les caractéristiques de la sécheresse dans les bassins de Beni Bahdel, Chouly et d'El Haciabia à l'échelle de 3 , 6 et 12 mois pendant la période 2006-2060 avec le scenario RCP4.5 (RCA4 (CanESM2)).	110
Figure IV .26 : Les caractéristiques de la sécheresse dans les bassins de Beni bahdel, Chouly et d'El Haciabia à l'échelle de 3 ,6 et 12 mois pendant la période 2045-2100 avec le scenario RCP4.5 (RCA4 (CanESM2)).	111

Liste des figures

Figure IV.27 : Les caractéristiques de la sécheresse dans les bassins de Beni bahdel, Chouly et d'El Haciabia à l'échelle de 3 ,6 et 12 mois pendant la période 2006-2060 avec le scenario RCP8.5 (RCA4 (CanESM2)	112
Figure IV.28. Les caractéristiques de la sécheresse dans les bassins de Beni bahdel, Chouly et d'El Haciabia à l'échelle de 3 ,6 et 12 mois pendant la période 2045-2100 avec le scenario RCP8.5 (RCA4 (CanESM2).	113

Liste des abréviations

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

CORDEX: Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment.

CQCJ : Comité des questions constitutionnelles et juridiques.

CMIP5: Coupled Model Intercomparison Project Phase 5.

ECDF : Empirical cumulative distribution function.

EDD : empirique downscaling statistique.

ETP : Evapotranspiration potentielle.

GIEC : groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

GCM : Modèle climatique globale.

MRC : Modèle Climatique régionale.

PDF : probability distribution function.

PMRC : Programme mondial de recherche sur le climat.

RCA4: Rossby Centre Atmospheric.

RCP: Representative Concentration Pathways.

RCD: régional downscaling climatique.

SMHI :(Swedish Meteorological and Hydrological Institute).

SRES: Special Report on Emissions Scenarios.

Introduction générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I : Recherche bibliographique

I.1. La sécheresse	3
I.1.1 Définition de la sécheresse	3
I.1.2. La relation entre les différents types de la sécheresse	4
I.1.3. Les indices de la sécheresse	5
I.1.3.1. Indice de précipitation normalisé	6
I.1.3.1.1.Méthode de calcul.....	8
I.1.3.2.Indices Hydrométriques (Streamflow Drought Index (SDI))	11
I.1.3.2.1.Méthode de calcul.....	11
I.1.4.Caractérisation de la sécheresse.....	12
I.2. les copules.....	13
I.2.1. Définitions	13
I.2.2.Les familles de copule.....	14
I.2.2.1. La copule de Gumbel.....	14
I.2.2.2. Copule de Student.....	15
I.2.3. Mesures de dépendance.....	16
I.2.3.1.Coefficient de corrélation de Kendall.....	16
I.2.3.2.Le coefficient de corrélation de Pearson	16
I.2.4. Estimation paramétrique	16
I.2.4.1.La méthode des moments	16
I.2.4.2.Méthode du maximum de vraisemblance (MLE)	17
I.2.4.3.Inférence sur les marginales (IFM)	18
I.2.5. Test de validité de l'ajustement.....	19
I.2.5.1.Principe de test de Kolmogorov-Smirnov	20
I.3. Les modèles climatiques.....	20
I.3.1.Les modèles et scénarios utilisés dans la 5 ^{ème} évaluation du changement climatique..	21
I.3.2.Les changements observés dans le climat dans les derniers siècles confirmés par le 5 ^{ème} rapport.....	22
I.3.3.Modèle climatique	23
I.3.3.1.Définition	23
I.3.3.2.Modèle climatique globale (GCM)	23
I.3.3.3.Modèle Climatique régionale (MRC).....	24

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

II.1. Présentation de la zone d'étude	26
II.1. 1. La Tafna	27
II.1.1. Bassin versant de la Macta.....	28
II.2. Choix de l'air d'étude.....	29
II.3. Choix des stations	29
II.4. Données pluviométriques et hydrométriques	30

Chapitre III : Analyse de la sécheresse hydrologique

III.1 Analyse de sécheresse hydrologique par application de copule	32
III.1.1. Calcul de l'indice hydrométrique 'SDI'	32
III.1.2. Calculs des caractéristiques de la sécheresse hydrologique	42
III.1.3 Ajustement des caractéristiques de la sécheresse hydrologique	47
III.1.3. Application de la copule bi-varie tri-variee sur les caractéristiques de la sécheresse	54
III.1.4. Périodes de retour.....	56
III.1.4. 1. Période de retour uni variable.....	57
III.1.4. 2. Période de retour multi variable	59
III.2. Comparaison entre les caractéristiques de la sécheresse métrologique et la sécheresse hydrologique	66
III.2.1 Calcul de l'indice de précipitation normalisé SPI.....	66

Chapitre IV: Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

VI.1. Méthodologie	72
VI.2. Comparaison entre l'évolution des précipitations mensuelles observées et simulées pendant la période 1951-2005.....	72
VI.3. Résultat	88
VI.3.1 Evolution des caractéristiques de la sécheresse pendant les périodes 2006-2060 et 2045-2100.....	Erreur ! Signet non défini. 85
Conclusion générale.....	114

L'impact des changements climatiques sur les ressources en eau a fait l'objet de nombreux travaux à travers le monde pour pouvoir mettre en place des scénarios de gestion de ces ressources.

Cet impact est illustré par les événements de sécheresse de plus en plus marquée et dont le nombre ne cesse d'augmenter, ce qui semble particulièrement sévère durant les deux à trois dernières décennies sur le Sahel et l'Afrique du Sud (Dai et al. 1998). Au cours des 50 dernières années, 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 été prouvé dans les études antérieures (Safi H., 1990, Agoumi A. & al. 1999, Meddi H., Meddi M., 2009 etc.). Le Maroc a été, marqué par les sécheresses des années 1940, ainsi que la Tunisie. 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. Durant ces 30 dernières années, ces pays ont subi de plein fouet ce phénomène qui s'est manifesté par un déficit pluviométrique sur l'ensemble de la région.

La région Nord-Ouest de l'Algérie en particulier, a souffert de cette péjoration pluviométrique récurrente et persistante, aux conséquences souvent dramatiques sur les conditions de vie de la population, notamment rurale. Ces impacts négatifs sur, le régime d'écoulement des oueds, l'alimentation de la nappe phréatique et le niveau de remplissage des barrages ont constitué un des principaux aspects.

L'objectif principal de ce travail est d'analyser le risque de la sécheresse dans le contexte du changement climatique dans deux bassins versants du Nord-Ouest de l'Algérie afin de suivre son évolution et de saisir son incidence sur les ressources en eau. Nous essayerons de caractériser la sécheresse, de la quantifier et enfin d'étudier sa variation temporelle.

Dans ce contexte, notre travail vise à :

Faire une étude bibliographique selon trois axes principaux ; la première étape comprend la définition, les types et les caractéristiques de la sécheresse aussi les indices de suivi de ce phénomène utilisés dans cette étude, la seconde entame les fonctions copules, et en dernier une discussion détaillée sur les modèles climatiques.

Après la présentation de la zone d'étude, les sécheresses hydrologiques ont été identifiées en utilisant l'indice de sécheresse SDI. Les caractéristiques de ce dernier seront tirées et adaptées aux copules pour obtenir les périodes de retour de sévérité-durée-intensité.

Introduction générale

Nous adopterons après l'indice SPI afin d'identifier la relation sécheresse météorologique, sécheresse hydrologique dans les bassins versant en question.

Nous évaluerons en dernier dans le futur projeté les caractéristiques de la sécheresse sous changement climatique à l'aide de l'indice SPI. Nous allons pouvoir calculer ce dernier à partir du meilleur modèle choisit parmi les huit (08) modèles climatiques régionaux.

Chapitre I : Recherche bibliographique

Le présent chapitre s'articule autour de trois axes :

- **Première partie** : une recherche bibliographique comprenant la définition, les types et les caractéristiques de la sécheresse aussi les indices du suivi de ce phénomène utilisés dans cette étude ;
- **Deuxième partie** : une discussion détaillée sur les fonctions copules utilisés dans notre étude ;
- **Troisième partie** : Dans cette section, il s'agira des modèles climatiques.

I.1. La sécheresse

I.1.1 Définition de la sécheresse

Il n'existe toujours pas à l'heure actuelle de définition précise et reconnue par tous concernant la sécheresse. Toutefois, la communauté scientifique, et notamment l'American Meteorological Society, s'accorde sur le fait qu'une sécheresse est caractérisée par une absence prolongée ou un déficit marqué en eau par rapport à la normale (Boken, 2005 ; Heim, 2002 ; Palmer, 1965). Dans la littérature, la distinction est souvent faite selon le point de vue envisagé. Si seul le déficit de précipitations est considéré, on parle de sécheresse météorologique (Boken, 2005 ; Keyantash & Dracup, 2002). Il serait plus rigoureux de qualifier ce type de sécheresse de climatique puisque résultant de la persistance de conditions météorologiques sèches, à l'échelle du mois ou de l'année. Si une attention particulière est portée à l'eau disponible dans le sol pour les végétaux, on parle de sécheresse agricole (Boken, 2005 ; Keyantash & Dracup 2002). Tandis que lorsque l'accent est mis sur le déficit du stock en eau de surface ou de sub surface (cours d'eau, réservoirs, nappes, etc.), on parle de sécheresse hydrologique (Boken, 2005 ; Keyantash & Dracup, 2002). Par contre la Sécheresse socio-économique , diffère fortement des autres types de sécheresse du fait qu'elle reflète la relation entre l'offre et la demande de certaines denrées ou de certains biens économiques (eau, fourrage pour le bétail, énergie hydroélectrique, etc.) qui sont tributaires des précipitations. L'offre varie annuellement en fonction des précipitations ou de l'eau disponible ; la demande varie également et est souvent associée à une évolution positive due, par exemple, à une augmentation de la population, au développement ou à d'autres facteurs.

I.1.2. La relation entre les différents types de la sécheresse

Les relations réciproques entre ces différents types de sécheresse sont illustrées à la figure I.1. 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. Il faut souvent plusieurs semaines avant que l’insuffisance des précipitations se traduise par un déficit d’humidité du sol et que les cultures, les pâturages et les parcours commencent d’en pâtir. La persistance d’un temps sec pendant plusieurs mois entraîne une diminution de débit des cours d’eau, une baisse de niveau des réservoirs et des lacs et, éventuellement, un abaissement de la nappe phréatique. 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. Comme on le voit à la figure I.1, il est assez difficile d’établir un lien direct entre les principaux types de sécheresse et l’insuffisance des précipitations, du fait que l’alimentation en eau assurée par les systèmes d’approvisionnement superficiels et souterrains est influencée par la façon dont ces systèmes sont gérés.

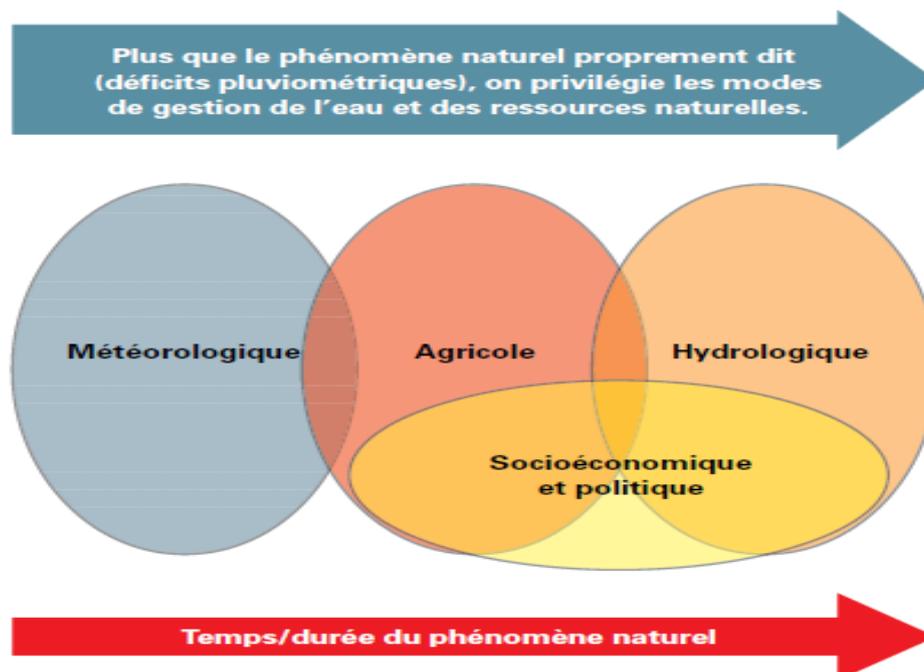


Figure I.1: Relation entre les différents types de sécheresse (Source: Centre national de lutte contre la sécheresse, Université de Nebraska-Lincoln, États-Unis d'Amérique).

Dans la suite de ce travail, nous nous sommes limités à l'analyse de la sécheresse météorologique et hydrologique, moins complexe et plus proche des préoccupations du géographe - climatologue.

I.1.3. Les indices de la sécheresse

À l'origine, un indice climatique est une combinaison d'au moins deux variables décrivant l'état de l'atmosphère pour caractériser le climat d'un lieu (Beltrando, 1995). Les variables les plus utilisées sont les précipitations, la température, le débit, la pression atmosphérique et l'évapotranspiration. Progressivement, les indices ont incorporé des informations de plus en plus nombreuses et complexes, résultant de traitements antérieurs et provenant même parfois de disciplines connexes. Aujourd'hui, les indices climatiques sont utilisés dans de multiples domaines différents, dont la sécheresse.

Ces indices assurent le suivi de la sécheresse et la détection à différents stades de son évolution. Ils constituent également un excellent moyen de communication avec le public et un outil de décision pour le gouvernement. La plupart de ces indices ont été proposés par les chercheurs pour quantifier la sévérité de la sécheresse qui sont liés à des variables hydro-météorologiques.

Parmi les indices de sécheresse les plus populaires on a :

- ✓ L'indice Palmer (Palmer, 1965) ;
- ✓ L'indice de l'approvisionnement en eau de surface (Shafer et Dezman, 1982) ;
- ✓ l'indice standardisé de précipitation (McKee et al. 1993) ;
- ✓ L'indice de sécheresse effective (Byun et Wilhite, 1999) ;
- ✓ L'indice de sécheresse des débits (Nalbantis et Tsakiris, 2009) ;
- ✓ L'indice hydrologique normalisé (Sharma et Panu, 2010) ;
- ✓ L'indice normalisé de l'évapotranspiration maximale (Vicente-Serrano et al. 2010) ;
- ✓ L'indice régional de la zone de sécheresse (Fleig et al. 2011) ;
- ✓ L'indice agricole de référence de la sécheresse (Woli et al. 2012).

Chaque indice a ses propres forces et faiblesses. Mishra et Singh (2010) ont fait un examen exhaustif des différents indices de sécheresse résumant leur utilité et les limites. Par ailleurs, une bonne critique sur les indices de sécheresse base de télédétection est donnée par Bayarjargal et al. (2006) et Niemeier (2008).

Dans notre étude nous avons décidé de concentrer nos efforts uniquement sur l'application du SPI et SDI. En effet, ces derniers présentent de très nombreux avantages par rapport à ces concurrents, principalement une bien meilleure flexibilité, des calculs sensiblement plus simples, et des résultats aisément comparables dans l'espace et dans le temps. De surcroît, ils sont plus transparents et conservent mieux la dimensionnalité des données (Keyantash & Dracup, 2002). D'ailleurs, selon Keyantash et Dracup (2002), le SPI est actuellement l'outil le plus efficace pour l'analyse de la sécheresse météorologique. Ce choix se justifie aussi par l'accessibilité aux données.

I.1.3.1. Indice de précipitation normalisé

Le SPI, quant à lui, est un indice statistique de type probabiliste. Il a été mis au point par l'université du Colorado au début des années 90 (McKee, 1993). Hayes et ses collaborateurs (1999) ont répertorié un certain nombre d'avantages et inconvénients en faveur de l'utilisation SPI, qui sont :

Chapitre I : Recherche bibliographique

Tableau I.1: Les avantages et les inconvénients de l'indice SPI.

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- Sa grande simplicité. En effet, il n'est basé que sur les précipitations, les calculs sont rapides et intuitifs ;- Le SPI est versatile : on peut aisément adapter l'échelle temporelle en fonction du type d'évaluation ;- Les résultats sont cohérents dans l'espace en raison des caractéristiques de la loi normale sur laquelle il est basé. Ainsi, une sécheresse extrême à la même probabilité d'occurrence sous nos latitudes que dans les régions arides ou semi-arides ;- Il est efficace tant l'hiver que l'été, et n'est pas affecté par l'effet de la topographie puisqu'il ne prend pas en compte l'eau dans le sol.	<ul style="list-style-type: none">- 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).- Un autre point délicat concerne la calibration. En effet, il faut disposer d'une série suffisamment longue et de qualité pour réaliser l'ajustement de la distribution et calibrer ainsi le SPI. McKee et ses collaborateurs (1993), tout comme Guttman (1999), recommandent de disposer d'au moins 30 ans de données de qualité (de préférence, sur 50 à 60 ans), voire plus.- Le choix de la distribution utilisée pour modéliser les données est fondamental. À cet effet, la distribution gamma est globalement acceptée car elle s'ajuste généralement bien aux données de précipitations. Cela n'est cependant pas toujours le cas au niveau des régions arides et semi-arides (Ntale & Gan, 2003).

I.1.3.1.1.Méthode de calcul

Le SPI est obtenu en ajustant une densité de probabilité appropriée à la distribution de fréquences des précipitations moyennées sur une échelle temporelle définie. Traditionnellement, les échelles temporelles les plus souvent utilisées sont 3, 6, 9, 12 et 24 mois en fonction du type de sécheresse étudié. L'ajustement se fait séparément pour les 12 mois de l'année afin de conserver la saisonnalité. Ensuite, chaque densité de probabilité cumulée est transformée en une distribution normale standardisée en appliquant la loi normale inverse de moyenne nulle et d'écart-type unitaire.

En d'autres mots, le SPI pour un total de précipitations de x mm est le quantile gaussien (Q_σ) de la valeur de la fonction de répartition de la loi statistique (F) s'ajustant aux données, prise en x [équations (I.1)].

$$SPI = [Q_\sigma F(x)] \dots\dots\dots(I.1)$$

Enfin, chaque valeur du SPI est reliée à un degré de sévérité repris dans le tableau I.2. Thom (1958) a constaté que la fonction de densité de probabilité de gamma de deux paramètres correspond mieux à la série chronologique de précipitation. La distribution de gamma est définie par sa fonction de densité de probabilité ou de fréquence :

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \text{ Pour } x > 0 \dots\dots\dots(I.2)$$

Où α est un facteur de forme, β est un facteur d'échelle et x est la quantité de précipitation.

$\Gamma(\alpha)$ est la fonction de gamma qui se définit comme :

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy \dots\dots\dots(I.3)$$

L'ajustement de la distribution gamma aux données requiert donc de déterminer α et β . Ils peuvent être estimés de la sorte (Thom, 1958)

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \dots\dots\dots(I.4)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}} \dots\dots\dots(I.5)$$

Chapitre I : Recherche bibliographique

Où, pour n observations :

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \dots\dots\dots (I.6)$$

En intégrant la fonction densité de probabilité sur x , en injectant les valeurs de α et β estimées respectivement dans les équations (I.4) et (I.5), on obtient une expression de la probabilité cumulée $G(x)$ qui détermine la probabilité d'observer telle quantité de précipitations ou une quantité inférieure pour un mois et une échelle temporelle donnés :

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\hat{\beta}^{\hat{\alpha}} \Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x x^{\hat{\alpha}-1} e^{-x/\hat{\beta}} dx \dots\dots\dots (I.7)$$

Laissant le $t = x/\hat{\beta}$, cette équation devient la fonction gamma inachevée :

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x t^{\hat{\alpha}-1} e^{-t} dt \dots\dots\dots (I.8)$$

La distribution gamma n'étant pas définie pour $x = 0$, et le cas où le total des précipitations est nul sur l'échelle temporelle définie pouvant se produire, la probabilité cumulée devient :

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \dots\dots\dots (I.9)$$

Où,

$q = P(x = 0) > 0$ Est la probabilité d'obtenir des précipitations nulles.

$H(x)$ Est ensuite transformée en une distribution normale standardisée qui correspond à la valeur du SPI.

Cette transformation est illustrée à la figure I.2. Cette conversion peut être approximée en utilisant la formule suivante élaborée par Abramowitz (1965) :

$$Z = \text{SPI} = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 - d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \text{ for } 0 < H(x) \leq 0.5 \dots\dots\dots (I.10)$$

Chapitre I : Recherche bibliographique

$$Z = \text{SPI} = + \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 - d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \text{ for } 0.5 < H(x) \leq 1.0 \dots \text{(I.11)}$$

Où:

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)} \text{ For } 0 < H(x) \leq 0.5 \dots \text{(I.12)}$$

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-H(x))^2}\right)} \text{ For } 0.5 < H(x) \leq 1.0 \dots \text{(I.13)}$$

Et:

$c_0 = 2.515517, c_1 = 0.802853, c_2 = 0.010328, d_1 = 1.432788, d_2 = 0.189269, d_3 = 0.001308$ (Mishra and Desai 2005).

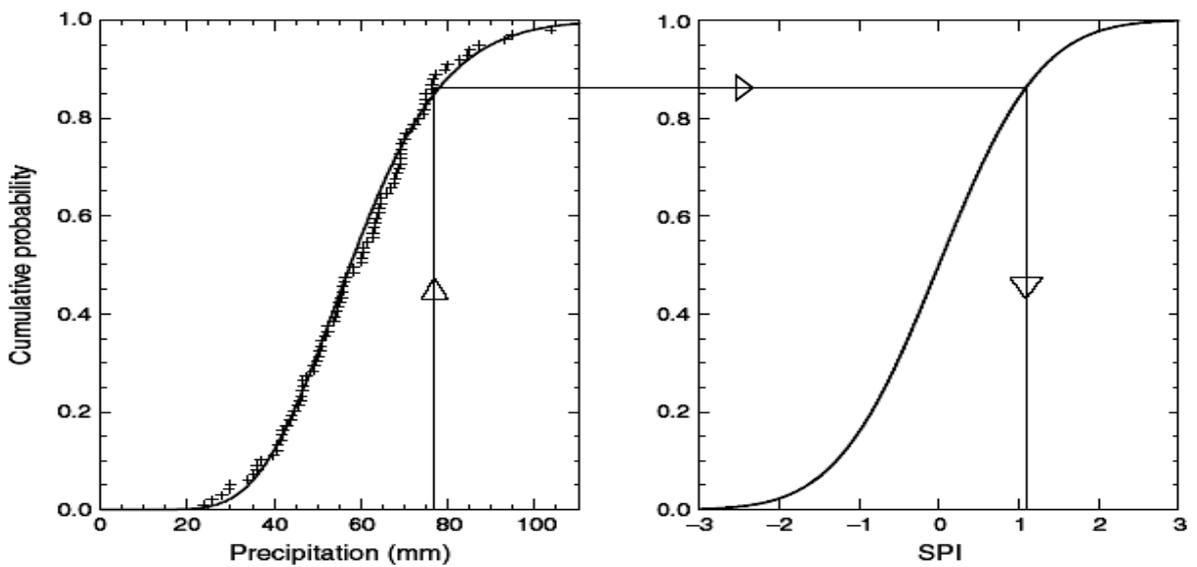


Figure I.1: Exemple de transformation d'une fonction de répartition de la loi gamma en une distribution normal standardisée.

Tableau I.2 : Les valeurs de l'indice des précipitations (SPI) (Mckee et al.1993).

Valeurs du SPI	Catégories de sécheresse
2.0 et plus	Extrêmement humide
De 1.5 à 1.99	Très humide
De 1.0 à 1.49	Modérément humide
De -0.99 à 0.99	Proche de la normale
De -1.0 à -1.49	Modérément sec
De -1.5 à -1.99	Très sec
-2 et moins	Extrêmement sec

I.1.3.2.Indices Hydrométriques (Streamflow Drought Index (SDI))

L'SDI a été développée la première fois par Nalbantis et Tsakiris (2009) pour caractériser la sécheresse hydrologique en Grèce, et a été également examinée dans les autres régions comprenant les Etats-Unis, Inde, l'Iran, l'Irak et Taïwan de la Chine (Madadgar et Moradkhani, 2013 ; Tabari et autres, 2013 ; Al-Faraj et autres, 2014 ; Manikandan et Tamilmani, 2015 ; Yeh et autres, 2015).

SDI maintient l'avantage de la simplicité et l'efficacité. Les données sur les débits constituent en fait le seul paramètre requis. Il est basé sur les volumes de débit cumulatif pour les périodes de chevauchement de trois, six, neuf et douze mois à l'intérieur de chaque année hydrologique.

I.1.3.2.1.Méthode de calcul

Nalbantis (2008), le calcul de SDI nécessite le calcul des apports cumulés et de procéder après de la même manière que dans le calcul de SPI pour la période de référence étudiée dans chaque année. Cette méthode permettra de définir SDI à différentes échelles du temps de 1 mois jusqu'à les quatre saisons, En outre, selon Nalbantis (2008), chaque année est affecté par une seule valeur de SDI.

Pour Nalbantis (2008), le calcul de SDI est basé sur les apports mensuel observé V_i , pour une période de référence k de i ème année comme suit :

$$SDI_{i,k} = \left(\frac{y_{i,k} - \bar{y}_k}{s_{y,k}} \right) \quad i = 1, 2, \dots, k = 1, 2, 3, 4 \dots \dots \dots \text{(I.14)}$$

$$y_{i,k} = \ln(V_{i,k}), \quad i=1, 2, \dots; \text{ et } k = 1, 2, 3, 4 \dots \dots \dots \text{(I.15)}$$

$$I=1, 2, \dots \dots \dots, T ; \text{ et } k = 1, 2, 3, 4$$

Chapitre I : Recherche bibliographique

Avec \bar{y} et sy , sont la moyenne et l'écart type des valeurs de y_i , T est le nombre d'année. $V_{i,k}$, est le cumul des apports pour une période de référence (k) dans l'année (i).

Les différentes classes d'indices SDI et leur signification sont identifiées dans le tableau suivant :

Tableau I.3: Définition des états de sécheresse hydrologique à l'aide de l'indice SDI.

Etat	Description	Catégories de sécheresse
0	Humide	SDI =0
1	Sécheresse légère	-1 < SDI < 0.0
2	Sécheresse modérée	-1.5 < SDI < -1.0
3	Sécheresse sévère	-2 < SDI < -1.5
4	Sécheresse extrême	SDI < -2.0

I.1.4. Caractérisation de la sécheresse

L'analyse de la sécheresse revient en fait, à la prise en considération de sa durée ainsi que de sa sévérité et de son intensité (Sibou, 2005).

- **La durée L(s)** : est la longueur de la période dans laquelle les valeurs de l'indice de la sécheresse sont inférieures à certain seuil. Ce seuil est généralement déterminé par la communauté scientifique suivant l'indice utilisé.

$$L(s) = I_f - I_i + 1 \dots \dots \dots \text{(I.16)}$$

Avec:

I_f = fin de l'intervalle considéré ;
 I_i = début du même intervalle considéré.

- **La sévérité D(s)** : est définie comme étant la somme des déviations, par rapport au seuil de troncature, des apports durant la période détectée comme sèche.

$$D(s) = \sum d(i) \dots \dots \dots \text{(I.17)}$$

- **L'intensité (Is)** : parfois appelé magnitude, est définie comme le rapport entre la sévérité et la durée de sécheresse (Dingman 1994 ; Shiau 2006).

Une autre caractéristique importante de la sécheresse est le temps interarrival, qui est définie comme le temps entre le début d'une sécheresse et le début de la suivante (Shiau 2006).

La figure I .3 explique les différentes caractéristiques de la sécheresse.

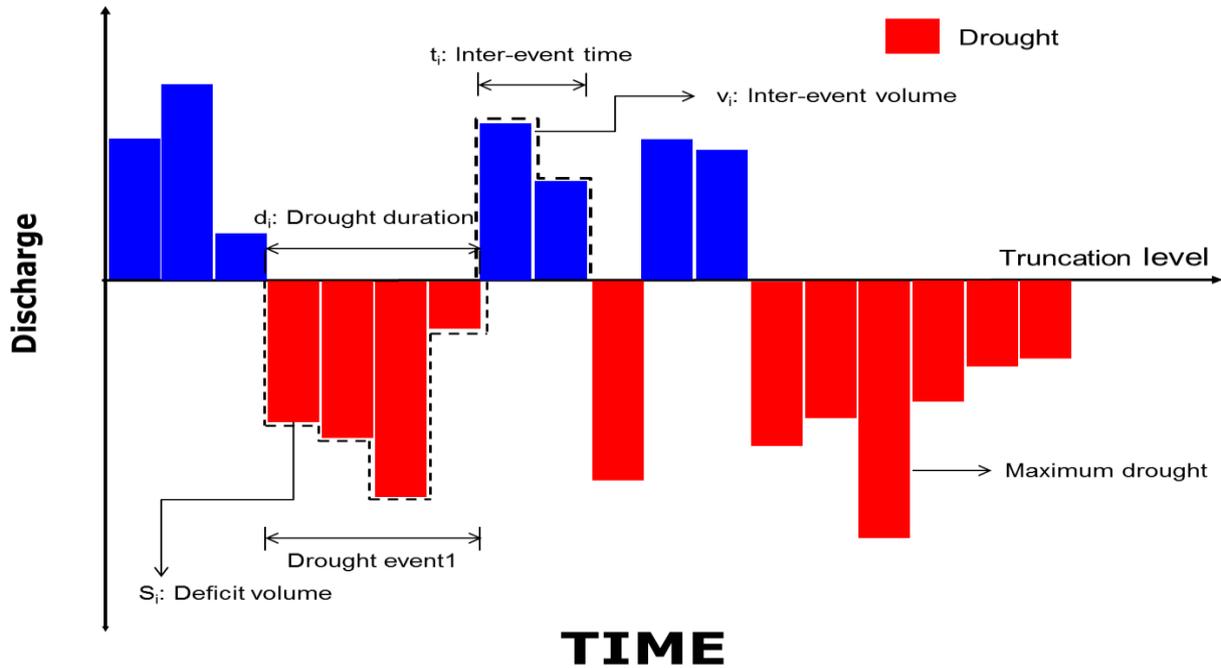


Figure I.3: Caractérisation des événements de sécheresse (Source: J. H. Sung et E.-S. Chung (2014). Development of streamflow drought severity–duration–frequency curves using the threshold level method).

Dans cette partie nous avons pu expliquer la définition de la sécheresse, ses différents types et ses caractéristiques brièvement. Pour analyser ces derniers dans notre zone d'étude nous utiliserons les fonctions copules.

I.2. les copules

I.2.1. Définitions

Une copule est une fonction de répartition C à $p \geq 2$ dimensions dont chacune des marges est uniforme sur l'intervalle $(0, 1)$. Étant donné une telle copule, on peut facilement construire une loi multi variée de marges F_1, \dots, F_p arbitraires en posant :

$$(x_1, x_2, \dots, x_p) = [F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_p(x_p)], x_1, x_2, \dots, x_p \in \mathbb{R} \dots \dots \dots (I.18)$$

De plus, un résultat obtenu par Sklar (1959) montre que cette façon de procéder est en fait complètement générale, en ce sens que toute fonction de répartition F à p dimensions peut s'écrire sous la forme (I.18). De plus, la copule en question est unique dans la mesure où les marges F_1, \dots, F_p sont continués.

I.2.2. Les familles de copule

Il y a plusieurs familles des copules y compris :

- elliptique (Gaussienne et Student) ;
- Archimédienne (Clayton, Gumbel, Franc, et Ali-Mihail-Haq) ;
- les valeurs extrêmes (Gumbel, Husler-Reiss, Galambos, Tawn, et t-EV) ;
- autre familles (Placett, et Farlie-Gumbel-Mordenstrern) (Yan et al.2009).

Les copules Archimédienne et elliptique sont les deux familles les plus utilisé.

Dans cette partie une attention particulière est accordée aux deux copules qui nous intéressent dans le cadre de cette étude, à savoir : la copule de Student et la copule de Gumbel.

I.2.2.1. La copule de Gumbel

Elle appartient à la famille des copules archimédiennes et son générateur, permet de modéliser les dépendances extrêmes. En effet, la copule de Gumbel appréhende les dépendances positives et possède la caractéristique de pouvoir représenter des risques dont la structure de dépendance est plus accentuée sur la queue supérieure.

S'écrit $(u) (\ln(u))^\alpha \phi = -$ avec $\alpha > 1$ et $u \in]0, 1]$. La copule de Gumbel s'écrit donc :

$$C(u_1, \dots, u_d) = \exp\left(-\left[-\sum_{i=1}^d (-\ln(u_i))^\alpha\right]^{1/\alpha}\right) \dots \dots \dots \text{(I.19)}$$

Bien qu'existante pour tout entier positif, l'expression explicite de la densité de cette copule est généralement complexe notamment pour des lois multi-variées. Nous proposons dans la suite une méthode afin de calculer cette densité. On part de l'expression générale : d

$$C(u_1, \dots, u_d) = (\phi)^{-1^{(d)}} (\phi(u_1) + \dots + \phi(u_d) \prod_{i=1}^d \phi'(u_i) \dots \dots \dots \text{(I.20)}$$

où

$$\phi(u) = (\ln(u))^\alpha \text{ et } \phi^{-1}(u) = \exp\left(-u^{\frac{1}{\alpha}}\right) = \exp(-u^\beta), \beta = \frac{1}{\alpha} \dots \dots \dots \text{(I.21)}$$

La détermination de la forme analytique de cette densité est délicate car le calcul de la dérivée d'ordre d de ϕ - est lourd et complexe. La majorité des travaux réalisés à ce sujet se contentent généralement d'étudier la densité bi-variée. La démarche que nous proposons sous forme d'algorithme, permet de calculer numériquement la dérivée d'ordre d de ϕ - et nous

permet donc de calculer numériquement la densité de la copule. La méthode consiste à calculer, par récurrence, pour tout réel $u \in \mathfrak{R}$ la dérivée d'ordre d en fonction des dérivées jusqu'à l'ordre $d - 1$. Plus précisément, nous procédons pour chaque $1 \leq n \leq d$ au calcul des dérivées de ϕ d'ordre $1, \dots, n - 1$ pour en déduire ensuite la dérivée d'ordre n . Par récurrence on calcule ainsi la dérivée d'ordre d pour chaque $u \in \mathfrak{R}$. Cette démarche se base sur la formule de Leibniz qui s'écrit pour deux fonctions dérivables en $u \in \mathfrak{R}$:

$$(f_g)^{(n)}(u) = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} f^{(k)}(u) g^{(n-k)}(u) \dots\dots\dots \text{(I.22)}$$

Que l'on utilise avec $(\emptyset^{-1})'(u) = -\beta \emptyset^{-1}(u) u^{\beta-1}$ on en déduit en notant $g(u) = u^{\beta-1}$ que pour tout $1 \leq n$:

$$(\emptyset^{-1})^{(n)}(u) = ((\emptyset^{-1})')^{(n-1)}(u) = (-\beta \emptyset^{-1} * g)^{(n-1)}(u) - \beta \sum_{k=0}^{n-1} \binom{n-1}{k} (\emptyset^{-1})^{(k)}(u) g^{(n-k-1)}(u) \dots \text{(I.23)}$$

On a par ailleurs $g^{(n-k)}(u) = u^{\beta-1-k} \prod_{i=1}^k (\beta - i)$. On note que la dérivée d'ordre d de \emptyset^{-1} est entièrement définie par les dérivées d'ordres inférieurs de \emptyset^{-1} et par les dérivées de g .

Donc par récurrence il est simple de calculer la dérivée d'ordre d de \emptyset^{-1} . Ce résultat nous donne la possibilité de calculer numériquement la densité d-variée de la copule de Gumbel et nous permet d'étudier donc la structure de dépendance qu'elle implique.

I.2.2.2. Copule de Student

La copule de Student (*t copula*) est la copule sous-jacente à une distribution multi-variée de Student. Cette structure de dépendance capte les dépendances extrêmes positives et négatives. Elle est construite de la même manière que la copule gaussienne mais à partir de la distribution de Student centrée réduite. La fonction de densité de la copule de Student d -variée, s'écrit pour tout $(U_1, \dots, U_d) \in [0, 1]^d$:

$$C(u_1, \dots, u_d) = \frac{f_{v, \Sigma}(t_v^{-1}(u_1), \dots, t_v^{-1}(u_d))}{\prod_{i=1}^d f_v(t_v^{-1}(u_i))} \dots\dots\dots \text{(I.24)}$$

La fonction de distribution t_v^{-1} est l'inverse de la distribution de Student centrée réduite uni-variée à v degrés de liberté. La fonction $f_{v, \Sigma}$ est la densité de probabilité de la loi de Student centrée réduite, Σ sa matrice de corrélation et f_v est la densité uni-variée de la loi de Student centrée réduite ($\Sigma = 1$).

I.2.3. Mesures de dépendance

Munissons-nous d'une distribution à deux variables. Généralement, la mesure d'une plus ou moins bonne corrélation entre elles est effectuée avec le coefficient de corrélation de Pearson, au besoin en utilisant un changement de variable si la liaison n'est pas linéaire.

Parfois, cet outil devient inopérant. On se tourne alors vers une corrélation de Kendall, un coefficient souvent utilisé est celui de Spearman. Mais ce dernier n'est pas toujours très pertinent.

I.2.3.1. Coefficient de corrélation de Kendall

Le coefficient du taux de Kendall est défini comme (Djehiche B. 2004) :

$$\tau = \frac{(\text{nombre de concordant paires}) - (\text{nombre de discordant paires})}{\frac{1}{2}n(n-1)} \dots\dots\dots \text{(I.25)}$$

On dit que les deux paires (x_1, y_1) et (x_2, y_2) sont en concordance si :

$$(x_1 - x_2)(y_1 - y_2) > 0 \dots\dots\dots \text{(I.26)}$$

Et en discordance si :

$$(x_1 - x_2)(y_1 - y_2) < 0 \dots\dots\dots \text{(I.27)}$$

I.2.3.2. Le coefficient de corrélation de Pearson

Le coefficient de corrélation de Pearson entre deux variables aléatoires réelles X et Y est défini par la covariance $\text{Cov}(X, Y)$ divisé par le produit de leurs écarts-types, $\sigma_X \sigma_Y$.

$$\rho_{X,Y} = \text{corr}(X, Y) = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[(X-\mu_X)(Y-\mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y} \dots\dots\dots \text{(I.28)Q}$$

I.2.4. Estimation paramétrique

I.2.4.1. La méthode des moments

Cette méthode consiste à estimer les paramètres $\beta_i, i=1, \dots$, des lois marginales et le paramètre α de la copule par la méthode des moments, i.e.

Résoudre le système des n équations à n inconnues :

$$\left\{ \begin{array}{l} X_t = f(\beta_1, \dots, \beta_n) \\ S^2_t = g(\beta_1, \dots, \beta_n) \dots\dots\dots (I.29) \\ \mu_{3,t} = h(\beta_1, \dots, \beta_n) \\ \vdots \\ \vdots \end{array} \right.$$

- Ou n désigne la dimension de α ; f , g et h sont les expressions des moments (ordinaire) d'ordre 1,2 et 3 en fonction des paramètres β_i . Répéter cette étape pour toutes les marginales.
- Inverser le taux de Kendall ou le rho de Spearman pour obtenir le paramètre α de la copule.

I.2.4.2.Méthode du maximum de vraisemblance (MLE)

Soit $\{x^t_1, \dots, x^t_n\}^T_{i=1}$ l'échantillon de fonction de répartition multi-variée $H(x; \theta)$ qui dépend du vecteur des paramètres $\theta \in \Theta \subset R^p$; le théorème de Sklar nous donne :

$$H(x_1, \dots, x_n) = (F_1(x_1), \dots, F_n(x_n)) \dots\dots\dots (I.30)$$

Et

$$f(x_1, \dots, x_n) = F_1(x_1, \dots, x_n) \prod_{i=1}^k f_i(x_i) \dots\dots\dots (I.31)$$

Ou

$$C(u_1, \dots, u_n) = \frac{\partial C(u_1, \dots, u_n)}{\partial u_1, \dots, u_n} \dots\dots\dots (I.33)$$

Désigne la densité de la copule d-dimensionnelle $(u_1, \dots, u_n; \theta)$ et f_i sont les densités des fonctions de répartition marginales F_i .

La fonction log- vraisemblance $L(X, \theta) = \sum_{t=1}^T \ln f(x^t_1, \dots, x^t_n)$ de l'échantillon $\{x^t_1, \dots, x^t_n\}^T_{i=1}$ donnée par :

$$L(x, \theta) = \sum_{t=1}^T \ln C(F_1(x^t_1; \theta), \dots, F_n(x^t_n; \theta)) + \sum_{t=1}^T \ln f_1(x^t_1; \theta) + \dots + \sum_{t=1}^T \ln f_n(x^t_n; \theta) \dots\dots(I.34)$$

L'estimateur de maximum de vraisemblance de θ est donné par :

$$\theta^{MLE} = \arg \max L(x, \theta) \dots\dots\dots (I.35)$$

I.2.4.3. Inférence sur les marginales (IFM)

La méthode du maximum de vraisemblance peut engendrer des temps de calcul très longs pour une copule multidimensionnelle car l'estimation des paramètres des lois marginales et des paramètres de la copule se fait d'une façon simultanée. En outre, une éventuelle erreur d'estimation des marginales peut rendre erronée l'estimation de la copule car elles interviennent directement dans la fonction vraisemblance.

Joe et Xu (1996) notent cependant que la représentation par la copule permet de séparer les paramètres spécifiques aux distributions marginales (β_1, \dots, β_n) et les paramètres communs de la structure de dépendance α . Ils suggèrent une estimation à deux étapes (voir Shih et Louis(1995)) ;

Nous estimons les paramètres β_1, \dots, β_n des lois marginales dans un premier temps étant donné ces estimations, nous estimons ensuite le paramètre de la copule. Cette méthode d'estimation est appelée par Shih et Louis [60] «two-stage parametric ML method». Joe et Xu [45] utilisent le terme «inference functions for margins»(IFM).

Nous pouvons donc écrire $\theta = (\alpha, \beta_1, \dots, \beta_n)$ par conséquent

$$H(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n; \theta) = C[F_1(\mathbf{x}_1; \beta_1), \dots, F_n(\mathbf{x}_n; \beta_n); \alpha, \beta_1, \dots, \beta_n] \dots \dots \dots \text{(I.36)}$$

Notons $C(u_1, \dots, u_n)$ la contrepartie paramétrique de la densité de la copule. L'approche par maximum de vraisemblance réduit à la maximisation à la quantité suivante :

$$L(\mathbf{x}, \alpha, \beta_1, \dots, \beta_n) = \sum_{t=1}^T \ln C(F_1(\mathbf{x}_1^t; \beta_1), \dots, F_n(\mathbf{x}_n^t; \beta_n); \alpha) + \sum_{t=1}^T \ln f_1(\mathbf{x}_1^t; \beta_1) + \dots + \sum_{t=1}^T \ln f_n(\mathbf{x}_n^t; \beta_n) \text{(I.37)}$$

Ainsi, au lieu de chercher le maximum global

$$\hat{\alpha}^{MLE}, \hat{\beta}_1^{MLE}, \dots, \hat{\beta}_n^{MLE} = \arg_{\alpha, \beta_1^{\max}, \dots, \beta_2} L(\mathbf{x}, \alpha, \beta_1, \dots, \beta_n) \dots \dots \dots \text{(I.38)}$$

On peut effectuer en deux étapes la procédure d'estimation des paramètres :

On estime la distribution marginale uni variée :

$$\hat{\beta}_1 = \arg \max \sum_{t=1}^T \ln f_i(\mathbf{x}_i^t; \beta_i) \dots \dots \dots \text{(I.39)}$$

Puis on peut estimer α en tenant compte des estimateurs obtenus ci-dessus :

$$\hat{\alpha} = \mathit{arg\ max} \sum_{t=1}^T \ln c(F_1(x_1^t; \hat{\beta}_1), \dots, F_n(x_n^t; \hat{\beta}_n); \alpha) \dots\dots\dots (\text{I.40})$$

L'estimateur IFM des paramètres du modèle est alors défini de la façon suivante :

$$\theta^{IFM} = (\hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_n; \hat{\alpha})' \dots\dots\dots (\text{I.41})$$

Joe (1997) a montré que l'estimateur IFM vérifié également dans les conditions de régularité la propriété de la normalité asymptotique, on a :

$$\sqrt{T}(\hat{\theta}_{IFM} - \theta_0) \rightarrow \aleph(\mathbf{0}, \mathbf{g}(\theta_0)) \dots\dots\dots (\text{I.42})$$

Où θ_0 est la matrice de l'information de godambe

$$\mathbf{g}(\theta_0) = \mathbf{D}^{-1} \mathbf{M} (\mathbf{D}^{-1})' \dots\dots\dots (\text{I.44})$$

Avec

$$\mathbf{D} = \mathbf{E} \frac{\partial \mathbf{g}(\theta)}{\partial \mathbf{g}(\theta')} \dots\dots\dots (\text{I.45})$$

θ n'est rien d'autre que la fonction score définie comme suit :

$$\frac{\partial L_1}{\partial \alpha_1}, \frac{\partial L_1}{\partial \alpha_2}, \dots, \dots, \frac{\partial L_n}{\partial \alpha_n}, \frac{\partial L_c}{\partial \theta_c} \dots\dots\dots (\text{I.46})$$

I.2.5. Test de validité de l'ajustement

Le test de Kolmogorov-Smirnov (ks test) est utilisé pour cette étude pour mesurer la qualité de l'ajustement pour les distributions marginales sur la base des hypothèses nulles et alternatives (Ricci, 2005).

