

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

Prévision des débits dans trois grands bassins versants du Centre et de l'Ouest de l'Algérie à partir des sorties du CORDEX Africain.

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 6-0023-16

APA Citation (توثيق APA):

Hadour, Ali (2016). Prévision des débits dans trois grands bassins versants du Centre et de l'Ouest de l'Algérie à partir des sorties du CORDEX Africain[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Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...)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 بتقييم الإنتاج العلمي لأساتذة و باحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (أطروحات، مطبوعات، مبداعات، مقالات المجلات، 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.

DEPARTEMENT Hydraulique Urbaine



MEMOIRE DE MASTER

Pour l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique

OPTION : Assainissement

THEME :

**Prévision des débits dans trois grands bassins
versants du Centre et de l'Ouest de l'Algérie à
partir des sorties du CORDEX Africain.**

Présenté par :

M^r : HADOUR ALI

DEVANT LES MEMBRES DU JURY

Nom et Prénom	Grade	Qualité
M ^r : KHODJET-KESBA Omar	Professeur	Présidente
M ^r : KHAHLERRAS Djillali	M.C.B	Membre
M ^{me} : AMMOUR Fadhila	M A.A	Membre
M ^{me} : SALHI Chahrazed	M A.A	Membre
M ^r : Meddi Mohamed	Professeur	Promoteur
M ^r : GIL MAHE	Professeur	Directeur du stage

Juin 2016

Remerciement

Arrivé au terme de ce mémoire, il m'est agréable d'exprimer ma gratitude et mes remerciements à tous ceux qui, par leurs enseignements, leurs soutiens et leurs conseils, m'ont aidé à sa réalisation.

Je voudrais tout d'abord, remercier Dieu le miséricordieux de m'avoir donné le courage, la patience et l'inspiration, afin d'achever ce modeste travail. Et d'avoir eu la chance de travailler sous la tutelle des professeurs qui connaissent le domaine. Qui m'ont impressionné par leurs qualités scientifiques et humaines.

Au terme de ces six mois passés au sein du laboratoire Hydrosiences. Je tiens à adresser en premier lieu, ma profonde reconnaissance à Mr GIL MAHE, mon directeur de stage, pour m'avoir accueilli au sein de son organisme. Au-delà de l'encadrement scientifique de haute qualité qui m'a été offert, je ne serais trouver les mots justes pour exprimer toute ma gratitude pour sa confiance ainsi le temps qu'il m'a consacré durant ce stage et après. Vous m'avez honoré Mr de votre confiance en m'acceptant et en croyant en mes capacités.

J'adresse toute ma gratitude à mon encadreur Mr Meddi, qui m'a offert l'occasion de travailler avec l'un de ces collègues et de m'orienter le long de cette aventure, je le remercie pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je teins également à exprimer toute ma gratitude à celle qui a suivi quotidiennement mon travail, Mme Claudine Dieulin, pour sa disponibilité, ses conseils et remarques avisées, son attention, sa patience et sa gentillesse. Merci infiniment madame.

Que Mesdames, Messieurs les membres du jury trouvent ici l'expression de ma reconnaissance pour avoir accepté de juger mon travail.

Je tiens à remercier mes parents pour le soutien inconditionnel dont ils ont fait preuve depuis que mon projet professionnel est défini. Merci pour le soutien financier, moral, et psychologique. Si je suis ici aujourd'hui, c'est grâce à vous!

Merci notamment à tous mes amis : Hachimi, Khali moh, da salim, Fouazi, Abdesselam, Amar, pour avoir su être à mes cotés dans les moments les plus dur.

Un merci tout particulier à vous, Mr Yahiaoui, pour toute l'aide que vous m'avez apporté. Une pensé à toi mon ami, Japhet, merci pour tous et je vous souhaite un bon courage dans votre thèse.

ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو تحديد آثار تغير المناخ على الموارد المائية في شرق و غرب الجزائر بالتحديد على مستوى الأحواض الرئيسية الثلاثة التالية شيليف, تافنة و مکتا. باستخدام النموذج الهيدرولوجي ج ر م 2 مع معطيات السيناريو المستخرجة من النموذج س ن ر م-س 5. حسب التطورات الملحوظة، شهدت التدفقات الشهرية انخفاضا كبيرا بين 1970-1999، هذا يعود لانخفاض معدل هطول الامطار و ارتفاع درجة الحرارة التي أدت إلى ارتفاع التبخر. حسب إسقاطات السيناريوين رس ب8.5 و رس ب4.5، فإن انخفاض التدفق الشتوي سيستمر في المستقبل، رس ب 8.5 يتنبأ ارتفاع طفيف التدفق الربيعي، بالمقابل رس ب4.5 يظهر انخفاضا هذا الأخير.

الكلمات المفتاحية: التغير المناخي، الجزائر، شيليف، تافنة، مکتا، الموارد المائية، ج ر م 2، س ن ر م-س 5.

Résumé

L'objet de cette étude est la détermination de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau au Nord-Ouest de l'Algérie, particulièrement sur ses trois grands bassins hydrographiques qui sont le Chéllif, la Tafna et la Macta. Ceci par l'utilisation du modèle hydrologique GR2M et les données des scénarios climatiques issues du modèle CNRM-CM5. En termes d'évolutions observées, les débits mensuels ont accusés une baisse notable entre 1970-1999, ceci est principalement dû à la diminution des précipitations combinées à l'augmentation de l'ETP, entraînée par la hausse des températures. Selon les projections des scénarios RCP8.5 et RCP4.5, la diminution des débits hivernaux va se poursuivre dans le futur. Pour le printemps, le RCP8.5 prévoit une hausse modérée, par contre le RCP 4.5 annonce une tendance à la baisse.

Mots clefs: Changement climatique, Algérie, Chéllif, Tafna, Macta, ressource en eau, GR2M, CNRM-CM5, RCP8.5, RCP4.5, ETP, débit, températures, précipitations.

Abstract

The purpose of this study is to determine the impact of climate change on water resources on the North West of Algeria. Particularly on three major river basins that are Chéllif, Tafna and Macta. By using the hydrological model and GR2M climate scenario data from the CNRM-CM5 model. In terms of developments, monthly flows have accused a notable decline between 1970-1999, mainly attributed to the decrease in precipitation combined with the increase in ETP, driven by rising temperatures. Projections of RCP8.5 scenarios and RCP4.5, reduced winter rates will continue in the future. For spring, the RCP8.5 expected to rise moderately by 4.5 against the SPC announced a downward trend.