Le test de K-S est l'un des tests d'adéquation non paramétriques les plus courants (avec le χ^2 mais ce dernier perd davantage d'information). Il permet de comparer une distribution observée avec une autre, ou avec une distribution connue de type loi de probabilité. Notamment, ce test donne une bonne indication d'ajustement à une loi normale. De plus, il s'adapte aux échelles ordinales et il est de ce fait très utilisé dans les études de marché. Son principal défaut est de ne pas être très efficace dans les queues de distribution.

I.2.5.1. Principe de test de Kolmogorov-Smirnov

Le principe est simple. On mesure l'écart maximum qui existe entre la fonction de répartition observée (ou tout simplement des fréquences cumulées) et la fonction de répartition théorique (ou tout autre fonction inconnue sous forme analytique).

Sous l'hypothèse H_0 , cet écart est faible et la répartition des observations s'intègre bien dans une distribution donnée. Un calcul « manuel » nécessite l'utilisation d'une table de Kolmogorov (au-dessous d'une trentaine d'observations) : il suffit alors de comparer la distance maximale à la valeur idoine de la table. Cette valeur tabulée prend en compte l'effectif et le seuil de risque « alpha ».

Un petit graphique permet de bien visualiser ce qu'on cherche à faire :

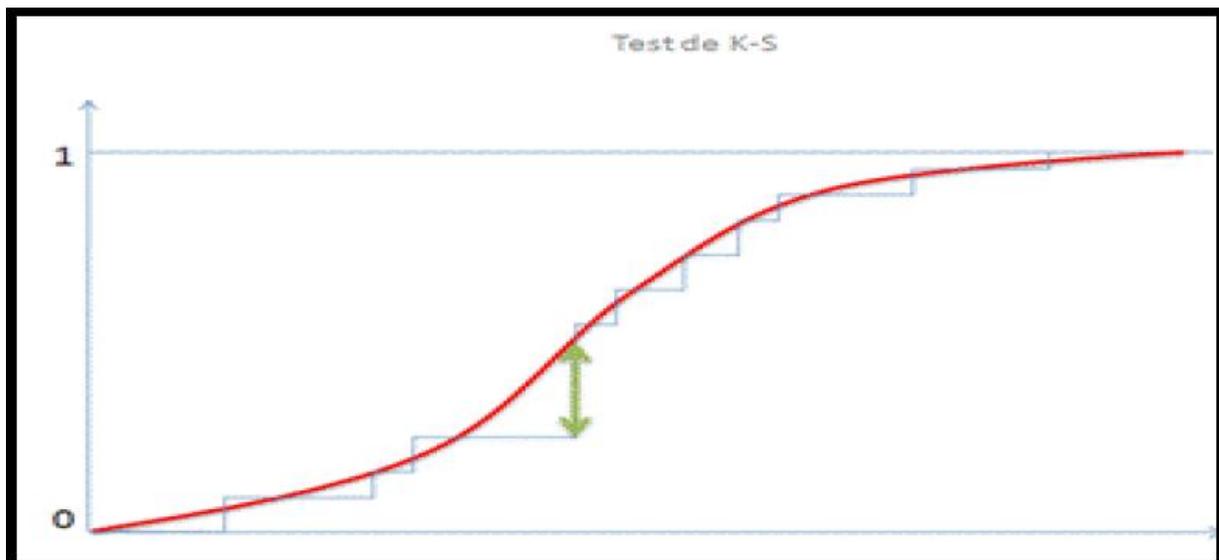


Figure I.4 : Teste de k-s.

La flèche verte mesure l'écart maximum entre les observations (en bleu) et la fonction de répartition connue rouge.

I.3. Les modèles climatiques

Le 5^{ème} rapport de groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) utilise un nouvel ensemble de nouvelle simulation des impacts futurs du changement climatiques, à partir d'une gamme de différentes hypothèses de scénario possibles d'évolution des missions.

I.3.1. Les modèles et scénarios utilisés dans la 5^{ème} évaluation du changement climatique

Les projections des changements dans le système climatique sont faites en utilisant une gamme de modèles climatiques qui simulent les changements en se basant sur un ensemble de scénarios de forçage radiatif d'origine anthropique. Une nouvelle série de scénarios, les scénarios RCP (Représentative Concentration Pathways), ont été utilisés pour les simulations des modèles climatiques réalisées pour ce 5^{ème} rapport ; ils comprennent généralement des composantes tant économiques, démographiques que de l'énergie et du climat (IPCC, 2013).

Les émissions futures de gaz à effet de serre (GES), de particules d'aérosols et d'autres sources de forçage radiatif tels que les changements d'utilisation des sols (forêts, cultures) dépendent de facteurs socio-économiques, et peuvent être influencés par des accords géopolitiques au niveau mondial dans le but de contrôler les émissions et évoluer vers leur atténuation. Les scénarios utilisés dans cette évaluation, qui explorent ce que ces émissions pourraient être, ont des cibles différentes d'ici 2100 en termes de forçage radiatif, qui va d'un scénario d'«atténuation forte» à un scénario de croissance continue des émissions.

Les trajectoires représentatives des concentrations de gaz à effet de Serre élaborées par le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, le GIEC, dans le 5^{ème} phase du projet d'inter-comparaison des modèles couplés (AR5) renferment un très sombre futur pour l'humanité toute entière et une multitude de formes de vies (IPCC 2013). Les RCP sont des scénarios de l'évolution des concentration de GES (dioxyde de carbone ou CO₂, méthane ou CH₄, protoxyde d'azote ou N₂O...), d'aérosol et de gaz chimiquement actifs, dans l'atmosphère sur la période 2006-2100, avec une extrapolation jusqu'à 2300 (IPCC 2013). Les scénarios sont présumés être tous directement liés aux émissions de CO₂ ; plus on émet du carbone, plus il fera chaud. Actuellement l'Humanité est en plein sur la trajectoire du pire des cas, le RCP8.5 qui nous amènera à un réchauffement Global moyen de 2°C pour l'an 2050 (IPCC 2013). Au nombre de quatre, ils ont été sélectionnés sur la base de 300 scénarios publiés dans la littérature de façon à couvrir une palette aussi large que possible des trajectoires futures de forçage radiatif envisageables. Chacun de ces quatre scénarios RCP est étiqueté en fonction du forçage radiatif qu'il atteint en 2100 : 2.6 W/m², 4.5 W/m², 6 W/m² et 8.5 W/m². La figure I.1 représente ces scénarios, de même que les scénarios «SRES» anciennement utilisés dans le Quatrième Rapport d'Évaluation (AR4) de 2007.

Le scénario le plus optimiste, le RCP2.6 (très faibles émissions ≈ 490 ppm CO₂ equiv), augmente jusqu'à $3,0 \text{ Wm}^{-2}$ puis descend à $2,6 \text{ Wm}^{-2}$ en 2100. Les scénarios RCP4.5 (faibles émissions ≈ 650 ppm CO₂ equiv) et RCP6.0 (émissions moyennes ≈ 850 ppm CO₂ equiv) se stabilisent respectivement à $4,2 \text{ Wm}^{-2}$ et à $6,0 \text{ Wm}^{-2}$ après 2100, alors que le scénario RCP8.5 (très hautes émissions ≈ 1370 ppm CO₂ equiv) atteint $8,3 \text{ Wm}^{-2}$ en 2100 sur une trajectoire montante. Ces scénarios ne sont pas associés à des scénarios socioéconomiques précis comme l'étaient les scénarios «SRES» utilisés précédemment. Ils représentent plutôt des projections pouvant être réalisées par plus d'un scénario socioéconomique sous-jacent atteignant des émissions de GES et des valeurs de forçage radiatif similaires.

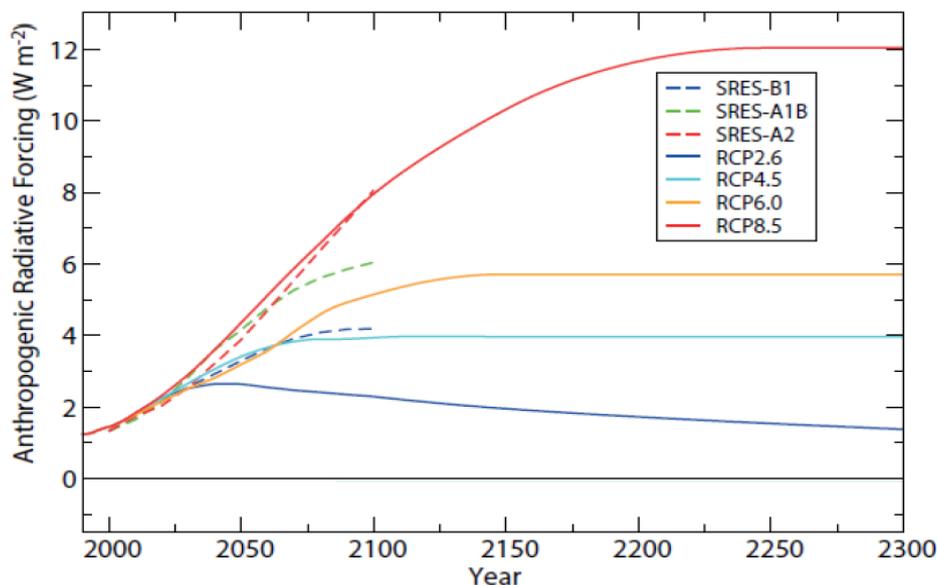


Figure I.5 : Évolution temporelle du forçage radiatif anthropogénique entre 2000 et 2300 pour les scénarios RCP (lignes continues) et comparaison aux scénarios SRES utilisés dans l'AR4 (pointillé). (Tiré de IPCC 2013).

I.3.2. Les changements observés dans le climat dans les derniers siècles confirmés par le 5^{ème} rapport

Devant les incertitudes caractérisant la science de climat, les énoncés et les résultats donnés dans chaque rapport de GIEC sont accompagnés des formulations spécifiques pour exprimer le degré d'incertitude à lequel sont liées. Dans ce paragraphe on va citer juste les observations pratiquement (probable à 99-100%).

- Augmentation des températures de surface globale de la terre de $0,85^{\circ}\text{C}$;
- L'océan au-dessus d'une profondeur de 700 m s'est réchauffé au cours de 20^e siècle ;

- A partir des années 1970, la planète est en déséquilibre énergétique avec plus d'énergie provenant du soleil entrant dans l'atmosphère qu'en sortant ;
- L'humidité de la basse atmosphère a augmenté depuis 1970 ;
- Des changements ont été observés dans les propriétés de l'océan (son réchauffement, des changements dans sa salinité, une augmentation dans sa teneur en carbone et son acidité, une diminution dans sa concentration en O₂) au cours de ces 40 dernières années ;
- Les concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre s'écartent vers le haut de la gamme de concentration mesurées dans les carottes de glaces ;
- Fonte des glaces terrestres.

En plus de ces modifications observées et confirmées à 99%, il y a d'autres dont l'incertitude est un peu grande.

Les facteurs subissant une modification dans leurs évolutions jouent un rôle déterminant dans la circulation générale. Pour le moment aucune observation ou mesure à démontrer un changement irréversible dans le système climatique suite à la modification de ces facteurs. Puisque le surplus d'énergie (93%) est absorbé par les océans, impliquant une augmentation de leur niveau par dilatation thermique. Mais, une grande majorité des chercheurs fondent leurs théories sur la modélisation et la simulation avancent que pour un certains éléments du système climatiques il existe un point où un changement brusque pourrait se produire une fois un certain seuil atteint. Et c'est le futur redoutable pour notre système. Par exemple, des changements dans la circulation méridienne océanique atlantique pourraient produire de brusque changement climatique à l'échelle mondiale et sur le climat de l'Europe et de l'Amérique du nord.

I.3.3.Modèle climatique

I.3.3.1.Définition

Un modèle est une modélisation mathématique du climat dans une zone géographique donnée.

I.3.3.2.Modèle climatique globale (GCM)

Modélise le climat à grande échelle, et peut fournir des informations de prévision fiable sur des échelles de l'ordre de 1000 par 1000 Km, couvrant ce qui pourrait être un paysage largement différent (de très montagneux aux plaines côtières plates, par exemple) avec un potentiel très variable pour les inondations, les sécheresses ou d'autres événements extrêmes. Ces modèles peuvent nous fournir des projections de la façon dont le climat de la terre peut

changer à l'avenir. Ces résultats sont la principale motivation pour la communauté internationale de prendre des décisions sur l'atténuation des changements climatiques.

(<http://www.clm-community.eu/index.php?menuid=254>).

I.3.3.3. Modèle Climatique régionale (MRC)

Contrairement au modèle climatique globale, les modèles climatiques régionaux (MRC) et empirique downscaling statistique (EDD) appliqué sur une zone limitée et entraînée par GCM peut fournir des informations sur des zones à petite échelle ce qui nous permettent d'évaluer l'impact du changement climatique et de procéder aux planifications et de suggérer les moyens d'adaptations dans nombreuse régions vulnérables du monde. Ajouté à cela, les RCD (régional downscaling climatique) fournissent des projections avec beaucoup plus de détails et une représentation plus précise des événements extrêmes localisés.

Dans la présente étude on a opté pour les sorties de modèle climatique régional pour étudier l'évaluation des caractéristiques futures des sécheresses sous changement climatique au Nord-Ouest de l'Algérie, vu la résolution de ces modèles qui est beaucoup plus fine que les GCM. De même, les MRC sont destinés pour l'étude de l'impact du changement climatique, le cadre dans lequel s'inscrit notre étude.

Le modèle retenu se trouve dans la liste des modèles régionaux utilisés dans le projet CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment ; Giorgi et al.2009, Jones et al. 2011). Un projet coparrainé par le PMRC (Programme mondial de recherche sur le climat), la commission européenne et du GIEC pendant la conférence internationale sur le climat régional en 2013.

Le programme CORDEX utilise les nouveaux profils représentatifs d'évolutions des concentrations de gaz à effets de serre, d'ozone et de précurseurs des aérosols (**RCP** : **Representative Concentration Pathways**) définis par le GIEC (Giorgi et al, 2009; Mondon et al, 2013). Ces prescriptions valant pour le XXIème siècle et au-delà correspondent à des efforts plus ou moins grands de réduction des émissions de GES au niveau mondial.

Cependant les simulations prioritaires faites dans cadre du programme CORDEX ne concernent que deux des RCP définis, qui sont les scénarios 4.5 et 8.5. Ces scénario particuliers correspondent aux scénarios B1 et A1B des anciens profils d'évolution des GES (SRES) (Ardoin-Bardin, 2004). Ils représentent respectivement des schémas plus optimistes et peu optimistes de l'évolution du climat pour le 21ième siècle.

Chapitre I : Recherche bibliographique

Dans notre travail, les simulations de précipitations mensuelles du modèle climatique régional du Rossby centre sur l'Afrique RCA4 ont été utilisées, cette base de données est obtenue à partir du modèle régionale de l'institut suédois de météorologie et d'hydrologie (SMHI), utilisant la condition aux limites de huit modèles de la circulation général (MCG) atmosphère-océan (AO) de la limite de dix modèles de la 5ème phase couplés (CMIP5) (tableau I.5). L'ensemble des données simulées, couvre la période 1951-2100, et sont simulées selon :

- un aspect historique (ou période historique) où les simulations s'étendent de 1951 à 2005, sans prise en compte des scénarios de RCP. Cette période sert généralement de période de référence pour l'évaluation des sorties des modèles climatiques.
- Un aspect futur où les simulations sont effectuées suivant les deux RCP 4.5 et 8.5. Les données de la période future s'étendent de 2006 à 2100, et sont donc utilisées pour l'analyse d'impacts des évolutions futures des caractéristiques de la sécheresse.

Tableau I.4: Modèles climatique régional et nom de l'institution des modèles de la circulation générale (Zeroual, 2010).

MCR(MCG)	Nom de l'institution de GCM (pays)
RCA4 (Can ESM2)	CCCma (canada)
RCA4 (CNRM-CM5)	CNRM-CERFACS (France)
RCA4 (IPSL-CM5A)	IPSL(France)
RCA4(MIROC5)	MIROC(Japan)
RCA4 (HadGEM2-ES)	MOHC(UK)
RCA4 (MPI-ESM-LR)	MPI-M(Germany)
RCA4 (NorESM1-M)	NCC (Norway)
RCA4 (GFDL-ESM2M)	NOAA-GFDL(USA)

MCR (MCG : Modèles climatique régional (modèles de la circulation générale).

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

Introduction

L'Algérie et en particulier la région Nord-Ouest a connu plusieurs sécheresses durant le dernier siècle. La dernière a été caractérisée par son intensité et son impact sensible sur la ressource en eau et le rendement des cultures (meddi.2009). Pour procéder à l'analyse du risque de la sécheresse dans le contexte du changement climatique, nous devons constituer la base de données sur laquelle l'étude sera fondée après la présentation de la zone d'étude.

II.1. Présentation de la zone d'étude

Notre zone d'étude est située dans la partie Nord-Ouest de l'Algérie, elle regroupe deux grands bassins versants, à savoir le bassin de Tafna et le bassin de Macta, ces deux bassins appartiennent à l'ensemble de l'Oranie-Chott Cherguie (A. BOUANANI, 2004). L'aire d'étude présente une irrégularité flagrante entre bassins et même entre les unités d'un bassin. Devant une telle hétérogénéité, chaque bassin sera représenté séparément afin de bien décrire ses spécificités en terme des paramètres qui influent et déterminent le type de la réponse hydrologique.

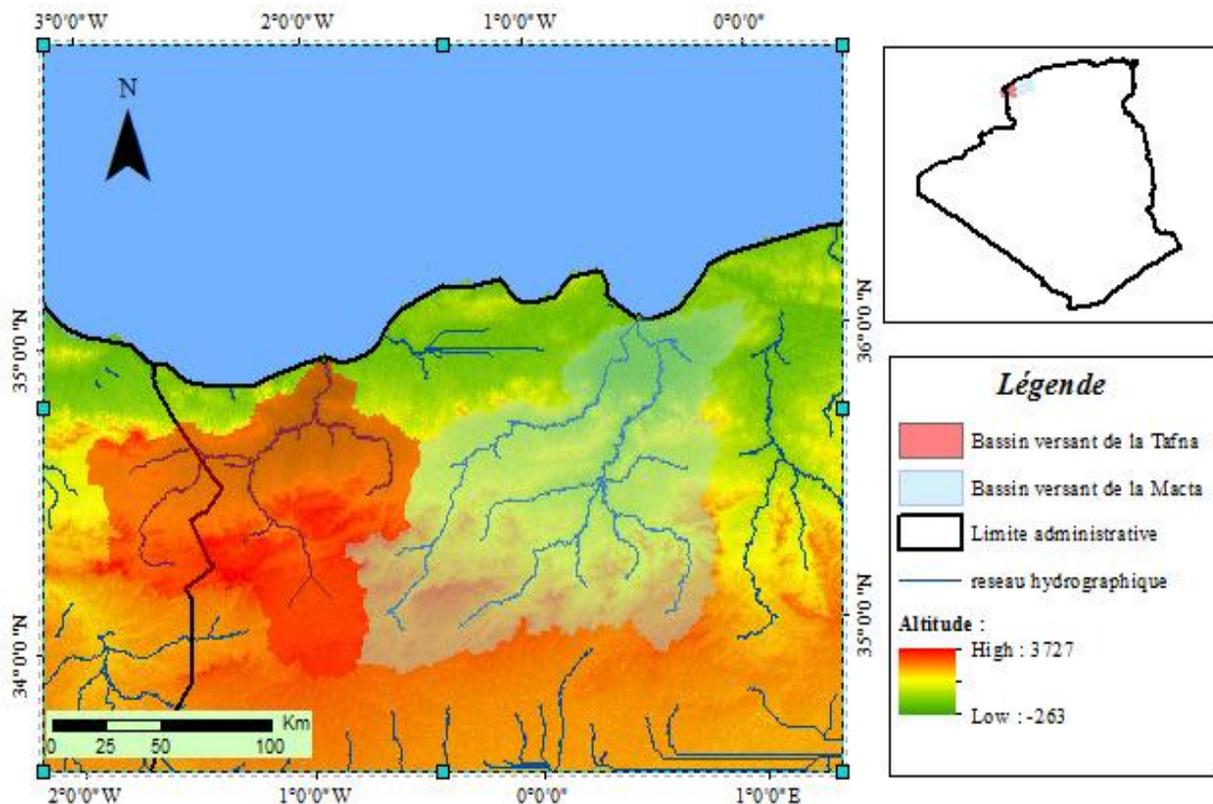


Figure II. 1: Présentation des différents bassins étudiés.

II.1. 1. La Tafna

Le bassin versant de la Tafna est comptabilisé parmi les grands bassins versants du Nord-Ouest algérien, il est compris entre 1° et 2° de longitude ouest et de 34°5' à 35°3' de latitude nord. Il s'étend sur la totalité de la wilaya de Tlemcen sur une superficie de 7245 km². Subdivisé en trois grandes parties :

- partie orientale avec comme principaux affluents l'oued Isser et l'oued Sikkak) ;
- partie occidentale comprenant la Haute Tafna (oued Sebdou et oued Khemis) et l'oued Mouilah ;
- partie septentrionale : qui débute pratiquement du village Tafna et s'étend jusqu'à la plage de Rachgoune, embouchure de la Tafna sur la mer. Les oueds Boukiou, Boumessaoud et Zitoun sont les principaux affluents de cette partie. (A.KHALDI, 2005).

Les sous bassins de la Tafna présentent, dans l'ensemble une forme assez ramassée dont la disposition du relief, ainsi que l'abondance des roches imperméables, ont combiné leurs effets pour donner naissance à un réseau hydrographique dense, variant de 0,5 à 2,9 selon l'importance des sous bassins (Ghenim, 2001). L'Oued Tafna prend sa source dans la région de Maghnia, et longe les piémonts sud des monts de Traras suivant une direction SW-NE.

Le bassin est assez bien drainé en amont, en raison des formations géologiques formant le bassin, dont la grande partie est constituée de marne, de calcaire et de dolomie Karstique. En revanche, les zones plaines sont moins drainées à cause de la nature alluviale des formations géologiques favorisant l'infiltration au détriment de ruissellement.

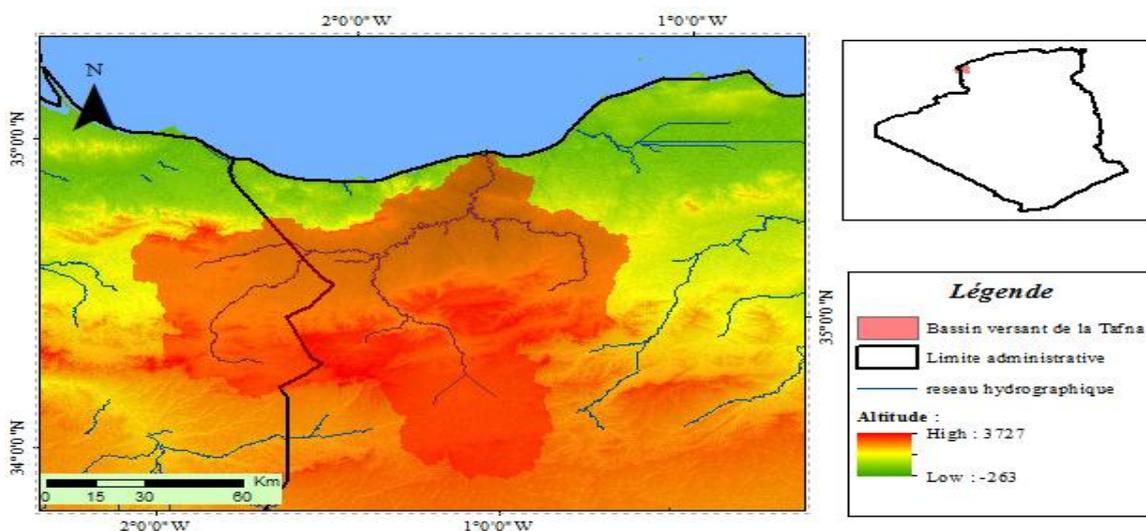


Figure II.2 : Bassin de la Tafna.

II.1.1. Bassin versant de la Macta

Situé en Algérie occidentale est constitué de seize sous bassins. Il est délimité au Nord-Ouest par la chaîne montagneuse du Tessala au sud par les hauts plateaux de Ras-el-Ma et les plaines de Maalifs, à l'Est par les plateaux du Telagh et les monts de Tlemcen qui sont le prolongement des monts de Beni-Chaugrane. (A.KHALDI, 2005). Il est compris entre 34° 28' et 35° 87'3 de latitude nord est 0° 52' et 1° 2' de longitude ouest. Il s'étend sur une superficie de 14 390 km².

Il est drainé par deux principaux cours d'eau : l'oued Mebtouh, à l'ouest et l'oued El Hammam à l'est. Il associe trois régions distinctes :

- la basse plaine littorale, présente des altitudes ordinairement inférieures à 9 m, ce qui favorise la présence de plans d'eau, de marais et de steppes ;
- les massifs, qui constituent la plus grande partie du bassin versant. Ce bassin est bordé à l'ouest et au nord-ouest par les monts de Tessala, les monts des Beni-Chougrane occupent une bonne partie de sa zone moyenne ;
- les larges plaines alluviales insérées dans les massifs montagneux de Sidi Bel Abbès.

C'est un bassin d'effondrement entouré par plusieurs reliefs, et notamment par :

- Les Monts des Beni Chougrane au nord et à l'ouest ;
- Les Monts de Saida au sud ;
- A l'est, le bassin de la Macta, limité par une barrière imperméable de marnes et d'argiles. (PNE, 2010).

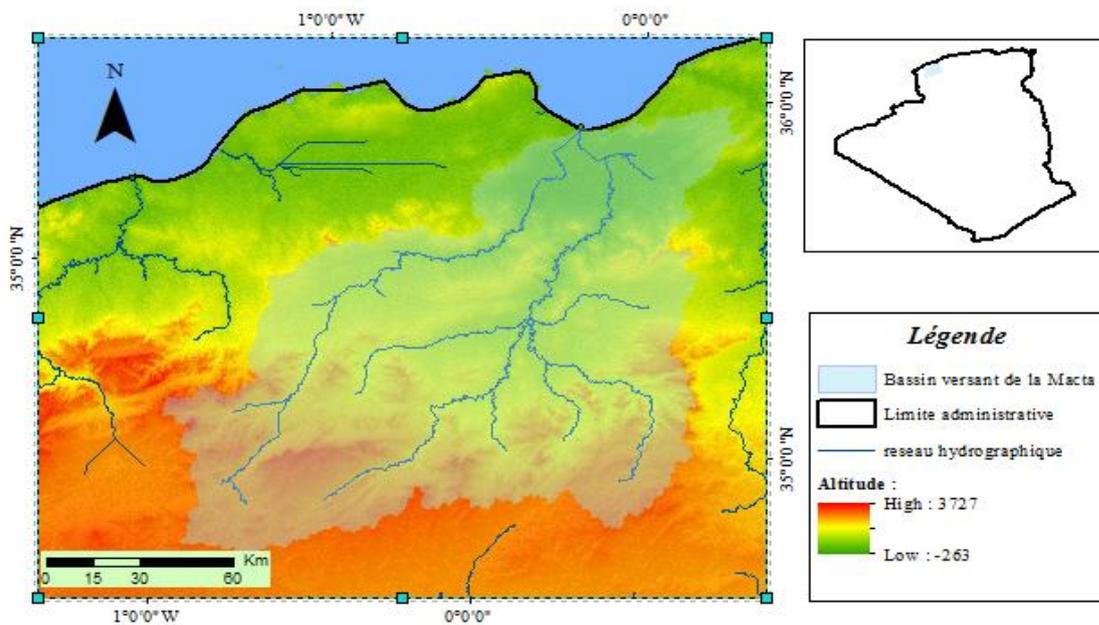


Figure II.3: Bassin de la Macta.

II.2. Choix de l'air d'étude

Notre zone d'étude est située dans la partie Nord-Ouest de l'Algérie, elle englobe les bassins versants de la Tafna, la Macta, Le choix se justifier par l'ampleur de la sécheresse au cours de ces derniers années sur cette zone (MEDDI, 2010). Outre, cette parie regroupe de nombreuses plaines fertiles avec un recours de plus en plus intense a l'irrigation, au déterminent de l'équilibre des ressources en eau (MEDDI, 2009). Ajoutant la grande population concentrée dans l'air d'étude, où les besoins en eau s'accroissent d'année en année. Un tel contexte nécessite des études bien précises sur l'évolution des paramètres climatiques, dans le but de connaitre en mieux les circonstances futures 'afin de mettre en œuvre des outils de gestions efficaces et durables. (ZEROUAL, 2017).

II.3. Choix des stations

Pour un bassin versant donné ou une région donnée, les stations pluviométriques et hydrométriques sont installées dans des conditions propres et forment le réseau d'observation. Les données relatives aux stations sont d'une haute importance pour les statistiques climatiques, la planification, la gestion des ressources et les projets de construction (A. KHALDI, 2005).

Pour un bon traitement des données recueillies, il est nécessaire et indispensable que la période de collecte soit suffisamment longue, autrement dit l'échantillon doit être suffisamment grand (El Ouissi A. 2004). Pour assurer une bonne représentation de notre

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

région, nous avons d'abord travaillé sur 4 stations pluviométriques et hydrométriques ayant des périodes aussi longues que possibles et réparties d'une façon plus ou moins uniforme sur toute la zone. .

Les stations hydrométriques ont été choisies selon un échantillonnage stratifié et le choix de nos stations n'a pas été aléatoire, les stations où l'effet anthropique sur le régime hydrométrique est bien évident sont écartées ainsi celle qui se trouve près des ouvrages hydrauliques en raison de l'impact de la régulation sur le comportement des oueds, on ajoutant la disponibilité des données. Sous ces trois conditions les quatre stations ont été sélectionnées. .

Les données pluviométriques et hydrométriques utilisées dans cette étude proviennent de l'Agence Nationale des Ressources Hydraulique (A.N.R.H) d'Alger.

II.4. Données pluviométriques et hydrométriques

La localisation et les caractéristiques des stations pluviométriques et hydrométriques utilisées dans cette étude, sont présentées sur les tableaux II.1 et II.2, ce nombre semble satisfaisant, puisque ces stations sont implantées, assez régulièrement sur les deux bassins versants concernés par cette étude. Deux stations sur le bassin de la Tafna et deux sur le bassin de la Macta.

Tableau II.1 : Code et coordonnées des stations pluviométriques.

Code de la station	Coordonnées (degré)		période de mesure		bassin
	Latitude	Longitude	Début	fin	
11-02-01	34.974	-0.734	1936	2006	La Macta
11-03-04	35.057	0.885	1936	2010	
16-04-03	34.337	-1.496	1941	2010	La Tafna
16-03-03	34.864	-1,682	1953	2010	

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

Tableau II.2: Stations hydrométrique retenues dans l'étude.

Code de la station	Oued	Coordonnées Lambert			Mise en service	bassin
		X (Km)	Y (Km)	altitude(m)		
11-01-01	Mekerra	183,50	161,65	950	1962	La Macta
11-03-01	Mekerra	194,25	215,60	485	1962	
16-04-02	Tafna	149,65	181,00	700	1972	La Tafna
16-06-01	Chouly	115,00	164,60	666	1941	

Pour chacun des bassins les données climatiques se présentent comme suit :

Le bassin de la Tafna : Le climat du bassin de la Tafna s'apparente à celui de toute la région méditerranéenne de l'Afrique du Nord, il est doux et humide. La température moyenne annuelle est d'environ 15.5°C en été. Les deux mois les plus chauds sont juillet et août, et ont une température moyenne de 26°C (Dekkiche A; 1998).

Le bassin de la Macta : En général, le bassin de la Macta subit l'influence méditerranéenne au Nord et continentale au Sud où le climat est aride et sec avec des hivers froids et des étés chauds. Les précipitations annuelles dans la région varient entre 280 mm dans la partie Sud du bassin et 350 mm dans les montagnes de Beni-Cheugrane. Les années les plus humides peuvent avoir des précipitations 3 à 4 fois supérieures à celle des années les plus sèches. (A. KHALDI, 2005).

Conclusion

Le bassin Tafna et de la Macta, confrontés à des problèmes de gestion et du développement durable de ses ressources en eau. Les niveaux élevés de déficit pluviométrique et des pénuries d'eau ont déjà été expérimentés dans cette région (Maddi et al. 2010) et ils destinent à s'aggraver dans l'avenir (Zeroual et al. 2013). Afin de surveiller les conditions de la sécheresse hydrologique à long terme dans ces bassins, la technique des copules a été appliquée en utilisant l'indice hydrométrique (SDI) qui est le but de chapitre suivant.

Chapitre III : Analyse de la sécheresse hydrologique

Introduction

Après le calcul des valeurs de l'SDI à partir des séries des apports à différentes échelles du temps sur la période de référence (1941-2009), les caractéristiques de la sécheresse sont tirées et adaptées aux copules pour obtenir les périodes de retour de sévérité-durée-intensité. Par la suite l'indice de sécheresse météorologique SPI est calculé pour la même période pour étudier la relation entre les caractéristiques de l'SPI, comme un indice climatologique, et les caractéristiques de l'SDI, comme un indice hydrologique de sécheresse. Afin de vérifier la possibilité de représenter l'indice de la sécheresse hydrologique par l'indice de la sécheresse météorologique.

III.1 Analyse de sécheresse hydrologique par application de copule

III.1.1. Calcul de l'indice hydrométrique 'SDI'

Dans notre travail nous calculerons l'indice SDI selon Madadgar et al, (2013) présenté dans le chapitre I. Dont Les données des apports cumulés seront ajustées sur les distributions Gamma (McKee et al. 1993), exponentielle, Weibull et la distribution Log-Normale (Nalbantis 2008 ; Shukla et Wood, 2008), pour les trois échelles de temps (3, 6, 12 mois), afin de sélectionner la meilleure distribution.

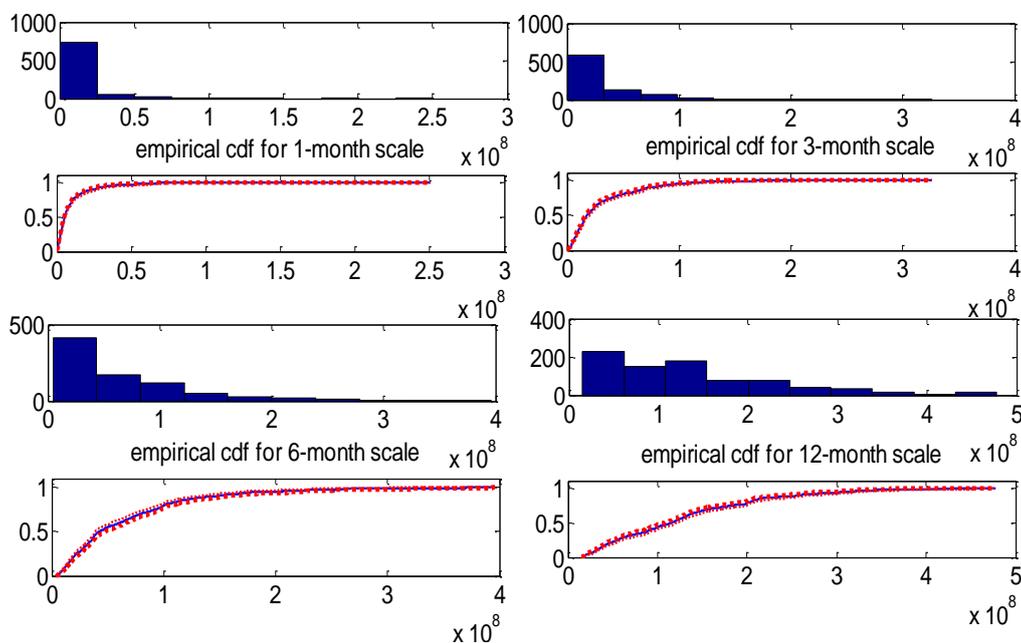


Figure III.1: Appoint cumulés à différentes échelles et leur fonction de distribution cumulative empirique (ecdf) pour La station de Beni Bahdel.

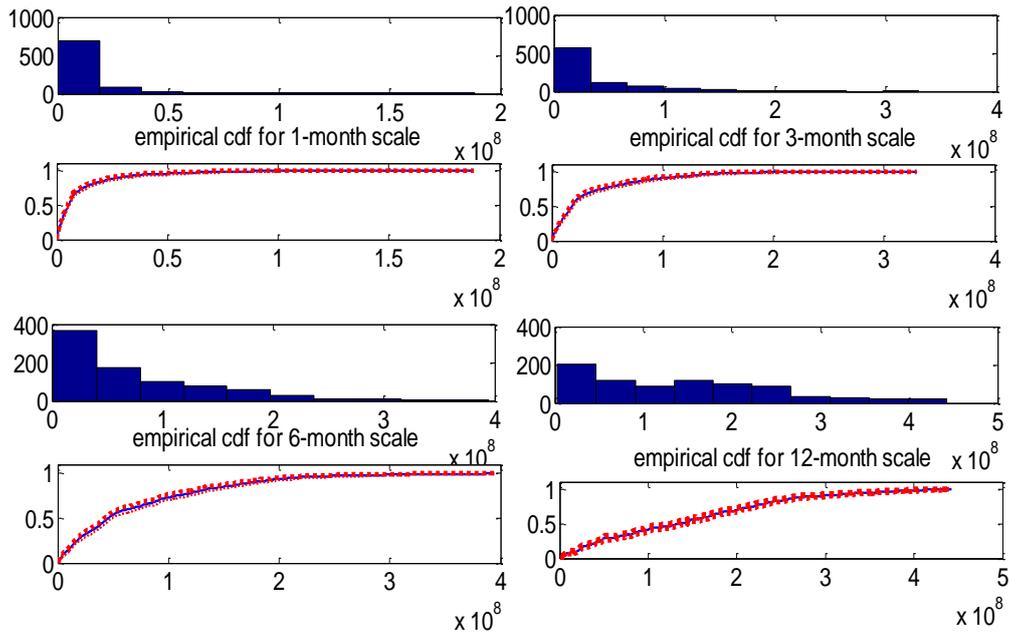


Figure III.2: Apport cumulés à différentes échelles et leur fonction de distribution cumulative empirique (ecdf) pour La station de Chouly.

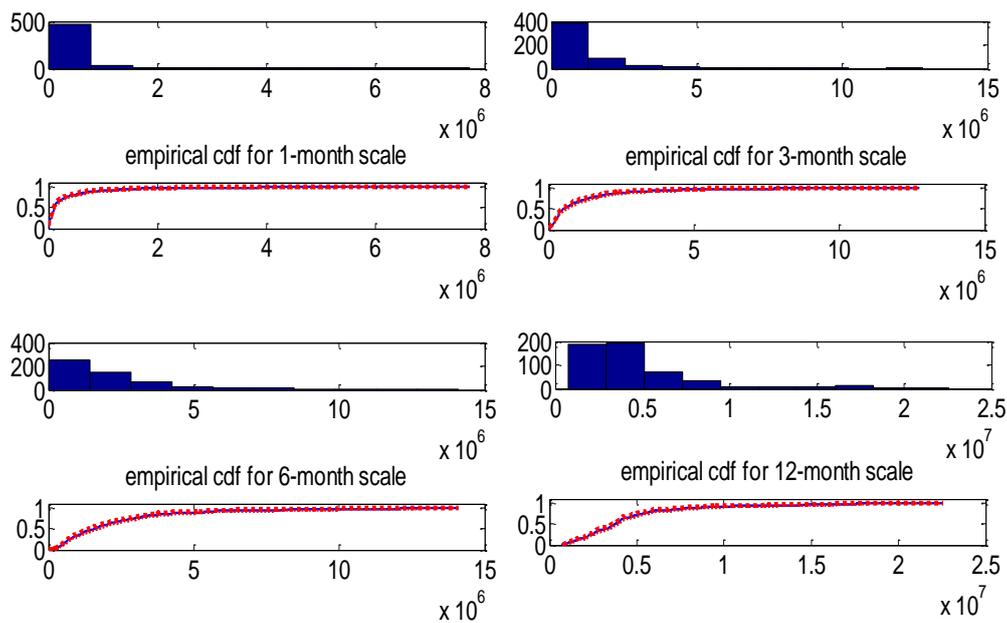


Figure III.3: Apport cumulés à différentes échelles et leur fonction de distribution cumulative empirique (ecdf) pour La station de d'El Haciabia.

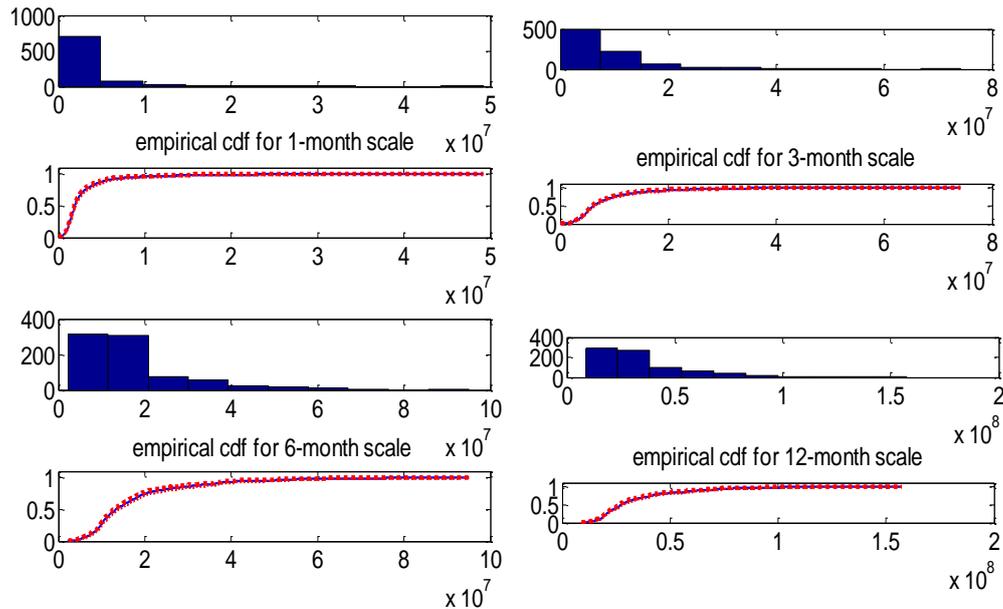


Figure III.4: Apport cumulés à différentes échelles et leur fonction de distribution cumulative empirique (ecdf) pour station de Sidi bel Abbés.

Le tableau III.1 montre la comparaison entre les ajustements des différentes lois sur les données des apports à différentes échelles du temps. Le test de Kolmogorov-Smirnov 'Ks' est utilisé pour tester la qualité de l'ajustement pour les différentes distributions supposées. L'hypothèse nulle du test Ks est que les données observées proviennent de la distribution proposée, et par conséquent, les valeurs p-values élevées (>0.05) sont considérées comme une tendance à accepter l'hypothèse nulle ($\alpha = 5\%$).

Tableau III.1 : Comparaison de l'ajustement des différentes lois sur les données des apports à différentes échelles du temps.

Ks-test	p-value		
	3-mois	6-mois	12-mois
La station de Beni bahdel			
Gamma	2.9361e-07	4.2273e-05	0.0287
Log-normal	0.1717	0.0649	7.7512e-05
Normal	1.1051e-33	1.1157e-19	1.8181e-08
exponentielle	1.1051e-33	1.5289e-05	1.3413e-11
weibull	1.1051e-33	2.3526e-04	0.0772
La station de Chouly			
Gamma	1.2436e-05	0.3350	5.0080e-08
Log-normal	0.0051	7.3953e-05	4.0858e-15
Normal	9.1544e-36	4.4741e-20	6.5371e-07
exponentielle	2.4137e-11	0.1267	4.1203e-10
weibull	0.0012	0.3440	3.2896e-06
La station d'El Haciabia			
Gamma		0.0341	2.2354e-05
Log-normal		0.8429	0.0578
Normal	1.3444e-28	1.0384e-15	1.7602e-16
exponentielle	2.8728e-09	6.4849e-04	1.1606e-16
weibull		0.0202	3.8005e-06
La station de Sidi bel abbés			
Gamma	3.4348e-10	9.9285e-08	2.6724e-12
Log-normal	0.0021	0.0052	1.7331e-06
Normal	5.3204e-28	1.0233e-25	1.2922e-23
exponentielle	6.7638e-29	2.0231e-42	1.8858e-60
weibull	2.0313e-09	1.8810e-10	3.5489e-12

Selon les valeurs de p-values, les données des apports de la station de Beni bahdel s'ajustent mieux à la distribution log-normale à l'échelle (3 et 6 mois) et avec la loi de Weibull à l'échelle de 12 mois. Pour la station de Chouly, les données des apports à l'échelle de 6 mois s'ajustent mieux à la distribution Gamma et à la distribution de Weibull, à l'échelle de (3 et 12) mois ne s'ajustent avec aucune loi (p-values 0.05). Pour la station d'El Haciabia les données des apports à l'échelle (6 et 12 mois) s'adaptent à la distribution log-normale et à l'échelle de 3 mois ne s'ajustent avec aucune loi.

Selon les valeurs de p-values, les données des apports de la station de Sidi bel Abbés à l'échelle (3, 6 et 12 mois) ne s'ajustent avec aucune loi (p-values <0.05).

Les figures suivantes montrent la comparaison entre la fonction de distribution cumulative empirique (ecdf) et la fonction de densité de probabilité (pdf) avec celles des différentes distributions à l'échelle de 3,6 et 12 mois pour les trois stations.

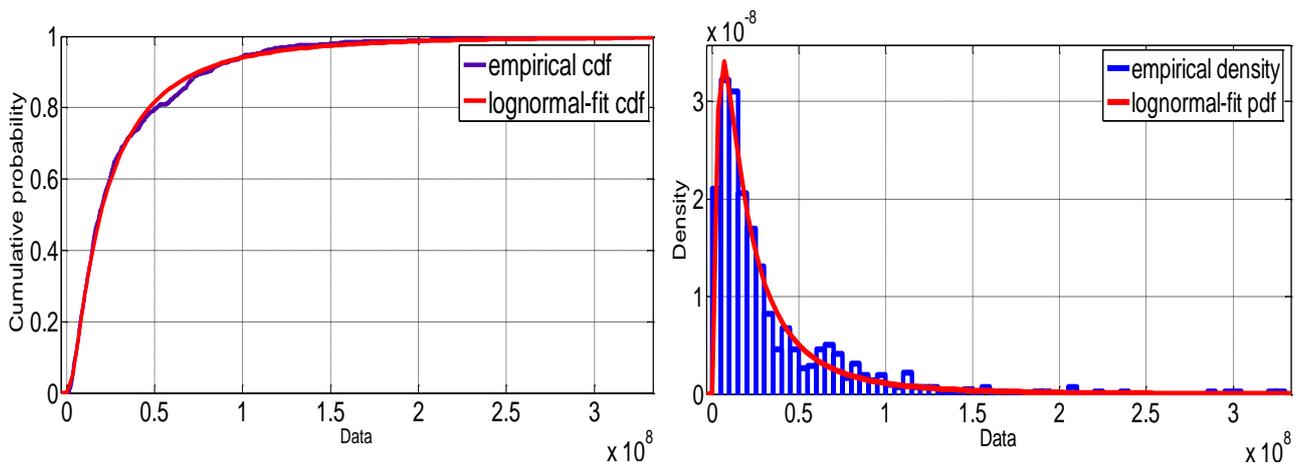


Figure III.5: Comparaison entre ECDF et PDF avec celles de la distribution log-normale à l'échelle de 3 mois pour la station de Beni bahdel.

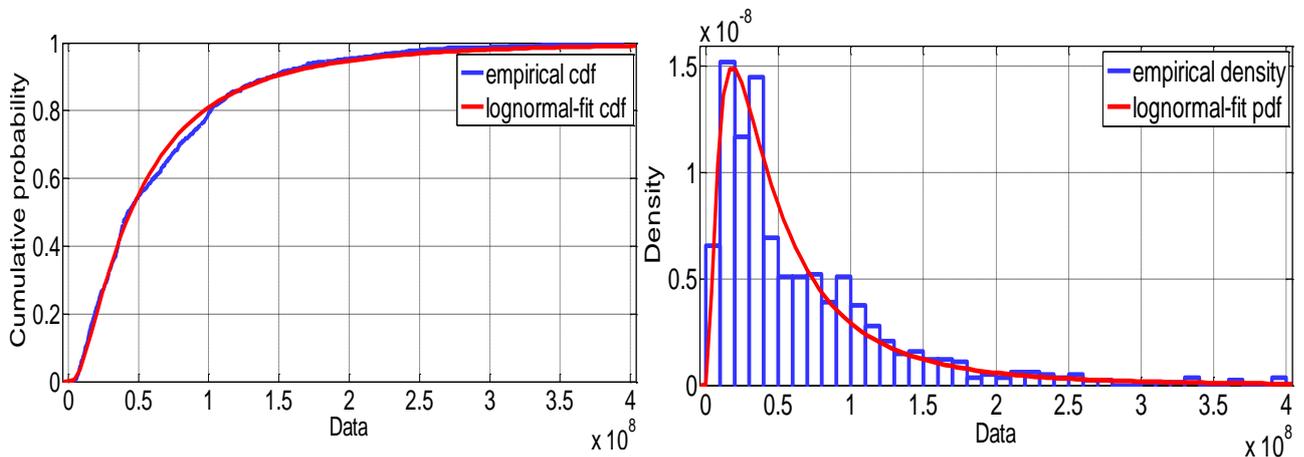


Figure III.6 : Comparaison entre ECDF et PDF avec celles de la distribution log-normale à l'échelle de 6 mois pour la station de Beni bahdel.

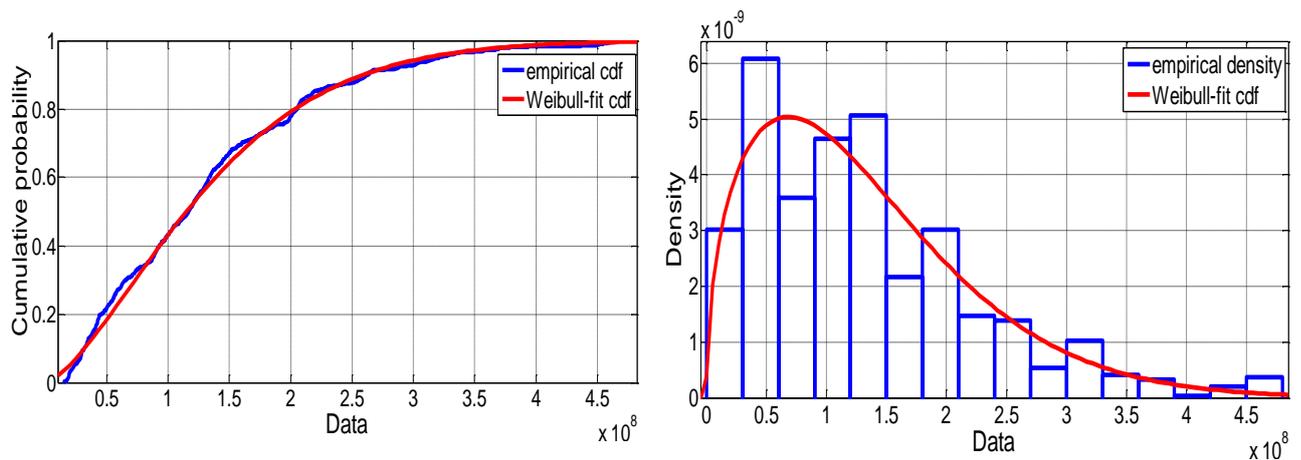


Figure III.7 : Comparaison entre ECDF et PDF avec celles de la distribution Weibull à l'échelle de 12mois pour la station de Beni bahdel.

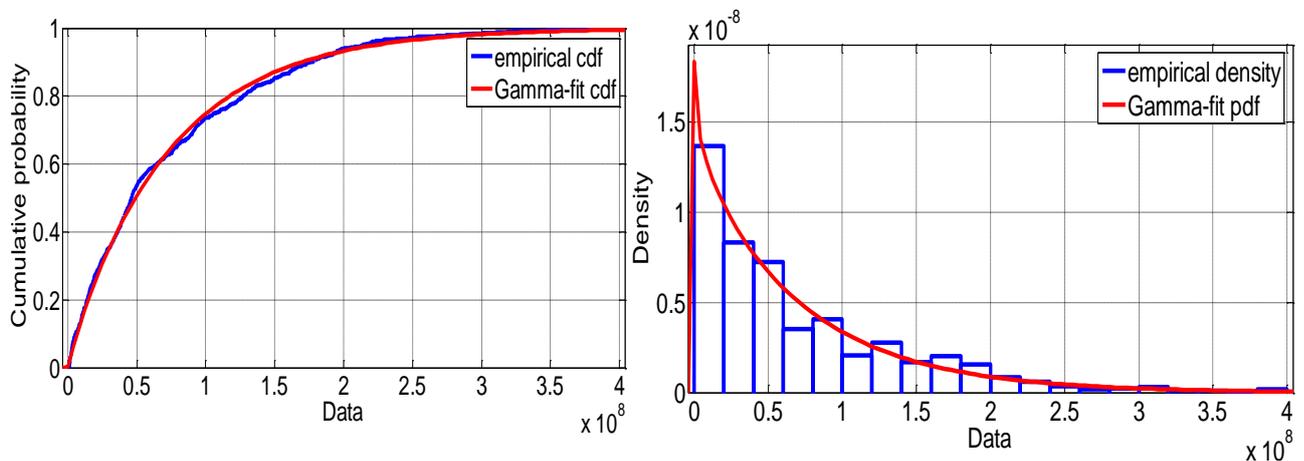


Figure III.8 : Comparaison entre ECDF et PDF avec celles de la distribution Gamma à l'échelle de 6 mois pour la station de Chouly.

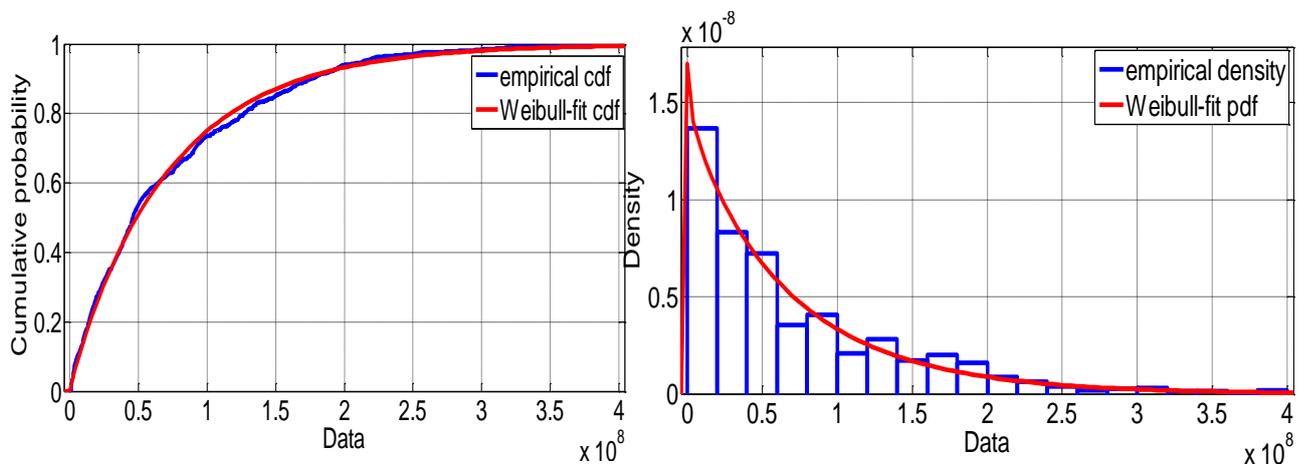


Figure III.9: Comparaison entre ECDF et PDF avec celles de la distribution Weibull à l'échelle de 6 mois pour la station de Chouly.

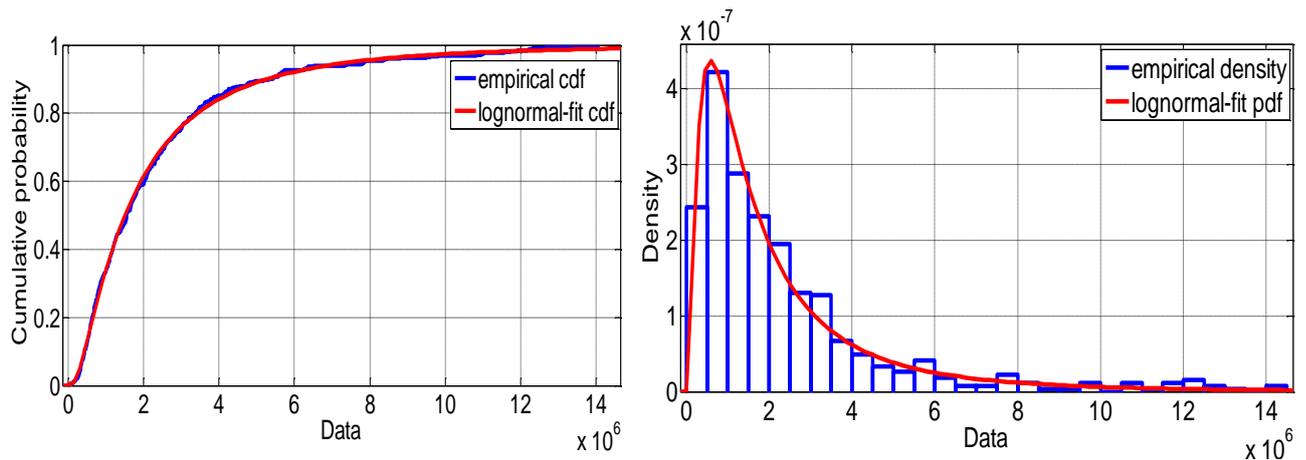


Figure III.10 : Comparaison entre ECDF et PDF avec celles de la distribution log-normale à l'échelle de 6 mois pour la station de d'El Haciabia.

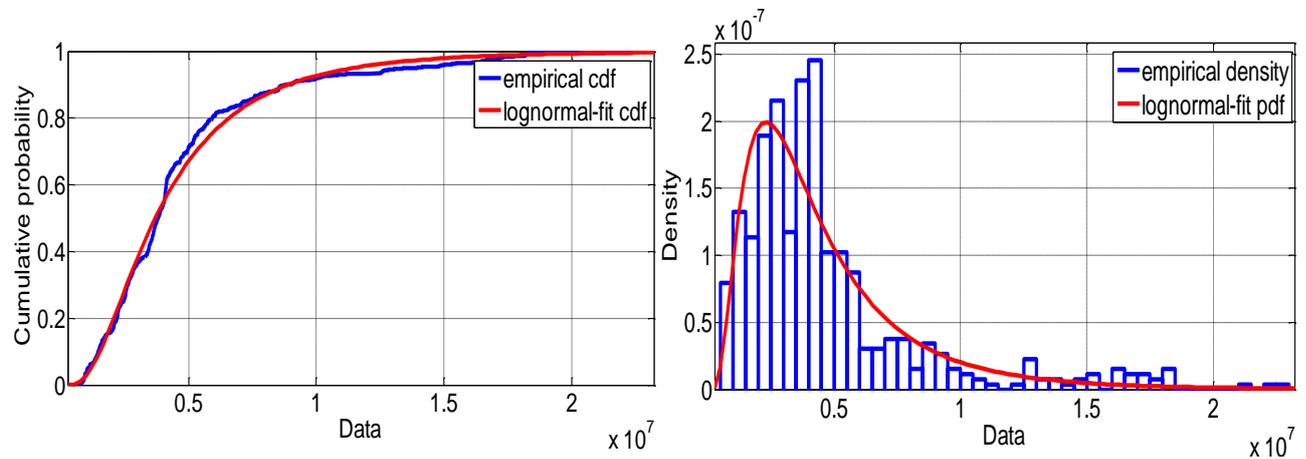


Figure III.11: Comparaison entre ECDF et PDF avec celles de la distribution log-normale à l'échelle de 12 mois pour la station de d'El Haciabia.

Une fois que la distribution appropriée est adaptée aux données des apports cumulés, le calcul des valeurs de l'indice SDI procède selon l'équation. (I.14). Les figures suivantes représentent le diagramme à moustache des valeurs de l'SDI calculées à différents échelles du temps.

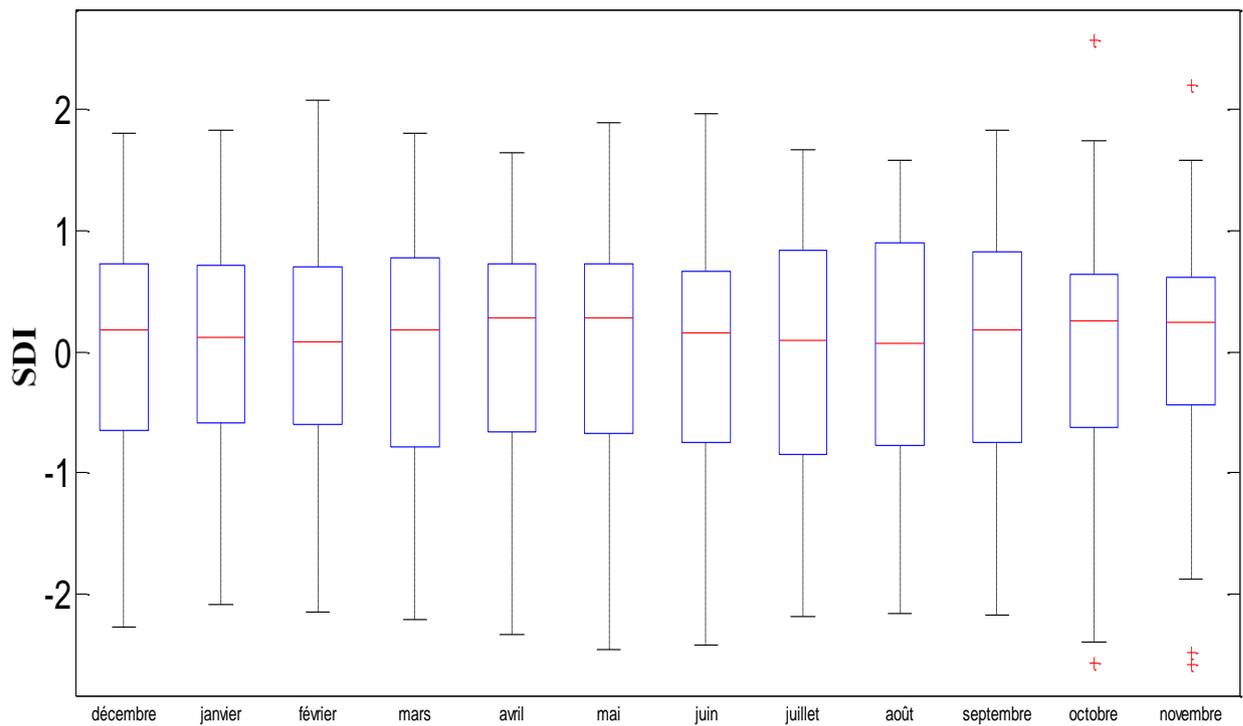


Figure III.12 : Variation mensuelle de l'indice SDI à l'échelle de 3 mois pour la période de temps de 1941-2009 pour la station de Beni bahdel.

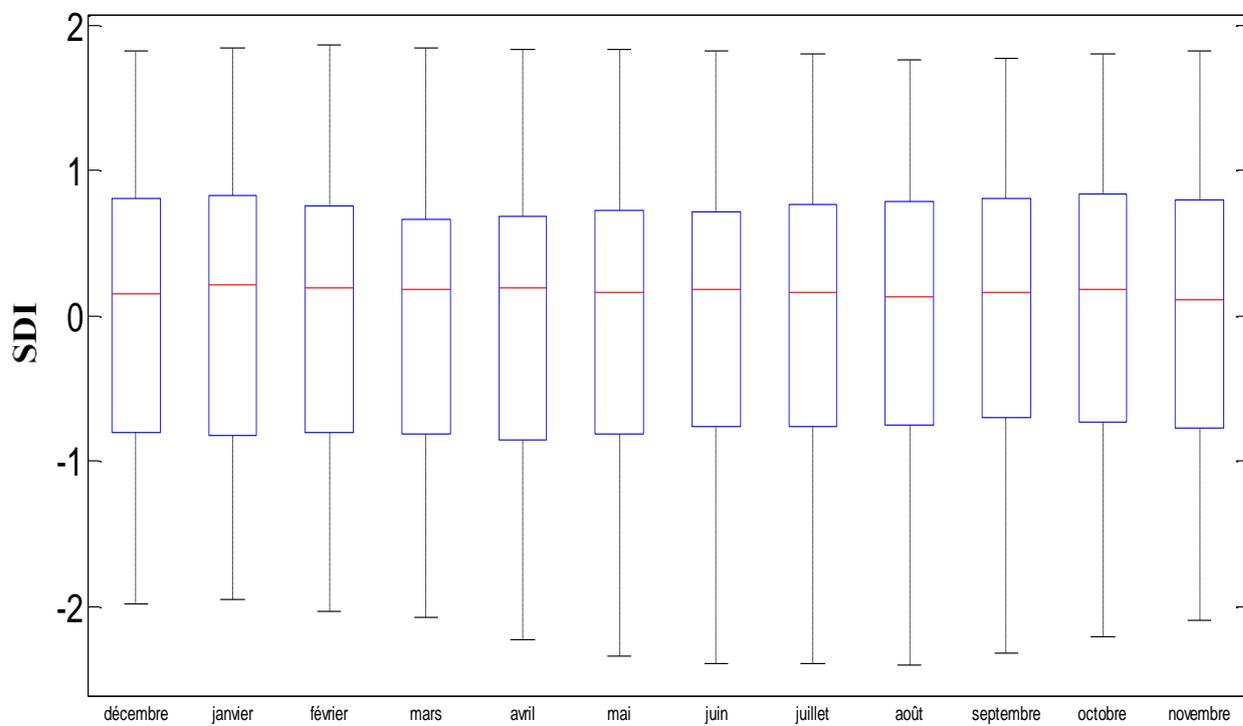


Figure III.13: Variation mensuelle de l'indice SDI à l'échelle de 6 mois pour la période de temps de 1941-2009 pour la station de Beni bahdel.

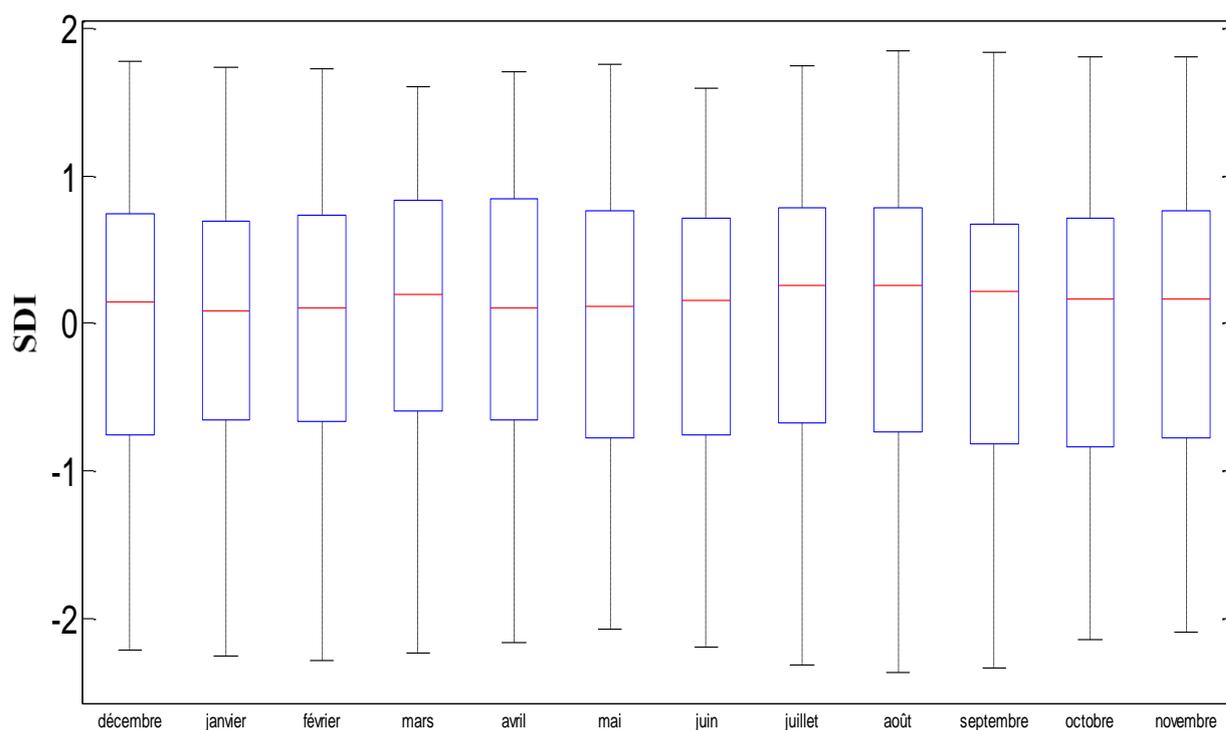


Figure III.14: Variation mensuelle de l'indice SDI à l'échelle de 12 mois pour la période de temps de 1941-2009 pour la station de Beni bahdel.

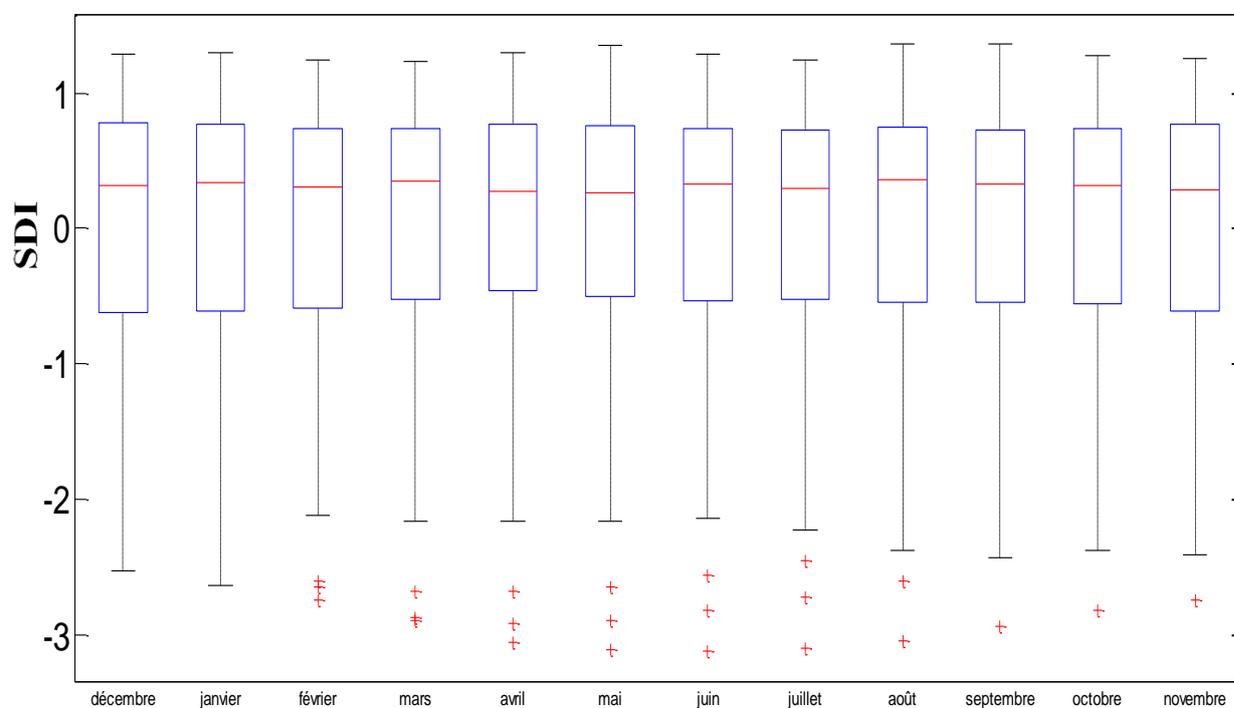


Figure III.15 : Variation mensuelle de l'indice SDI à l'échelle de 6 mois pour la période de temps de 1941-2009 pour la station de Chouly.

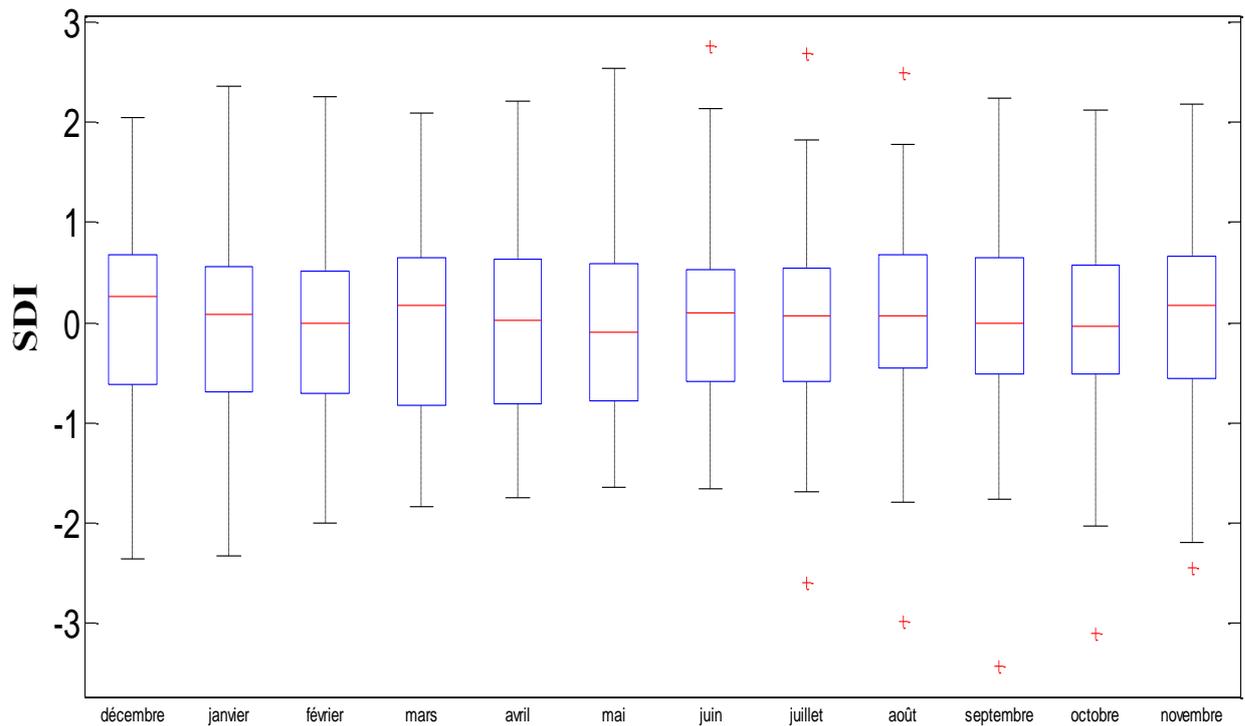


Figure III.16: Variation mensuelle de l'indice SDI à l'échelle de 6 mois pour la période de temps de 1941-2009 pour la station d'El Haciabia.

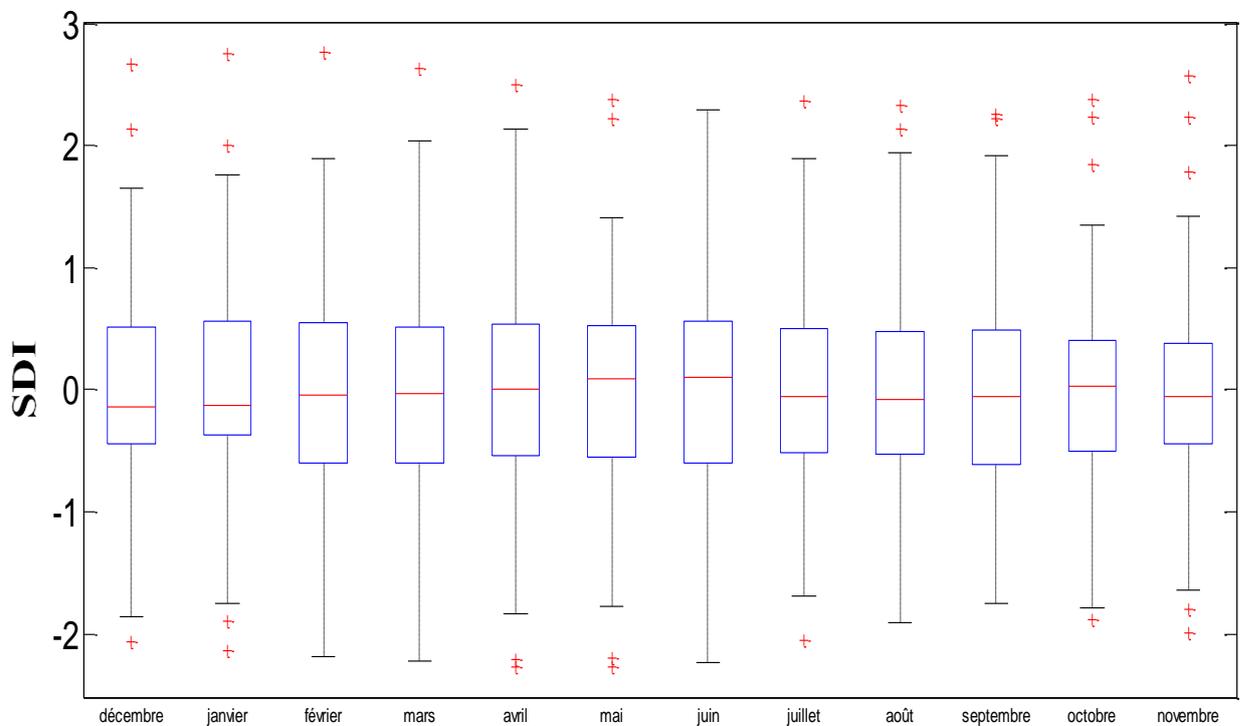


Figure. III. 17: Variation mensuelle de l'indice SDI à l'échelle de 12 mois pour la période de temps de 1941-2009 pour la station d'El Haciabia.

Selon les valeurs mensuelles de l'indice SDI présentées dans les figures ci-dessus nous constatons à l'échelle de 6 mois (figure III.1):

La valeur minimale (SDI=-2.36) a été observé durant le mois d'août dans la station de Beni Bahdel, au mois de mai (SDI=-3.12) dans la station de Chouly et au mois de septembre (SDI=-3.43) dans la station de El hacaiba.

Le mois de février, mai, septembre et octobre sont considérés comme mois secs par rapport à la moyenne de l'SDI et les autres comme humide dans la station d'El Haciabia. Pour les autres stations nous considérons tous les mois humide.

III.1.2.Calculs des caractéristiques de la sécheresse hydrologique

Pour trouver les marginales des variables (la durée, la sévérité et l'intensité) de la sécheresse hydrologique, ces variables devraient être d'abord calculées manuellement à partir des valeurs de l'indice SDI pour les trois stations. Les résultats à l'échelle de 3 et 6 et 12mois sont respectivement présentés dans les tableaux suivants :

Chapitre III : analyse de la sécheresse hydrologique

Tableau III.2 : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 3 mois pour la station de Beni bahdel.

année	Durée (mois)	Sévérité	Intensité	Temps interarrival (mois)
févr.-43	8	3,302	0,413	10
déc.-44	2	0,146	0,073	6
juin-44	6	2,958	0,493	9
mars-45	3	0,767	0,256	8
nov.-45	3	1,255	0,418	13
déc.-47	2	0,550	0,275	62
févr.-52	1	0,055	0,055	36
févr.-55	2	0,203	0,102	27
mai-57	6	2,014	0,336	18
nov.-58	2	0,489	0,245	7
juin-59	2	0,080	0,040	4
oct.-59	5	1,065	0,213	15
janv.-61	3	0,577	0,192	38
mars-64	6	2,266	0,378	12
mars-65	7	1,443	0,206	31
oct.-67	2	0,140	0,070	92
juin-75	2	0,041	0,021	17
nov.-76	1	0,005	0,005	9
août-77	1	0,008	0,008	13
janv.-80	11	3,961	0,360	14
mars-81	23	17,317	0,753	34
janv.-84	14	14,524	1,037	17
juin-85	8	4,563	0,570	12
juin-86	4	1,226	0,307	8
févr.-87	38	51,871	1,365	42
août-90	10	9,600	0,960	14
oct.-91	31	39,919	1,288	33
juil.-94	8	4,759	0,595	16
nov.-95	23	39,311	1,709	25
déc.-98	23	30,178	1,312	24
déc.-00	11	8,012	0,728	14
févr.-01	8	8,286	1,036	13
mars-02	7	3,988	0,570	10
janv.-03	59	74,948	1,270	73
févr.-09	3	0,225	0,075	

Chapitre III : analyse de la sécheresse hydrologique

Tableau III.3 : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pour la station de Beni bahdel.

année	Durée (mois)	Sévérité	Intensité	Temps interarrival (mois)
mars-43	12	4,966	0,414	17
août-44	10	1,785	0,179	
août-57	5	1,038	0,208	156
nov.-59	5	0,695	0,139	27
mai-64	8	2,683	0,335	54
mai-65	6	1,360	0,227	12
févr.-80	39	26,384	0,677	177
mars-84	15	14,600	0,973	49
sept.-85	7	2,027	0,290	18
oct.-86	45	53,141	1,181	13
déc.-91	9	6,856	0,762	50
janv.-92	31	33,731	1,088	13
nov.-94	7	2,479	0,354	34
janv.-96	73	91,460	1,253	14
mai-02	69	89,469	1,297	76
juin-09	1	0,008	0,008	85

Tableau III.4: Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 12 mois pour la station de Beni bahdel.

année	Durée (mois)	Sévérité	Intensité	Temps interarrival (mois)
juil.-43	27	7,623	0,282	257
déc.-65	15	3,711	0,247	
nov.-77	1	0,002	0,002	155
sept.-80	38	28,764	0,757	34
juil.-84	21	12,424	0,592	46
avr.-87	45	50,903	1,131	33
juil.-91	47	29,932	0,637	51
mai-96	148	200,718	1,356	58

Chapitre III : analyse de la sécheresse hydrologique

Tableau III.5 : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pour la station de Chouly.

année	Durée (mois)	Sévérité	Intensité	Temps interarrival (mois)
mai-43	8	1,820	0,228	265
juin-65	4	0,420	0,105	
juin-66	4	0,427	0,107	12
févr.-70	4	0,226	0,057	44
mars-81	8	1,400	0,175	133
juin-82	34	12,715	0,374	15
déc.-86	3	0,509	0,170	42
janv.-87	40	28,282	0,707	13
janv.-91	8	3,569	0,446	48
févr.-92	29	16,783	0,579	13
oct.-94	6	1,946	0,324	32
févr.-96	147	236,908	1,612	16
août-08	16	16,389	1,024	150

Tableau III.6: Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pour la station d'El Haciabia.

année	Durée (mois)	Sévérité	Intensité	Temps interarrival (mois)
mai-62	13	6,418	0,494	21
févr.-64	18	22,940	1,274	
févr.-66	11	4,570	0,415	24
mai-68	22	20,809	0,946	27
févr.-71	9	8,863	0,985	33
oct.-72	1	0,037	0,037	20
sept.-73	9	4,606	0,512	11
janv.-75	5	1,795	0,359	16
juil.-77	7	3,460	0,494	30
août-78	10	5,743	0,574	13
janv.-80	11	2,799	0,254	17
févr.-82	7	6,438	0,920	25
août-83	15	18,034	1,202	18
sept.-85	14	3,875	0,277	25
déc.-88	9	7,356	0,817	27
oct.-88	8	4,486	0,561	10

Chapitre III : analyse de la sécheresse hydrologique

Tableau III.6 (suite et fin): Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pour la station d'El Haciabia.

année	Durée (mois)	Sévérité	Intensité	Temps interarrival (mois)
janv.-90	3	0,500	0,167	15
mai-91	41	44,761	1,092	16
juil.-96	5	0,802	0,160	62
mai-97	6	3,630	0,605	10
avr.-00	10	18,653	1,865	35
févr.-03	6	1,634	0,272	34
sept.-04	10	10,967	1,097	19

Tableau III.7: Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 12 mois pour la station d'El Haciabia.

année	Durée (mois)	Sévérité	Intensité	Temps interarrival (mois)
nov.-62	55	42,886	0,780	69
août-68	26	24,440	0,940	
juil.-71	7	1,408	0,201	35
nov.-73	29	6,858	0,236	28
févr.-78	6	0,481	0,080	51
nov.-78	30	10,642	0,355	9
déc.-84	37	26,510	0,716	61
juin-88	18	10,812	0,601	54
nov.-91	39	59,660	1,530	41
août-97	2	0,104	0,052	69
juil.-00	9	1,549	0,172	35
déc.-05	12	6,818	0,568	53

Sur la base de l'analyse des quatre caractéristiques de la sécheresse aux différentes échelles du temps au cours de 1940-2009 pour les trois stations :

À l'échelle du trois mois le sous bassin de Beni bahdel avait connu 35 épisodes de sécheresse, avec une durée maximale de 59 mois, sévérité maximale de 74.95 et une intensité maximale de 1.71, et 16 épisodes de sécheresse, avec une durée maximale de 73 mois, sévérité maximale de 91.46 et une intensité maximale de 1.29 à l'échelle du six mois, à l'échelle de 12 mois elle avait connu 8 épisodes de sécheresse, avec une durée maximale de 148 mois, sévérité maximale de 200.71 et une intensité maximale de 1.36.

Pour la station de Chouly, à l'échelle de 6 mois, on recense 13 événements secs pour une durée maximale de 147 mois, sévérité minimale de 236 et une intensité maximale de 1.61.

À l'échelle du 6 mois la station d'El Haciabia avait connu 23 épisodes de sécheresse, avec une durée maximale de 41 mois, sévérité maximale de 44.76 et une intensité maximale de 1.86 et 12 épisodes de sécheresse, avec une durée maximale de 55 mois, sévérité maximale de 59.66 et une intensité maximale de 1.52 à l'échelle du 12 mois.

Donc au cours des 69 années étudiés, L'analyse de la durée des épisodes de sécheresse montre que celle-ci varie d'une échelle de temps à une autre et d'une station a une autre, à l'échelle du six mois, la station d'El Haciabia a connu la plus longue épisode de sécheresse avec 23 de séquences sèches consécutives. Cependant, la station de Chouly contient la plus longue durée de sécheresse.

III.1.3 Ajustement des caractéristiques de la sécheresse hydrologique

Les quatre caractéristiques de la sécheresse (durée, sévérité, temps interarrival et l'intensité) sont mise à l'épreuve sous cinq distributions à savoir : la distribution exponentielle, Log-normal, Weibull et la distribution gamma. Le test de Kolmogorov-Smirnov (ks) est utilisé pour déterminer et vérifier la fiabilité de l'ajustement de ces caractéristiques avec les quatre distributions proposées.

Les résultats des paramètres de l'ajustement avec les quatre lois et le p-value de test KS pour les trois stations sont présentés dans les tableaux suivants :

Chapitre III : analyse de la sécheresse hydrologique

Tableau III.8: Résultats de l'ajustement des caractéristiques de la sécheresse à l'échelle de 3 mois pour la station de Beni bahdel.