Keywords: Climate Change, Algeria, Chelif, Tafna Macta, water resources, GR2M, CNRM-CM5, RCP8.5, RCP4.5, ETP, flows, temperatures, precipitation.

Sommaire

Introduction générale	1
Partie I : Présentation de la zone d'étude	
I.1 Introduction	1
I.2 Cadres géographique, morphométriques et topographique de la zone d'étude.....	1
I.2.1 Bassin versant de la Tafna.....	1
I.2.2 Bassin de la Macta.....	2
I.2.3 Bassin du Chéllif	3
I.3 Contexte climatique.....	4
I.4 Tendances et variables observées	5
I.4.1 Pluie.....	6
I.4.2 Débit	6
I.4.3 Température :	6
I.5 Choix de l'air d'étude.....	7
I.6 Constitution de la banque de données	7
I.7 Choix de l'échelle spatio-temporelle.....	8
I.8 Données climatiques	8
I.8.1 Pluviométrie	8
I.8.1.1 Source.....	8
I.8.1.2 Calcul de la pluie moyenne pour chaque bassin drainé par une station hydrométrique ..	9
I.8.1.3 Comparaison entre les pluies provient de la base SIEREM et les pluies moyennes surfaciques :.....	11
I.8.1.4 Restitution des données	17
I.8.2 Températures.....	17
I.8.2.1 Source.....	17
I.8.2.2 Reconstitution des données	18
I.8.2.3 Calcul de la température moyenne	23
I.8.3 Calcul de flux évaporatoire	24
I.9 Calcul de la capacité en eau des sols.....	25
I.9.1 Carte des sols de la FAO	26
I.9.2 Evaluation de la capacité en eau pour chaque unité et pour chaque classe	26

Sommaire

I.10	Les données hydrométriques	28
I.10.1	Critiques des données hydrométriques	29
I.11	Analyse de ruptures et de tendances sur les séries hydrométéorologiques	30
I.11.1	Principes des tests.....	30
I.11.2	Résultats et discussion :.....	31
I.11.2.1	Bassin de Beni_Bahdel.....	32
I.11.2.2	Bassin d’Ammi_Moussa	33
I.11.2.3	Sidi_Abelkader el Djillali.....	34
I.11.2.4	Ouled Ben A.E.K.....	35
I.11.2.5	Sidi-Bel-abbes	36
I.11.2.6	Le bassin de Haciabia.....	37
I.11.2.7	Le bassin de Chouly RN.7.....	38
I.11.2.8	Le bassin d’Ain_Hamara.....	39

Partie II : Choix, calage et validation du modèle hydrologique

Introduction	40
II.1 Définition de la modélisation	40
II.2 Définition d’un modèle hydrologique	40
II.3 Structure et variables types d’un modèle hydrologique	40
II.4 Enjeux de la modélisation	41
II.5 Classification des modèles	41
II.6 Choix du modèle	42
II.7 Concept et architecture de GR2M.....	43
II.8.1 Description	43
II.8.2 Le réservoir sol.....	43
II.8.3 La fonction de production et la fonction de transfert	43
II.8 Choix de la variable cible.....	45
II.9 Etalonnage du modèle	45
II.10 Choix de la fonction critère.....	45
II.11 Méthode d’optimisation retenue.....	46
II.12 Evaluation de la performance d’un modèle.....	46

Sommaire

II.13	Présentation des résultats de calage et validation.....	48
	Conclusion.....	50
Partie III : Evaluation des changements projetés pour le futur		
	Introduction.....	52
III.1	La circulation générale.....	52
III.2	L'origine de la circulation générale.....	52
III.3	La circulation atmosphérique.....	52
III.3.1	Les cellules de convections.....	53
III.3.2	Les champs de pression, leur répartition et leur origine.....	54
III.4	La circulation océanique.....	55
III.4.1	Définition.....	55
III.4.2	L'origine de la circulation océanique.....	55
III.4.2.1	Les courants de surface.....	56
III.4.2.2	Les courants de profondeur.....	56
III.4.3	La circulation Thermohaline.....	57
III.5	Qu'est-ce que l'effet de serre?.....	57
III.5.1	L'effet de serre naturel.....	58
III.5.2	L'effet de serre renforcé.....	58
III.6	Le réchauffement climatique modifie-t-il la circulation générale et le cycle de l'eau ?	58
III.7	Le 5 ^{ème} rapport de GIEC.....	59
III.7.1	Les modèles et scénarios utilisés dans la 5 ^{ème} évaluation du changement climatique.....	59
III.7.2	Les changements observés dans le climat dans les derniers siècles confirmés par le 5 ^{ème} rapport	Erreur ! Signet non défini.
III.8	Modèle climatique.....	61
III.8.1	Définition.....	61
III.8.2	Construction classique d'un modèle.....	61
III.8.3	Les principaux items pris en compte dans les modèles d'aujourd'hui.....	62
III.8.4	Modèle climatique globale (GCM).....	62
III.8.5	Modèle Climatique régionale (MRC).....	63

Sommaire

III.9	Evaluation de la pluviométrie et de la température projetée au nord ouest de l'Algérie par le modèle CNRM-CM5.....	64
	Conclusion.....	80

Partie IV: Prévision des débits, et étude d'impact

Aucune entrée de table des matières n'a été trouvée. Conclusion

générale.....	88
---------------	----

Partie V : Annexe

V.1	Méthode de Thiessen.....	98
V.2	L'évolution des pluies surfaciques moyennes sur les bassins d'études	98
V.3	Coefficient de corrélation de Bravier_Person	101
V.3.1	Interprétation de $r(X,Y)$	101
V.4	Évolution des températures moyennes.....	102
V.5	Calcul de flux évaporatoire « méthode de Thornwaite »	104
V.6	Évolution de l'évapotranspiration dans les différents bassins	105
V.7	Évolution des débits dans les sous bassins appartenus au même grand bassin.....	107
V.8	Présentation des méthodes statistiques utilisées.....	109
V.8.1	Méthodes de détection des ruptures.....	109
V.8.1.1	Test de Pettitt (Pettitt, 1979 ; H. Lubes-Niel et al ;. 1998).....	109
V.8.1.2	Procédure de segmentation des séries hydrométéorologiques (Hubert et Carbonnel, 1987).....	109
V.8.2	Méthode d'étude de la stationnarité.....	110
V.8.2.1	Le test de corrélation sur le rang (Kendall et Stuart, 1943 ; WMO ; 1966)	110
V.9	Les changements projetés pour les précipitations mensuelles futurs par le scénario RCP 8.5.....	111
V.10	Les changements projetés pour les précipitations mensuelles futurs par le scénario RCP 4.5.....	113
V.11	Les changements projetés pour les températures mensuelles futurs par le scénario RCP 8.5.....	116
V.12	Les changements projetés pour les températures mensuelles futurs par le scénario RCP 4.5.....	118
V.13	Les changements projetés pour les débits futur par le scénario RCP 8.5.....	121
V.14	Les changements projetés pour les débits futur par le scénario RCP 8.5.....	123