Distribution	Paramètres de la loi				P-value	Ks	h
La durée							
Exponentiel	Mu	9.85714			0.3097	0.1584	0
Log normal	Mu	1.71772	sigma	1.06888	0.6631	0.1188	0
Gamma	scale	1.01057	shape	9.75409	0.3018	0.1596	0
Weibull	scale	9.55988	shape	0.944001	0.4248	0.1437	0
Normal	Mu	9.85714	sigma	12.3435	0.0082	0.2741	1
Sévérité							
Exponentiel	Mu	9.43008			3.3687e-04	0.3438	1
Log normal	Mu	0.39113	sigma	2.41922	0.9819	0.0746	0
Gamma	scale	0.361096	shape	26.1151	0.5073	0.1346	0
Weibull	scale	4.61176	shape	0.493714	0.9770	0.0764	0
Normal	Mu	9.43008	sigma	17.2291	0.0010	0.3211	1
Intensité							
Exponentiel	Mu	0.506652			0.9102	0.0908	0
Log normal	Mu	-1.32659	sigma	1.44157	0.3378	0.1546	0
Gamma	scale	0.903602	shape	0.560703	0.9646	0.0802	0
Weibull	scale	0.499475	shape	0.965419	0.9644	0.0802	0
Normal	Mu	0.506652	sigma	0.466202	0.2076	0.1751	0
Temps interarrival							
Exponentiel	Mu	0.1740			2.0789e-31	1.0000	1
Log normal	Mu	2.85146	sigma	0.728156	0.5922	0.1276	0
Gamma	scale	1.95967	shape	11.6466	0.2103	0.1771	0
Weibull	scale	25.1166	shape	1.33631	0.2268	0.1740	0
Normal	Mu	22.8235	sigma	19.789	2.9700e-09	0.5338	1

Selon les p-valus présentés dans le tableau III.8, la distribution Log normal est la plus adaptée pour la durée, la sévérité et le temps interarrival et la distribution gamma pour l'intensité.

Chapitre III : analyse de la sécheresse hydrologique

Tableau III.9: Résultats de l'ajustement des caractéristiques de la sécheresse à l'échelle de 6 mois pour la station de Beni bahdel.

Distribution	Paramètres de la loi				P-value	Ks	h
La durée							
Exponentiel	Mu	21.375			0.5126	0.1954	0
Log normal	Mu	2.50647	sigma	1.13867	0.7958	0.1529	0
Gamma	scale	1.03452	shape	20.6617	0.4757	0.2012	0
Weibull	scale	21.1945	shape	0.982241	0.5515	0.1894	0
Normal	Mu	21.375	sigma	23.2175	0.0981	0.2957	0
Sévérité							
Exponentiel	Mu	20.7927			0.0142	0.3789	1
Log normal	Mu	1.51808	sigma	2.34519	0.8216	0.1487	0
Gamma	scale	0.429059	shape	48.4612	0.6198	0.1793	0
Weibull	scale	12.8274	shape	0.558856	0.7571	0.1589	0
Normal	Mu	20.7927	sigma	31.0043	0.0289	0.3508	1
Intensité							
Exponentiel	Mu	0.586428			0.8221	0.1486	0
Log normal	Mu	-0.988386	sigma	1.27682	0.7226	0.1641	0
Gamma	scale	1.23981	shape	0.472997	0.9173	0.1301	0
Weibull	scale	0.62233	shape	1.22353	0.8959	0.1349	0
Normal	Mu	0.586428	sigma	0.443567	0.4000	0.2139	0
Temps interarrival							
Exponentiel	Mu	53			0.5058	0.2026	0
Log normal	Mu	3.57279	sigma	0.912299	0.6997	0.1728	0
Gamma	scale	1.40114	shape	37.8262	0.6323	0.1830	0
Weibull	scale	56.0487	shape	1.15202	0.7616	0.1632	0
Normal	Mu	53	sigma	51.7715	0.3732	0.2256	0

Selon les p-valus présentés dans le tableau III.9, la distribution la plus adaptée pour la durée, la sévérité est Log normal, la distribution gamma pour l'intensité, et la distribution Weibull pour le temps interarrival.

Chapitre III : analyse de la sécheresse hydrologique

Tableau III.10: Résultats de l'ajustement des caractéristiques de la sécheresse à l'échelle de 12 mois pour la station de Beni bahdel.

Distribution	Paramètres de la loi				P-value	Ks	h
La durée							
Exponentiel	Mu	42.75			0.8142	0.2081	0
Log normal	Mu	3.1675	sigma	1.45008	0.6102	0.2507	0
Gamma	scale	0.983776	shape	43.455	0.8173	0.2073	0
Weibull	scale	42.8019	shape	1.00298	0.8126	0.2084	0
Normal	Mu	42.75	sigma	45.2888	0.2571	0.3376	0
Sévérité							
Exponentiel	Mu	41.7596			0.6487	0.2427	0
Log normal	Mu	1.95132	sigma	3.52699	0.3782	0.3030	0
Gamma	scale	0.373651	shape	111.761	0.8960	0.1873	0
Weibull	scale	25.9467	shape	0.514006	0.9106	0.1829	0
Normal	Mu	41.7596	sigma	66.4157	0.3124	0.320	0
Intensité							
Exponentiel	Mu	0.625558			0.6783	0.2366	0
Log normal	Mu	-1.21618	sigma	2.11581	0.2470	0.3410	0
Gamma	scale	0.795071	shape	0.786795	0.5920	0.2545	0
Weibull	scale	0.622558	shape	0.982687	0.6680	0.2387	0
Normal	Mu	0.625558	sigma	0.456345	0.9822	0.1490	0
Temps interarrival							
Exponentiel	Mu	90.5714			0.4448	0.3054	0
Log normal	Mu	4.20518	sigma	0.786254	0.5188	0.2873	0
Gamma	scale	1.8102	shape	50.034	0.3439	0.3324	0
Weibull	scale	99.0022	shape	1.29031	0.3890	0.3198	0
Normal	Mu	90.5714	sigma	84.6342	0.2446	0.3641	0

Selon les p-values présentés dans le tableau III.10, la distribution la plus adaptée pour la durée est l'exponentiel, la distribution Weibull pour la sévérité, la distribution Normal pour l'intensité, et Log normal pour le temps interarrival.

Chapitre III : analyse de la sécheresse hydrologique

Tableau III.11: Résultats de l'ajustement des caractéristiques de la sécheresse à l'échelle de 6 mois pour la station de Chouly.

Distribution	Paramètres de la loi				P-value	Ks	h
La durée							
Exponentiel	Mu	23.9231			0.0901	0.3311	0
Log normal	Mu	2.43332	sigma	1.16028	0.4055	0.2352	0
Gamma	scale	0.800324	shape	29.8917	0.2071	0.2824	0
Weibull	scale	20.6793	shape	0.811659	0.3568	0.2450	0
Normal	Mu	23.9231	sigma	39.0586	0.1664	0.2961	0
Sévérité							
Exponentiel	Mu	24.7227			0.0027	0.4810	1
Log normal	Mu	1.228	sigma	2.04896	0.9051	0.1465	0
Gamma	scale	0.341092	shape	72.481	0.4936	0.2190	0
Weibull	scale	9.52506	shape	0.485841	0.7985	0.1683	0
Normal	Mu	24.7227	sigma	64.3648	0.0212	0.4010	1
Intensité							
Exponentiel	Mu	0.454363			0.9615	0.1296	0
Log normal	Mu	-1.20532	sigma	0.972845	0.9990	0.0942	0
Gamma	scale	1.34283	shape	0.338362	0.9699	0.1259	0
Weibull	scale	0.478286	shape	1.13961	0.9899	0.1128	0
Normal	Mu	0.454363	sigma	0.445201	0.6085	0.1997	0
Temps interarrival							
Exponentiel	Mu	65.25			0.4841	0.2292	0
Log normal	Mu	3.61958	sigma	1.06942	0.6384	0.2025	0
Gamma	scale	1.02972	shape	63.3665	0.4641	0.2329	0
Weibull	scale	63.7771	shape	0.956801	0.5542	0.2168	0
Normal	Mu	65.25	sigma	78.2271	0.1016	0.3373	0

Selon les p-valus présentés dans le tableau III.11, la distribution la plus adaptée pour les quatre caractéristiques de la sécheresse est Log normal.

Chapitre III : analyse de la sécheresse hydrologique

Tableau III.12: Résultats de l'ajustement des caractéristiques de la sécheresse à l'échelle de 6 mois pour la station d'El Haciabia.

Distribution	Paramètres de la loi				P-value	Ks	h
La durée							
Exponentiel	Mu	10.8696			0.0416	0.2818	1
Log normal	Mu	2.16411	sigma	0.721532	0.7541	0.1341	0
Gamma	scale	2.40724	shape	4.51536	0.6558	0.1463	0
Weibull	scale	12.1397	shape	1.52245	0.5292	0.1620	0
Normal	Mu	10.8696	sigma	8.09211	0.1407	0.2327	0
Sévérité							
Exponentiel	Mu	8.83362			0.7496	0.1346	0
Log normal	Mu	1.48489	sigma	1.49466	0.4371	0.1744	0
Gamma	scale	0.848996	shape	10.4048	0.8953	0.1137	0
Weibull	scale	8.37887	shape	0.897551	0.9324	0.1064	0
Normal	Mu	8.83362	sigma	10.2841	0.0879	0.2528	0
Intensité							
Exponentiel	Mu	0.668676			0.3584	0.1861	0
Log normal	Mu	-0.679222	sigma	0.873024	0.7070	0.1400	0
Gamma	scale	1.95683	shape	0.341714	0.9276	0.1075	0
Weibull	scale	0.742166	shape	1.54443	0.9598	0.0995	0
Normal	Mu	0.668676	sigma	0.445677	0.5020	0.1656	0
Temps interarrival							
Exponentiel	Mu	23.0909			0.0062	0.3515	1
Log normal	Mu	3.03834	sigma	0.452072	0.9963	0.0809	0
Gamma	scale	5.10661	shape	4.52177	0.9973	0.0791	0
Weibull	scale	26.1591	shape	2.15828	0.8847	0.1179	0
Normal	Mu	23.0909	sigma	11.5672	0.7272	0.1404	0

Selon les p-valus présentés dans le tableau III.12, la distribution la plus adaptée pour la durée et le temps interarrival est gamma, et la distribution Weibull pour l'intensité et la sévérité.

Chapitre III : analyse de la sécheresse hydrologique

Tableau III.13: Résultats de l'ajustement des caractéristiques de la sécheresse à l'échelle de 12 mois pour la station d'El Haciabia.

Distribution	Paramètres de la loi				P-value	Ks	h
La durée							
Exponentiel	Mu	22.5			0.7407	0.1851	0
Log normal	Mu	2.77598	sigma	0.972476	0.7126	0.1900	0
Gamma	scale	1.62801	shape	13.8206	0.8043	0.1736	0
Weibull	scale	24.6496	shape	1.40446	0.8731	0.1597	0
Normal	Mu	22.5	sigma	16.2229	0.8809	0.1579	0
Sévérité							
Exponentiel	Mu	16.0142			0.4213	0.2411	0
Log normal	Mu	1.9236	sigma	1.72496	0.6117	0.2070	0
Gamma	scale	0.590655	shape	27.1126	0.9693	0.1310	0
Weibull	scale	13.1067	shape	0.709069	0.9583	0.1359	0
Normal	Mu	16.0142	sigma	18.9485	0.2716	0.2748	0
Intensité							
Exponentiel	Mu	0.519312			0.8472	0.1652	0
Log normal	Mu	-1.05102	sigma	1.0266	0.7588	0.1819	0
Gamma	scale	1.40674	shape	0.369159	0.9061	0.1519	0
Weibull	scale	0.556996	shape	1.24063	0.9437	0.1412	0
Normal	Mu	0.519312	sigma	0.432075	0.8702	0.1603	0
Temps interarrival							
Exponentiel	Mu	45.9091			0.0796	0.3657	0
Log normal	Mu	3.71126	sigma	0.581714	0.6300	0.2125	0
Gamma	scale	4.49268	shape	10.2186	0.7300	0.1948	0
Weibull	scale	51.2793	shape	2.90496	0.8486	0.1717	0
Normal	Mu	45.9091	sigma	18.3872	0.9202	0.1545	0

Selon les p-values présentés dans le tableau III.13, la distribution la plus adaptée pour la durée et le temps inter-arrival est normal, la distribution Weibull pour l'intensité et la distribution gamma pour la sévérité.

Une fois que les distributions des variables de sécheresse sont caractérisées, les copules bi-variées et tri-variées en particulier la copule de Gumbel (de la famille archimédienne) et t-copule (de la famille Elliptique) sont adaptées pour évaluer la période de retour des sécheresses conjointement et conditionnelle dans la zone d'étude.

Pour appliquer la copule de Gumbel, la corrélation deux à deux entre les trois variables de la sécheresse est calculée afin de choisir la plus élevée. Pour cela le coefficient de corrélation

Chapitre III : analyse de la sécheresse hydrologique

de Pearson et la corrélation de tau de Kendall ont été appliqués aux variables deux à deux (Durée –Sévérité, Durée–Intensité et Sévérité–Intensité).

III.1.3. Application de la copule bi-varie tri-variée sur les caractéristiques de la sécheresse

La copule tri-variée est exprimée comme suit :

$$C_1[C_2(u_1, u_2), u_3] = \exp \left\{ -[(-\ln u_1)^{\theta_2} + (-\ln u_2)^{\theta_2}]^{\frac{\theta_1}{\theta_2}} + (-\ln u_3)^{\theta_1} \right\}^{\frac{1}{\theta_1}} \quad (\text{III.1})$$

Etant donné que θ_2 représente la dépendance existant entre la paire la plus corrélés (u_1, u_2), en premier temps la corrélation entre les trois paires des trois caractéristiques de la sécheresse doivent être calculées.

Le tableau III.14 résume les valeurs de coefficient de corrélation de Pearson et le Tau de Kendall entre toutes les paires possibles des trois caractéristiques de la sécheresse.

Tableau III.14: Corrélation des caractéristiques de la sécheresse de la station de Beni bahdel.

Pearson		Kendall's Tau
3 mois		
Durée – Sévérité	0,979**	0,903**
Durée – Intensité	0,794**	0,788**
Sévérité –Intensité	0,821**	0,889**
6 mois		
Durée – Sévérité	0,985**	0,891**
Durée – Intensité	0,855**	0,790**
Sévérité –Intensité	0,861**	0,900
12 mois		
Durée – Sévérité	0,985**	0,857**
Durée – Intensité	0,830*	0,786**
Sévérité –Intensité	0,811*	0,929**

Chapitre III : analyse de la sécheresse hydrologique

Tableau III.15: Corrélation des caractéristiques de la sécheresse pour la station de Chouly.

	Pearson	Kendall's Tau
6 mois		
Durée – Sévérité	0,979**	0,774**
Durée – Intensité	0,863**	0,694**
Sévérité –Intensité	0,844**	0,923**

Tableau III.16: Corrélation des caractéristiques de la sécheresse pour la station d'El Hacia.

	Pearson	Kendall's Tau
6 mois		
Durée – Sévérité	0,917**	0,649**
Durée – Intensité	0,454*	0,423**
Sévérité –Intensité	0,707**	0,779**
12 mois		
Durée – Sévérité	0,828**	0,848**
Durée – Intensité	0,674*	0,697**
Sévérité –Intensité	0,924**	0,848

* : La corrélation est significative au niveau 0,01.

Les résultats dans les tableaux en dessus mènent également à la conclusion que la sévérité et la durée ont la plus forte corrélation, la méthode de détermination des paramètres, illustré dans le chapitre 1, est utilisée pour estimer les paramètres θ_1 et θ_2 dans la copule tri-variée de Gumbel, ainsi que pour estimer la matrice de la corrélation et le degré de liberté pour le t copule. Les paramètres estimés de tri-variée de Gumbel et t-copule sont résumés dans le tableau III.18.

Tableau III.17: Estimation des paramètres de la copule tri-variée de Gumbel et t-copule.

	Paramètre estimé		
La station de Beni Bahdel			
	3 mois	6 mois	12 mois
Gumbel copula	$\theta_1 = 4,69 ; \theta_2 = 3,99$	$\theta_1 = 5,45 ; \theta_2 = 4,31$	$\theta_1 = 5,29 ; \theta_2 = 2,42$
t-copula	$\begin{bmatrix} 1 & 0.95 & 0.91 \\ 0.95 & 1 & 0.98 \\ 0.91 & 0.98 & 1 \end{bmatrix}$ $nu = 3.4517e+07$	$\begin{bmatrix} 1 & 0.97 & 0.92 \\ 0.97 & 1 & 0.98 \\ 0.92 & 0.98 & 1 \end{bmatrix}$ $nu = 3.4517e+07$	$\begin{bmatrix} 1 & 0.97 & 0.79 \\ 0.97 & 1 & 0.78 \\ 0.79 & 0.78 & 1 \end{bmatrix}$ $nu = 3.0013e+07$
La station de Chouly			
	6 mois		
Gumbel copula	$\theta_1 = 5,52 ; \theta_2 = 1,58$		
t-copula	$\begin{bmatrix} 1 & 0.98 & 0.66 \\ 0.98 & 1 & 0.74 \\ 0.66 & 0.74 & 1 \end{bmatrix}$ $nu = 3.7354e+07$		
La station d'El Haciabia			
	6 mois	12 mois	
Gumbel copula	$\theta_1 = 3,42 ; \theta_2 = 1,98$	$\theta_1 = 3,15 ; \theta_2 = 2,23$	
t-copula	$\begin{bmatrix} 1 & 0.90 & 0.63 \\ 0.90 & 1 & 0.88 \\ 0.63 & 0.88 & 1 \end{bmatrix}$ $nu = 4.9651$	$\begin{bmatrix} 1 & 0.87 & 0.63 \\ 0.87 & 1 & 0.92 \\ 0.63 & 0.92 & 1 \end{bmatrix}$ $nu = 3.4410e+07$	

III.1.4. Périodes de retour

La période de retour de certains événements de sécheresse s'associe d'habitude avec une probabilité de dépassement d'une valeur fixée. Contrairement à l'analyse fréquentielle des crues, un événement de sécheresse peut arriver plusieurs fois en un an et aussi se prolonger plus qu'une année, alors, le temps inter-arrival est une caractéristique de sécheresse nécessaire à inclure pour estimer les périodes de retour de sécheresse. Le temps inter-arrival est défini comme le temps entre le début d'une sécheresse et le début de la suivante :

III.1.4. 1.Période de retour uni variable

Les périodes de retour peuvent être séparément définies pour les trois variables (durée, sévérité et intensité) (Shiau et 2001 Shen) comme suit :

$$T_s = \frac{E(L)}{1-F_S(s)} \quad ; \quad T_D = \frac{E(L)}{1-F_D(d)} \quad ; \quad T_I = \frac{E(L)}{1-F_I(i)}$$

Où

- T_s est la période de retour des sécheresses avec sévérité supérieure ou égale à certaines valeurs ;
- T_D est la période de retour des sécheresses d'une durée supérieure ou égale à certains mois ;
- T_I est la période de retour des sécheresses avec une intensité supérieure ou égal à certaines valeurs ;
- $E(L)$ est le temps Inter-arrival attendu de la sécheresse.

Le tableau suivant résume les périodes de retour unique de 3, 5, 10, 20, 50 et 100 ans de la sévérité, la durée et l'intensité de la sécheresse.

Tableau III.18: Périodes de retour de chacune des caractéristiques de la sécheresse pour la station de Beni bahdel.

Périodes de retour	quantile	sévérité	Durée	Intensité
le temps moyen de l'inter-arrival= 22,824 (3 mois)				
3	0,366	3,8	0,62	0,214
5	0,620	7,9	3,2	0,481
10	0,810	14,3	12,4	0,852
20	0,905	22,7	35,4	1,227
50	0,962	37,3	108,2	1,729
100	0,981	51,2	223,9	2,113
le temps moyen de l'inter-arrival= 53 (6 mois)				
3	-0,472	-	-	-
5	0,117	3,2	0,5	0,101
10	0,558	14,5	6,5	0,508
20	0,779	29,5	27,7	0,874
50	0,912	57,4	108,4	1,346
100	0,956	85,8	252,7	1,697
le temps moyen de l'inter-arrival= 90,57 (12 mois)				
3	-1,516	-	-	-
5	-0,510	-	-	-
10	0,245	11,3	2,1	0,312
20	0,623	41,5	25	0,768
50	0,849	81	86	1,098
100	0,925	111,8	166	1,285

Chapitre III : analyse de la sécheresse hydrologique

Tableau III.19: Périodes de retour de chacune des caractéristiques de la sécheresse pour la station de Chouly.

Périodes de retour	quantile	sévérité	Durée	Intensité
le temps moyen de l'inter-arrival= 65,25 (6 mois)				
3	-0,813	-	-	-
5	-0,088	-	-	-
10	0,456	10,1	2,9	0,268
20	0,728	22,9	11,5	0,542
50	0,891	47,7	44	0,994
100	0,946	74,2	92	1,436

Tableau III.20: Périodes de retour de chacune des caractéristiques de la sécheresse pour la station d'El Haciabia.

Périodes de retour	quantile	sévérité	Durée	Intensité
le temps moyen de l'inter-arrival= 23,09 (6 mois)				
3	0,359	6,6	3,4	0,432
5	0,615	10,7	7,9	0,721
10	0,808	16,3	14,7	1,028
20	0,904	22,4	21,7	1,291
50	0,962	31,5	31,3	1,599
100	0,981	39	39,4	1,822
le temps moyen de l'inter-arrival=45,91 (12 mois)				
3	-0,275	-	-	-
5	0,235	10,8	2,1	2,05
10	0,617	27,3	13,2	12,2
20	0,809	36,7	27,5	26,8
50	0,923	45,7	47,9	48,6
100	0,962	51,4	64,9	68,8

III.1.4. 2. Période de retour multi variable

III.1.4. 2.1. Périodes de retour à deux variables

Puisque des événements de sécheresse sont caractérisés par la sévérité et la durée, la Périodes de retour uni variable peuvent donner des résultats sous ou au-dessus prévus. Par conséquent il est important de calculer les périodes de retour conjointes.

Shiau 2003 a proposé une méthodologie pour déterminer les périodes de retour conjointes bivariées en considérant les deux variables : la durée et la sévérité.

Les périodes de retour conjoint de la durée et de la sévérité de la sécheresse peuvent être caractérisées par deux cas : période de retour pour $D \geq d$ et $S \geq s$; période de retour pour $D \geq d$ ou $S \geq s$. Sur la base des copules, les périodes de retour conjoint des événements de la sécheresse sont décrites comme suit :

$$T_{DS} = \frac{E(I)}{P(D \geq d, S \geq s)} = \frac{E(I)}{1 - F_D(d) - F_S(s) + F_{DS}(d, s)} = \frac{E(I)}{1 - F_D(d) - F_S(s) + C(F_D(d), F_S(s))}$$

$$T_{DS'} = \frac{E(I)}{P(D \geq d \text{ or } S \geq s)} = \frac{E(I)}{1 - F_{DS}(d, s)} = \frac{E(I)}{1 - C(F_D(d), F_S(s))}$$

Avec T_{DS} est la période de retour conjointe pour $D \geq d$ et $S \geq s$; $T_{DS'}$ est la période de retour conjointe pour $D \geq d$ ou $S \geq s$.

Puisqu'il existe plusieurs combinaisons de durée et la sévérité de la sécheresse qui aboutit à la même période de référence, les périodes de retour commun sont mises en évidence dans les lignes de contour comme le montre les abaques des figures suivantes :

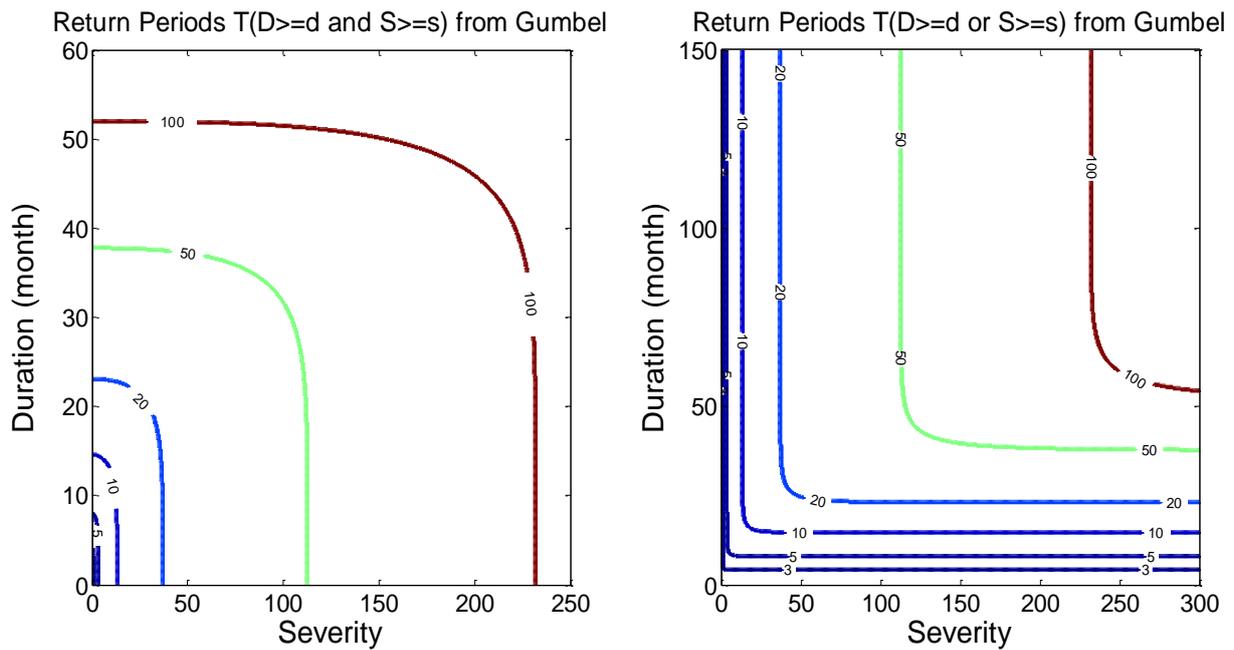


Figure III.18 : la période de retour conjoint TDS (à gauche) et TDS' (à droite) de la durée et la sévérité de la sècheresse en utilisant la copule de Gumbel pour la station de Beni bahdel (Cas 1 : 3 mois).

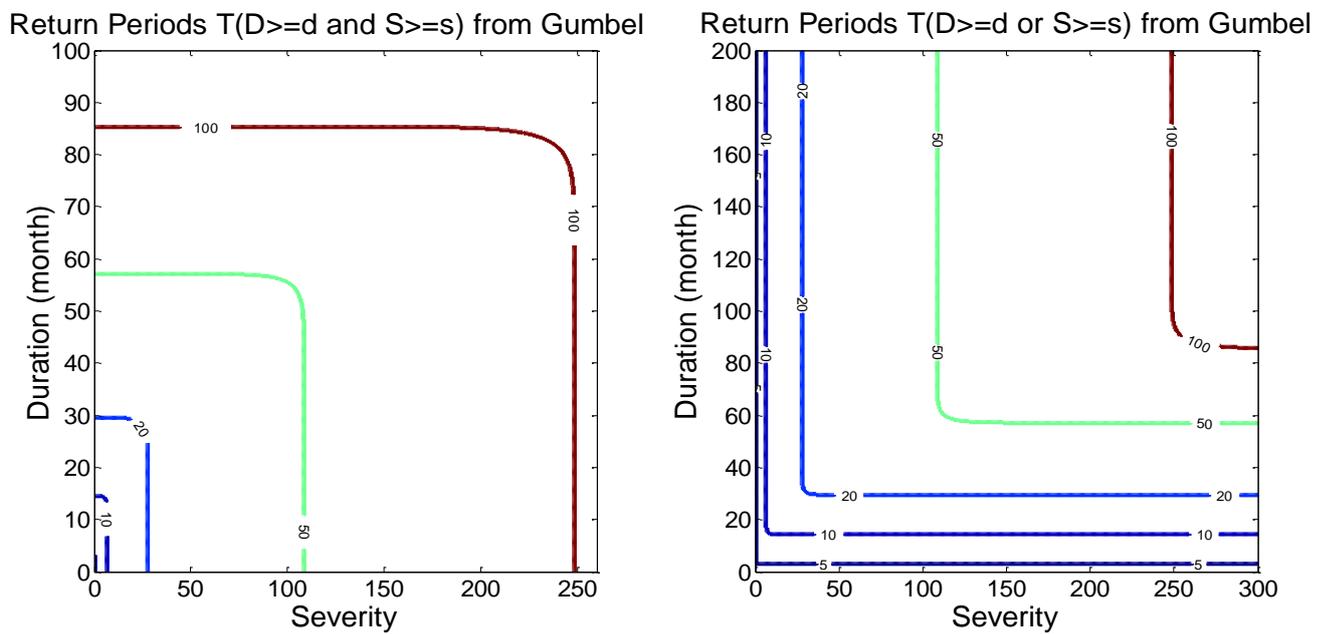


Figure III.19 : la période de retour conjoint TDS (à gauche) et TDS' (à droite) de la durée et la sévérité de la sècheresse en utilisant la copule de Gumbel pour la station de Beni bahdel (Cas 2 : 6 mois).

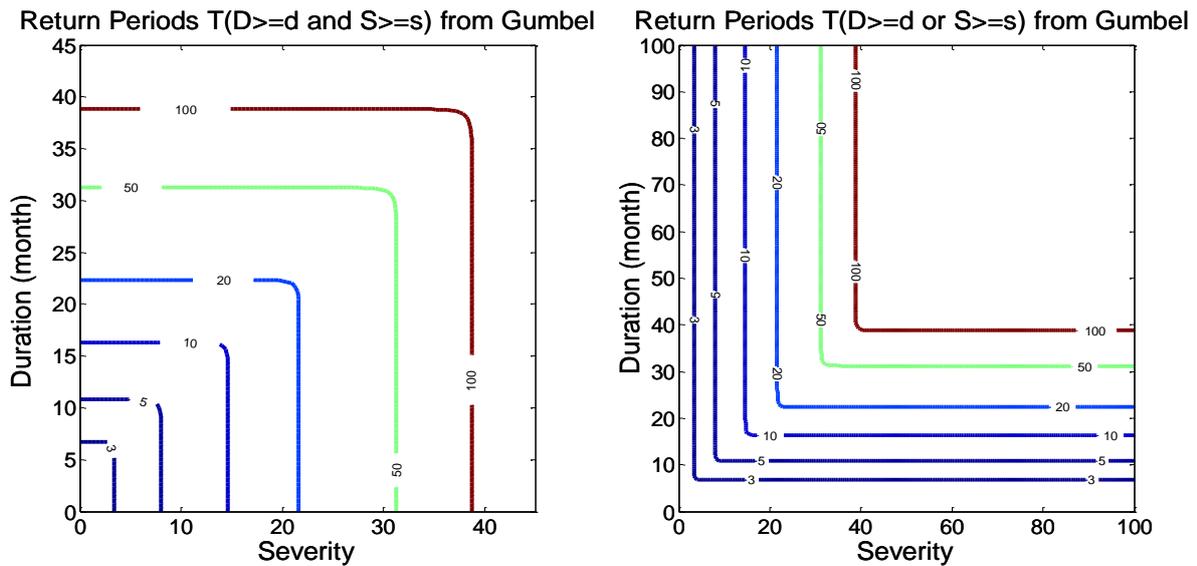


Figure III.20 : la période de retour conjoint TDS (à gauche) et TDS' (à droite) de la durée et la sévérité de la sècheresse en utilisant la copule de Gumbel pour la station de Beni bahdel (Cas 3 : 12 mois).

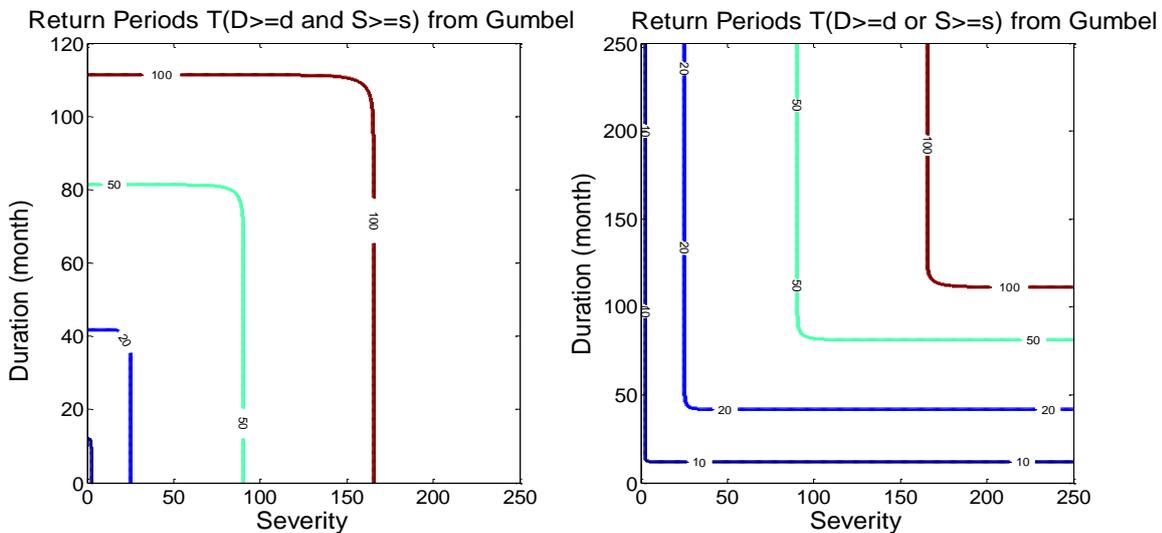


Figure III.21 : la période de retour conjoint TDS (à gauche) et TDS' (à droite) de la durée et la sévérité de la sècheresse en utilisant la copule de Gumbel pour la station de Chouly (Cas 1 : 6 mois).

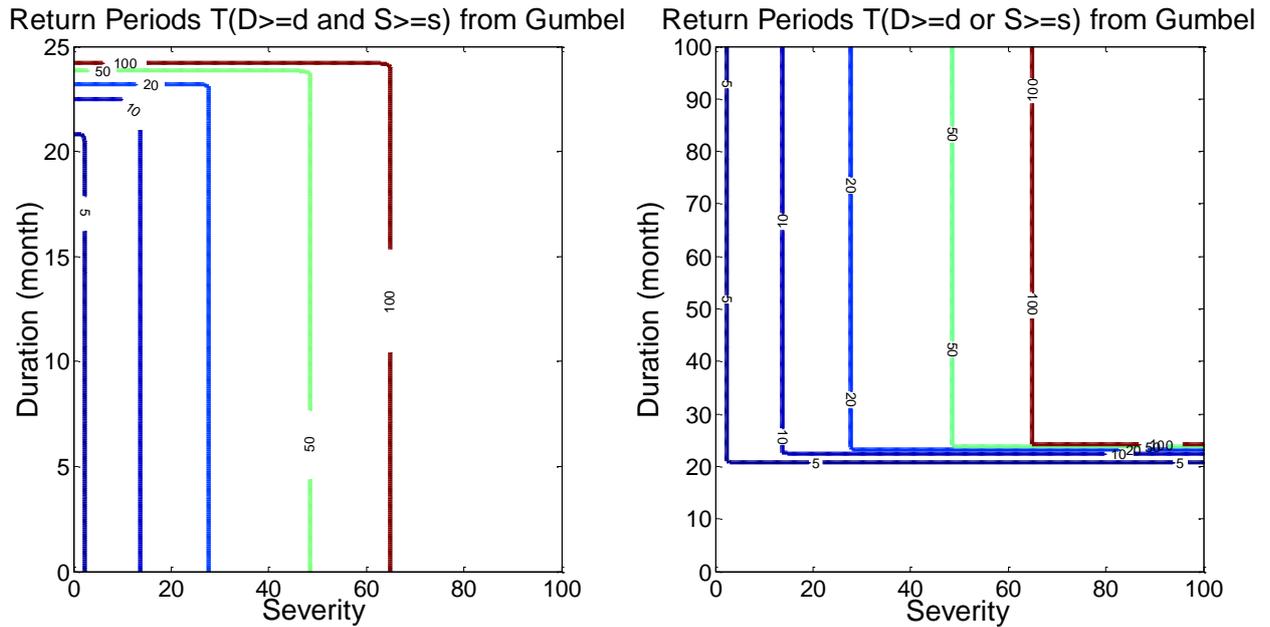


Figure III.22 : la période de retour conjoint TDS (à gauche) et TDS' (à droite) de la durée et la sévérité de la sècheresse en utilisant la copule de Gumbel la station d'El Haciabia

(Cas 1 : 6 mois).

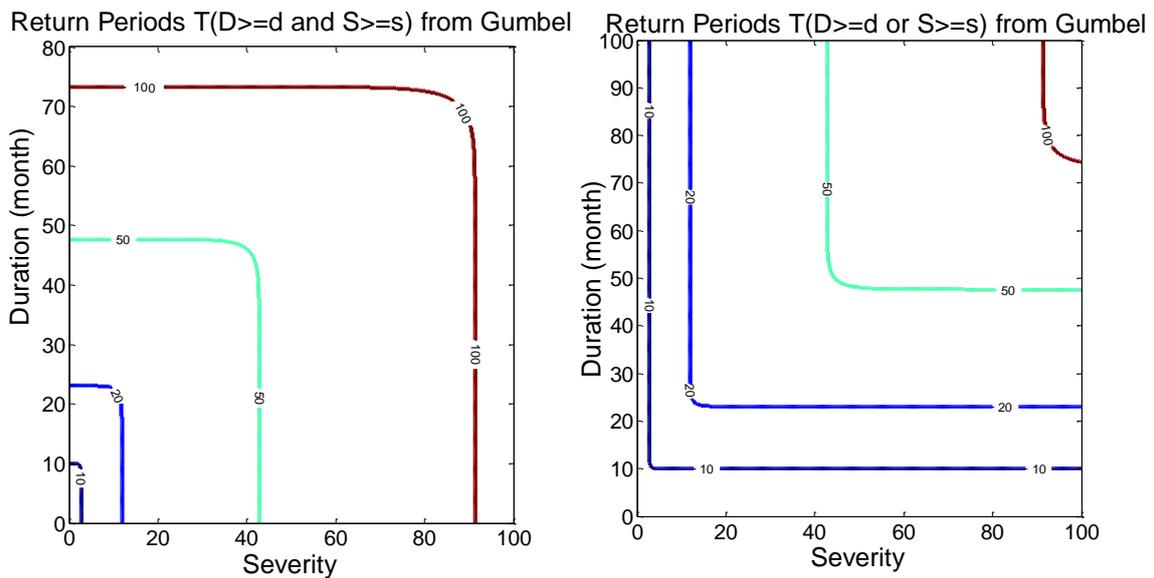


Figure III.23: la période de retour conjoint TDS (à gauche) et TDS' (à droite) de la durée et la sévérité de la sècheresse en utilisant la copule de Gumbel pour la station d'El Hacaiba

(Cas 2 : 12 mois).

III.1.4. 2.2. Périodes de retour tri-variées

De même, nous pouvons obtenir des périodes de retour définies pour le cas tri-varié, qui se présente comme suit :

$$\begin{aligned}
 T_{DSI} &= \frac{E(l)}{P(D \geq d, S \geq s, I \geq i)} \\
 &= \frac{E(l)}{1 - F_D(d) - F_S(s) + F_I(i) + F_{DS}(d, s) + F_{DI}(d, i) + F_{SI}(s, i) - F_{DSI}(d, s, i)} \\
 &= \frac{E(l)}{1 - F_D(d) - F_S(s) - F_I(i) + F_{DS}(d, s) + F_{DI}(d, i) + F_{IS}(i, s) + C(F_D(d), F_S(s), F_I(i))}
 \end{aligned}$$

Avec T_{DSI} est la période de retour conjointe pour $D \geq d$ et $S \geq s$ et $I \geq i$. La période de retour Conjointe pour $D \geq d$ ou $S \geq s$ ou $I \geq i$ est défini comme suit :

$$T_{DSI}' = \frac{E(l)}{1 - F_{DSI}(d, s, i)} = \frac{E(l)}{1 - C(F_D(d), F_S(s), F_I(i))}$$

Tableau III.21 : Comparaison entre la conjointe période de retour tri-variée et la période de retour d'une seule variable en utilisant t-copula pour la station de Beni bahdel.

Période de retour unique (année)	Tri-variés t-copule	
	Période de retour pour T_{DSI} (année)	Période de retour pour T_{DSI}' (année)
3 mois		
3	1,83	1,83
5	1,833	1,833
10	13,242	7,603
20	27,840	14,160
50	75,971	33,336
100	161,715	64,243
6 mois		
3	4,417	4,417
5	4,417	4,417
10	11,911	8,659
20	26,170	16,212
50	69,014	37,254
100	4,417	4,417
1000	4,417	4,417
12 mois		
3	1,875	7,500
5	2,968	7,500
10	11,486	8,799
20	29,349	15,062
50	95,546	33,252
100	211,662	61,049

Chapitre III : analyse de la sécheresse hydrologique

Le tableau ci-dessus montre la comparaison entre la période de retour conjointe de tri-variée en utilisant t-copula et la période de retour d'une seule variable. Par exemple, si on ne considère qu'une seule variable à l'échelle de trois mois, puis la période de retour est égale à 20 ans ce qui signifie que la sévérité est supérieure à 22.7, la durée est plus longue que 35.4 mois, et l'intensité est supérieure à 1.227 (tableau III.18). Mais si on considère le comportement conjointe de ces trois variables, nous pouvons constater que la période de retour pour le cas $S \geq 22.7$ et $D \geq 35.4$ et $I \geq 1.227$ est égale à 27 ans, alors que la période de retour pour le cas $S \geq 22.7$ ou $D \geq 35.4$ ou $I \geq 1.227$ est égal à 14 ans.

Tableau III.22 : Comparaison entre la conjointe période de retour de tri-variée et la période de retour d'une seule variable en utilisant t-copula pour la station de Chouly.

Période de retour unique (année)	Tri-variés t-copule	
	Période de retour pour <i>TDSI</i> (année)	Période de retour pour <i>TDSI'</i> (année)
6 mois		
3	5,438	5,438
5	4,302	5,438
10	5,438	5,438
20	5,438	5,438
50	5,438	5,438
100	5,438	5,438

Chapitre III : analyse de la sécheresse hydrologique

Tableau III.23 : Comparaison entre la conjointe période de retour de tri-variée et la période de retour d'une seule variable en utilisant t-copula pour la station d'El Haciabia.

Période de retour unique (année)	Tri-variés t-copule	
	Période de retour pour <i>TDSI</i> (année)	Période de retour pour <i>TDSI'</i> (année)
6 mois		
3	1,917	1,917
5	1,917	1,917
10	17,554	6,648
20	42,405	12,519
50	138,067	30,082
100	336,270	58,723
12 mois		
3	2,055	3,750
5	3,750	3,750
10	11,977	7,223
20	26,556	13,066
50	67,938	28,549
100	146,283	54,633

III.2. Comparaison entre les caractéristiques de la sécheresse métrologique et la sécheresse hydrologique

Comme on a déjà mentionné dans le chapitre I :

La sécheresse météorologique est due à la réduction naturelle de la pluviométrie sur une région donnée pendant une année ou sur plusieurs années successives.

La sécheresse hydrologique est la réduction de l'écoulement superficiel dans les cours d'eau et, par conséquent, elle conduit à une diminution des volumes stockés dans les ouvrages hydrauliques et à une baisse naturelle du niveau d'eau dans les nappes souterraines.

Le présent chapitre a pour objectif d'identifier et de caractériser ces deux types de sécheresses et d'étudier l'impact de la sécheresse météorologique sur la sécheresse hydrologique. Aussi, d'évaluer la coïncidence des épisodes de sécheresse hydrologique avec la sécheresse métrologique. Les données pour quantifier ce dernier à long terme (précipitations) sont disponibles pour la majorité des bassins Algérien, alors que la sécheresse hydrologique, basé sur les séries de débit, présente des lacunes surtout pendant la période 1990-2000.

III.2.1 Calcul de l'indice de précipitation normalisé SPI

Le calcul des valeurs mensuelles de l'indice SPI pour les trois stations pluviométriques procède selon les équations présentées dans le chapitre I. l'évolution des valeurs mensuelles de l'indice SPI (l'échelle de 3,6 et 12) pour la période de **1941-2010** sont représentées dans les figures suivantes :

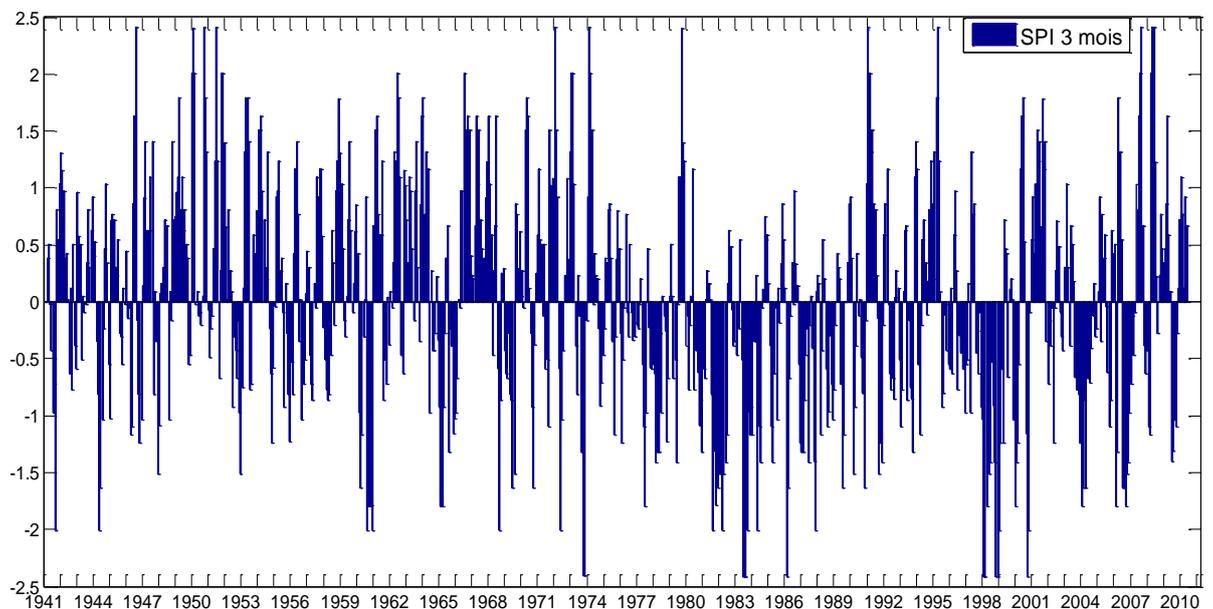


Figure III.24 : Valeurs mensuelles de l'indice SPI à l'échelle de 3 mois pour la station de Beni bahdel.

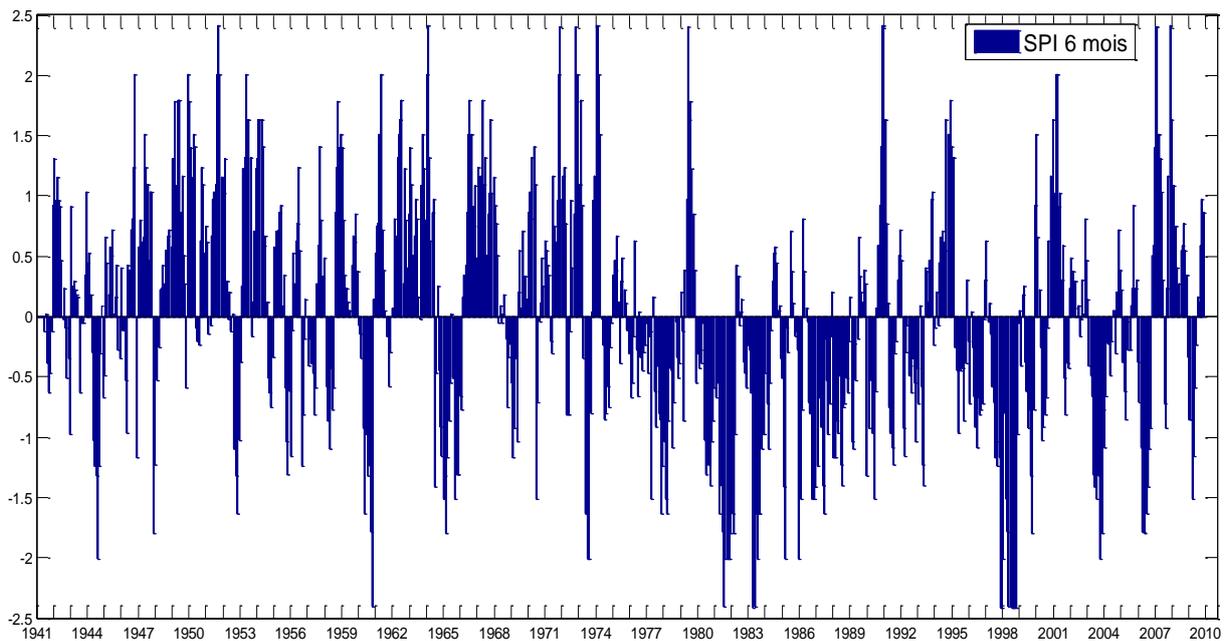


Figure III.25 : Valeurs mensuelles de l'indice SPI à l'échelle de 6 mois pour la station de Beni bahdel.

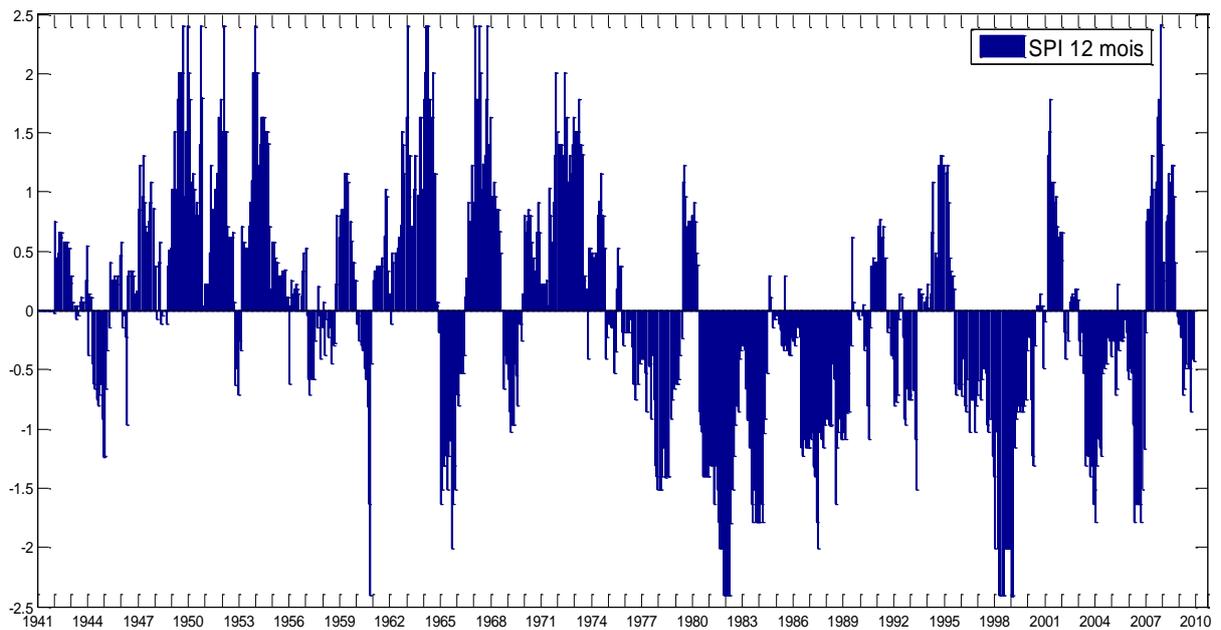


Figure III.26 : Valeurs mensuelles de l'indice SPI à l'échelle de 12 mois pour la station de Beni bahdel.

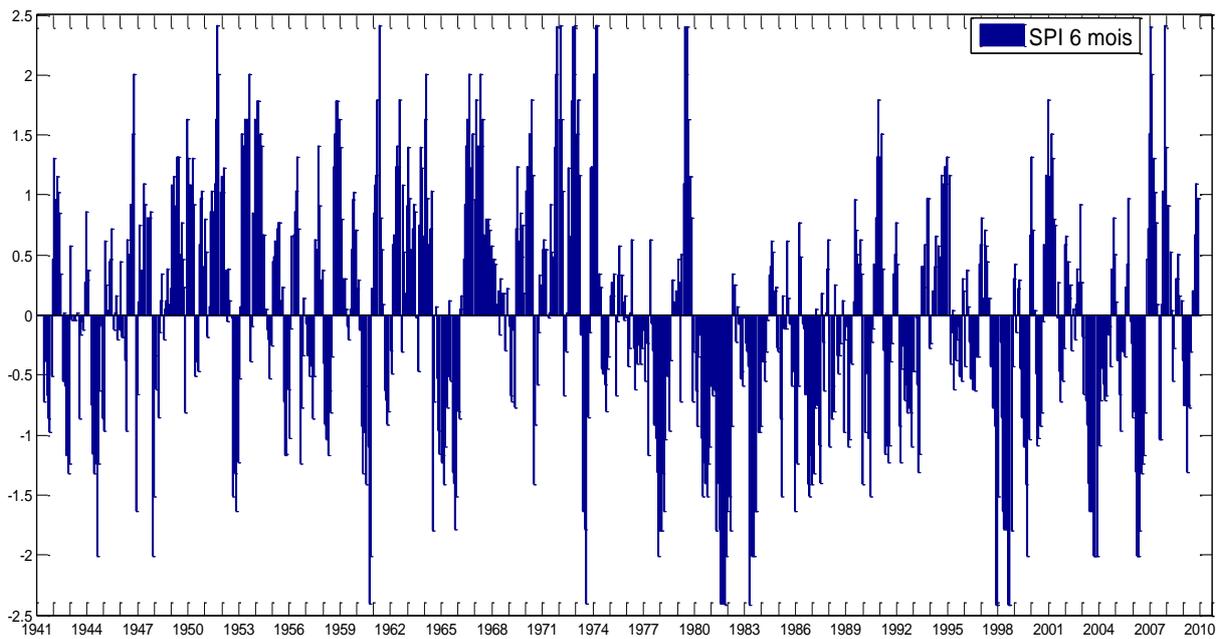


Figure III.27 : Valeurs mensuelles de l'indice SPI à l'échelle de 6 mois pour la station de Chouly.

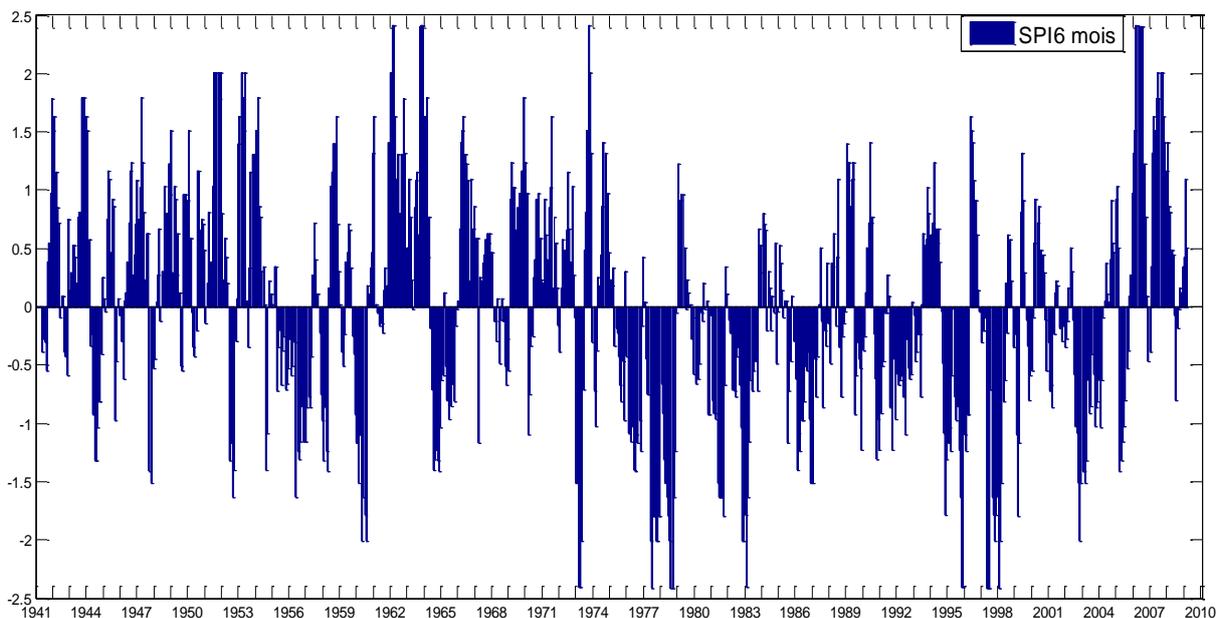


Figure III.28: Valeurs mensuelles de l'indice SPI à l'échelle de 6 mois pour la station d'El Haciabia.

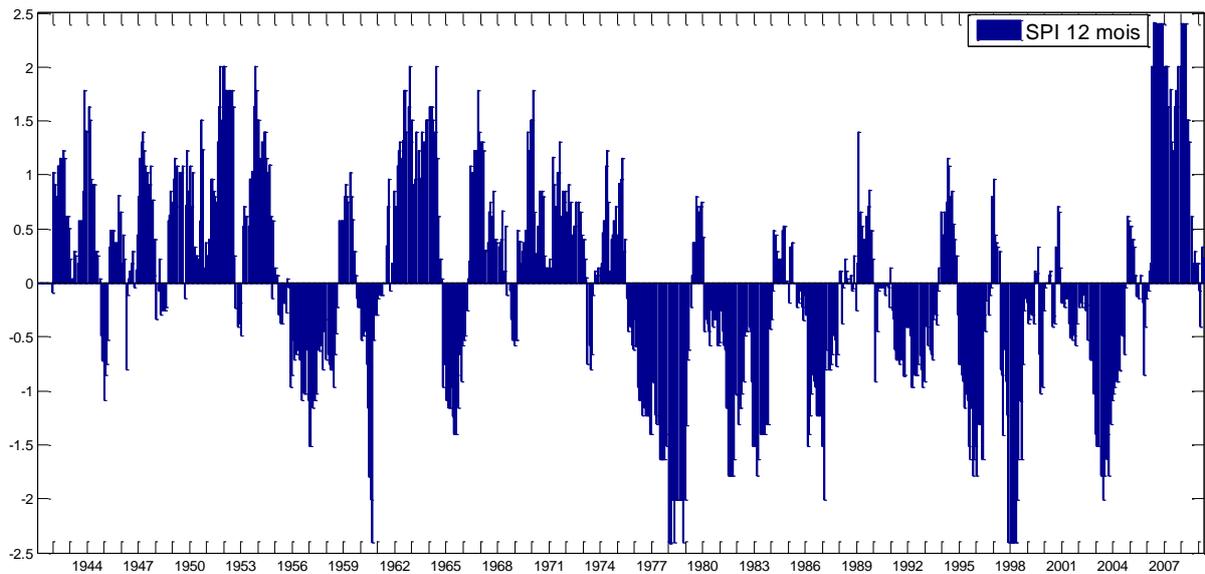


Figure III.29: Valeurs mensuelles de l'indice SPI à l'échelle de 12 mois pour la station d'El Haciabia.

Nous avons calculé l'indice SPI pour les précipitations tombées sur les bassins du Tafna et Macta dès 1941 jusqu'à 2010. Les résultats montrent l'existence de nombreuses séquences sèches tout le long de la période analysée, et qu'on a une dominance des années sèches bien remarquable, on note aussi que l'indice SPI entre cette période peut atteindre (-2.409), ce qui explique l'existence des années extrêmement sèches, La récurrence des années sèches s'accélère et la longévité de la période sèche également, tandis que celle des années humides a évolué inversement dont les figures les montrent clairement.

Nous remarquons aussi que les séquences à tendance sèche et à tendance humide n'apparaissent pas toujours à la même date pour les trois stations. À partir des années 1975, les périodes sèches sont de plus en plus longues et cela pour les trois stations à l'échelle de 6 mois.

Les caractéristiques essentielles des sécheresses hydrologiques (eaux souterraines, débits) et météorologiques (précipitations) sont liées à leur durée et à leur sévérité, la comparaison entre les caractéristiques de la sécheresse météorologique et la sécheresse hydrologique à l'échelle de 3, 6 et 12 mois pour les trois stations de la zone d'étude sont représentées dans les figures suivantes :

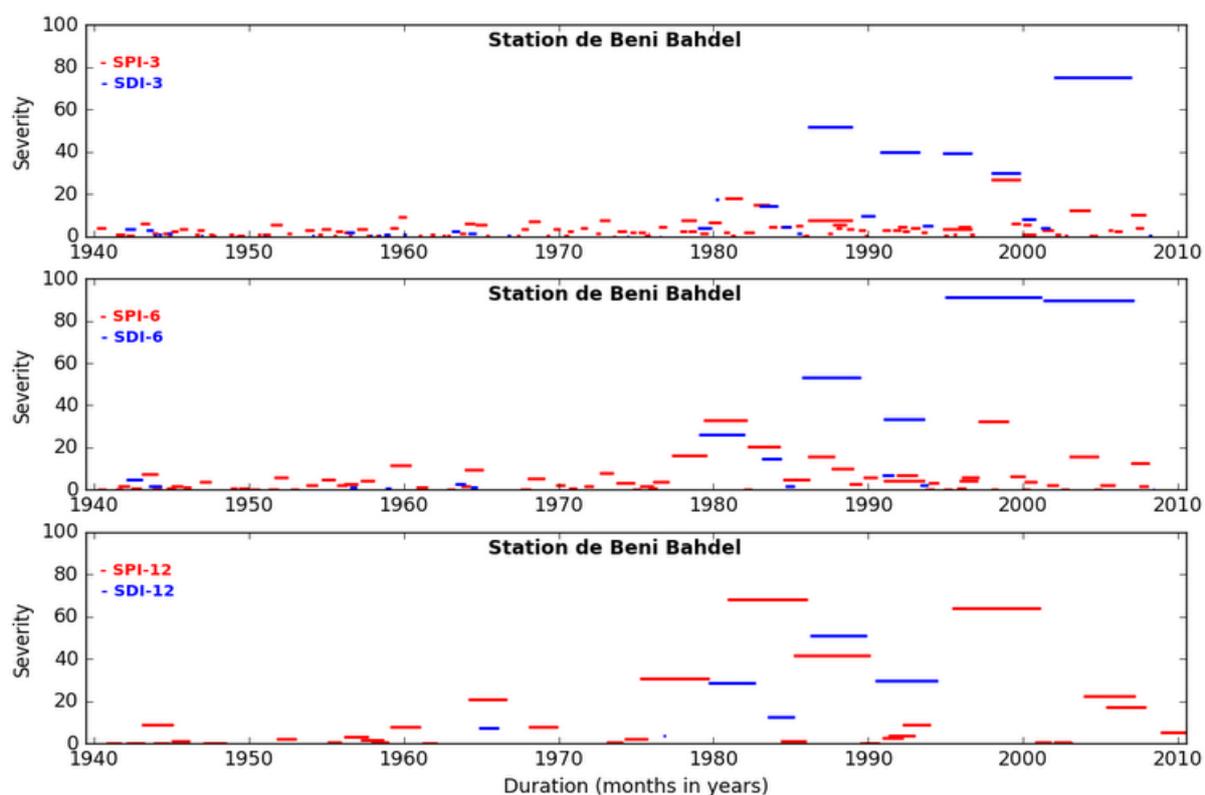


Figure III.30: Comparaison entre les caractéristiques de la sécheresse météorologique et la sécheresse hydrologique à l'échelle e de 3 ,6 et 12 mois pour la station de Beni bahdel.

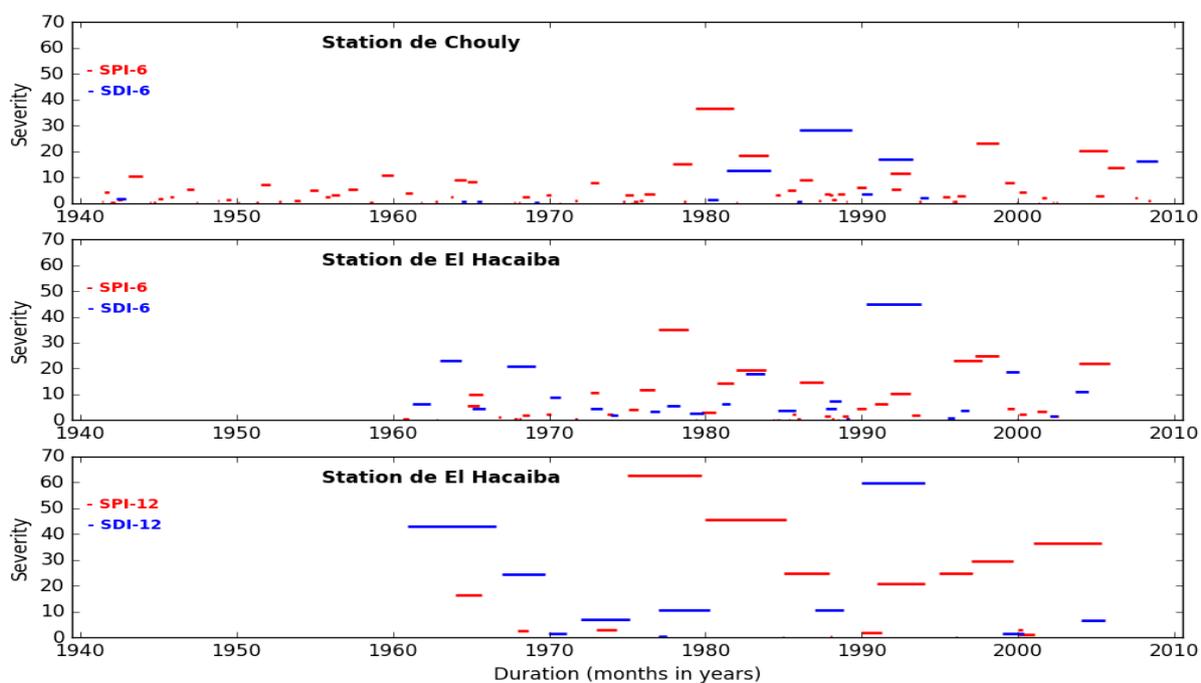


Figure III.31 : Comparaison entre les caractéristiques de la sécheresse météorologique et la sécheresse hydrologique à l'échelle de 6 mois pour la station de Chouly et à l'échelle de 6, 12 mois pour la station d'El Hacaiba.

Chapitre III : analyse de la sécheresse hydrologique

Entre deux sécheresses, la durée et sévérité varient considérablement. On ne peut pas mettre en évidence une tendance bien définie dans le temps entre les deux. En s'appuyant sur les données observées sur les trois stations, il se dégage que la sécheresse hydrologique est plus accentuée que la sécheresse météorologique en sévérité et en durée.

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

Introduction

Dans ce chapitre nous étudierons les événements de la sécheresse sur trois stations pluviométriques situées au Nord-Ouest de l'Algérie en termes de la sévérité et de la durée en utilisant les projections futures sous deux types de scénarios d'émission par les différents modèles régionaux CORDEX-Africa à $0,44^{\circ} \times 0,44^{\circ}$. Pour ce faire, nous extrairons les données des précipitations mensuelles de chaque station pluviométrique (nombre de trois) à partir des sorties de huit (08) modèles régionaux climatiques CORDEX-Africa pendant la période (1951-2005). La fonction de répartition cumulative empirique (ecdf) de ces données des précipitations sera comparée aux ecdf de précipitations observées sur la même période (1951-2005). Cela permettra de tester la capacité de ces modèles à reproduire les précipitations observées dans la période historique et de choisir le meilleur modèle qu'on va utiliser dans le futur (2005-2100). Pour la période future deux périodes ont été prises (2005-2060 et 2045-2100) et deux scénarios seront principalement utilisés à savoir le RCP4.5 et le RCP8.5.

VI.1. Méthodologie

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'impact du changement climatique sur la sécheresse météorologique en adoptant l'indice de sécheresse : SPI. L'application de l'analyse de la sécheresse sur cet indice, nous permet de caractériser la durée et la sévérité de la sécheresse pour les périodes futures. La procédure consiste à calculer SPI et à identifier les trois caractéristiques de la sécheresse. Les détails de calcul de SPI se trouvent au chapitre I.

VI.2. Comparaison entre l'évolution des précipitations mensuelles observées et simulées pendant la période 1951-2005.

Avant de procéder à l'étude des caractéristiques de la sécheresse dans le futur, on a d'abord comparé le climat (précipitations) observé pendant la période 1951-2005 au moyen de l'ensemble de données observées au niveau des trois stations à celles simulées au moyen des huit (08) modèles climatiques utilisés dans le cadre du programme CORDEX-Africa (tableau I.4) afin de tester leur capacité à reproduire le climat observé et son évolution. Pour cela, la fonction de répartition cumulative empirique (ecdf) des données mensuelles des précipitations des trois stations sera comparée aux données de modèles climatiques sur la période (1951-2005). Les ecdf calculées au moyen des précipitations moyennes mensuelles observées au

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

niveau des trois stations durant la période 1951-2005 et celles de données des huit (08) modèles climatiques sont présentées dans les figures suivantes :

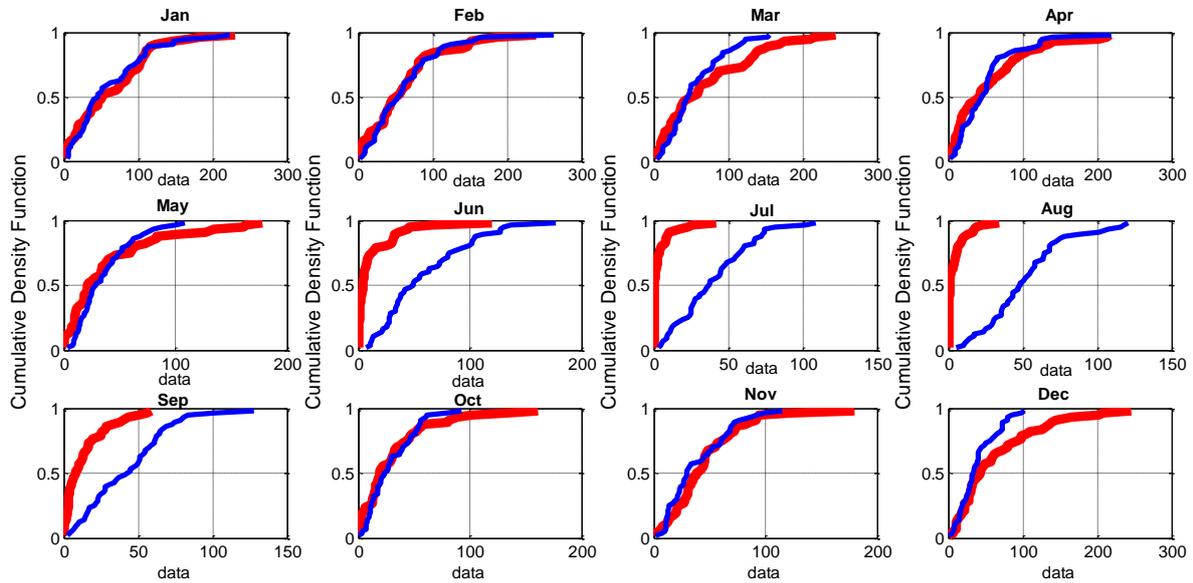


Figure IV.1 : Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de Beni bahdel (rouge) et les simulations brutes des modèles CanESM2 (bleu).

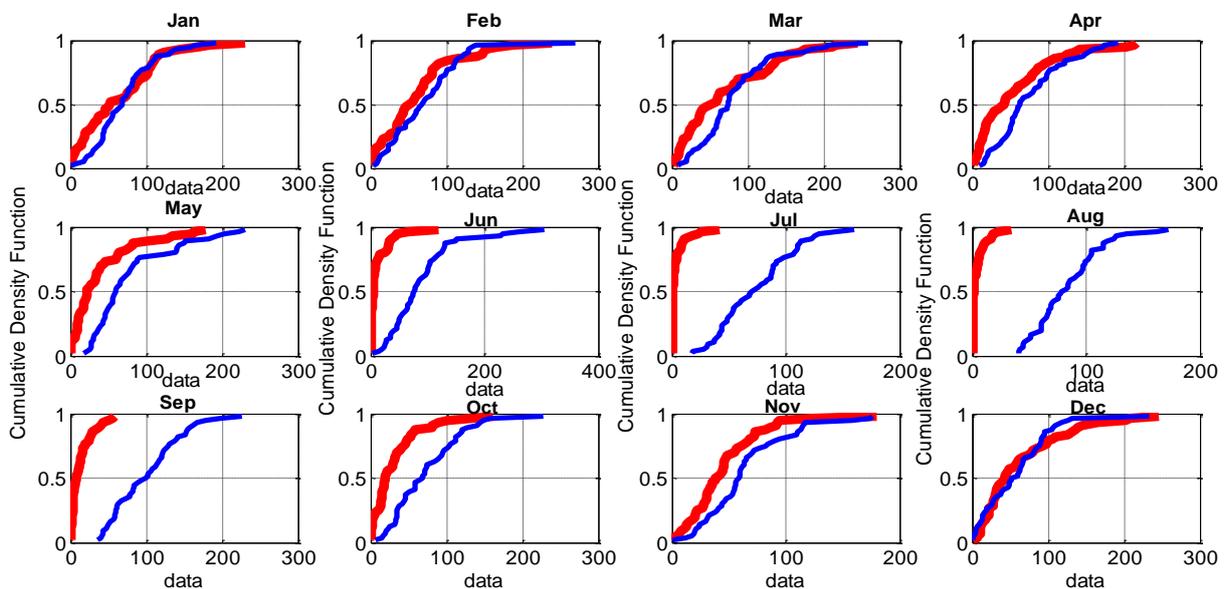


Figure IV.2 : Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de Beni bahdel et les simulations brutes des modèles - CNRM-CM5 (bleu).

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

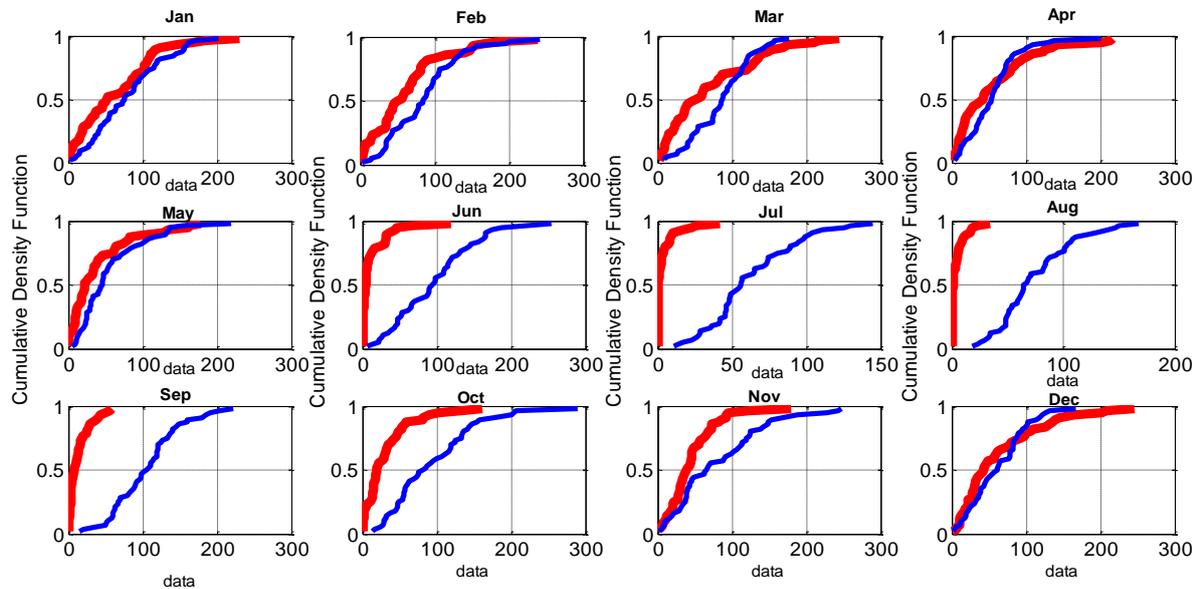


Figure IV .3: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de Beni bahdel (rouge) et les simulations brutes des - CSIRO-Mk3 (bleu).

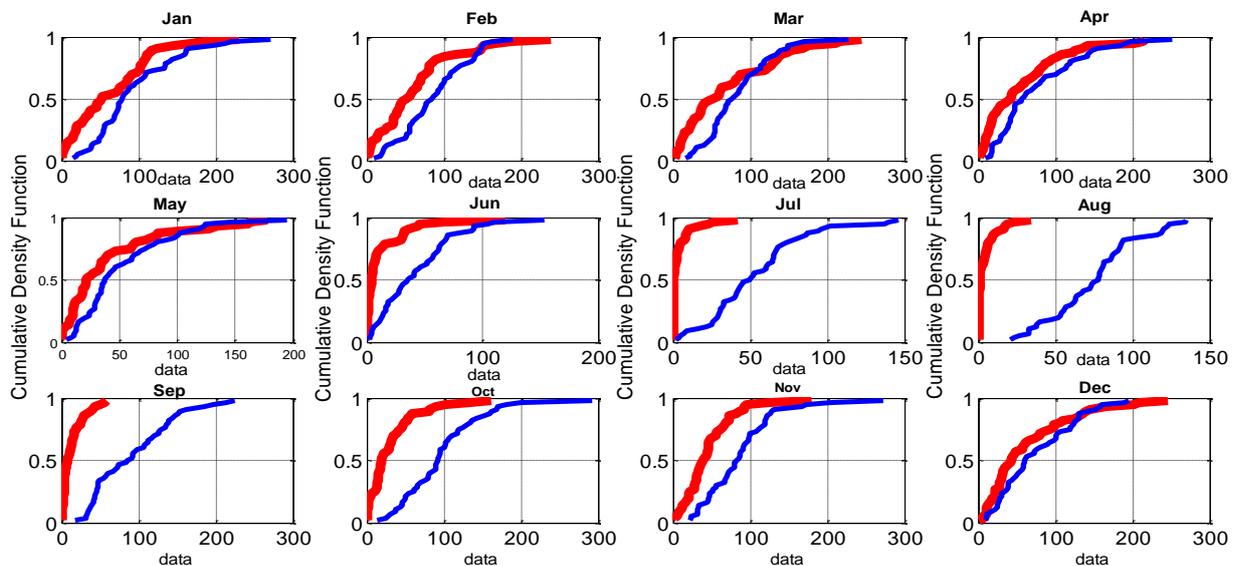


Figure IV .4: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de Beni bahdel (rouge) et les simulations brutes des modèles MIROC5 (bleu).

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

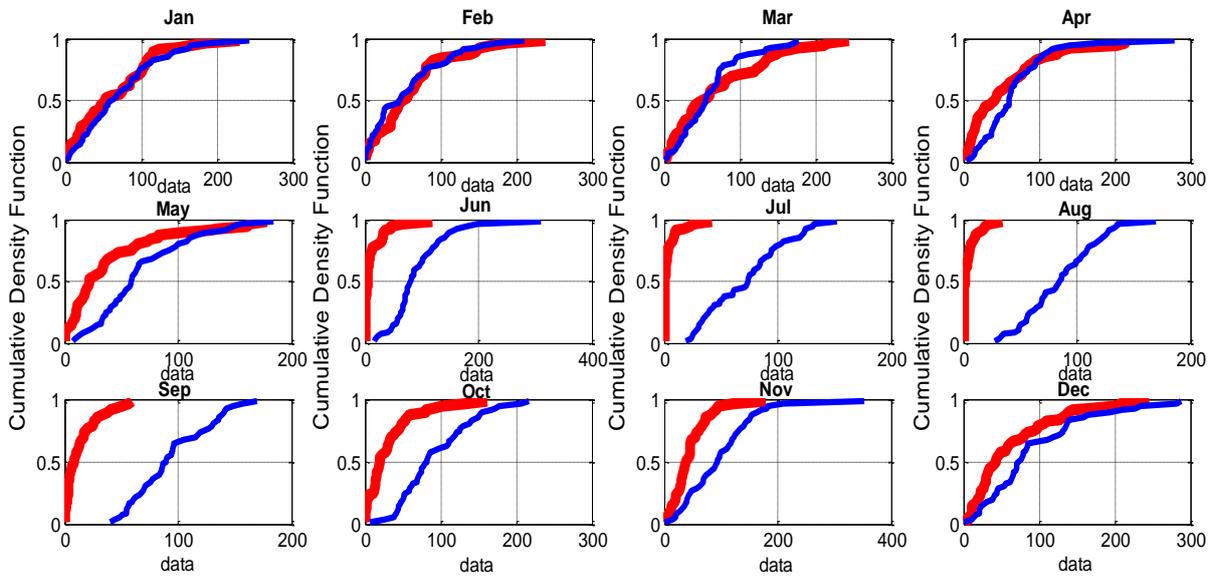


Figure IV .5 : Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de Beni bahdel (rouge) et les simulations brutes des modèles HadGEM2-ES (bleu).

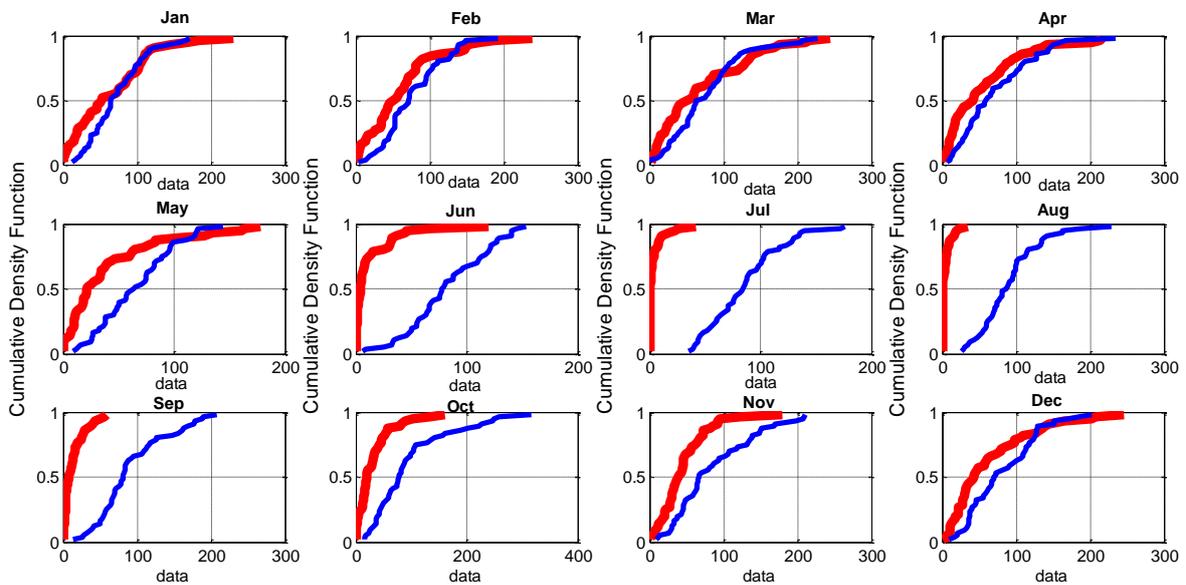


Figure IV .6 : Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de Beni bahdel (rouge) et les simulations brutes des modèles MPI-ESM-LR (bleu).

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

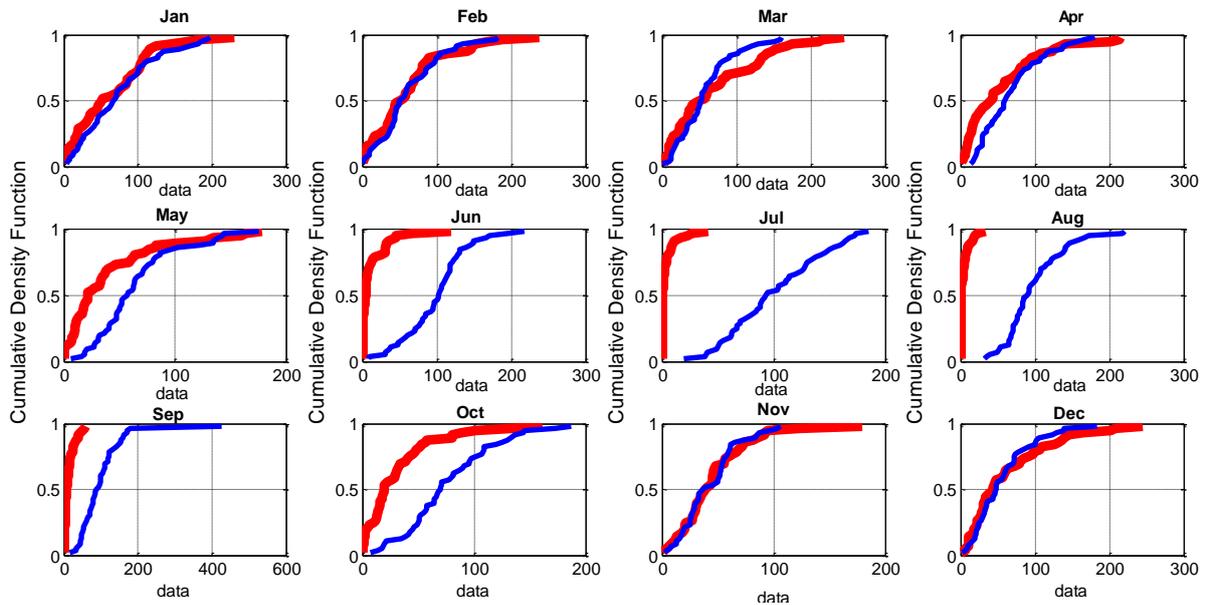


Figure IV .7: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de Beni bahdel (rouge) et les simulations brutes des modèles NorESM1-M (bleu).

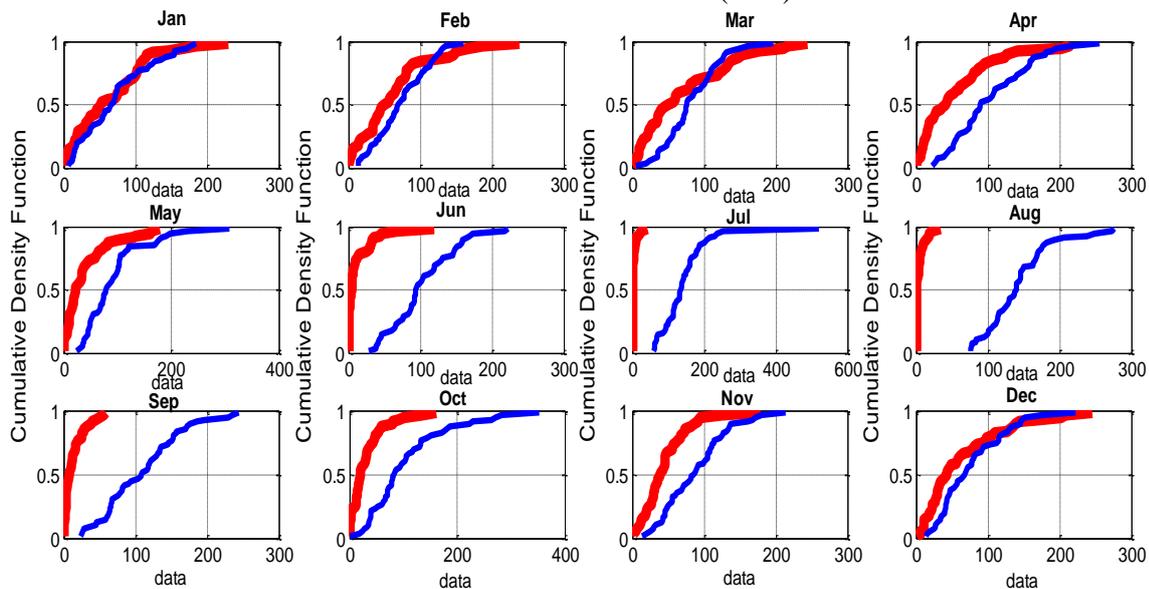


Figure IV .8: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de Beni bahdel (rouge) et les simulations brutes des modèles GFDL-GFDL (bleu).