La liste des figures

Partie I : Présentation de la zone d'étude

Figure I.1 : Présentation des différents bassins étudiés.....	4
Figure I.2 : Bassin de la Tafna	5
Figure I.3 : Bassin de la Macta.....	6
Figure I.4 : Bassin du Chéllif	7
Figure I.5 : Interaction bassin et Grille de pluies spatialisées	13
Figure I.6 : Evolution de la pluie spatialisée sur le bassin de Beni_Bahdel	13
Figure I.7 : Evolution de la pluie surfacique moyenne sur le bassin de Beni_Bahdel.....	14
Figure I.8 : Pluie spatialisée de SIEREM et la pluie surfacique moyenne projetée sur le bassin de Sidi_Djillali	15
Figure I.9 : Pluie spatialisée de SIEREM et la pluie surfacique moyenne projetée sur le bassin de Haciabia.....	15
Figure I.10 : Pluie spatialisée de SIEREM et la pluie surfacique moyenne projetée sur le bassin de Chouly	15
Figure I.11 : Pluie spatialisée de SIEREM et la pluie surfacique moyenne projetée sur le bassin d'Ammi_Moussa.....	16
Figure I.12 : Pluie spatialisée de SIEREM et la pluie moyenne surfacique projetée sur le bassin d'Ouled Ben A.E.K	17
Figure I.13 : Pluie spatialisée de SIEREM et la pluie moyenne surfacique projetée sur le bassin de Beni_Bahdel	17
Figure I.14 : Pluie spatialisée de SIEREM et la pluie moyenne surfacique projetée sur le bassin d'Ain_Hamara	18
Figure I.15 : Pluie spatialisée de SIEREM et la pluie moyenne surfacique projetée sur le bassin de Sidi-Bel-Abbès	18
Figure I.16 : Spatialisation par les polygones de thiessen.....	23
Figure I.17 : Différence de température par rapport à la moyenne interannuelle 1958-2011 ..	23
Figure I.18 : Ecart de l'ETP par rapport à la moyenne interannuelle 1958-2011	24
Figure I.19 : Intersection entre les bassins de la carte des sols et les bassins drainés par les stations hydrométriques.....	26
Figure I.20 : Localisation des différents sous bassins drainés par les différentes stations hydrométriques.....	28
Figure I.21 : Analyse des ruptures sur la série pluviométrique de Beni Bahdel 1941-2009....	31
Figure I.22 : Analyse des ruptures sur la série hydrométrique de Beni Bahdel 1941-2009.....	31

La liste des figures

Figure I.23 : Evolution des débits à Beni Bahdel 1941-2009	31
Figure I.24: Evolution de la pluviométrie à Beni Bahdel 1941-2009	31
Figure I.25: Analyse des ruptures sur la série pluviométrique d'Ammi Moussa 1958-2010 ..	32
Figure I.26: Analyse des ruptures sur la série hydrométrique d'Ammi Moussa 1958-2010 ...	32
Figure I.27: Evolution des débits à Ammi Moussa 1958-2010.....	32
Figure I.28: Evolution de la pluviométrie à Ammi Moussa 1941-2010	32
Figure I.29: Analyse des ruptures sur la série pluviométrique de Sidi Abdelkader Djillali 1969-2011.....	33
Figure I.31: Analyse des ruptures sur la série hydrométrique de Sidi Abdelkader Djillali 1969- 2011	33
Figure I.32: Evolution des débits de Sidi Abdelkader Djillali 1969-2011	33
Figure I.33: Evolution de la pluviométrie de Sidi Abdelkader Djillali 1969-2011.....	33
Figure I.34: Analyse des ruptures sur la série pluviométrique d'Ouled Ben AEK1967-2003.	34
Figure I.35: Analyse des ruptures sur la série hydrométrique d'Ouled Ben AEK 1967-2003.	34
Figure I.36: Evolution des débits d'Ouled Ben AEK 1967-2003	34
Figure I.37: Evolution de la pluviométrie d'Ouled Ben AEK1967-2003	34
Figure I.38: Analyse des ruptures sur la série pluviométrique de Sidi Bel Abbes 1942-2009	35
Figure I.39: Analyse des ruptures sur la série hydrométrique de Sidi Bel Abbes 1942-2009 .	35
Figure I.40: Evolution des débits de Sidi Bel Abbes 1942-2009	35
Figure I.41: Evolution de la pluviométrie de Sidi Bel Abbes1942-2009.....	35
Figure I.42: Analyse des ruptures sur la série pluviométrique de Haciabia 1961-2005	36
Figure I.43: Analyse des ruptures sur la série hydrométrique de Haciabia 1961-2005	36
Figure I.44: Evolution des débits de Haciabia 1961-2005	36
Figure I.45: Evolution de la pluviométrie de Haciabia1961-2005.....	36
Figure I.46: Analyse des ruptures sur la série pluviométrique de Chouly RN7 1941-2009	37
Figure I.47: Analyse des ruptures sur la série hydrométrique de Chouly RN7 1941-2009	37
Figure I.48: Evolution des débits de Chouly RN7 1941-2009.....	37
Figure I.49: Evolution de la pluviométrie de Chouly RN7 1941-2009.....	37
Figure I.50: Analyse des ruptures sur la série pluviométrique d'Ain Hamara 1967-2012	38
Figure I.51: Analyse des ruptures sur la série hydrométrique d'Ain Hamara 1967-2012	38
Figure I.52: Evolution des débits d'Ain Hamara 1967-2012.....	38
Figure I.53: Evolution de la pluviométrie d'Ain Hamara 1967-2012.....	38

La liste des figures

Partie II : Choix, calage et validation du modèle hydrologique

Figure II.1 : Architecture du modèle GR2M.....	44
Figure II.2 : Les équations et les paramètres du modèle GR2.....	44
Figure II.3 : Schéma d'évaluation considéré dans ce travail.....	47
Figure II.4 : Différents découpages des périodes utilisées en calage et validation.....	47

Partie III : Evaluation des changements projetés pour le futur

Figure III.1 : Montre la répartition de flux d'énergie solaire sur le globe terrestre en w/m^2 ..	52
Figure III.2 : Illustration de mouvement de convection et la formation de la cellule de Hadley.	53
Figure III.3 : La distribution des cellules zonales dans l'hémisphère nord.....	54
Figure III.4 : Répartition des champs de pression sur le globe en mois de Janvier	55
Figure III.5 : Principaux courants de surface. En rouge les courants relativement chauds, et les courants relativement froids sont en Blue	56
Figure III.6 : Les cinq grands tourbillons formés par les courants de surface	57
Figure III.7 : Aperçu sur la boucle Thermohaline. En bleu, ce sont les eaux froides et salées qui circulent en profondeur. En rouge, ce sont les eaux chaudes et moins salées qui circulent plus en surface.....	57
Figure III.8 : L'action de l'effet de serre.....	58
Figure III.9 : Les émissions de combustibles fossiles simulées par les modèles CMIP5 pour les quatre scénarios RCP (IAM : modèle d'évaluation intégré utilisés pour définir les scénarios RCP).....	60
Figure III.10 : Résultats de RMC : signal de changement climatique pour le continent africain incl. Madagascar 2031-2060 (période de référence 1971-2000).....	64
Figure III.11 : Résultats de RMC : signal de changement climatique pour le continent africain incl. Madagascar 2071-2099 (période de référence 1971-2000).....	65
Figure III.12 : Evaluation des pluies moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Sidi Bel Abbas	66
Figure III.13 : Evaluation des pluies moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Beni Bahdel.	66

La liste des figures

Figure III.14 : Evaluation des pluies moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Haciabia.	67
Figure III.15 : Evaluation des pluies moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Sidi Djillali.....	67
Figure III.16 : Evaluation des pluies moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin d’Ammi Moussa	67
Figure III.17 : Evaluation des pluies moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin d’Ouled Ben A.E.K.	68
Figure III. 18 : Evaluation des pluies moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Chouly.....	68
Figure III.19 : Evaluation des pluies moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Sidi bel Abbes.....	70
Figure III.20 : Evaluation des pluies moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Beni Bahdel.	70
Figure III.21 : Evaluation des pluies moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Haciabia.	70
Figure III.22 : Evaluation des pluies moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Sidi Djillali.....	70
Figure III.23 : Evaluation des pluies moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin d’Ammi Moussa	71
Figure III.24 : Evaluation des pluies moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin d’Ouled Ben A.E.K.	71

La liste des figures

Figure III.25 : Evaluation des pluies moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Chouly.....	72
Figure III.26 : Evaluation des températures moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Sidi Bel Abbas.	74
Figure III.27 : Evaluation des températures moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Beni Bahdel.....	74
Figure III.28 : Evaluation des températures moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Haciabia.	74
Figure III.29 : Evaluation des températures moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Sidi Djillali.....	75
Figure III.30 : Evaluation des températures moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin d’Ammi Moussa.	75
Figure III.31 : Evaluation des températures moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin d’Ouled Ben A.E.K.....	76
Figure III.32 : Evaluation des températures moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Chouly.....	76
Figure III.33 : Evaluation des températures moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Sidi Bel Abbas.	77
Figure III.34 : Evaluation des températures moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Beni Bahdel.....	77
Figure III.35 : Evaluation des températures moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Haciabia.	77

La liste des figures

Figure III.36 : Evaluation des températures moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Sidi Djillali.....	78
Figure III.37 : Evaluation des températures moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin d’Ammi Moussa.	78
Figure III.38 : Evaluation des températures moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin d’Ouled Ben A.E.K.	78

Partie IV: Prévion des débits, et étude d’impact

Figure IV.1 : Evaluation de l’ETP moyenne saisonnière projeté par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec ceux de la période de référence (1970-1999) sur le bassin de Haciabia.....	82
Figure IV.2 : Evaluation de l’ETP moyenne saisonnière projeté par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec ceux de la période de référence (1970-1999) sur le bassin de Sidi Djillali	83
Figure IV.3 : Evaluation de l’ETP moyenne saisonnière projeté par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec ceux de la période de référence (1970-1999) sur le bassin d’Ammi Moussa.....	83
Figure IV.4 : Evaluation de l’ETP moyenne saisonnière projeté par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec ceux de la période de référence (1970-1999) sur le bassin d’Ouled Ben A.E.K	83
Figure IV.5 : Evaluation de l’ETP moyenne saisonnière projeté par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec ceux de la période de référence (1970-1999) sur le bassin de Chouly	84
Figure IV.6 : Evaluation de l’ETP moyenne saisonnière projeté par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec ceux de la période de référence (1970-1999) sur le bassin de Haciabia.....	85
Figure IV.7 : Evaluation de l’ETP moyenne saisonnière projeté par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec ceux de la période de référence (1970-1999) sur le bassin de Sidi Djillali	85

La liste des figures

Figure IV.8 : Evaluation de l'ETP moyenne saisonnière projeté par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec ceux de la période de référence (1970-1999) sur le bassin d'Ammi Moussa.....	85
Figure IV.9 : Evaluation de l'ETP moyenne saisonnière projeté par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec ceux de la période de référence (1970-1999) sur le bassin d'Ouled Ben A.E.K	86
Figure IV.10 : Evaluation de l'ETP moyenne saisonnière projeté par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec ceux de la période de référence (1970-1999) sur le bassin de Chouly	86
Figure IV.11 : Evaluation des débits moyens saisonnières simulés par le modèle GR2M, en utilisant les pluies projetés par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec ce de la période de référence (1970-1999) sur le bassin de Haciabia.....	88
Figure IV.12 : Evaluation des débits moyens saisonnières simulés par le modèle GR2M, en utilisant les pluies projetés par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec ce de la période de référence (1970-1999) sur le bassin de Sidi Djillali.	88
Figure IV.13 : Evaluation des débits moyens saisonnières simulés par le modèle GR2M, en utilisant les pluies projetés par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec ce de la période de référence (1970-1999) sur le bassin d'Ammi Moussa	89
Figure IV.14 : Evaluation des débits moyens saisonnières simulés par le modèle GR2M, en utilisant les pluies projetés par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec ce de la période de référence (1970-1999) sur le bassin d'Ouled Ben AEK.....	89
Figure IV.15 : Evaluation des débits moyens saisonnières simulés par le modèle GR2M, en utilisant les pluies projetés par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec ce de la période de référence (1970-1999) sur le bassin de Chouly	89
Figure IV.16 : Evaluation des débits moyens saisonnières simulés par le modèle GR2M, en utilisant les pluies projetés par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec ce de la période de référence (1970-1999) sur le bassin de Haciabia.....	91
Figure IV.17 : Evaluation des débits moyens saisonnières simulés par le modèle GR2M, en utilisant les pluies projetés par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec ce de la période de référence (1970-1999) sur le bassin de Sidi Djillali	91