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

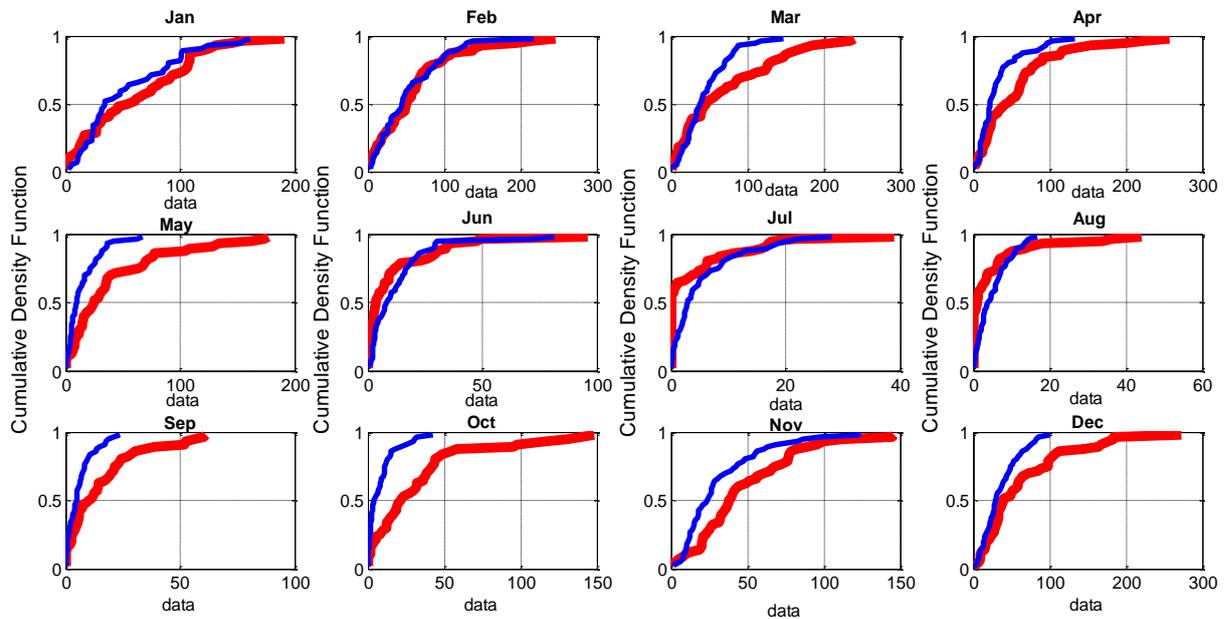


Figure IV .9: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de Chouly et les simulations brutes des modèles - CanESM2 (bleu).

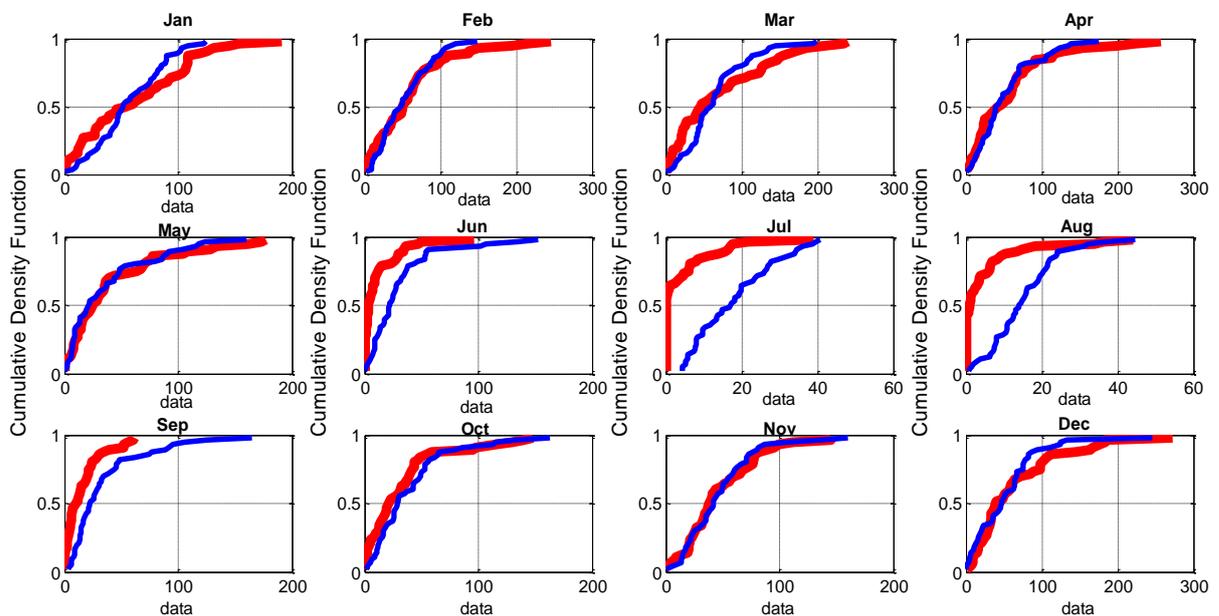


Figure IV .10: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de Chouly et les simulations brutes des modèles CNRM-CM5 (bleu).

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

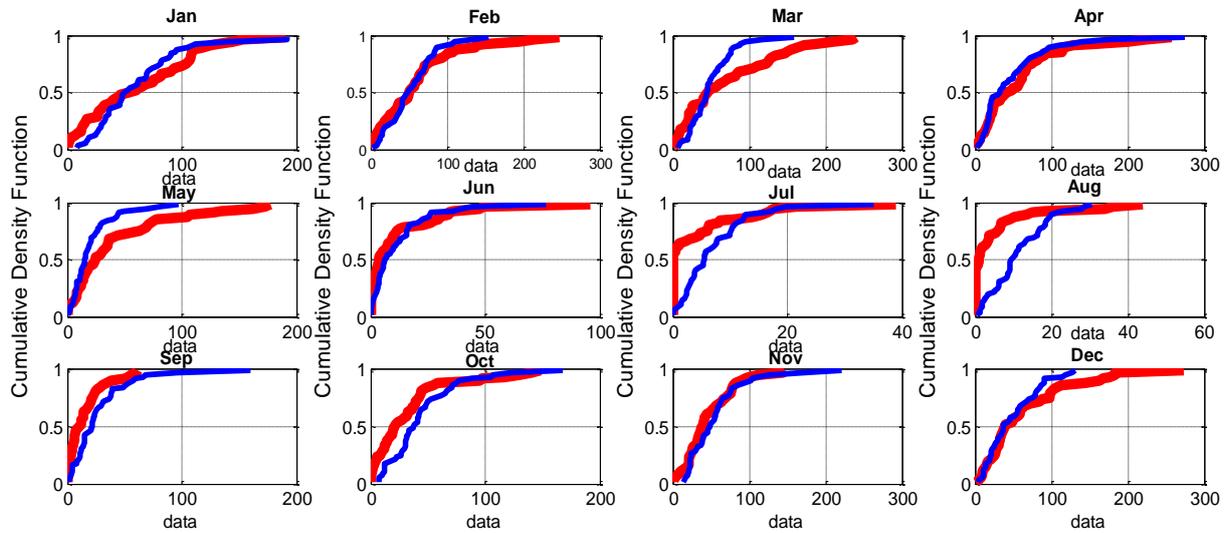


Figure IV .11: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de de Chouly (rouge) et les simulations brutes des modèles CSIRO-Mk3 (bleu).

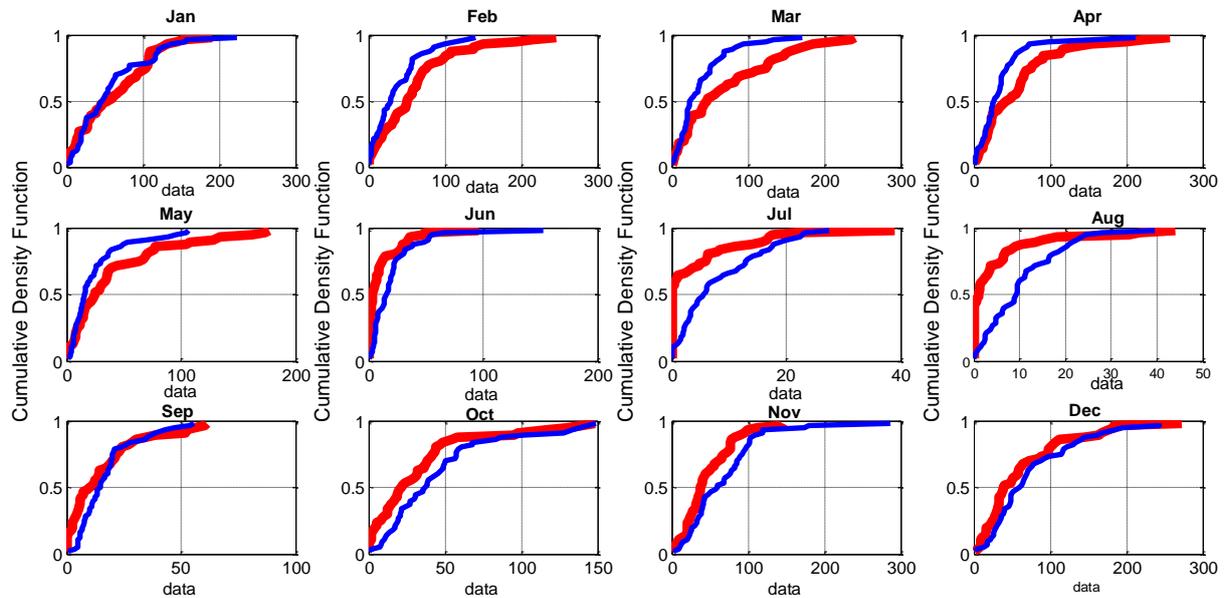


Figure IV .12: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de de Chouly (rouge) et les simulations brutes des modèles MIROC5 (bleu).

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

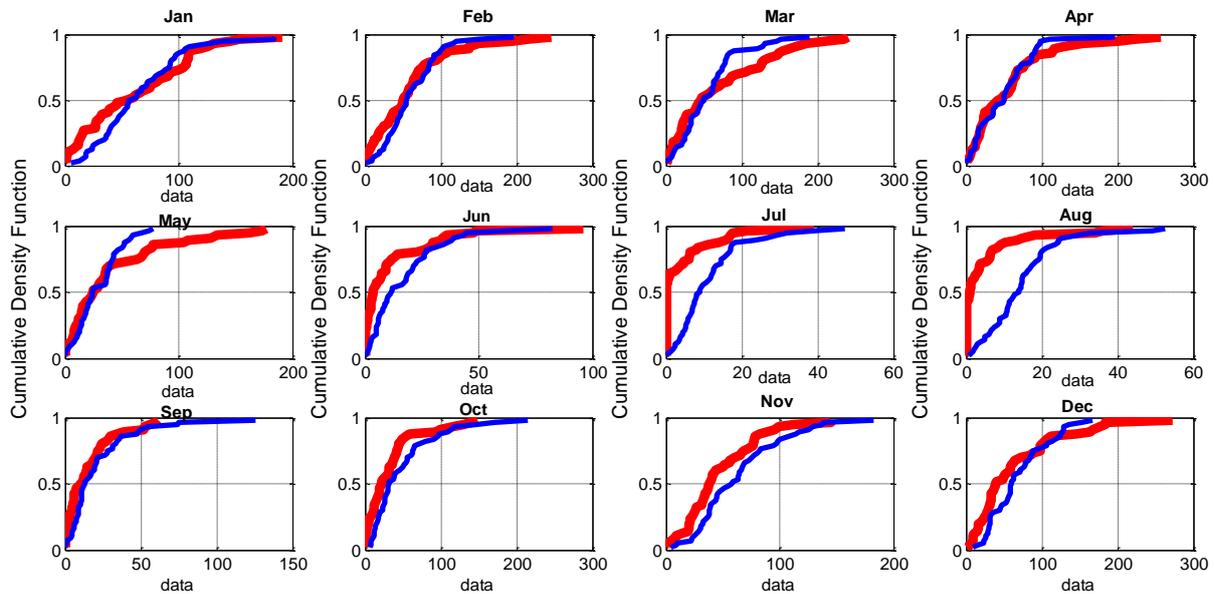


Figure IV .13 : Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de de Chouly (rouge) et les simulations brutes des modèles HadGEM2-ES (bleu).

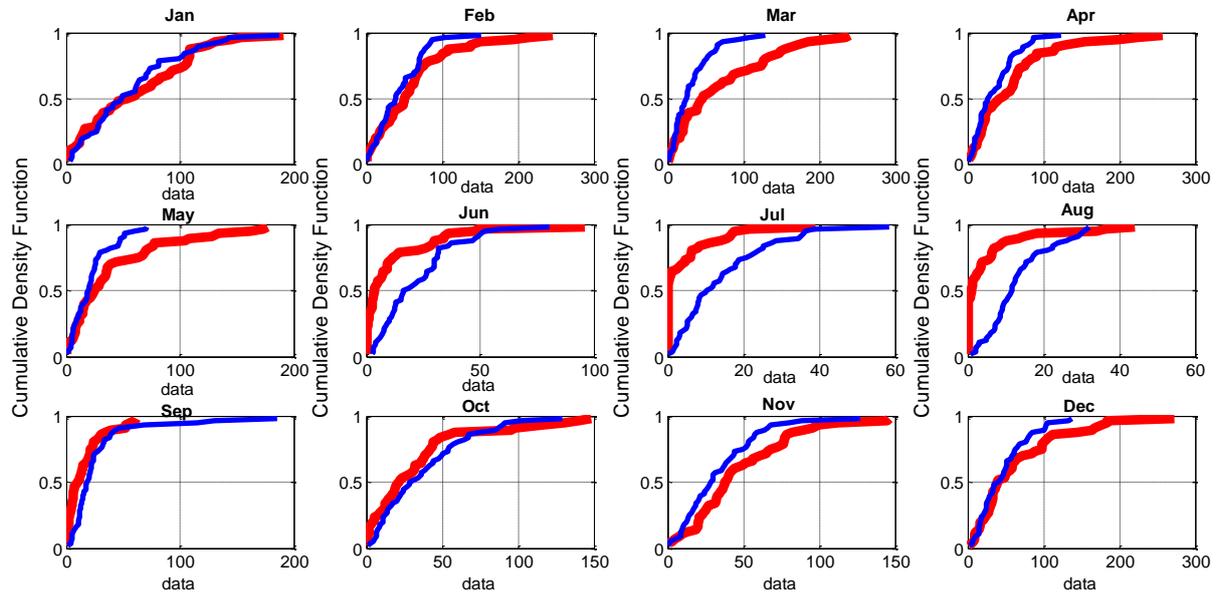


Figure IV .14: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de de Chouly (rouge) et les simulations brutes des modèles MPI-ESM (bleu).

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

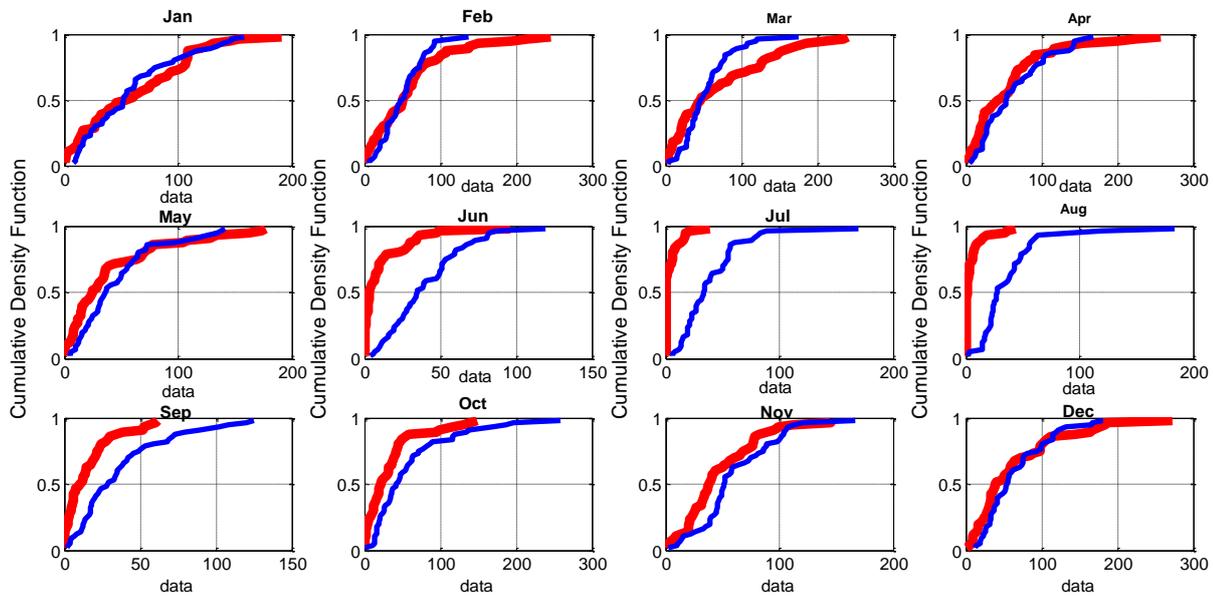


Figure IV .15: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de de Chouly (rouge) et les simulations brutes des NorESM1-M (bleu).

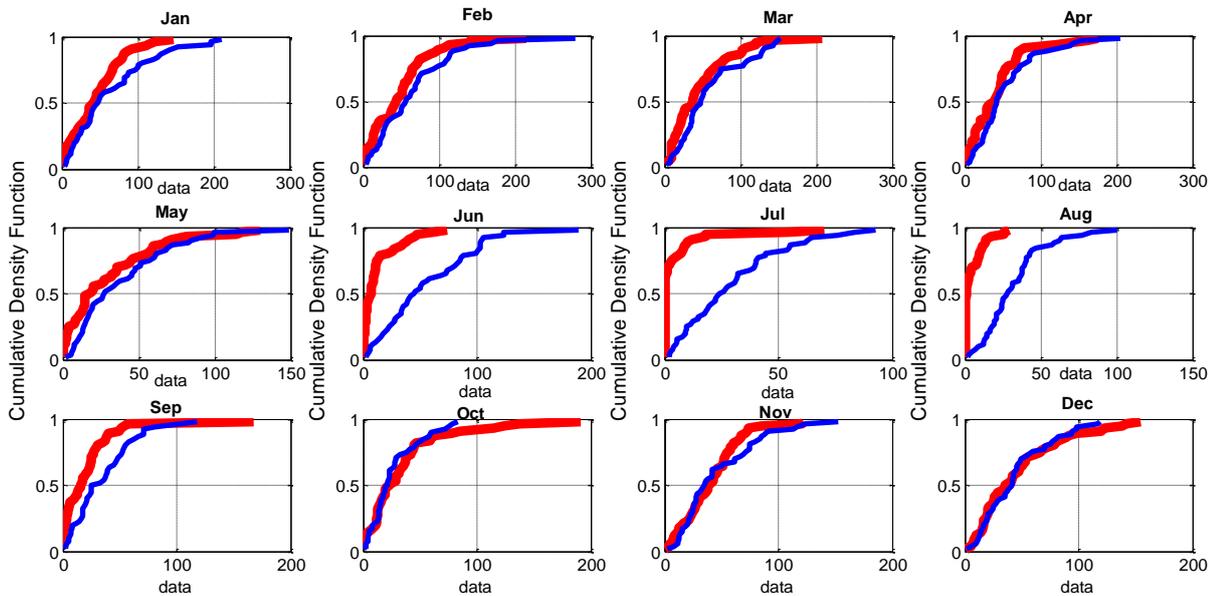


Figure IV .16: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station de de Chouly (rouge) et les simulations brutes des modèles GFDL-ESM2M (bleu).

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

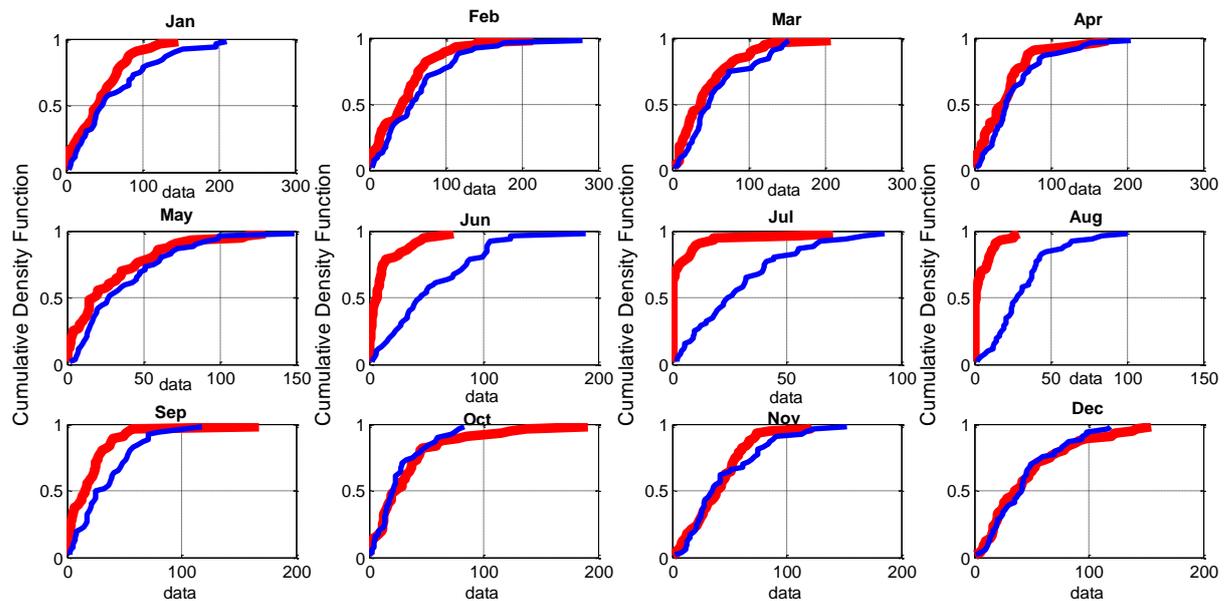


Figure IV .17: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station d'EL Haciabia et les simulations brutes des modèles CanESM2 (bleu).

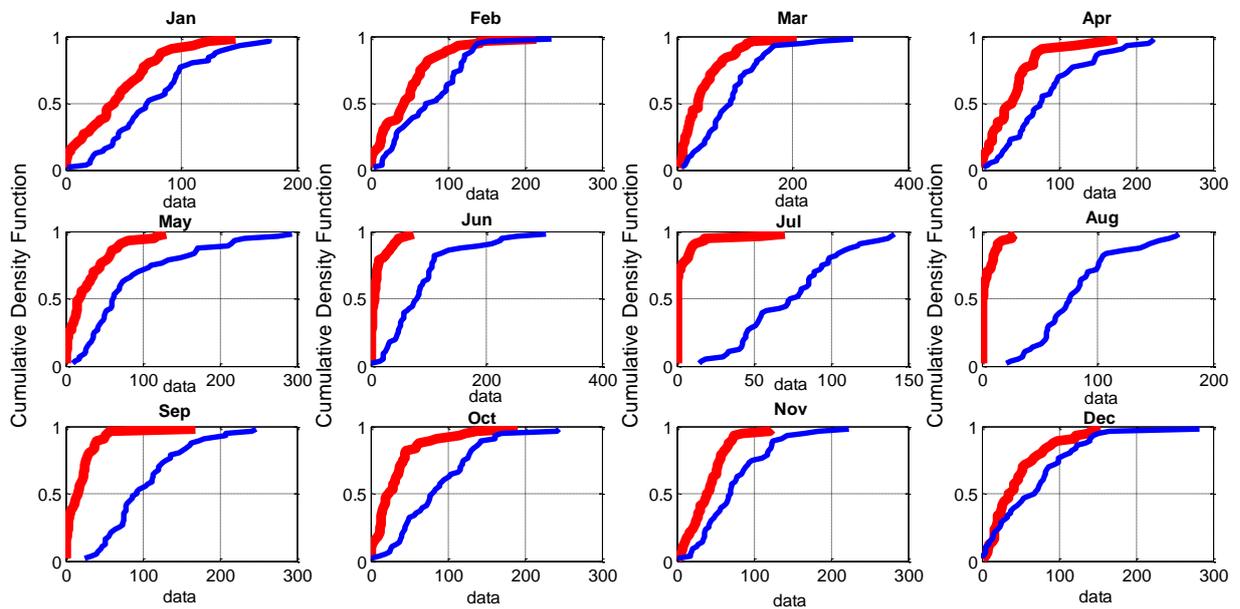


Figure IV .18: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station d'EL Haciabia et les simulations brutes des modèles CNRM-CM5 (bleu).

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

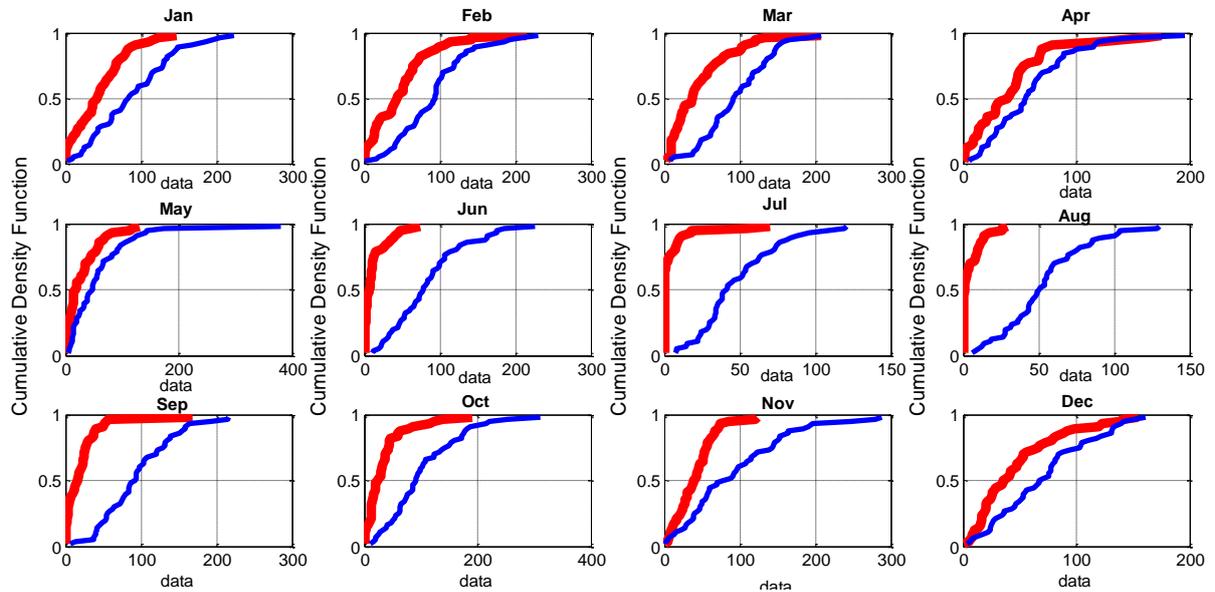


Figure IV .19: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station d'EL Haciabia et les simulations brutes des modèles CSIRO-Mk3 (bleu).

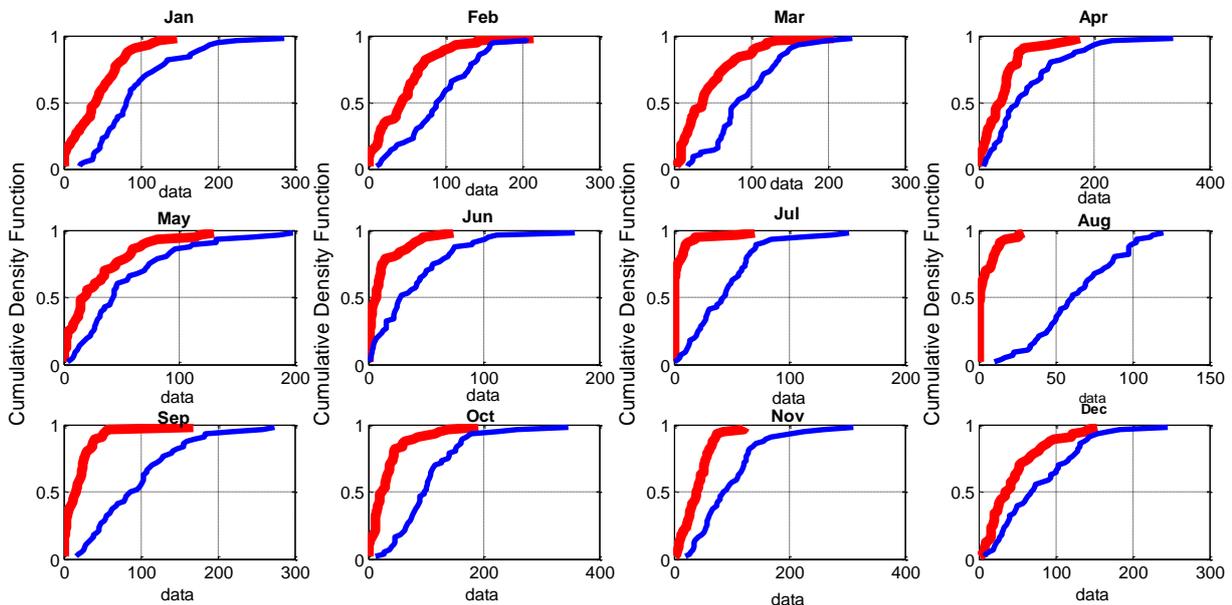


Figure IV .20: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station d'EL Haciabia et les simulations brutes des modèles MIROC5 (bleu).

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

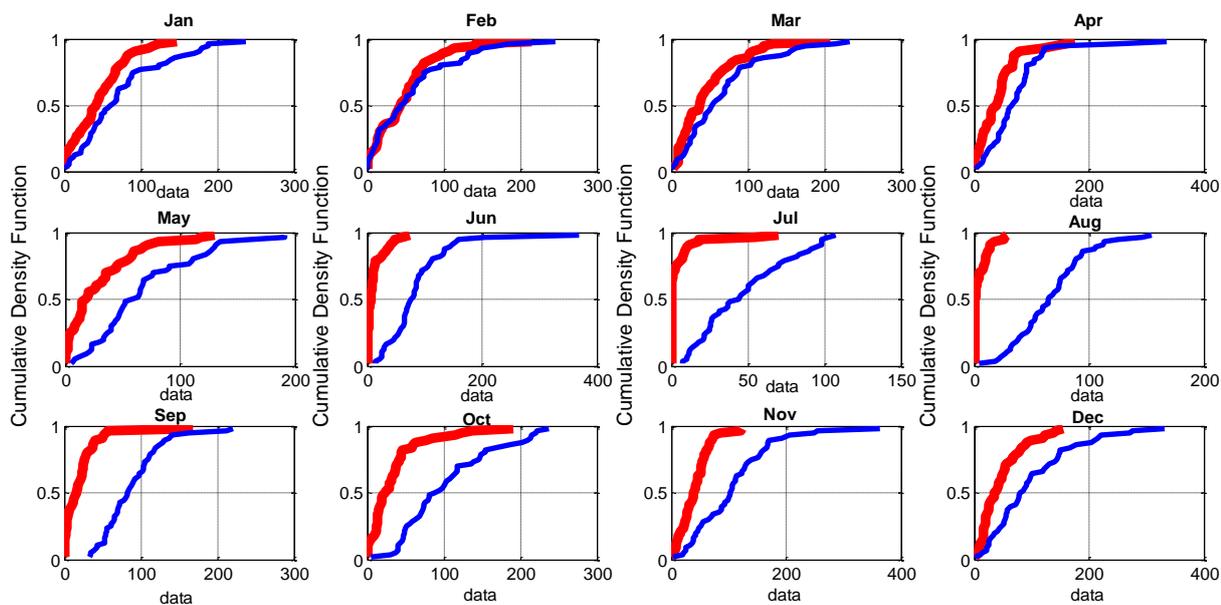


Figure IV .21: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station d'EL Haciabia et les simulations brutes des modèles HadGEM2-ES (bleu).

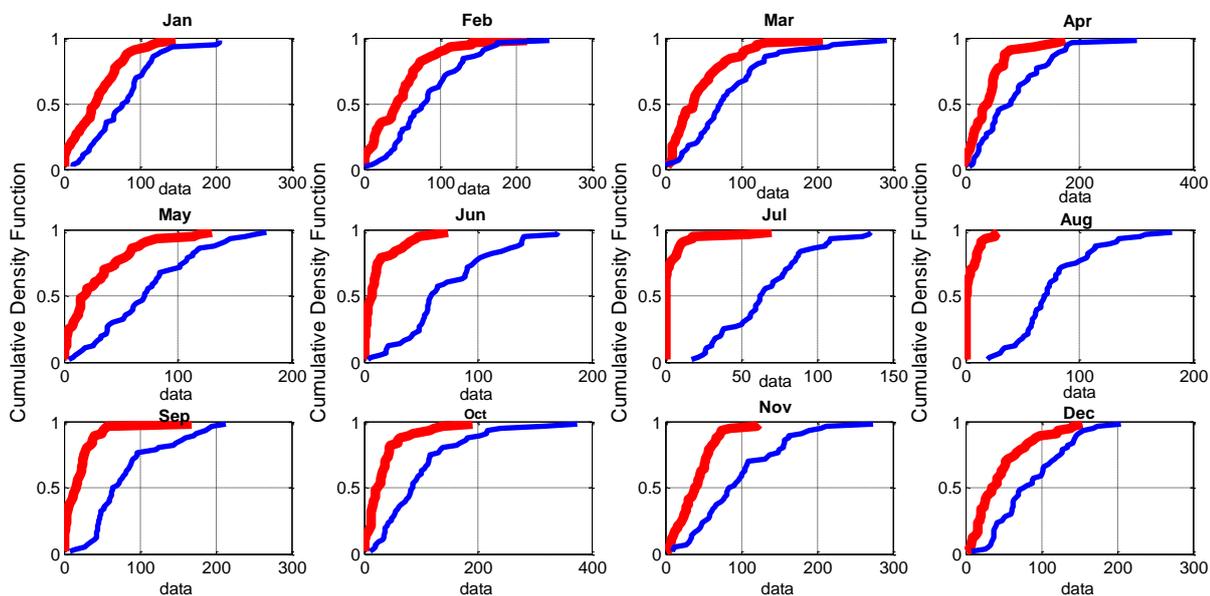


Figure IV .22: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station d'EL Haciabia et les simulations brutes des modèles MPI-ESM-LR (bleu).

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

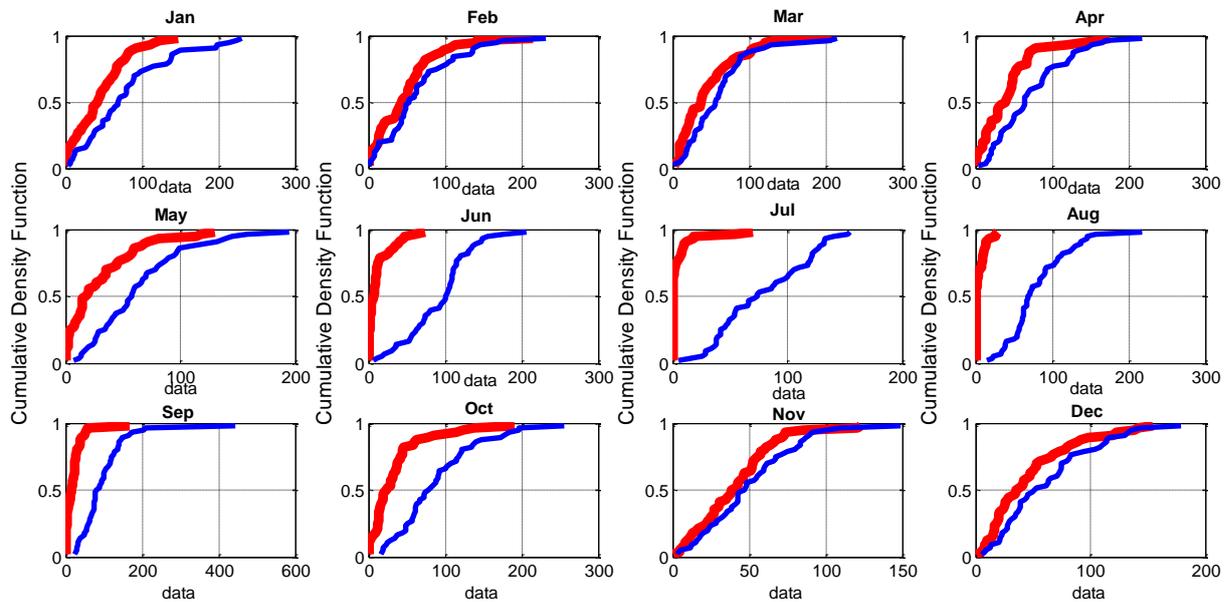


Figure IV .23: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station d'EL Haciabia et les simulations brutes des modèles NorESM1-M (bleu).

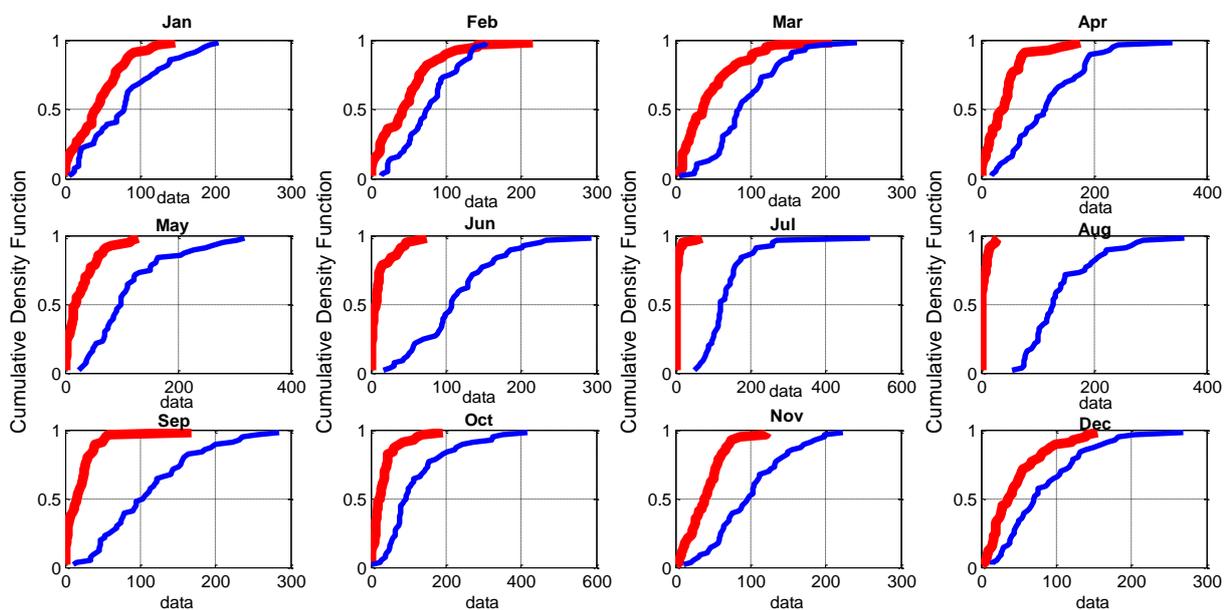


Figure IV .24: Comparaison sur la période de référence (1951-2005) des précipitations mensuelles observées de la station d'EL Haciabia et les simulations brutes des modèles GFDL-ESM2M (bleu).

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

Le tableau suivant montre le nombre des mois dont la concordance entre ecdf des observations (stations) et ecdf des modèles climatiques est significatif :

Tableau IV.1: Nombre des mois capturés par chaque modèle climatique.

MCR (MCG)	Nombre des mois /12mois		
	Station de Beni bahdel	Station de Chouly	Station d'El hacaiba
RCA4 (CanESM2)	9	10	9
RCA4 (CNRM-CM5)	7	9	6
RCA4 (IPSL-CM5A)	7	6	5
RCA4 (MIROC5)	7	8	5
RCA4 (HadGEM2-ES)	6	9	6
RCA4 (MPI-ESM-LR)	7	9	5
RCA4 (NorESM1-M)	6	8	5
RCA4 (GFDL-ESM2M)	5	7	5

A partir des 24 figures et du tableau IV.1, on observe que le modèle climatique RCA4 (CanESM2) parvient à simuler de manière satisfaisante les précipitations moyennes mensuelles (9mois/12 pour les stations de Beni bahdel et d'El hacaiba et (10/12mois) pour la station de Chouly).

VI.3. Résultat

VI.3.1 Evolution des caractéristiques de la sécheresse pendant les périodes 2006-2060 et 2045-2100.

Les tableaux ci-dessous récapitulent les caractéristiques de la sécheresse pendant les périodes futures pour les deux scénarios :

- Scénario RCP 4.5

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

Tableau IV.2 : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 3mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP4.5 pour la station de Beni bahdel.

Année	Durée (mois)	sévérité	intensité	Année	Durée (mois)	sévérité	intensité
Période (2006-2060)				Période (2045-2100)			
mai-06	4	3,960	0,990	mai-46	1	0,106	0,106
oct.-06	1	0,294	0,294	sept.-46	8	8,904	1,113
mai-07	1	0,617	0,617	sept.-47	11	13,141	1,195
avr.-08	1	0,435	0,435	déc.-49	2	2,434	1,217
juin-08	5	4,977	0,995	mai-49	2	2,787	1,394
mars-10	1	0,464	0,464	déc.-50	1	1,016	1,016
févr.-11	3	1,131	0,377	févr.-50	1	0,649	0,649
août-11	4	2,211	0,553	juil.-50	3	1,750	0,583
sept.-12	2	1,156	0,578	janv.-51	3	1,538	0,513
févr.-13	4	3,285	0,821	août-51	5	3,764	0,753
août-13	9	3,918	0,435	févr.-52	7	4,054	0,579
oct.-14	2	0,794	0,397	juin-53	11	6,483	0,589
avr.-15	8	3,784	0,473	oct.-54	6	2,614	0,436
oct.-16	4	0,863	0,216	mai-55	3	0,929	0,310
août-17	4	1,929	0,482	janv.-56	8	3,715	0,464
août-18	1	0,079	0,079	févr.-57	3	1,424	0,475
déc.-19	1	0,545	0,545	juil.-57	1	0,350	0,350
févr.-19	6	4,001	0,667	sept.-57	4	3,087	0,772
nov.-19	2	2,236	1,118	mars-58	3	3,764	1,255
avr.-31	9	4,502	0,500	nov.-58	3	1,893	0,631
janv.-23	1	0,040	0,040	sept.-59	2	1,260	0,630
juil.-23	6	5,627	0,938	sept.-60	3	3,924	1,308
août-24	1	0,435	0,435	janv.-61	11	10,408	0,946
juil.-25	1	0,494	0,494	juil.-62	2	1,116	0,558
déc.-26	2	0,908	0,454	févr.-63	5	5,036	1,007
mai-26	3	4,123	1,374	août-63	1	0,186	0,186
nov.-26	1	0,106	0,106	févr.-64	1	0,053	0,053
janv.-27	1	0,283	0,283	avr.-64	3	1,766	0,589
août-27	4	5,279	1,320	août-64	4	4,336	1,084
mars-28	3	2,169	0,723	janv.-65	8	9,901	1,238
sept.-28	4	2,600	0,650	févr.-66	5	6,173	1,235
juin-29	2	1,475	0,738	nov.-66	4	1,453	0,363
janv.-30	4	1,810	0,453	juin-67	4	3,208	0,802
juin-30	1	0,350	0,350	déc.-68	1	0,067	0,067
oct.-30	8	7,458	0,932	mai-86	4	0,966	0,241
sept.-31	1	0,322	0,322	nov.-68	1	0,267	0,267
nov.-31	1	0,378	0,378	mars-69	1	0,524	0,524
janv.-32	1	0,425	0,425	nov.-69	6	6,375	1,063

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

Tableau IV.2 (suite) : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 3 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP4.5 pour la station de Beni bahdel.