La liste des figures

Figure IV.18 : Evaluation des débits moyens saisonnières simulés par le modèle GR2M, en utilisant les pluies projetés par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec ce de la période de référence (1970-1999) sur le bassin d’Ammi Moussa	92
Figure IV.19 : Evaluation des débits moyens saisonnières simulés par le modèle GR2M, en utilisant les pluies projetés par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec ce de la période de référence (1970-1999) sur le bassin d’Ouled Ben A.E.K.....	92
Figure IV.20 : Evaluation des débits moyens saisonnières simulés par le modèle GR2M, en utilisant les pluies projetés par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec ce de la période de référence (1970-1999) sur le bassin de Chouly	92

Partie V : Annexe

Figure V.1 : Méthode de thiessen.....	94
Figure V.2 : Evolution de la pluie surfacique moyenne sur le bassin d’Ouled Ben AEK	94
Figure V.3 : Evolution de la pluie surfacique moyenne sur le bassin de Sidi AEK Djillali	95
Figure V.4 : Evolution de la pluie moyenne surfacique sur le bassin de Sidi Bel Abbès	95
Figure V.5 : Evolution de la pluie moyenne surfacique sur le bassin de Haciabia	95
Figure V.6 : Evolution de la pluie moyenne surfacique sur le bassin de Beni Bahdel	96
Figure V.7 : Evolution de la pluie moyenne surfacique sur le bassin de Chouly	96
Figure V.8 : Evolution de la pluie moyenne surfacique sur le bassin d’Ammi Moussa	96
Figure V.9 : Evolution de la pluviométrie sur le bassin d’Ain Hamara.....	97
Figure V.10 : Evolution des températures moyennes annuelles sur le bassin d’Ammi Moussa	98
Figure V.11 : Evolution des températures moyennes annuelles sur le bassin d’Ouled Ben AEK	98
Figure V.12 : Evolution des températures moyennes annuelles sur le bassin de Chouly	98
Figure V.13 : Evolution des températures moyennes annuelles sur le bassin d’Ain Hamara..	99
Figure V.14 : Evolution des températures moyennes annuelles sur le bassin de Haciabia.....	99
Figure V.15 : Evolution des températures moyennes annuelles sur le bassin de Sidi Bel Abbès	99
Figure V.16 : Evolution des températures moyennes annuelles sur le bassin de Sidi AEK Djillali.....	100
Figure V.17 : Evolution des températures moyennes annuelles sur le bassin de Beni Bahde	100
Figure V.18 : Evolution de l’ETP moyen annuel sur le bassin d’Ouled Ben AEK	101
Figure V.19 : Evolution de l’ETP moyen annuel sur le bassin de Sidi AEK Djillali	101

La liste des figures

Figure V.20 : Evolution de l'ETP moyen annuel sur le bassin d'Ain Hamara	101
Figure V.21 : Evolution de l'ETP moyen annuel sur le bassin de Beni Bahdel	102
Figure V.22 : Evolution de l'ETP moyen annuel sur le bassin de Chouly	102
Figure V.23 : Evolution d'ETP moyen annuel sur le bassin de Sidi Bel Abbas	102
Figure V.24 : Evolution d'ETP moyen annuel sur le bassin de Haciabia	103
Figure V.25 : Evolution de l'ETP moyen annuel sur le bassin d'Ammi Moussa	103
Figure V.26 : Evolution des débits dans le bassin de Beni Bahdel et Chouly	103
Figure V.27 : Evolution des débits dans le bassin de Sidi Bel Abbas et Haciabia	104
Figure V.28: Evolution des débits dans le bassin d'Ammi Moussa et Ouled Ben AEK	104
Figure V.29 : Evolution des débits dans le bassin d'Ain Ammara et Sidi Abdelkader Djilla	104
Figure V.30 : Evaluation des précipitations moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Sidi Bel Abbas.....	107
Figure V.31 : Evaluation des précipitations moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Beni Bahdel	107
Figure V.32: Evaluation des précipitations moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Haciabia.....	107
Figure V.33: Evaluation des précipitations moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Sidi Djillali	108
Figure V.34: Evaluation des précipitations moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin d'Ammi Moussa	108
Figure V.35: Evaluation des précipitations moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin d'Ouled Ben A.E.K	108
Figure V.36: Evaluation des précipitations moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Chouly	109

La liste des figures

Figure V.37: Evaluation des précipitations moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Sidi Bel Abbes.....	109
Figure V.38: Evaluation des précipitations moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Beni Bahdel	110
Figure V.39: Evaluation des précipitations moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Haciabia.....	110
Figure V.40: Evaluation des précipitations moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Sidi Djillali	110
Figure V.41: Evaluation des précipitations moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin d’Ammi Moussa.....	111
Figure V.42: Evaluation des précipitations moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin d’Ouled Ben A.E.K	111
Figure V.43: Evaluation des précipitations moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Chouly	111
Figure V.44: Evaluation des températures moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Sidi Bel Abbes.....	112
Figure V.45: Evaluation des températures moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Beni Bahdel	112
Figure V.46: Evaluation des températures moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Haciabia.....	112
Figure V.47: Evaluation des températures moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Sidi Djillali	113

La liste des figures

Figure V.48: Evaluation des températures moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin d'Ammi Moussa.....	113
Figure V.49: Evaluation des températures moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin d'Ouled Ben A.E.K.....	113
Figure V.50: Evaluation des températures moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Chouly.....	114
Figure V.51: Evaluation des températures moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Sidi Bel Abbas.....	114
Figure V.52: Evaluation des températures moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Beni Bahdel.....	115
Figure V.53: Evaluation des températures moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Haciabia.....	115
Figure V.54: Evaluation des températures moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Sidi Djillali.....	115
Figure V.55: Evaluation des températures moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin d'Ammi Moussa.....	116
Figure V.56: Evaluation des températures moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin d'Ouled Ben A.E.K.....	116
Figure V.57: Evaluation des températures moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Chouly.....	116
Figure V.58: Evaluation des débits moyennes inter-mensuelles simulés par le modèle GR2M, en utilisant les sorties de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Haciabia.....	117

La liste des figures

Figure V.59: Evaluation des débits moyennes inter-mensuelles simulés par le modèle GR2M, en utilisant les sorties de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Sidi Djillali.....	117
Figure V.60: Evaluation des débits moyennes inter-mensuelles simulés par le modèle GR2M, en utilisant les sorties de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin d’Ammi Moussa	117
Figure V.61: Evaluation des débits moyennes inter-mensuelles simulés par le modèle GR2M, en utilisant les sorties de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin d’Ouled Ben A.E.K	118
Figure V.62: Evaluation des débits moyennes inter-mensuelles simulés par le modèle GR2M, en utilisant les sorties de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Chouly.....	118
Figure V.63: Evaluation des débits moyennes inter-mensuelles simulés par le modèle GR2M, en utilisant les sorties de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Haciabia	119
Figure V.64: Evaluation des débits moyennes inter-mensuelles simulés par le modèle GR2M, en utilisant les sorties de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Sidi Djillali.....	119
Figure V.65: Evaluation des débits moyennes inter-mensuelles simulés par le modèle GR2M, en utilisant les sorties de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin d’Ammi Moussa	119
Figure V.66: Evaluation des débits moyennes inter-mensuelles simulés par le modèle GR2M, en utilisant les sorties de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin d’Ouled Ben A.E.K	120
Figure V.67: Evaluation des débits moyennes inter-mensuelles simulés par le modèle GR2M, en utilisant les sorties de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Chouly.....	120

La liste des tableaux

Partie I : Présentation de la zone d'étude

Tableau I.1 : Codes et coordonnées des stations pluviométriques	12
Tableau I.2 : Caractéristiques des deux séries de données et le coefficient de pondération ...	16
Tableau I.3 : Caractéristiques des deux types de données et les coefficients de pondération..	17
Tableau I.4 : Caractéristiques des deux types des données et le coefficient de pondération ...	19
Tableau I.5 : Codes et coordonnées des stations	20
Tableau I.6 : Les dates de ruptures des séries de références et le coefficient de corrélation ...	22
Tableau I.7 : Démarche de la reconstitution pour le mois de septembre	22
Tableau I.8 : Classification des sols selon la capacité de rétention en eau d'après FAO-UNESCO 1974-1981.....	25
Tableau I.9 : Répartition des valeurs de capacité en eau (S) en mm.....	26
Tableau I.10 : Les valeurs minimums, moyennes et maximums de capacité en eau de chaque bassin d'étude.....	26
Tableau I.11: Caractéristiques des stations hydrométriques	28
Tableau I.12 : Segmentation d'Hubert sur le bassin de Beni_Bahdel.....	31
Tableau I.13 : Segmentation d'Hubert sur le bassin d'Ammi Moussa	32
Tableau I.14 : Segmentation d'Hubert sur le bassin de Sidi Abdelkader Djillali	33
Tableau I.15: Segmentation d'Hubert sur le bassin d'Ouled Ben AEK.....	34
Tableau I.16 : Segmentation d'Hubert sur le bassin de Sidi Bel Abbes	35
Tableau I.17 : Segmentation d'Hubert sur le bassin de Haciabia	36
Tableau I.18 : Segmentation d'Hubert sur le bassin de Chouly RN7	37
Tableau I.19 : Segmentation d'Hubert sur le bassin d'Ain Hamara	38

Partie II : Choix, calage et validation du modèle hydrologique

Tableau II.1 : Résultats de calage et validation du GR2M sur le bassin de Beni Bahdel	48
Tableau II.2 : Résultats de calage et validation du GR2M sur le bassin d'Ain Hamara.....	48
Tableau II.3 : Résultats de calage et validation du GR2M sur le bassin de Sidi Bel Abbes	48
Tableau II.4 : Résultats de calage et validation du GR2M sur le bassin de Haciabia.....	49
Tableau II.5 : Résultats de calage et validation du GR2M sur le bassin de Chouly	49
Tableau II.6 : Résultats de calage et validation du GR2M sur le bassin de Sidi Djillali	49
Tableau II.7 : Résultats de calage et validation du GR2M sur le bassin d'Ammi Moussa.....	50
Tableau II.8 : Résultats de calage et validation du GR2M sur le bassin d'Ouled Ben AEK ...	50

La liste des tableaux

Partie III : Evaluation des changements projetés pour le futur

Tableau III.1 : Changement futurs de précipitations saisonnières moyennées sur les différents horizons	69
Tableau III.2 : Changement futurs de précipitations saisonnières moyennées sur les différents horizons	73
Tableau III.3 : Les écarts entre les moyens des horizons futurs et celle de la période de référence	76
Tableau III.4 : Les écarts entre les moyens des horizons futurs et celle de la période de référence	79

Partie IV: Prévion des débits, et étude d'impact

Tableau IV.1 : Changement futur pour l'ETP moyen saisonnière sur les différents horizons	83
Tableau IV.2 : Changement futur pour l'ETP moyen saisonnière sur les différents horizons	86
Tableau IV.3 : Les écarts entre la moyenne des débits saisonnière de la période de référence et celle des différents horizons futurs (en %)	89
Tableau IV.4 : Les écarts entre la moyenne des débits saisonnière de la période de référence et celle des différents horizons futurs (en %)	92

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

Cemagref : Centre national du machinisme agricole du génie rural, des eaux et des forêts (remplacé aujourd'hui par IRSTEA).

GES : gaz à effet de serre.

CORDEX : Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment.

CMIP5 : Coupled Model Intercomparison Project Phase 5.

CLM : climat limitée zone de modélisation communautaire

CQCJ : Comité des questions constitutionnelles et juridiques.

CRU : Climatic Research Unit.

EDD : empirique downscaling statistique.

ERA-Interim : réanalyse atmosphérique mondiale.

ETP : Evapotranspiration potentielle.

ETR : Evapotranspiration réelle.

FAO : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture.

GCM : Modèle climatique globale.

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

GR2M : Génie Rural à 2 paramètres Mensuel.

IAM : modèle d'évaluation intégré.

IRD : Institut de recherche pour le développement.

ITCZ : la zone de convergence intertropicale.

MRC : Modèle Climatique régionale.

ORSTOM : Office de la recherche scientifique et technique outre-mer (remplacé aujourd'hui par IRD).

PMRC : Programme mondial de recherche sur le climat.

RCD : régional downscaling climatique.

RCP : Representative Concentration Pathways.

SIEREM : Système d'information environnementale sur les ressources en eau et leur modélisation.

S : capacités en eau.