Année	Durée (mois)	sévérité	intensité	Année	Durée (mois)	sévérité	intensité
Période (2006-2060)				Période (2045-2100)			
juil.-31	6	3,858	0,643	sept.-70	3	1,034	0,345
sept.-33	1	0,026	0,026	mai-71	2	1,623	0,812
nov.-33	7	2,195	0,314	janv.-72	7	6,346	0,907
déc.-35	1	0,147	0,147	sept.-72	4	2,421	0,605
févr.-35	1	0,524	0,524	avr.-73	3	1,567	0,522
avr.-35	1	0,132	0,132	sept.-73	1	0,159	0,159
sept.-35	3	1,819	0,606	nov.-73	7	8,786	1,255
juin-36	2	1,113	0,557	juil.-74	1	0,159	0,159
mai-37	4	0,797	0,199	nov.-74	6	3,789	0,632
juin-38	3	2,131	0,710	août-75	1	0,026	0,026
mars-39	5	1,752	0,350	janv.-76	14	15,920	1,137
déc.-40	5	2,714	0,543	juin-77	8	8,163	1,020
juin-40	4	1,954	0,489	avr.-78	6	7,952	1,325
janv.-41	1	0,742	0,742	déc.-79	9	8,066	0,896
mai-41	1	0,294	0,294	janv.-80	3	2,064	0,688
déc.-42	3	2,771	0,924	août-80	2	1,644	0,822
août-42	10	5,777	0,578	janv.-81	3	1,358	0,453
juin-43	1	0,026	0,026	sept.-81	11	16,976	1,543
août-43	13	10,244	0,788	nov.-82	6	6,667	1,111
oct.-44	16	20,130	1,258	août-83	3	0,940	0,313
mai-46	1	0,106	0,106	déc.-84	5	4,502	0,900
sept.-46	8	8,904	1,113	août-84	6	10,871	1,812
sept.-47	11	13,141	1,195	avr.-85	2	1,079	0,540
déc.-49	2	2,434	1,217	sept.-85	2	0,561	0,280
mai-49	2	2,787	1,394	oct.-86	1	0,159	0,159
déc.-50	1	1,016	1,016	déc.-87	1	1,273	1,273
févr.-50	1	0,649	0,649	mai-87	6	2,965	0,494
juil.-50	3	1,750	0,583	juin-88	4	3,272	0,818
janv.-51	3	1,538	0,513	janv.-89	2	0,471	0,236
août-51	5	3,764	0,753	mai-89	4	3,309	0,827
févr.-52	7	4,054	0,579	oct.-89	1	0,524	0,524
juin-53	11	6,483	0,589	févr.-90	6	5,025	0,838
oct.-54	6	2,614	0,436	sept.-90	14	17,091	1,221
mai-55	3	0,929	0,310	déc.-92	1	0,425	0,425
janv.-56	8	3,715	0,464	mars-92	6	6,588	1,098
févr.-57	3	1,424	0,475	sept.-93	4	3,591	0,898
juil.-57	1	0,350	0,350	janv.-94	6	4,758	0,793

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

Tableau IV.2 (suite et fin) : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 3 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP4.5 pour la station de Beni bahdel.

Année	Durée (mois)	sévérité	intensité	Année	Durée (mois)	sévérité	intensité
Période (2006-2060)				Période (2045-2100)			
sept.-57	4	3,087	0,772	nov.-94	2	0,799	0,399
mars-58	3	3,764	1,255	mai-95	3	2,866	0,955
nov.-58	3	1,893	0,631	nov.-95	1	0,350	0,350
sept.-59	2	1,260	0,630	janv.-96	3	1,511	0,504
sept.-60	3	3,924	1,308	mai-96	1	0,554	0,554
				juil.-96	4	5,195	1,299
				déc.-97	6	3,235	0,539
				oct.-97	7	3,323	0,475
				mars-99	1	0,132	0,132
				juil.-99	4	3,678	0,919
				déc.-00	1	2,130	2,130
				avr.-00	4	5,392	1,348

Tableau IV.3 : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP4.5 pour la station de Beni bahdel.

Année	Durée (mois)	sévérité	intensité	Année	Durée (mois)	sévérité	intensité
Période (2006-2060)				Période (2045-2100)			
mai-06	6	3,696	0,616	mars-46	1	0,311	0,311
janv.-07	1	0,040	0,040	août-46	1	0,026	0,026
août-07	1	0,464	0,464	oct.-46	8	9,311	1,164
juin-08	8	6,845	0,856	nov.-47	10	14,475	1,447
févr.-11	1	0,040	0,040	oct.-48	1	0,350	0,350
avr.-11	1	0,067	0,067	janv.-49	1	0,256	0,256
juin-11	6	2,826	0,471	févr.-50	1	0,120	0,120
janv.-12	1	0,455	0,455	oct.-51	11	8,543	0,777
oct.-12	1	0,053	0,053	août-53	11	6,306	0,573
déc.-13	18	9,268	0,515	nov.-54	10	3,895	0,390
juin-15	6	3,519	0,587	mars-55	7	4,383	0,626
oct.-17	2	1,447	0,723	mai-57	3	1,210	0,403
janv.-18	1	0,368	0,368	sept.-57	11	7,129	0,648
févr.-19	6	3,533	0,589	déc.-59	1	0,147	0,147
sept.-19	3	1,334	0,445	févr.-59	1	0,147	0,147
juil.-21	7	5,028	0,718	déc.-60	1	0,425	0,425
août-23	6	5,133	0,855	oct.-60	17	0,454	0,027
nov.-24	1	0,079	0,079	juil.-62	1	0,239	0,239

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

Tableau IV.3 (suite et fin) : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP4.5 pour la station de Beni bahdel.

Année	Durée (mois)	sévérité	intensité	Année	Durée (mois)	sévérité	intensité
Période (2006-2060)				Période (2045-2100)			
mars-55	2	0,053	0,027	oct.-62	17	0,524	0,031
juin-26	6	2,404	0,401	févr.-63	7	6,042	0,863
sept.-27	13	6,165	0,474	avr.-64	20	18,324	0,916
nov.-28	2	1,268	0,634	mars-66	8	6,069	0,759
févr.-30	6	2,114	0,352	janv.-67	2	1,061	0,530
sept.-30	18	10,297	0,572	août-67	5	3,542	0,708
oct.-32	3	2,624	0,875	août-68	1	0,378	0,378
déc.-34	7	2,315	0,331	nov.-68	1	0,378	0,378
févr.-35	2	0,297	0,148	juin-69	1	0,159	0,159
juin-36	1	0,350	0,350	déc.-70	7	6,344	0,906
sept.-36	1	0,053	0,053	août-71	1	0,079	0,079
août-37	2	0,514	0,257	févr.-72	11	9,986	0,908
juil.-38	1	0,079	0,079	févr.-73	4	1,415	0,354
sept.-38	1	0,322	0,322	juil.-73	1	0,649	0,649
mai-39	3	1,007	0,336	sept.-73	1	0,267	0,267
févr.-40	12	6,178	0,515	déc.-74	8	9,386	1,173
févr.-42	3	1,283	0,428	oct.-74	1	0,239	0,239
sept.-42	6	4,844	0,807	déc.-75	7	3,399	0,486
sept.-43	29	40,738	1,405	mars-76	12	19,161	1,597
mars-46	1	0,311	0,311	avr.-77	2	0,552	0,276
août-46	1	0,026	0,026	sept.-77	25	28,500	1,140
oct.-46	8	9,311	1,164	nov.-79	1	0,239	0,239
nov.-47	10	14,475	1,447	janv.-80	3	1,463	0,488
oct.-48	1	0,350	0,350	mai-81	1	0,464	0,464
janv.-49	1	0,256	0,256	déc.-82	17	25,864	1,521
févr.-50	1	0,120	0,120	nov.-83	19	17,948	0,945
oct.-51	11	8,543	0,777	juil.-85	4	0,853	0,213
août-53	11	6,306	0,573	janv.-86	1	0,311	0,311
nov.-54	10	3,895	0,390	oct.-86	1	0,106	0,106
mars-55	7	4,383	0,626	déc.-87	1	0,545	0,545
mai-57	3	1,210	0,403	août-87	5	2,751	0,550
sept.-57	11	7,129	0,648	juil.-88	3	1,534	0,511
déc.-59	1	0,147	0,147	avr.-90	8	5,502	0,688
févr.-59	1	0,147	0,147	janv.-90	25	30,038	1,202
déc.-60	1	0,425	0,425	mars-92	1	0,174	0,174
oct.-60	17	0,454	0,027	mai-92	4	4,664	1,166
				mars-93	16	12,029	0,752
				juil.-95	3	1,041	0,347
				févr.-96	17	13,226	0,778
				déc.-98	5	2,763	0,553

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

Tableau IV.4: Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 12mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP4.5 pour la station de Beni bahdel

Année	Durée (mois)	sévérité	intensité	Année	Durée (mois)	sévérité	intensité
Période (2006-2060)				Période (2045-2100)			
nov.-06	3	0,379	0,126	oct.-46	28	25,910	0,925
mars-07	2	0,596	0,298	avr.-49	2	0,133	0,067
août-08	9	3,580	0,398	oct.-51	1	0,040	0,040
août-11	7	2,776	0,397	mars-52	7	4,929	0,704
mai-12	1	0,311	0,311	févr.-54	8	4,401	0,550
mars-13	18	11,034	0,613	nov.-54	3	0,895	0,298
nov.-14	1	0,106	0,106	mars-55	1	0,515	0,515
déc.-16	1	0,040	0,040	mai-55	5	2,359	0,472
avr.-18	2	0,187	0,094	avr.-56	1	0,339	0,339
juil.-18	1	0,013	0,013	juin-57	5	1,379	0,276
avr.-19	10	4,745	0,474	févr.-57	1	0,013	0,013
janv.-22	2	1,292	0,646	oct.-57	17	9,873	0,581
avr.-26	1	0,013	0,013	févr.-61	19	17,827	0,938
juin-26	2	0,569	0,284	janv.-63	9	4,442	0,494
sept.-26	3	0,373	0,124	nov.-35	2	0,279	0,139
janv.-27	2	0,214	0,107	sept.-64	31	31,458	1,015
oct.-27	1	0,067	0,067	juil.-67	6	2,664	0,444
févr.-28	12	5,415	0,451	déc.-70	14	7,194	0,514
juin-29	1	0,228	0,228	févr.-11	45	30,989	0,689
avr.-30	2	0,160	0,080	mars-76	1	0,067	0,067
août-30	20	15,977	0,799	mai-76	47	62,298	1,325
août-32	5	1,020	0,204	mai-81	1	0,067	0,067
juin-34	2	0,743	0,371	févr.-82	15	23,567	1,571
sept.-34	1	0,013	0,013	mai-84	19	20,490	1,078
juin-36	1	0,093	0,093	janv.-86	1	0,256	0,256
avr.-39	2	0,214	0,107	mars-86	1	0,093	0,093
janv.-40	4	0,699	0,175	juin-86	1	0,067	0,067
juil.-40	7	4,168	0,595	déc.-87	1	0,120	0,120
mars-41	1	0,174	0,174	févr.-88	1	0,067	0,067
mai-41	2	0,268	0,134	avr.-88	1	0,147	0,147
août-42	7	2,765	0,395	juil.-88	1	0,147	0,147
mai-43	5	0,845	0,169	mai-89	3	0,307	0,102
déc.-44	33	49,561	1,502	sept.-89	36	45,973	1,277
oct.-46	28	25,910	0,925	févr.-93	2	0,436	0,218
avr.-49	2	0,133	0,067	sept.-93	12	11,813	0,984
oct.-51	1	0,040	0,040	oct.-94	3	0,732	0,244
mars-52	7	4,929	0,704	janv.-96	28	18,556	0,663

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

Tableau IV.4 (suite et fin) : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 12 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP4.5 pour la station de Beni bahdel.

Année	Durée (mois)	sévérité	intensité	Année	Durée (mois)	sévérité	intensité
Période (2006-2060)				Période (2045-2100)			
févr.-54	8	4,401	0,550	oct.-99	14	8,133	0,581
nov.-54	3	0,895	0,298				
mars-55	1	0,515	0,515				
mai-55	5	2,359	0,472				
avr.-56	1	0,339	0,339				
juin-57	5	1,379	0,276				
févr.-57	1	0,013	0,013				
oct.-57	17	9,873	0,581				

Tableau IV .5 : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP4.5 pour la station de Chouly.

Année	Durée (mois)	sévérité	intensité	Année	Durée (mois)	sévérité	intensité
Période (2006-2060)				Période (2045-2100)			
août-06	3	1,672	0,557	mars-46	15	14,319	0,955
mai-07	2	0,318	0,159	nov.-47	10	11,214	1,121
août-07	2	2,335	1,167	oct.-48	4	3,961	0,990
juil.-08	1	0,350	0,350	janv.-49	3	0,159	0,053
sept.-08	1	0,294	0,294	déc.-50	3	1,012	0,337
févr.-11	1	0,013	0,013	sept.-50	7	8,056	1,151
avr.-11	4	1,172	0,293	oct.-51	11	7,190	0,654
févr.-13	9	6,009	0,668	sept.-53	11	8,575	0,780
déc.-14	2	0,696	0,348	sept.-54	1	0,524	0,524
avr.-14	2	0,253	0,126	nov.-54	10	6,459	0,646
août-14	1	0,350	0,350	mars-56	6	3,176	0,529
nov.-14	1	0,294	0,294	nov.-56	1	0,106	0,106
oct.-15	1	1,568	1,568	févr.-57	6	1,740	0,290
oct.-16	4	1,838	0,459	oct.-57	2	1,765	0,883
sept.-17	5	4,530	0,906	mars-58	1	0,093	0,093
sept.-18	2	1,045	0,522	juin-58	4	3,278	0,819
déc.-19	1	0,339	0,339	nov.-58	3	0,834	0,278
févr.-19	8	6,571	0,821	nov.-60	1	0,822	0,822
nov.-19	1	0,026	0,026	janv.-61	10	7,756	0,776
juil.-21	2	0,948	0,474	oct.-62	1	0,554	0,554
oct.-21	4	2,600	0,650	déc.-63	9	10,649	1,183

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

Tableau IV .5 (suite) : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP4.5 pour la station de Chouly.

Année	Durée (mois)	sévérité	intensité	Année	Durée (mois)	sévérité	intensité
Période (2006-2060)				Période (2045-2100)			
sept.-23	4	3,234	0,808	mars-64	20	17,125	0,856
oct.-24	2	2,049	1,024	févr.-66	13	10,392	0,799
août-26	1	0,494	0,494	oct.-67	2	0,842	0,421
oct.-26	2	0,894	0,447	août-68	1	0,898	0,898
janv.-27	1	0,311	0,311	juin-69	3	0,725	0,242
sept.-27	1	0,132	0,132	déc.-70	12	13,855	1,155
nov.-27	1	1,221	1,221	janv.-71	1	0,147	0,147
févr.-28	3	0,280	0,093	août-71	2	0,802	0,401
juin-28	2	1,150	0,575	janv.-72	7	4,204	0,601
déc.-29	1	0,814	0,814	sept.-72	1	0,106	0,106
févr.-30	35	25,412	0,726	juil.-73	27	28,305	1,048
déc.-34	9	3,953	0,439	févr.-76	17	20,764	1,221
oct.-34	1	0,053	0,053	nov.-77	29	31,915	1,101
févr.-35	1	0,040	0,040	janv.-81	1	0,013	0,013
nov.-35	1	0,494	0,494	oct.-81	13	17,092	1,315
août-37	2	0,512	0,256	déc.-83	7	5,950	0,850
oct.-38	3	0,331	0,110	nov.-83	10	7,846	0,785
févr.-39	8	2,969	0,371	nov.-84	4	2,816	0,704
janv.-40	6	2,725	0,454	avr.-85	1	0,093	0,093
sept.-40	1	0,350	0,350	sept.-85	1	0,750	0,750
déc.-41	2	0,662	0,331	déc.-87	1	0,742	0,742
janv.-42	2	0,241	0,120	août-87	5	2,063	0,413
oct.-42	2	0,795	0,397	mai-89	3	0,132	0,044
sept.-43	1	0,026	0,026	sept.-89	2	2,562	1,281
déc.-44	26	32,620	1,255	févr.-90	6	3,045	0,508
mars-46	15	14,319	0,955	sept.-90	1	0,682	0,682
nov.-47	10	11,214	1,121	déc.-91	24	33,551	1,398
oct.-48	4	3,961	0,990	janv.-93	4	2,552	0,638
janv.-49	3	0,159	0,053	juin-93	1	0,494	0,494
déc.-50	3	1,012	0,337	oct.-93	1	0,938	0,938
sept.-50	7	8,056	1,151	mai-94	7	3,670	0,524
oct.-51	11	7,190	0,654	juil.-95	26	17,621	0,678
sept.-53	11	8,575	0,780	déc.-98	9	4,785	0,532
sept.-54	1	0,524	0,524	déc.-00	1	1,161	1,161
nov.-54	10	6,459	0,646	avr.-00	2	0,333	0,166
mars-56	6	3,176	0,529	juil.-00	4	3,632	0,908
nov.-56	1	0,106	0,106				

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

Tableau IV .5 (suite et fin) : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP4.5 pour la station de Chouly.

Année	Durée (mois)	sévérité	intensité	Année	Durée (mois)	sévérité	intensité
Période (2006-2060)				Période (2045-2100)			
févr.-57	6	1,740	0,290				
oct.-57	2	1,765	0,883				
mars-58	1	0,093	0,093				
juin-58	4	3,278	0,819				
nov.-58	3	0,834	0,278				
nov.-60	1	0,822	0,822				

Tableau IV.6 Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP4.5 pour la station d'El Haciabia.

Année	Durée (mois)	sévérité	intensité	Année	Durée (mois)	sévérité	intensité
Période (2006-2060)				Période (2045-2100)			
juin-06	1	0,079	0,079	mars-46	1	0,147 0,147	
août-06	3	2,330	0,777	oct.-46	8	8,759	1,095
avr.-07	9	8,952	0,995	déc.-48	8	7,545	0,943
juin-08	5	5,114	1,023	déc.-49	2	0,743	0,371
févr.-11	8	3,527	0,441	mai-49	1	0,267	0,267
avr.-12	2	0,308	0,154	août-49	1	0,715	0,715
nov.-12	1	0,132	0,132	sept.-50	1	0,079	0,079
févr.-13	9	5,572	0,619	déc.-51	2	0,321	0,161
déc.-14	6	2,903	0,484	oct.-51	11	12,260	1,115
août-15	3	1,071	0,357	août-53	14	8,253	0,589
oct.-16	1	0,822	0,822	nov.-54	1	0,026	0,026
janv.-17	1	0,201	0,201	mars-55	1	0,067	0,067
sept.-17	3	1,377	0,459	juil.-55	1	0,106	0,106
août-18	3	1,484	0,495	janv.-56	19	14,819	0,780
févr.-19	10	7,666	0,767	févr.-58	6	3,696	0,616
juil.-21	2	0,879	0,440	nov.-58	1	0,053	0,053
oct.-21	4	0,806	0,201	févr.-19	1	0,368	0,368
oct.-23	4	2,065	0,516	déc.-60	1	0,013	0,013
mars-26	2	0,160	0,080	déc.-61	11	11,189	1,017
juin-26	6	2,512	0,419	déc.-63	7	3,312	0,473
août-27	12	10,107	0,842	mai-64	1	0,132	0,132
sept.-28	1	0,026	0,026	juil.-64	16	15,648	0,978
nov.-28	2	0,673	0,337	févr.-66	8	4,483	0,560

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

Tableau V.6 (suite et fin): Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP4.5 pour la station d'El Haciaibia.

Année	Durée (mois)	sévérité	intensité	Année	Durée (mois)	sévérité	intensité
Période (2006-2060)				Période (2045-2100)			
févr.-30	24	23,183	0,966	déc.-67	4	2,420	0,605
oct.-32	3	1,444	0,481	août-67	5	1,286	0,257
janv.-34	1	0,013	0,013	juil.-68	2	0,562	0,281
mars-34	1	0,228	0,228	juin-69	1	0,350	0,350
juin-34	1	0,053	0,053	août-69	1	0,186	0,186
juil.-35	5	1,445	0,289	nov.-69	9	8,008	0,890
janv.-36	2	0,540	0,270	sept.-70	2	0,767	0,383
juin-36	1	0,132	0,132	févr.-72	1	0,283	0,283
août-37	2	0,954	0,477	avr.-72	9	7,263	0,807
nov.-38	1	0,494	0,494	févr.-73	1	0,120	0,120
mars-39	7	5,478	0,783	mai-73	1	0,106	0,106
nov.-39	15	7,791	0,519	juil.-73	3	0,893	0,298
oct.-42	2	0,966	0,483	nov.-73	16	14,265	0,892
janv.-43	2	0,214	0,107	avr.-75	1	0,147	0,147
sept.-43	29	30,534	1,053	juin-75	1	0,026	0,026
mars-46	1	0,147	0,147	mars-76	1	0,013	0,013
oct.-46	8	8,759	1,095	juin-76	42	44,828	1,067
déc.-48	8	7,545	0,943	janv.-80	2	1,047	0,523
déc.-49	2	0,743	0,371	févr.-81	4	1,608	0,402
mai-49	1	0,267	0,267	déc.-82	18	23,298	1,294
août-49	1	0,715	0,715	nov.-83	8	7,412	0,926
sept.-50	1	0,079	0,079	nov.-84	13	8,879	0,683
déc.-51	2	0,321	0,161	janv.-86	1	0,147	0,147
oct.-51	11	12,260	1,115	déc.-87	1	0,256	0,256
août-53	14	8,253	0,589	avr.-88	1	0,040	0,040
nov.-54	1	0,026	0,026	juin-88	5	3,386	0,677
mars-55	1	0,067	0,067	juin-89	32	41,795	1,306
juil.-55	1	0,106	0,106	avr.-92	5	3,184	0,637
janv.-56	19	14,819	0,780	févr.-93	6	2,540	0,423
févr.-58	6	3,696	0,616	sept.-93	11	17,580	1,598
nov.-58	1	0,053	0,053	juil.-95	7	4,170	0,596
févr.-59	1	0,368	0,368	mars-96	3	0,320	0,107
déc.-60	1	0,013	0,013	août-96	1	0,682	0,682
				déc.-97	8	8,113	1,014
				déc.-98	5	3,553	0,711
				févr.-99	2	0,348	0,174
				mai-99	1	0,079	0,079

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

Tableau IV.7: Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 12 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP4.5 pour la station d'El Haciabia.

Année	Durée (mois)	sévérité	intensité	Année	Durée (mois)	sévérité	intensité
Période (2006-2060)				Période (2045-2100)			
févr.-07	21	9,554	0,455	oct.-46	28	15,867	0,567
déc.-09	1	0,067	0,067	juin-49	1	0,067	0,067
janv.-10	1	1,924	1,924	févr.-50	1	0,311	0,311
juil.-11	3	0,915	0,305	mars-52	11	9,218	0,838
oct.-12	2	0,415	0,207	mai-55	1	0,013	0,013
mars-13	16	8,393	0,525	juil.-55	1	0,013	0,013
févr.-19	12	9,955	0,830	janv.-56	38	21,677	0,570
janv.-22	1	0,484	0,484	mars-61	10	10,300	1,030
avr.-26	1	0,013	0,013	mars-63	7	1,180	0,169
juin-26	2	0,484	0,242	nov.-63	2	0,173	0,086
sept.-26	2	0,241	0,120	août-64	32	24,080	0,752
févr.-27	1	0,120	0,120	juin-67	6	1,919	0,320
sept.-27	2	0,053	0,027	déc.-70	14	11,027	0,788
déc.-28	13	8,963	0,689	févr.-72	1	0,147	0,147
févr.-30	26	25,676	0,988	mai-72	17	8,014	0,471
nov.-35	1	0,186	0,186	nov.-73	20	19,595	0,980
janv.-36	2	0,832	0,416	août-75	1	0,067	0,067
avr.-39	22	17,026	0,774	juin-76	48	52,817	1,100
mars-52	28	35,248	1,259	avr.-81	2	0,377	0,188
oct.-46	28	15,867	0,567	nov.-81	51	43,454	0,852
juin-49	1	0,067	0,067	juil.-88	4	0,670	0,168
févr.-50	1	0,311	0,311	janv.-89	1	0,013	0,013
mars-52	11	9,218	0,838	oct.-89	35	46,521	1,329
févr.-54	14	6,401	0,457	janv.-93	24	26,824	1,118
mai-55	1	0,013	0,013	juil.-95	2	0,107	0,053
juil.-55	1	0,013	0,013	déc.-96	6	2,643	0,440
janv.-56	38	21,677	0,570	août-96	3	0,363	0,121
				févr.-97	15	12,612	0,841
				oct.-99	14	12,422	0,887

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

➤ RCP 8.5

Tableau IV.8: Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 3 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP8.5 pour la station de Beni bahdel.

Année	Durée (mois)	sévérité	intensité	Année	Durée (mois)	sévérité	intensité
Période (2006-2060)				Période (2045-2100)			
sept.-06	3	3,149	1,050	avr.-45	19	14,623	0,770
janv.-07	3	2,378	0,793	févr.-47	1	1,409	1,409
juil.-07	1	0,494	0,494	juin-47	2	0,682	0,341
mars-08	8	4,923	0,615	déc.-48	1	1,273	1,273
juil.-09	1	0,159	0,159	mai-48	1	0,212	0,212
mai-10	4	1,713	0,428	sept.-48	1	0,682	0,682
juil.-11	1	0,132	0,132	avr.-49	6	5,809	0,968
sept.-11	1	0,079	0,079	nov.-49	2	0,728	0,364
févr.-12	2	0,346	0,173	juin-30	1	0,106	0,106
oct.-12	4	2,358	0,590	août-50	1	0,132	0,132
avr.-13	3	1,943	0,648	janv.-51	5	3,311	0,662
déc.-14	8	7,274	0,909	déc.-52	3	1,351	0,450
nov.-14	2	0,795	0,397	sept.-52	3	1,048	0,349
juin-15	4	1,949	0,487	mars-53	3	1,442	0,481
oct.-16	3	2,469	0,823	août-53	4	2,925	0,731
nov.-17	4	2,602	0,650	févr.-54	4	2,617	0,654
oct.-18	3	2,160	0,720	sept.-54	1	0,212	0,212
janv.-71	8	9,138	1,142	déc.-55	1	0,040	0,040
déc.-21	1	0,147	0,147	avr.-55	6	4,357	0,726
juil.-21	8	7,882	0,985	janv.-56	3	3,359	1,120
juin-22	6	3,450	0,575	juin-56	6	5,710	0,952
juin-23	9	5,665	0,629	juin-57	5	2,147	0,429
juil.-24	1	0,026	0,026	janv.-58	1	0,608	0,608
sept.-24	3	2,210	0,737	juin-58	1	0,267	0,267
mars-25	6	4,114	0,686	oct.-58	3	0,962	0,321
mars-26	6	2,141	0,357	sept.-59	2	1,844	0,922
avr.-27	2	1,661	0,831	nov.-60	1	0,617	0,617
sept.-27	7	4,781	0,683	janv.-61	2	0,387	0,194
juil.-28	1	0,267	0,267	mai-61	8	5,439	0,680
oct.-28	1	0,026	0,026	juin-62	3	3,502	1,167
févr.-29	3	1,970	0,657	nov.-62	5	2,646	0,529
août-29	3	2,860	0,953	oct.-63	7	5,245	0,749
juin-30	1	0,239	0,239	août-64	1	0,524	0,524
oct.-30	9	6,601	0,733	oct.-64	1	0,053	0,053

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

Tableau IV.8 (suite) : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 3 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP8.5 pour la station de Beni bahdel.

Année	Durée (mois)	sévérité	intensité	Année	Durée (mois)	sévérité	intensité
Période (2006-2060)				Période (2045-2100)			
févr.-33	1	0,132	0,132	mars-65	6	7,180	1,197
juin-33	8	6,777	0,847	déc.-66	6	4,860	0,810
oct.-34	1	1,117	1,117	janv.-67	5	4,349	0,870
nov.-35	3	1,081	0,360	sept.-67	1	0,322	0,322
avr.-36	5	5,768	1,154	avr.-68	1	0,406	0,406
oct.-37	3	2,733	0,911	août-68	3	1,753	0,584
avr.-38	3	2,740	0,913	juin-69	6	6,607	1,101
oct.-38	3	3,698	1,233	mars-70	1	1,117	1,117
mars-39	1	0,132	0,132	mai-70	1	0,026	0,026
nov.-39	1	0,079	0,079	juil.-70	2	0,669	0,335
janv.-40	7	7,269	1,038	déc.-71	2	2,635	1,318
nov.-40	6	5,035	0,839	juin-71	5	3,075	0,615
mars-42	2	0,371	0,186	sept.-72	3	4,706	1,569
juin-42	4	3,126	0,782	janv.-73	12	11,886	0,990
sept.-43	1	0,026	0,026	févr.-74	4	3,156	0,789
nov.-43	1	0,186	0,186	déc.-75	12	10,612	0,884
janv.-44	1	0,067	0,067	mars-76	6	5,532	0,922
avr.-44	5	3,635	0,727	janv.-77	21	12,580	0,599
oct.-44	1	0,212	0,212	févr.-79	1	0,053	0,053
avr.-45	19	14,623	0,770	avr.-79	4	1,523	0,381
févr.-47	1	1,409	1,409	nov.-79	3	1,193	0,398
juin-47	2	0,682	0,341	mai-80	1	0,106	0,106
déc.-48	1	1,273	1,273	août-80	1	0,585	0,585
mai-48	1	0,212	0,212	déc.-81	2	0,160	0,080
sept.-48	1	0,682	0,682	mai-81	1	0,053	0,053
avr.-49	6	5,809	0,968	août-81	6	4,616	0,769
nov.-49	2	0,728	0,364	août-82	2	0,514	0,257
juin-30	1	0,106	0,106	déc.-83	6	4,462	0,744
août-50	1	0,132	0,132	sept.-83	3	0,974	0,325
janv.-51	5	3,311	0,662	mars-58	9	12,339	1,371
déc.-52	3	1,351	0,450	févr.-85	3	1,550	0,517
sept.-52	3	1,048	0,349	sept.-85	19	22,079	1,162
mars-53	3	1,442	0,481	oct.-87	1	0,186	0,186
août-53	4	2,925	0,731	janv.-88	14	13,572	0,969
févr.-54	4	2,617	0,654	juin-89	4	4,205	1,051
sept.-54	1	0,212	0,212	nov.-89	18	23,987	1,333
déc.-55	1	0,040	0,040	oct.-91	4	3,723	0,931

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

Tableau IV.8 (suite et fin) : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 3 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP8.5 pour la station de Beni bahdel.

Année	Durée (mois)	sévérité	intensité	Année	Durée (mois)	sévérité	intensité
Période (2006-2060)				Période (2045-2100)			
avr.-55	6	4,357	0,726	mai-92	3	1,991	0,664
janv.-56	3	3,359	1,120	déc.-93	3	3,423	1,141
juin-56	6	5,710	0,952	août-93	10	13,084	1,308
juin-57	5	2,147	0,429	déc.-95	6	5,913	0,985
janv.-58	1	0,608	0,608	déc.-96	8	11,756	1,470
juin-58	1	0,267	0,267	nov.-96	11	6,143	0,558
oct.-58	3	0,962	0,321	nov.-97	6	9,422	1,570
sept.-59	2	1,844	0,922	août-98	8	7,550	0,944
nov.-60	1	0,617	0,617	mai-99	2	0,238	0,119
				déc.-00	4	4,220	1,055
				mai-00	1	0,132	0,132
				sept.-00	1	0,106	0,106

Tableau IV.9: Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP8.5 pour la station de Beni bahdel.

Année	Durée (mois)	sévérité	intensité	Année	Durée (mois)	sévérité	intensité
Période (2006-2060)				Période (2045-2100)			
nov.-06	9	4,975	0,553	juin-45	21	18,950	0,902
oct.-07	1	0,378	0,378	mai-47	1	0,554	0,554
juin-08	6	5,283	0,881	juil.-47	1	0,406	0,406
juil.-10	3	0,533	0,178	juin-49	7	8,032	1,147
sept.-11	2	0,132	0,066	janv.-51	5	2,578	0,516
févr.-12	1	0,093	0,093	avr.-52	1	0,228	0,228
oct.-12	4	1,536	0,384	sept.-52	4	1,336	0,334
mars-13	6	1,845	0,307	févr.-53	18	6,587	0,366
janv.-14	8	6,574	0,822	déc.-55	1	0,339	0,339
août-15	2	0,561	0,280	mars-55	21	16,887	0,804
oct.-16	3	1,350	0,450	juil.-57	1	0,053	0,053
déc.-18	4	1,243	0,311	sept.-57	5	3,721	0,744
oct.-18	1	0,079	0,079	nov.-58	1	0,267	0,267
déc.-19	1	0,067	0,067	déc.-60	1	0,455	0,455
févr.-19	1	0,339	0,339	févr.-61	1	0,608	0,608
avr.-20	5	6,559	1,312	mai-61	8	7,484	0,936
oct.-20	1	0,106	0,106	sept.-62	8	5,088	0,636
août-21	16	12,053	0,753	août-64	1	0,159	0,159
juin-23	10	7,322	0,732	mai-65	8	6,827	0,853

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

Tableau IV.9 (suite) : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP8.5 pour la station de Beni bahdel.

Année	Durée (mois)	sévérité	intensité	Année	Durée (mois)	sévérité	intensité
Période (2006-2060)				Période (2045-2100)			
oct.-25	2	0,834	0,417	mars-66	4	3,419	0,855
janv.-25	9	5,428	0,603	janv.-67	1	0,040	0,040
mai-26	5	1,767	0,353	mars-67	7	4,087	0,584
déc.-28	4	3,961	0,990	août-68	6	1,805	0,301
juin-28	1	0,322	0,322	juil.-69	9	6,642	0,738
oct.-28	1	0,435	0,435	juin-70	2	0,852	0,426
févr.-29	3	0,854	0,285	oct.-70	1	0,132	0,132
nov.-29	3	1,410	0,470	août-71	6	3,311	0,552
janv.-31	6	6,283	1,047	sept.-72	1	0,079	0,079
juin-33	9	9,319	1,035	nov.-72	19	21,327	1,122
janv.-35	5	1,622	0,324	mars-75	11	13,325	1,211
juil.-35	1	0,079	0,079	avr.-76	8	5,594	0,699
juin-36	4	3,342	0,835	mars-77	21	16,451	0,783
oct.-37	4	0,860	0,215	avr.-79	2	0,225	0,113
mars-38	3	0,563	0,188	juil.-79	1	0,554	0,554
juil.-38	9	3,242	0,360	sept.-79	1	0,159	0,159
févr.-40	17	15,053	0,885	août-80	1	0,524	0,524
juin-42	7	4,612	0,659	déc.-81	1	0,120	0,120
janv.-44	1	0,013	0,013	août-81	6	5,300	0,883
avr.-44	8	4,184	0,523	déc.-83	7	5,125	0,732
juin-45	21	18,950	0,902	janv.-84	17	16,477	0,969
mai-47	1	0,554	0,554	déc.-88	17	26,849	1,579
juil.-47	1	0,406	0,406	janv.-88	42	51,691	1,231
juin-49	7	8,032	1,147	nov.-91	3	1,970	0,657
janv.-51	5	2,578	0,516	août-92	1	0,406	0,406
avr.-52	1	0,228	0,228	févr.-93	1	0,013	0,013
sept.-52	4	1,336	0,334	sept.-93	9	13,561	1,507
févr.-53	18	6,587	0,366	févr.-95	7	4,435	0,634
déc.-55	1	0,339	0,339	févr.-96	8	12,710	1,589

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

Tableau IV.9 (suite et fin): Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP8.5 pour la station de Beni bahdel.

Année	Durée (mois)	sévérité	intensité	Année	Durée (mois)	sévérité	intensité
Période (2006-2060)				Période (2045-2100)			
mars-55	21	16,887	0,804	févr.-97	29	26,410	0,911
juil.-57	1	0,053	0,053	janv.-00	5	3,881	0,776
sept.-57	5	3,721	0,744	juil.-00	1	0,186	0,186
nov.-58	1	0,267	0,267				#DIV/0!
déc.-60	1	0,455	0,455				#DIV/0!

Tableau IV.10 Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 12 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP8.5 pour la station de Beni bahdel.

Année	Durée (mois)	sévérité	intensité	Année	Durée (mois)	sévérité	intensité
Période (2006-2060)				Période (2045-2100)			
févr.-07	2	0,348	0,174	févr.-45	2	0,457	0,228
mai-07	8	3,402	0,425	nov.-45	21	25,306	1,205
avr.-08	1	0,120	0,120	nov.-47	2	0,145	0,073
juin-08	10	3,758	0,376	nov.-49	7	4,595	0,656
déc.-10	2	-3,327	-1,663	janv.-51	5	1,401	0,280
mars-12	1	0,067	0,067	sept.-52	3	0,863	0,288
nov.-12	3	0,507	0,169	mars-53	19	10,410	0,548
avr.-13	21	11,729	0,559	nov.-54	2	0,821	0,411
oct.-20	4	2,391	0,598	mars-55	24	19,688	0,820
sept.-21	15	12,439	0,829	avr.-57	1	0,093	0,093
déc.-24	8	5,119	0,640	déc.-58	5	1,961	0,392
sept.-24	2	0,187	0,094	juin-58	1	0,174	0,174
févr.-25	9	5,191	0,577	juin-60	1	0,067	0,067
déc.-26	1	0,093	0,093	juil.-61	8	6,163	0,770
janv.-28	2	0,402	0,201	juin-62	1	0,040	0,040
juin-28	5	2,212	0,442	janv.-63	5	3,425	0,685
févr.-29	1	0,013	0,013	mars-64	1	0,201	0,201
avr.-29	1	0,640	0,640	mai-64	7	4,691	0,670

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

Tableau IV.10 (suite et fin): Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 12 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP8.5 pour la station de Beni bahdel.

Année	Durée (mois)	sévérité	intensité	Année	Durée (mois)	sévérité	intensité
Période (2006-2060)				Période (2045-2100)			
avr.-29	1	0,640	0,640	mai-64	7	4,691	0,670
avr.-31	1	0,013	0,013	mai-65	4	1,320	0,330
juil.-31	3	1,175	0,392	oct.-65	9	8,159	0,907
sept.-33	7	6,279	0,897	sept.-66	2	0,408	0,204
mai-35	1	0,120	0,120	janv.-67	1	0,067	0,067
juil.-35	2	0,406	0,203	mai-67	1	0,228	0,228
avr.-38	12	5,040	0,420	juil.-67	6	1,981	0,330
juil.-39	1	0,093	0,093	janv.-69	2	0,349	0,175
avr.-40	15	15,335	1,022	juin-69	15	8,240	0,549
août-41	1	0,120	0,120	déc.-71	1	0,425	0,425
sept.-42	6	1,599	0,266	avr.-71	1	0,040	0,040
avr.-44	9	3,859	0,429	août-71	4	1,935	0,484
févr.-45	2	0,457	0,228	janv.-72	4	1,057	0,264
nov.-45	21	25,306	1,205	déc.-73	18	24,240	1,347
nov.-47	2	0,145	0,073	juil.-74	2	0,297	0,148
nov.-49	7	4,595	0,656	juin-75	49	46,237	0,944
janv.-51	5	1,401	0,280	oct.-79	1	0,067	0,067
sept.-52	3	0,863	0,288	déc.-80	2	0,728	0,364
mars-53	19	10,410	0,548	mars-80	1	0,093	0,093
nov.-54	2	0,821	0,411	août-80	1	0,040	0,040
mars-55	24	19,688	0,820	févr.-82	3	0,907	0,302
avr.-57	1	0,093	0,093	mars-83	1	0,147	0,147
déc.-58	5	1,961	0,392	mai-83	7	3,144	0,449
juin-58	1	0,174	0,174	janv.-84	1	0,228	0,228
juin-60	1	0,067	0,067	mars-85	19	20,993	1,105
				nov.-85	19	28,953	1,524
				mai-88	45	69,945	1,554
				mai-92	1	0,013	0,013
				févr.-93	1	0,425	0,425
				sept.-93	12	10,657	0,888
				juin-95	6	1,447	0,241
				janv.-96	58	51,682	0,891

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

Tableau IV.11: Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pendant les périodes futures (2006-2060) pour le scénario RCP8.5 pour la station de Chouly.

Année	Durée (mois)	sévérité	intensité	Année	Durée (mois)	sévérité	intensité
Période (2006-2060)				Période (2045-2100)			
janv.-07	7	3,4120	0,4874	juin-26	3	1,5087	0,5029
juil.-08	5	1,9906	0,3981	oct.-45	13	7,6711	0,5901
sept.-10	2	0,9087	0,4543	déc.-47	8	6,3047	0,7881
sept.-11	1	0,0527	0,0527	oct.-47	1	0,2666	0,2666
oct.-12	13	10,5927	0,8148	déc.-48	1	0,0133	0,0133
déc.-14	9	6,7590	0,7510	juil.-49	7	3,8769	0,5538
déc.-15	1	0,1470	0,1470	août-50	1	0,0264	0,0264
nov.-16	2	1,3547	0,6774	janv.-51	6	2,8535	0,4756
mars-17	1	0,3963	0,3963	déc.-52	1	0,4253	0,4253
nov.-17	5	3,6039	0,7208	févr.-52	1	0,6735	0,6735
oct.-18	1	0,5237	0,5237	avr.-52	1	0,0933	0,0933
déc.-19	4	1,6495	0,4124	juil.-52	1	0,0527	0,0527
févr.-20	7	7,3665	1,0524	sept.-52	3	3,9858	1,3286
déc.-21	1	0,2283	0,2283	janv.-53	7	2,3504	0,3358
oct.-21	1	0,4937	0,4937	sept.-53	2	2,2499	1,1250
janv.-22	6	1,7635	0,2939	mai-54	4	2,5288	0,6322
nov.-22	1	0,3777	0,3777	mars-55	7	5,1030	0,7290
juin-23	1	0,4350	0,4350	nov.-55	9	10,6059	1,1784
sept.-23	6	5,4425	0,9071	sept.-56	3	1,8867	0,6289
mars-25	9	5,9345	0,6594	sept.-57	9	3,9030	0,4337
juin-26	4	1,2708	0,3177	août-58	6	2,5469	0,4245
août-27	1	0,1855	0,1855	oct.-59	1	0,3496	0,3496
janv.-28	3	1,7771	0,5924	oct.-60	1	0,0264	0,0264
mai-28	2	0,4805	0,2402	sept.-61	1	0,2394	0,2394
avr.-29	5	3,1284	0,6257	nov.-61	2	2,3697	1,1849
janv.-31	5	3,0139	0,6028	sept.-62	8	5,0583	0,6323
août-32	1	0,0791	0,0791	nov.-63	12	12,8540	1,0712
déc.-33	16	4,9912	0,3120	mai-65	16	13,9477	0,8717
févr.-35	7	2,6759	0,3823	janv.-67	8	7,0255	0,8782

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

Tableau IV.11 (suite et fin) : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pendant les périodes futures (2006-2060) pour le scénario RCP8.5 pour la station de Chouly.

Année	Durée (mois)	sévérité	intensité	Année	Durée (mois)	sévérité	intensité
Période (2006-2060)				Période (2045-2100)			
juin-36	6	4,7499	0,7916	juil.-68	1	0,1321	0,1321
oct.-37	3	0,8253	0,2751	sept.-68	1	0,0264	0,0264
févr.-38	7	2,9499	0,4214	sept.-69	3	3,8699	1,2900
févr.-40	17	22,1866	1,3051	mars-70	1	0,0666	0,0666
juil.-42	1	0,0791	0,0791	déc.-71	2	0,7552	0,3776
oct.-42	3	1,8546	0,6182	août-71	4	4,0082	1,0021
avr.-44	7	3,1067	0,4438	janv.-72	1	0,0400	0,0400
juin-26	3	1,5087	0,5029	sept.-72	1	0,1056	0,1056
oct.-45	13	7,6711	0,5901	nov.-72	1	0,4062	0,4062
déc.-47	8	6,3047	0,7881	janv.-73	12	12,4810	1,0401
oct.-47	1	0,2666	0,2666	févr.-74	8	4,1915	0,5239
déc.-48	1	0,0133	0,0133	nov.-74	13	8,4010	0,6462
juil.-49	7	3,8769	0,5538	mars-76	7	6,8798	0,9828
août-50	1	0,0264	0,0264	avr.-77	10	8,1248	0,8125
janv.-51	6	2,8535	0,4756	mai-78	1	0,1056	0,1056
déc.-52	1	0,4253	0,4253	sept.-78	4	2,4861	0,6215
févr.-52	1	0,6735	0,6735	févr.-79	1	0,3677	0,3677
avr.-52	1	0,0933	0,0933	juil.-79	1	0,1056	0,1056
juil.-52	1	0,0527	0,0527	sept.-42	5	2,9802	0,5960
sept.-52	3	3,9858	1,3286	août-80	1	0,2394	0,2394
janv.-53	7	2,3504	0,3358	oct.-80	4	0,8326	0,2082
sept.-53	2	2,2499	1,1250	août-81	5	5,0892	1,0178
mai-54	4	2,5288	0,6322	févr.-83	12	10,3168	0,8597
mars-55	7	5,1030	0,7290	avr.-84	8	5,2465	0,6558
nov.-55	9	10,6059	1,1784	janv.-85	9	2,4679	0,2742
sept.-56	3	1,8867	0,6289	nov.-85	20	33,6650	1,6832
sept.-57	9	3,9030	0,4337	janv.-88	14	15,2151	1,0868
août-58	6	2,5469	0,4245	avr.-89	1	0,0133	0,0133
oct.-59	1	0,3496	0,3496	nov.-89	1	0,8217	0,8217
oct.-60	1	0,0264	0,0264	févr.-90	19	27,0683	1,4246
				janv.-92	1	0,4844	0,4844
				août-92	3	2,5380	0,8460
				déc.-93	3	2,8494	0,9498
				sept.-93	1	0,0791	0,0791
				nov.-93	10	13,7681	1,3768
				déc.-95	51	59,6804	1,1702
				nov.-99	7	6,2655	0,8951

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

Tableau IV.12: Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP8.5 pour la station d'El Haciabia.