UMR : Hydrosiences Montpellier.

Introduction

L'Algérie et en particulier la région Nord Ouest a connu plusieurs séquences de sécheresse 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. La diminution de la pluviométrie associée à l'accroissement considérable de la température durant les deux dernières décennies a influencé les rendements des céréales en générale et le blé en particulier.

D'après plusieurs chercheurs, l'Algérie et surtout l'Ouest, a connu plusieurs grandes sécheresses durant ce siècle, pendant les années 40 et les années 70 jusqu'à nos jours (Meddi et Hubert, 2003 ; Meddi et al., 2009 ; Taibi et al., 2013). Celle enregistrée après 1975 elle a été caractérisée par son ampleur spatiale, son intensité et par son impact majeur et sensible qui est la diminution des ressources en eau et la baisse du rendement agricole. Cette diminution et le contexte des ressources en eau sont à l'origine de l'extension des surfaces irriguées, l'irrigation apparaissant comme le seul moyen pour garantir et préserver la production agricole. Ce contexte est marqué par des tensions entre utilisations concurrentes de l'eau. Dans ce cas de figure, la prévision devient un outil intéressant pour une meilleur gestion des ressources en eau.

Cet état de fait a été observé également dans le bassin de la Méditerranée où la variabilité interannuelle des précipitations est caractérisée par une diminution plus ou moins significative des précipitations depuis la décennie 70 (Knippertz et al., 2003 ; Ellouze and Abiba 2008 ; Drouiech et al., 2010).

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.

Les prévisions effectuées par les modèles de circulation atmosphérique donne une augmentation de la température de 4°C dans les pays du Maghreb (IPCC, 2007 and 2013). Alors que ces mêmes modèles prévoient une réduction de la pluviométrie sur le littoral sud de la méditerranéen.

La connaissance régionale des écoulements de surface, devient très indispensable pour la gestion des ressources en eau superficielles et souterraines.

Les projections climatiques sur l'Algérie indiquent que pour la période 1990 _ 2020, la hausse de la température moyenne sera comprise entre 0.8°C et 1.1°C et la baisse des précipitations moyennes sera de l'ordre de 10%. L'élévation du niveau de la mer sera comprise entre 5 et 10 cm. L'intensification de l'évaporation due à l'augmentation de la

Introduction

température s'ajoute à la baisse des précipitations pour diminuer encore plus la quantité des eaux mobilisables au niveau des barrages et des nappes souterraines.

Les projections à l'horizon 2020 et 2050 indiquent que les saisons seront dérégées et les températures continueront de croître. La période pluvieuse sera concentrée sur une courte période entraînant des risques d'inondations. De même, il y aura une augmentation de la fréquence des sécheresses (Abdelguerfi, 2003).

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'impact des changements climatiques sur les écoulements superficiels dans trois bassins versant du Nord Ouest de l'Algérie pour montrer l'ordre de diminution des ressources en eau superficielles qui devrait affecter cette région aux horizons futurs. Ces simulations hydrologiques sont indispensables pour toutes planifications destinées à atténuer l'impact de ces changements climatiques sur la disponibilité des ressources en eau et de proposer des outils d'aide à l'amélioration de la gestion intégrée des ressources et demande en eau. Il sera question d'étudier la variation temporelle des précipitations ainsi que la prévision des débits aux horizons de 2039, 2069, 2099.

Ce travail consiste à utiliser des scénarios de prévision climatique en amont des modèles hydrologiques. L'objectif est donc de procéder à étudier la sensibilité aux paramètres climatiques plutôt qu'à une prédiction exacte.

Dans ce contexte, le travail vise à la :

- ✓ Collecte des données climatiques disponibles à partir de différents organismes gestionnaires des réseaux de mesure.
- ✓ Analyse de l'évolution des différents facteurs climatiques (Températures, précipitations, ETP et débits)
- ✓ Application d'un modèle pluie-débit au pas de temps mensuel, de type Génie Rural, développé par CEMAGREF. On suivra les étapes de calibration et de validation en fonction des données mesurées existantes.
- ✓ Analyse des sorties de modèle climatique régional de projet CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment; Giorgi et al.2009, Jones et al. 2011.), et l'étude des changements futurs projetés pour les températures et les précipitations. En comparant avec celles de la période de référence.
- ✓ Calcul de l'ETP futur, et la production de chronique de débits des oueds des bassins versants étudiés.

Introduction

- ✓ Compréhension de l'impact des variations climatiques sur les débits aux horizons futurs.

I.1 Introduction

Pour procéder à l'étude de l'impact de changement climatique sur les ressources en eau, nous devons constituer la base de données sur laquelle l'étude sera fondée, ensuite on entame la phase d'analyse et la critique de ces données, dans le but d'améliorer leurs qualités et de déceler des éventuelles erreurs. La prévision des chroniques de débits futurs en se basant sur les modèles à bilan hydrique, exige une bonne description des différents processus de cycle de l'eau ainsi l'état du sol et de relief, afin d'atteindre une bonne reproduction de la réalité hydrologique. De même, un diagnostic sur l'évolution des facteurs climatiques et hydrométriques dans le passé, s'avère indispensable dans la simulation et la compréhension de l'état avenir.

I.2 Cadres géographique, morphométriques et topographique de la zone d'étude

La zone d'étude située dans le Nord-Ouest de l'Algérie, entre $33^{\circ} 91'$ et $36^{\circ} 58'$ de latitude et $-2^{\circ} 30'$ et $3^{\circ}30'$ de longitude, s'étend sur une superficie de $68\,532\text{ km}^2$. Elle regroupe trois grands bassins versants, à savoir le bassin du Chéllif, le bassin de la Tafna et de la Macta, les chéllif fait partie de la région hydrographique Cheliff-côtier Dahra. En revanche, la Tafna et la Macta appartiennent à l'ensemble de l'Oranie-Chott Cherguie.

La réponse hydrographique qui est la résultante de l'interaction entre facteurs physico-géologique et climatique, diffère d'un bassin à l'autre, selon la distribution et la nature de ces facteurs. 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.