Année	Durée (mois)	sévérité	intensité	Année	Durée (mois)	sévérité	intensité
Période (2006-2060)				Période (2045-2100)			
déc.-07	4	2,352	0,588	juin-45	3	0,702	0,234
mai-07	3	0,865	0,288	oct.-45	13	12,854	0,989
juin-08	6	3,669	0,611	mai-47	4	1,268	0,317
sept.-10	2	0,573	0,286	oct.-47	1	0,106	0,106
oct.-12	23	18,380	0,799	juin-49	7	5,057	0,722
sept.-15	1	0,186	0,186	févr.-50	1	0,013	0,013
oct.-16	3	1,632	0,544	févr.-51	4	2,073	0,518
mars-17	1	0,228	0,228	févr.-52	1	0,396	0,396
oct.-17	6	3,969	0,662	avr.-52	1	0,283	0,283
oct.-18	3	1,305	0,435	juil.-52	1	0,106	0,106
mars-20	6	7,874	1,312	sept.-52	15	12,354	0,824
oct.-30	1	0,159	0,159	janv.-54	7	2,327	0,332
juil.-21	10	8,138	0,814	mars-55	7	4,093	0,585
juin-22	1	0,026	0,026	nov.-55	13	15,467	1,190
août-22	4	1,512	0,378	sept.-57	6	3,892	0,649
juin-23	1	0,106	0,106	nov.-58	3	1,044	0,348
août-23	8	7,498	0,937	déc.-60	1	0,040	0,040
févr.-25	9	5,738	0,638	févr.-61	1	0,120	0,120
avr.-26	6	2,077	0,346	avr.-61	9	6,803	0,756
mai-27	1	0,026	0,026	août-62	9	7,862	0,874
déc.-28	4	4,505	1,126	nov.-63	8	5,798	0,725
juin-28	1	0,267	0,267	août-64	3	0,649	0,216
oct.-28	1	0,494	0,494	mai-65	16	14,506	0,907
avr.-29	1	0,311	0,311	janv.-67	8	6,150	0,769
nov.-29	3	1,302	0,434	juil.-68	3	0,883	0,294
janv.-31	6	6,115	1,019	nov.-38	2	0,443	0,222
mai-33	10	7,737	0,774	août-69	8	6,453	0,807
janv.-35	7	1,157	0,165	janv.-72	1	0,067	0,067
juil.-36	2	1,815	0,907	sept.-72	21	21,391	1,019

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

Tableau IV.12 (suite et fin) : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 6 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP8.5 pour la station d'El Haciabia.

Année	Durée (mois)	sévérité	intensité	Année	Durée (mois)	sévérité	intensité
Période (2006-2060)				Période (2045-2100)			
nov.-37	2	0,468	0,234	juil.-74	1	0,350	0,350
mars-38	9	2,624	0,292	mars-75	45	26,095	0,580
mars-39	1	0,120	0,120	avr.-77	20	11,285	0,564
févr.-40	16	13,180	0,824	juil.-79	1	0,026	0,026
juin-42	7	5,305	0,758	sept.-79	1	0,212	0,212
sept.-43	2	0,159	0,079	déc.-80	2	0,854	0,427
avr.-44	1	0,201	0,201	déc.-81	1	0,256	0,256
juin-44	6	2,476	0,413	août-81	6	6,387	1,064
juin-45	3	0,702	0,234	févr.-83	10	6,021	0,602
oct.-45	13	12,854	0,989	janv.-84	1	0,147	0,147
mai-47	4	1,268	0,317	avr.-84	14	9,899	0,707
oct.-47	1	0,106	0,106	déc.-86	18	30,091	1,672
juin-49	7	5,057	0,722	janv.-88	42	45,847	1,092
févr.-50	1	0,013	0,013	nov.-91	3	0,294	0,098
févr.-51	4	2,073	0,518	août-92	2	0,656	0,328
févr.-52	1	0,396	0,396	déc.-93	3	2,068	0,689
avr.-52	1	0,283	0,283	sept.-93	9	11,333	1,259
juil.-52	1	0,106	0,106	déc.-95	9	8,333	0,926
sept.-52	15	12,354	0,824	nov.-95	1	0,212	0,212
janv.-54	7	2,327	0,332	janv.-96	9	13,605	1,512
mars-55	7	4,093	0,585	janv.-97	29	32,509	1,121
nov.-55	13	15,467	1,190	déc.-00	6	3,384	0,564
sept.-57	6	3,892	0,649				
nov.-58	3	1,044	0,348				
déc.-60	1	0,040	0,040				

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

Tableau IV.13 : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 12 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP8.5 pour la station d'El Haciabia.

Année	Durée (mois)	sévérité	intensité	Année	Durée (mois)	sévérité	intensité
Période (2006-2060)				Période (2045-2100)			
mai-07	4	2,057	0,514	févr.-45	2	0,187	0,093
nov.-07	1	0,026	0,026	nov.-45	22	17,853	0,811
sept.-08	2	0,294	0,147	nov.-47	2	0,717	0,359
déc.-09	1	0,368	0,368	avr.-48	1	0,256	0,256
févr.-09	1	0,174	0,174	nov.-49	7	3,616	0,517
nov.-12	3	0,292	0,097	févr.-51	4	1,482	0,371
mars-13	22	22,709	1,032	août-52	26	19,317	0,743
juil.-20	9	5,525	0,614	déc.-55	1	0,201	0,201
sept.-21	15	9,280	0,619	juin-55	23	20,131	0,875
oct.-23	9	3,725	0,414	janv.-58	4	1,657	0,414
avr.-25	15	6,961	0,464	juin-61	8	5,185	0,648
sept.-26	2	0,403	0,201	janv.-64	1	0,013	0,013
janv.-28	3	0,750	0,250	mars-64	8	5,375	0,672
juin-28	5	2,759	0,552	juil.-65	1	0,040	0,040
avr.-29	1	0,640	0,640	nov.-65	26	23,826	0,916
déc.-30	2	0,160	0,080	janv.-69	1	0,201	0,201
mars-31	7	1,978	0,283	juil.-69	1	0,067	0,067
juin-33	10	5,492	0,549	oct.-69	2	0,633	0,316
avr.-35	2	0,268	0,134	janv.-70	8	5,240	0,655
juil.-35	2	0,241	0,121	déc.-71	1	0,311	0,311
avr.-38	12	4,819	0,402	oct.-72	1	0,040	0,040
mai-40	14	13,113	0,937	déc.-73	22	27,234	1,238
août-41	1	0,013	0,013	janv.-75	1	0,228	0,228
sept.-42	7	2,128	0,304	juin-75	45	35,656	0,792
avr.-44	8	2,187	0,273	avr.-79	2	0,213	0,107
févr.-45	2	0,187	0,093	oct.-79	1	0,013	0,013
nov.-45	22	17,853	0,811	janv.-80	1	0,545	0,545
nov.-47	2	0,717	0,359	mars-80	1	0,425	0,425
avr.-48	1	0,256	0,256	févr.-82	2	0,080	0,040
nov.-49	7	3,616	0,517	mai-83	26	20,305	0,781

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

Tableau IV.13 (suite et fin) : Les caractéristiques de la sécheresse à l'échelle 12 mois pendant les périodes futures (2006-2100) pour le scénario RCP8.5 pour la station d'El Haciabia.

Année	Durée (mois)	sévérité	intensité	Année	Durée (mois)	sévérité	intensité
Période (2006-2060)				Période (2045-2100)			
févr.-51	4	1,482	0,371	nov.-85	23	29,459	1,281
août-52	26	19,317	0,743	mai-88	44	57,364	1,304
déc.-55	1	0,201	0,201	sept.-92	1	0,040	0,040
juin-55	23	20,131	0,875	janv.-93	2	1,102	0,551
janv.-58	4	1,657	0,414	oct.-93	2	0,359	0,180
				févr.-94	11	7,193	0,654
				févr.-95	59	68,188	1,156
				févr.-00	2	0,652	0,326
				mai-00	6	1,815	0,303

Sur la base de l'analyse des quatre caractéristiques de la sécheresse aux différentes échelles du temps dans les périodes futures pour le deux scénarios futures :

- Période (2006-2060)
 - Scénario RCP 4.5

À l'échelle du trois mois le sous bassin de Beni bahdel avait connu 80 épisodes de sécheresse, avec une durée maximale de 16 mois, sévérité maximale de 20.13 et une intensité maximale de 1.39 , et 54 épisodes de sécheresse, avec une durée maximale de 29 mois, sévérité maximale de 40.73 et une intensité maximale de 1.44 à l'échelle du six mois, à l'échelle de 12 mois elle avait connu 45 épisodes de sécheresse, avec une durée maximale de 33 mois, sévérité maximale de 49.56 et une intensité maximale de 1.50.

Pour la station de Chouly, à l'échelle de 6 mois, on recense 63 événements secs pour une durée maximale de 35 mois, sévérité minimale de 32.62 et une intensité maximale de 1.57.

À l'échelle du 6 mois la station d'El Haciabia avait connu 56 épisodes de sécheresse, avec une durée maximale de 29 mois, sévérité maximale de 30.53 et une intensité maximale de 1.11 et 26 épisodes de sécheresse, avec une durée maximale de 38 mois, sévérité maximale de 35.24 et une intensité maximale de 1.94 à l'échelle du 12 mois.

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

Donc au cours de cette période , L'analyse de la durée des épisodes de sécheresse montre que celle-ci varie d'une échelle de temps à une autre et d'une station a une autre, à l'échelle du six mois, la station de Chouly a connu la plus longue épisode de sécheresse avec 63 de séquences sèches consécutives. Cependant, la station de Beni bahdel contienne la plus longue durée de sécheresse.

➤ Scénario RCP 8.5

À l'échelle du trois mois le sous bassin de Beni bahdel avait connu 71 épisodes de sécheresse, avec une durée maximale de 19 mois, sévérité maximale de 14.62 et une intensité maximale de 1.41, et 53 épisodes de sécheresse, avec une durée maximale de 21 mois, sévérité maximale de 18.95 et une intensité maximale de 1.31 à l'échelle du six mois, à l'échelle de 12 mois elle avait connu 42 épisodes de sécheresse, avec une durée maximale de 24 mois, sévérité maximale de 25.30 et une intensité maximale de 1.21.

Pour la station de Chouly, à l'échelle de 6 mois, on recense 59 événements secs pour une durée maximale de 17 mois, sévérité minimale de 22.18 et une intensité maximale de 1.33.

À l'échelle du 6 mois la station d'El Haciabia avait connu 54 épisodes de sécheresse, avec une durée maximale de 23 mois, sévérité maximale de 18.38 et une intensité maximale de 1.32 et 35 épisodes de sécheresse, avec une durée maximale de 26 mois, sévérité maximale de 22.07 et une intensité maximale de 1.03 à l'échelle du 12 mois.

Donc au cours de cette période, L'analyse de la durée des épisodes de sécheresse montre que celle-ci varie d'une échelle de temps à une autre et d'une station a une autre, à l'échelle du six mois, la station de Chouly a connu la plus longue épisode de sécheresse avec 59 de séquences sèches consécutives. Cependant, la station d'El Haciabia contienne la plus longue durée de sécheresse.

- Période (2060-2100)
 - Scénario RCP 4.5

À l'échelle du trois mois le sous bassin de Beni bahdel avait connu 87 épisodes de sécheresse, avec une durée maximale de 14 mois, sévérité maximale de 17.09 et une intensité maximale de 2.13, et 60 épisodes de sécheresse, avec une durée maximale de 25 mois, sévérité maximale de 30.04 et une intensité maximale de 1.6 à l'échelle du six mois, à l'échelle de 12 mois elle avait connu 38

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

épisodes de sécheresse, avec une durée maximale de 47 mois, sévérité maximale de 62.49 et une intensité maximale de 1.57.

Pour la station de Chouly, à l'échelle de 6 mois, on recense 57 événements secs pour une durée maximale de 29 mois, sévérité minimale de 33.55 et une intensité maximale de 1.39.

À l'échelle du 6 mois la station d'El Haciabia avait connu 60 épisodes de sécheresse, avec une durée maximale de 42 mois, sévérité maximale de 44.83 et une intensité maximale de 1.60 et 28 épisodes de sécheresse, avec une durée maximale de 51 mois, sévérité maximale de 52.83 et une intensité maximale de 1.33 à l'échelle du 12 mois.

Donc au cours de cette période, L'analyse de la durée des épisodes de sécheresse montre que celle-ci varie d'une échelle de temps à une autre et d'une station a une autre, à l'échelle du six mois, la station d'El Haciabia et Beni bahdel ont connu la plus longue épisode de sécheresse avec 60 de séquences sèches consécutives. Cependant, la station d'El Hacaiba contienne la plus longue durée de sécheresse.

➤ Scénario RCP 8.5

À l'échelle du trois mois le sous bassin de Beni bahdel avait connu 83 épisodes de sécheresse, avec une durée maximale de 21 mois, sévérité maximale de 23.99 et une intensité maximale de 1.55, et 51 épisodes de sécheresse, avec une durée maximale de 42 mois, sévérité maximale de 21.69 et une intensité maximale de 1.59 à l'échelle du six mois, à l'échelle de 12 mois elle avait connu 49 épisodes de sécheresse, avec une durée maximale de 58 mois, sévérité maximale de 69.94 et une intensité maximale de 1.55.

Pour la station de Chouly, à l'échelle de 6 mois, on recense 66 événements secs pour une durée maximale de 51 mois, sévérité minimale de 59.68 t une intensité maximale de 39.86.

À l'échelle du 6 mois la station d'El Haciabia avait connu 51 épisodes de sécheresse, avec une durée maximale de 45 mois, sévérité maximale de 45.85 et une intensité maximale de 1.67 et 39 épisodes de sécheresse, avec une durée maximale de 59 mois, sévérité maximale de 68.18 et une intensité maximale de 1.304 à l'échelle du 12 mois.

Donc au cours cette période, L'analyse de la durée des épisodes de sécheresse montre que celle-ci varie d'une échelle de temps à une autre et d'une station a une autre, à l'échelle du six mois, la station de Chouly a connu la plus longue épisode de sécheresse avec 66 de séquences sèches consécutives. Et elle contienne la plus longue durée de sécheresse.

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

Il est à signaler que pour chacune des stations et chacune des échelles étudiées, que seuls les résultats du modèle précédemment retenu RCA4 (CanESM2) seront présentés.

Les caractéristiques de la sécheresse (sévérité-durée) dans les stations étudiées pour les deux périodes futures 2006-2060 et 2045-2100 obtenues par les deux scénarios sont présentées dans les figures IV.25, IV.26, IV.27 et IV.28.

Les caractéristiques de la sécheresse simulées par le modèle retenu ont montré une augmentation en nombre et en durée d'évènement de sécheresse dans toutes les échelles étudiées. En effet, le modèle RCA4 (CanESM2) prédit, pour les périodes 2006-2060 et 2045-2100, avec les deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5, une stabilisation dans la sévérité de la sécheresse par rapport à la période 1951-2005 dans les stations étudiées. L'augmentation de la durée et le nombre d'évènement de la sécheresse a augmenté en passant du scénario RCP4.5 au scénario RCP8.5 et de la période 2006-2060 à la période 2045-2100.

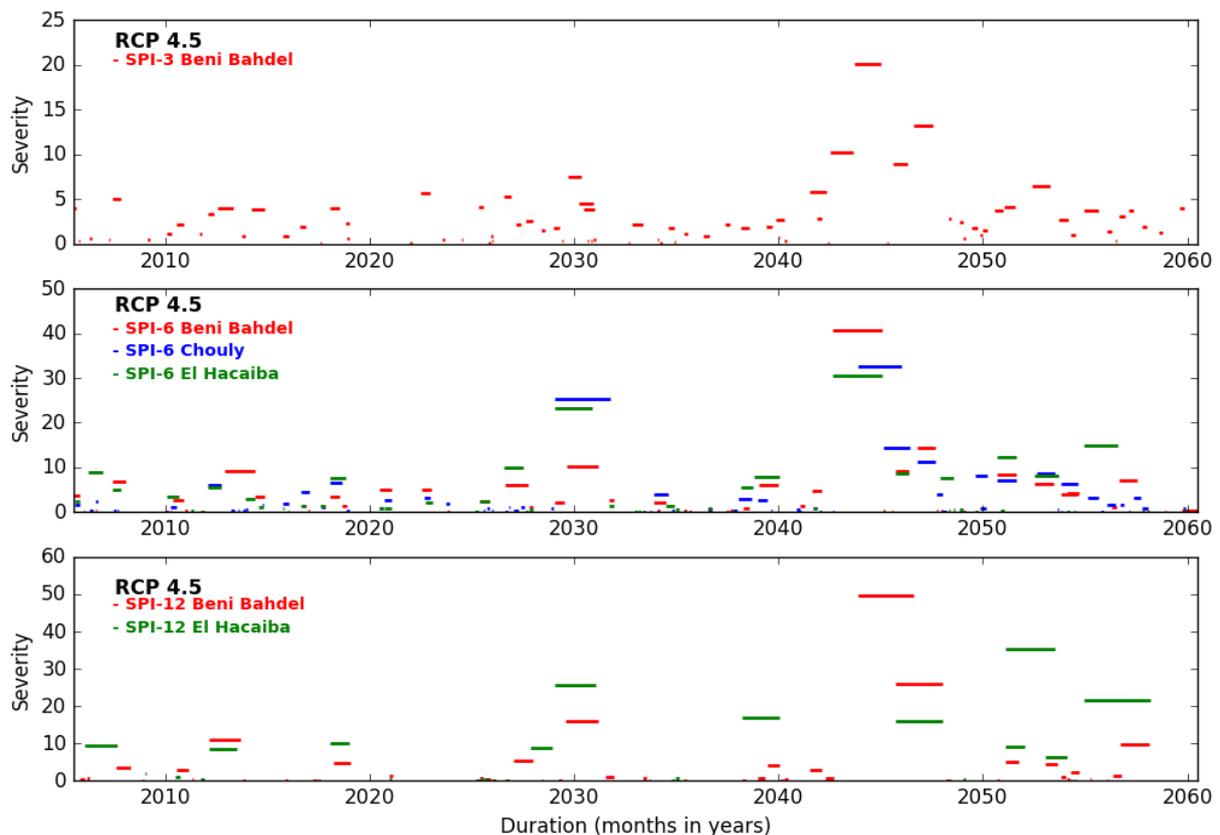


Figure IV.25 : Les caractéristiques de la sécheresse dans les bassins de Beni Bahdel, Chouly et d'El Hacaiba à l'échelle de 3, 6 et 12 mois pendant la période 2006-2060 avec le scénario RCP4.5 (RCA4 (CanESM2)).

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

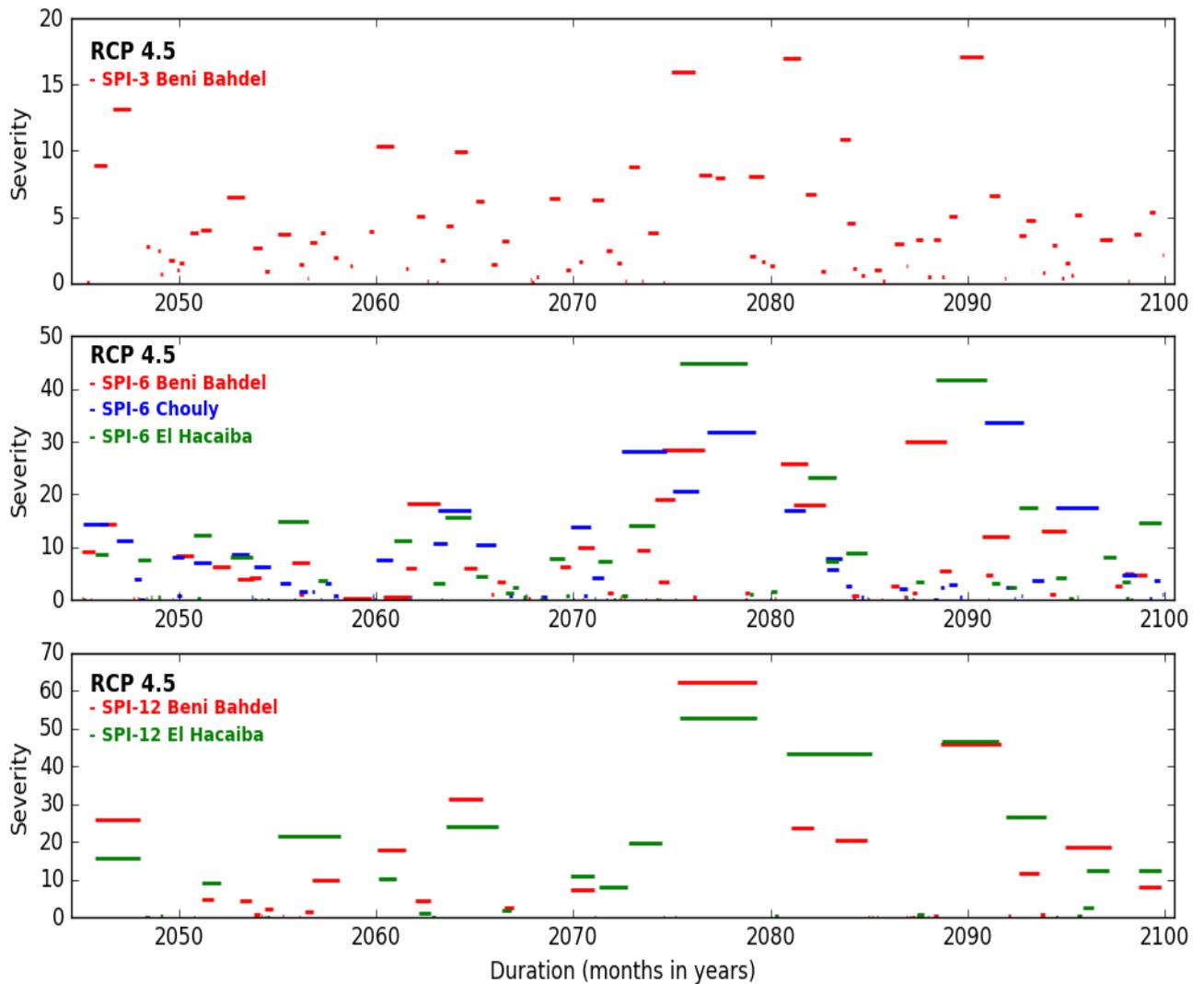


Figure IV.26 : Les caractéristiques de la sécheresse dans les bassins de Beni bahdel, Chouly et d'El Hacaiba à l'échelle de 3 ,6 et 12 mois pendant la période 2045-2100 avec le scénario RCP4.5 (RCA4 (CanESM2)).

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

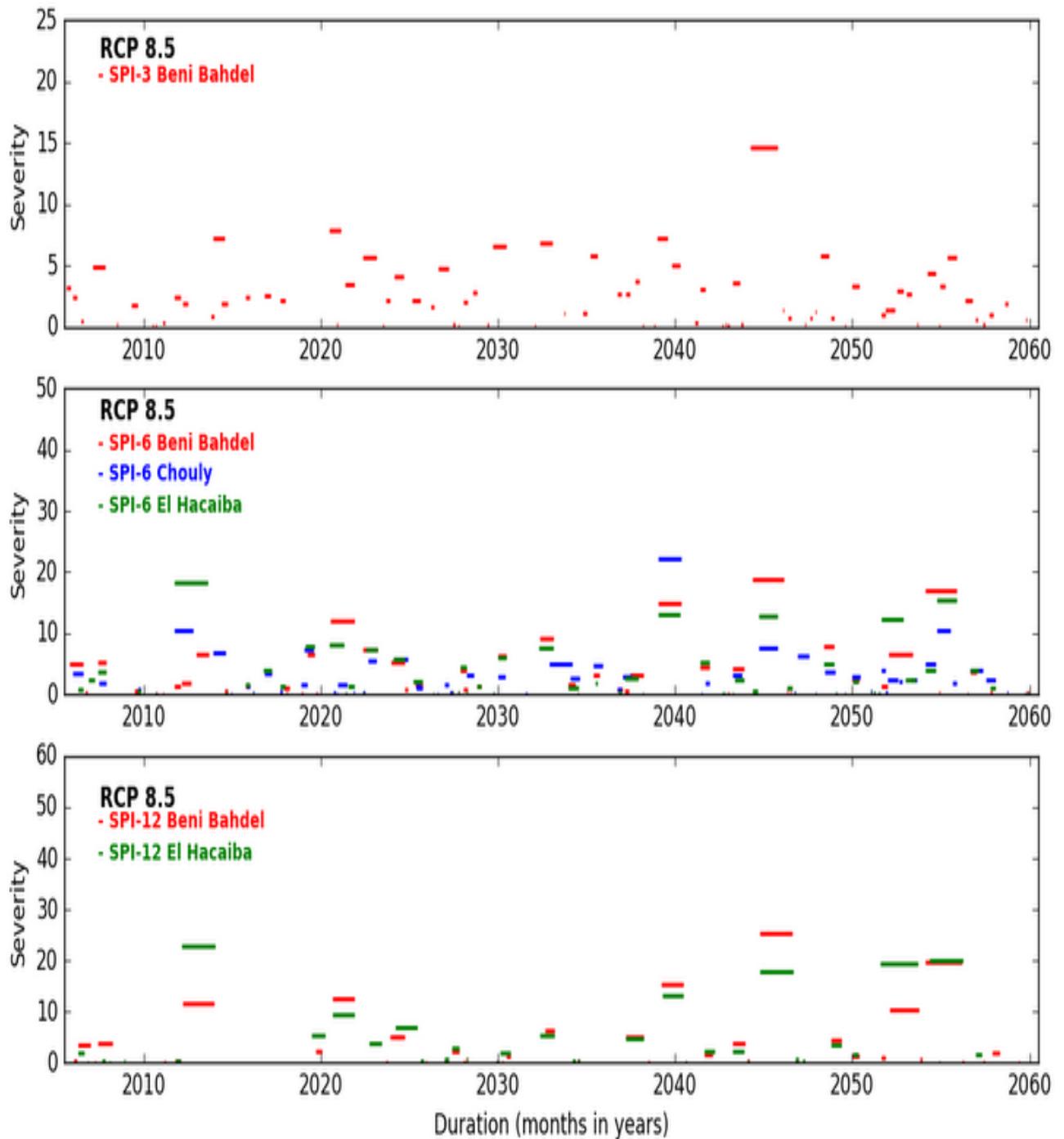


Figure IV.27 : Les caractéristiques de la sècheresse dans les bassins de Beni bahdel, Chouly et d'El Haciabia à l'échelle de 3 ,6 et 12 mois pendant la période 2006-2060 avec le scenario RCP8.5 (RCA4 (CanESM2)).

Chapitre IV : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

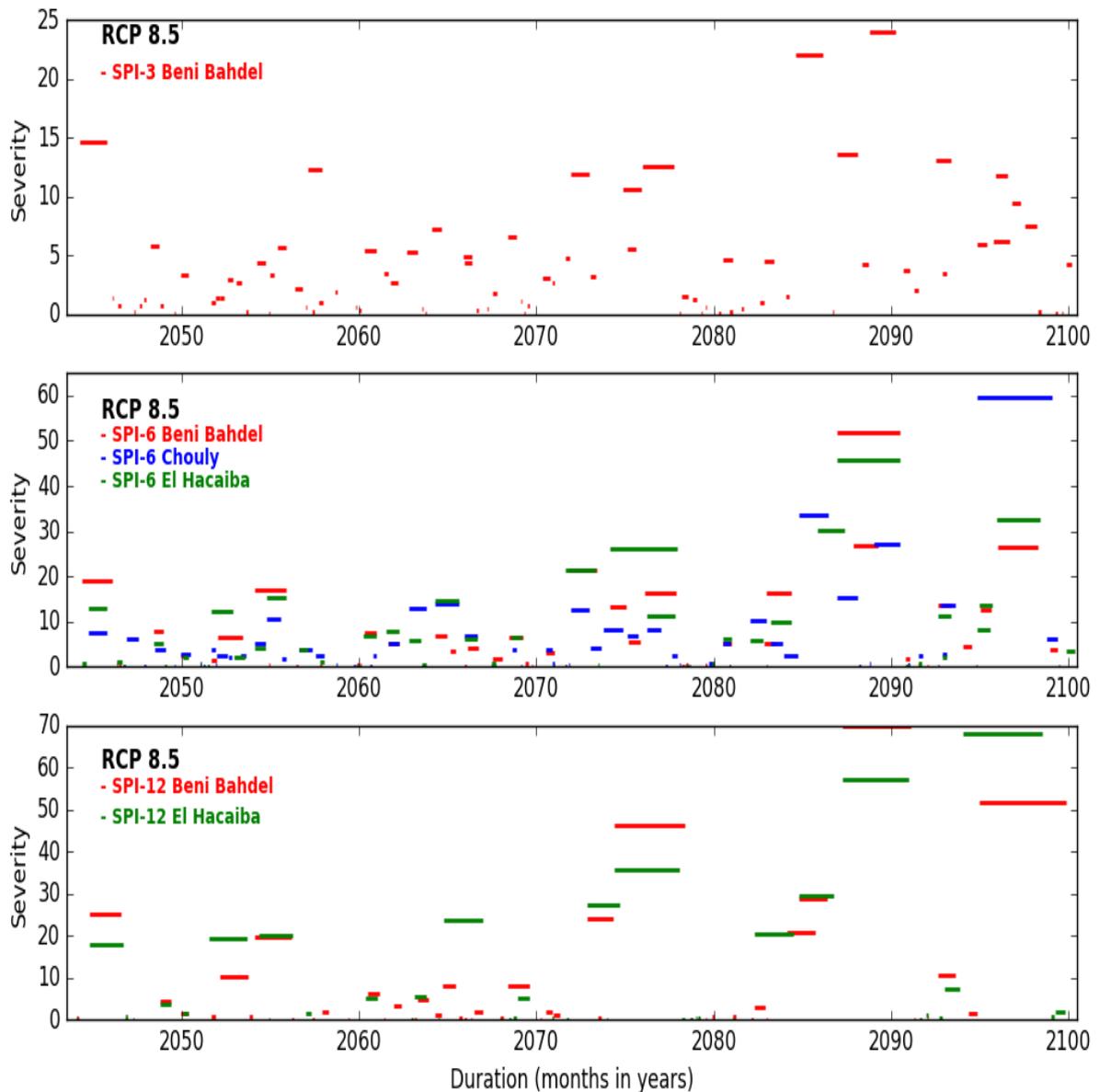


Figure IV.28. Les caractéristiques de la sècheresse dans les bassins de Beni bahdel, Chouly et d'El Haciaibia à l'échelle de 3 ,6 et 12 mois pendant la période 2045-2100 avec le scenario RCP8.5 (RCA4 (CanESM2)).

Conclusion

Au terme de ce travail, mené sur les deux principaux bassins versant de l'Ouest algérien (Tafna – Macta) et aux nuances climatiques variées, nous avons essayé d'analyser le risque de la sécheresse dans le contexte du changement climatique.

Dans cette étude deux indices relatifs à la sécheresse sont proposés et calculés à savoir l'indice SPI comme un indice climatologique et l'indice SDI comme un indice hydrologique, Afin de vérifier la possibilité de représenter la sècheresse hydrologique par la sécheresse métrologique.

L'étude a été portée sur l'analyse conjointe des caractéristiques de la sécheresse à savoir : la durée, la gravité et l'intensité de la sécheresse hydrologique définie par l'indice SDI.

Selon les valeurs mensuelles de ce dernier dans les trois stations étudié à différentes échelles, on a constaté qu'à l'échelle de 6 mois :

La plus sévère sécheresse a été observée durant le mois d'août dans la station de Beni Bahdel, au mois de mai dans la station de Chouly et au mois de septembre dans la station d'El hacaiba.

Le mois de février, mai, septembre et octobre sont considérés comme mois secs par rapport à la moyenne de l'SDI et les autres comme humide dans la station d'El hacaiba. Pour les autres stations nous considérons tous les mois humide.

Sur la base de l'analyse des quatre caractéristiques de la sécheresse hydrologique aux différentes échelles du temps au cours de 1940-2009 pour les trois stations :

À l'échelle du trois mois le sous bassin de Beni bahdel avait connu 35 épisodes de sécheresse au cours de 1940-2009, avec une durée maximale de 59 mois, sévérité maximale de 74.95 et une intensité maximale de 1.71, et 16 épisodes de sécheresse, avec une durée maximale de 73 mois, sévérité maximale de 91.46 et une intensité maximale de 1.29 à l'échelle du six mois, à l'échelle de 12 mois il avait connu 8 épisodes de sécheresse, avec une durée maximale de 148 mois, sévérité maximale de 200.71 et une intensité maximale de 1.36.

Pour la station de Chouly, on recense 13 événements secs pour une durée maximale de 147, sévérité minimale de 236 et une intensité maximale de 1.61 mois à moyen terme.

À l'échelle du 6 mois la maximale de 44.76 et une intensité maximale de 1.86, et 12 épisodes de sécheresse, avec une durée maximale de 55 mois, sévérité maximale de 59.66 et une intensité maximale de 1.52 à l'échelle du 12mois.

Conclusion

Dont au cours des 86 années étudiées, L'analyse de la durée des épisodes de sécheresse montre que celle-ci varie d'une échelle de temps à une autre et d'une station à une autre, la station d'El Hacaiba a connu la plus longue période de sécheresse avec 23 mois de séquences sèches consécutives à l'échelle du six mois.

Les principaux résultats d'estimation de la probabilité conditionnelle et la période de retour de la sécheresse hydrologique à partir de ces caractéristiques montrent qu'aussi bien t-copule ou la copule du Gumbel sont adaptés à l'analyse de la sécheresse en Algérie. Cela est dû essentiellement à la queue de la copule de Gumbel et t-copule qui sont habituellement considérées comme appropriées pour estimer les événements extrêmes. Ceci est également soutenu par la proximité des contours de copule bivariate marginale avec des données observées.

Avec la copule bivariée de Gumbel sur durée-sévérité, nous avons conduit la conditionnelle distribution de la sévérité de la sécheresse compte tenu de la durée de la sécheresse pour les événements historiques et futurs. Cela, nous a permis de construire deux abaques aux différentes échelles pour déterminer la période de retour de la durée et de la sévérité de la sécheresse pour les stations de Beni bahdel, Chouly et El hacaiba.

Les résultats d'analyse de l'indice standardisé des précipitations (SPI) sur les bassins du Tafna et Macta dès 1941 jusqu'à 2010 montrent l'existence de nombreuses séquences sèches tout le long de la période analysée, et qu'on a une dominance des années sèches bien remarquable, on note aussi que l'indice SPI entre cette période peut atteindre (-2.409), ce qui explique l'existence des années extrêmement sèches, la récurrence des années sèches s'accélère et la longévité de la période sèche également, tandis que celle des années humides a évolué inversement.

Nous remarquons aussi que les séquences à tendance sèche et à tendance humide n'apparaissent pas toujours à la même date pour les trois stations. À partir des années 1975, les périodes sèches sont de plus en plus longues et cela pour les trois stations à l'échelle de 6 mois.

Le résultat de l'indice SPI a été comparé aux résultats de l'SDI, Entre deux sécheresses, la durée et sévérité varient considérablement. On ne peut pas mettre en évidence une tendance bien définie dans le temps entre les deux. En s'appuyant sur les données observées sur les trois stations, il se dégage que la sécheresse hydrologique est plus accentuée que la sécheresse météorologique en sévérité et en durée

Conclusion

L'étude des événements de la sécheresse en termes de la sévérité et de la durée en utilisant les projections futures sous deux types de scénarios d'émission à savoir le RCP4.5 et le RCP8.5 par les différents modèles régionaux CORDEX-Africa à $0,44^{\circ} \times 0,44^{\circ}$. Nous a permis de constater que le modèle climatique RCA4 (CanESM2) parvient à simuler de manière satisfaisante les précipitations moyennes mensuelles sur la période de référence (1951-2005).

Les caractéristiques de la sécheresse simulées par le modèle retenu ont montré une augmentation en nombre et en durée d'évènement de sécheresse dans toutes les échelles étudiées. En effet, le modèle RCA4 (CanESM2) prédit, pour les périodes 2006-2060 et 2045-2100, avec les deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5, une stabilisation dans la sévérité de la sécheresse par rapport à la période 1951-2005 dans les stations étudiées. L'augmentation de la durée et le nombre d'évènement de la sécheresse a augmenté en passant du scénario RCP4.5 au scénario RCP8.5 et de la période 2006-2060 à la période 2045-2100.

Références bibliographiques

A
Abramowitz M, Stegun IA (1964). Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables.
Armel, K. (2010). Structure de dépendance des générateurs de scénarios économiques- Modélisation et simulation. Mémoire d'Actuariat.
Armel, K., Planchet, F., & Kamega, A. (2011). Quelle structure de dépendance pour un générateur de scénarios économiques en assurance? Impact sur le besoin de capital. Bulletin Français d'Actuariat, 11(22).
B
Barbe, P., Genest, C., Ghoudi, K. et Rémillard, B. (1996). On Kendall's process. Journal of Multivariate Analysis, 58:197–229.
Bădiliță, C. (2005). Métamorphoses de l'antichrist chez les pères de l'église (Vol. 116). Editions Beauchesne
Beltrando G. & Chemery L. 1995. Dictionnaire du climat, Collection Références Larousse, Paris, 344.
BOUANANI, A. (2004). Hydrologie, transport solide et modélisation étude de quelques sous bassins de la Tafna (NW–Algérie) (Doctoral dissertation, Université de Tlemcen).
BELKACEM, Z. (2015). Contribution à l'étude du cortège floristique de l'espèce Juniperus oxycedrus (Cuprèssacées) dans la région de Tlemcen (Doctoral dissertation).
Bigot, S., & Rome, S. (2012). Les climats régionaux: observation et modélisation.
Béliveau, J. (2006). Analyse fréquentielle multi variée de la pointe, du volume et de la durée de la crue (Doctoral dissertation, Université Laval).
Boken V.K. 2005. Agricultural drought and its monitoring and prediction: some concepts. Boken, V.K., Cracknell A.P. & Heathcote R.L. (éditeurs): Monitoring and Predicting Agricultural Drought: A Global Study, Oxford-New-York: Oxford University Press, 3-10
C
Cadoux, D., & Loizeau, J. M. (2004). „Copules et dépendances: application pratique à la détermination du besoin en fonds propres d'un assureur non vie". Bulletin Français d'Actuariat, 6(12), 173-208.
D
Daki, Y., Zahour, G., Lachgar, R., & El Hadi, H. (2016). Caractérisation De La Sécheresse Climatique Du Bassin Versant D'oum Er Rbia (Maroc) Par Le Biais De L'indice De Précipitation Standardisé (SPI). European Scientific Journal, 12(14).
Durante F. & Sempì C., Copula Theory: An Introduction. , Dans :Jaworski, P., Durante, F., Haerdle, W., Rychlik, T. : (eds). Copula Theory and Its Applications, Proceedings of the Workshop, Warsaw 25-26 sept 2009, Springer, Dordrecht (2010).

Références bibliographiques

E
Edwards DC, McKee TB (1997) Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales.
En Climat De Type Soudanais: Cas De L'extrême Nord-Ouest De La Cote D'ivoire. Larhyss Journal Issn 1112-3680, (18).
EL OUISSI.A. (2004). impact des changements climatiques sur les ressources hydriques et la diversité biologique. Memoir de magister, C.U.Mascara.
F
Fermanian, J.-D. (2005). Goodness-of-fit tests for copulas. Journal of Multivariate Analysis, 95:119–152.
G
Gafsi, M. (2007). Exploitations agricoles familiales en Afrique de l'Ouest et du Centre: enjeux, caractéristiques et éléments de gestion. Editions Quae.
Gao, L., & Zhang, Y. (2016). Spatio-temporal variation of hydrological drought under climate change during the period 1960–2013 in the Hexi Corridor, China. Journal of Arid Land, 8(2), 157-171.
Genest, C. et MacKay, R. J. (1986). Copules archimédiennes et familles de Lois bidimensionnelles dont les marges sont données. La revue canadienne de statistique 14:145–159.
Guttman N.B. 1999. Accepting the Standardized Precipitation Index: a calculation algorithm, Journal of the American Water Resources Association, 35 (2), 311–322.
H
Hayes M.J., 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, 25 (1), 3367–3370.
Hallouz, F., Meddi, M., & Mahé, G. (2012). Relation débit liquide-transport de matières en suspension dans le bassin de l'Oued Mina en Algérie.
I
IPCC, 2007: Climate change 2007: The physical Science basis. Contribution of working group I to the Fourth Assessment, Solomon S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996.
IPCC, 2013 : Climate Change 2013. Publication du Volume 1 du 5e Rapport d'évaluation du GIEC, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K.
K

Références bibliographiques

Khaldi, A. (2005). Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien" Monts de Tlemcen-Saida. These de doctorat, université d'Oran, Algérie.
Klein, T. (2009). Comparaison des sécheresses estivales de 1976 et 2003 en Europe occidentale à l'aide d'indices climatiques. Bulletin de la Société géographique de Liège, 53, 75-86.
L
Lloyd-Hughes B, Saunders MA (2002) A drought climatology for Europe. Int J Climatol 22:1571–1592. doi: 10.1002/joc.846
Layelmam, M. (2008). Calcul des indicateurs de sécheresse à partir des images NOAA/AVHRR.
M
MCKee T.B., Doesken N.J. & Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales, Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 17-22 January 1993, Anaheim, California,179–184.
Mishra AK, Desai VR (2005) Drought forecasting using stochastic models. Stoch Environ Res Risk Assess 19:326–339. doi: 10.1007/s00477-005-0238-4.
Meddi, M., Hubert, P., & Bendjoudi, H. (2002, Octobre). Evolution du régime pluviométrique du Nord-Ouest de l'Algérie. In Actes du colloque international sur l'eau dans le Bassin Méditerranéen : Ressources et développement Durable, Tunisie.
Meddi, M., & Hubert, P. I. E. R. R. E. (2003). Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du Nord-Ouest de l'Algérie. IAHS publication, 229-235.
Meddi, H., & Meddi, M. (2009). Etude De La Persistance De La Sècheresse Au Niveau De Sept Plaines Algériennes Par Utilisation Des Chaines De Markov (1930-2003).
Meddi, M. M., Assani, A. A., & Meddi, H. (2010). Temporal variability of annual rainfall in the Macta and Tafna catchments, Northwestern Algeria. Water Resources Management, 24(14), 3817-3833.
MEDDI, H., & MEDDI, M. (2013). Etude de la persistance de la sécheresse au niveau de sept plaines algériennes par utilisation des chaînes de Markov (1930-2003).
N
Ntale H.K. & Gan T.W. 2003. Drought indices and their application to East Africa, International Journal of Climatology, 23 (11), 1335–1357
P
Palmer W.C. 1965. Meteorological drought. U.S. weather bureau research paper 45, Washington DC, 58.
Pita López, M. F. (2001). Un nouvel indice de sécheresse pour les domaines méditerranéens: application au bassin du Guadalquivir (sud-ouest de l'Espagne). In 13e colloque de l'Association internationale de climatologie, Nice, 6-9 septembre 2000, 225-233. Association Internationale de Climatologie.

Références bibliographiques

S

Sklar, A. (1959). Fonctions de répartition à n dimensions et leurs marges. Publications de l'Institut de statistique de l'Université de Paris, 8:229–231.

Szczypta, C. (2012). Hydrologie spatiale pour le suivi des sécheresses du bassin méditerranéen (Doctoral dissertation, INPT).

SORO, G., ANOUMAN, D., BI, T. G., SROHOROU, B., & SAVANE, I. (2014). Caractérisation Des Séquences De Sècheresse Météorologique A Diverses Echelles De

Sung, J. H., & Chung, E. S. (2014). Development of streamflow drought severity–duration–frequency curves using the threshold level method. *Hydrology and Earth System Sciences*,

Sibou Tarik, 2005 : Caractérisation hydro-climatique et agronomique de la sécheresse dans le bassin d'Oum-er-rabia. Institut Agronomique et Vétérinaire Hassn II- Mémoire de 3^{ème}