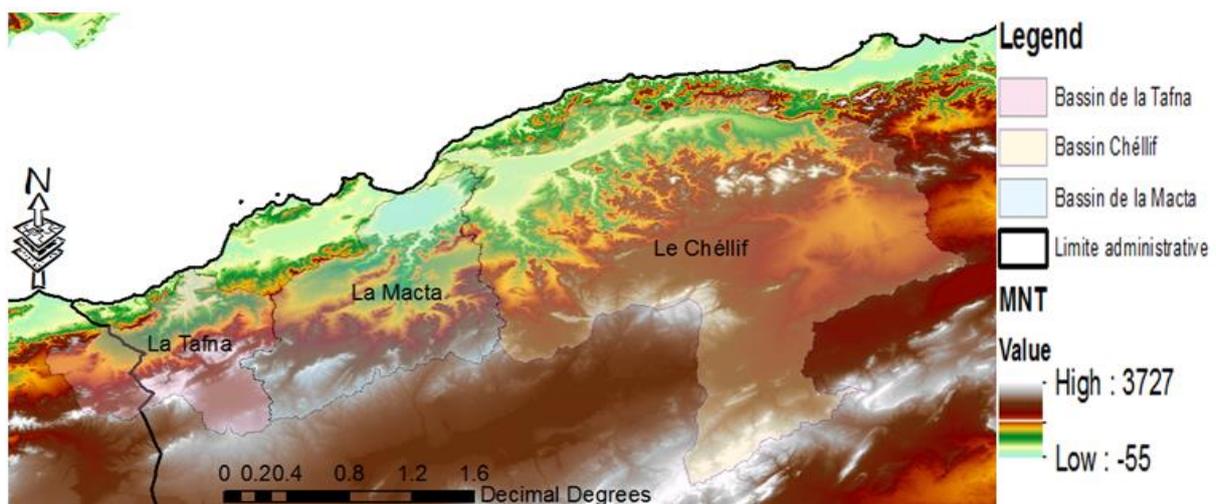


Figure I.1 : Présentation des différents bassins étudiés.

I.2.1 Bassin versant de la Tafna

Situé au Nord-Ouest de l'Algérie et faisant partie de la région hydrographique de l'Oranie-Chott Cherguie, le bassin versant de la Tafna est délimité par le principal relief en amont de Tlemcen entre la Méditerranée et les hautes plaines oranaises, est relayé à l'Ouest par les moyens Atlas et à l'est par les monts de DIAI (SAIDA), au nord-ouest les monts de Trara constituent une barrière entre le bassin et les influences de la mer.

D'une superficie de 7245 km², soit 10,57 % de l'aire d'étude. Ce bassin est constitué de huit sous bassins versants, subdivisé en trois grandes parties :

- ✓ partie orientale : drainée principalement par l'oued Isser et Sikkak.
- ✓ partie occidentale : comprend la haute Tafna (l'oued Sebdou et l'oued Khemis) et l'oued Mouilah.
- ✓ partie septentrionale : débute pratiquement du village Tafna et s'étend jusqu'à la plage de Rechgoune, embouchure de la Tafna sur la mer.

D'une forme assez ramassée dans l'ensemble, il est drainé par un cours d'eau de 170 Km, qui prend source dans les monts de Tlemcen.

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, caractérisées par leur faible perméabilité, dont la pente de versant la plus importante est supérieure à 30 % . En revanche, les zones de plaines sont moins drainées à cause de leurs faibles pentes et la nature alluviale des formations géologiques favorisant l'infiltration au détriment de ruissellement.

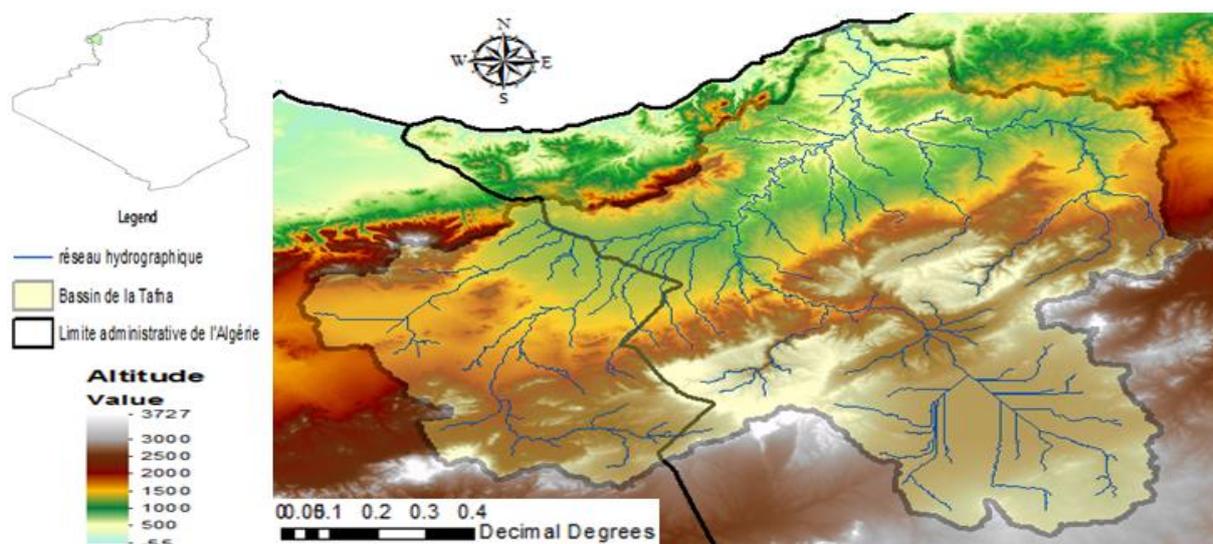


Figure I.2 : Bassin de la Tafna.

I.2.2 Bassin de la Macta

Situé au Nord de l'Algérie, le bassin versant de la Macta est compris entre $34^{\circ} 28'$ et $35^{\circ} 87'$ de latitude Nord et $0^{\circ} 52'$ et $1^{\circ} 2'$ de longitude Ouest. 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 une basse plaine littorale séparée de la mer par un cordon dunaire. Cette plaine se caractérise par des altitudes le plus souvent inférieures à 9 m ; ce qui favorise la présence de plans de marais et des steppes plus ou moins humides. Des massifs, orientés SW-NE, qui confèrent à la plus grande partie du bassin versant un caractère montagneux : les monts de Tessala (1061 m) bordent le bassin versant à l'ouest et au nord-ouest. Au sud-ouest, ils sont remplacés par la partie orientale des monts de Tlemcen (1412 m). Les monts de Beni-Chougrane (932 m) occupent une bonne partie de la zone moyenne de bassin versant. Celui-ci remonte, à l'Est, jusqu'aux monts de Saida (1021 m) et au sud, jusqu'aux monts de Dhaya (1455 m). Et enfin, de larges plaines alluviales sont insérées dans le massif montagneux : celles de Sidi Bel-Abbes, de direction S-N, drainés par l'oued Mekarra.

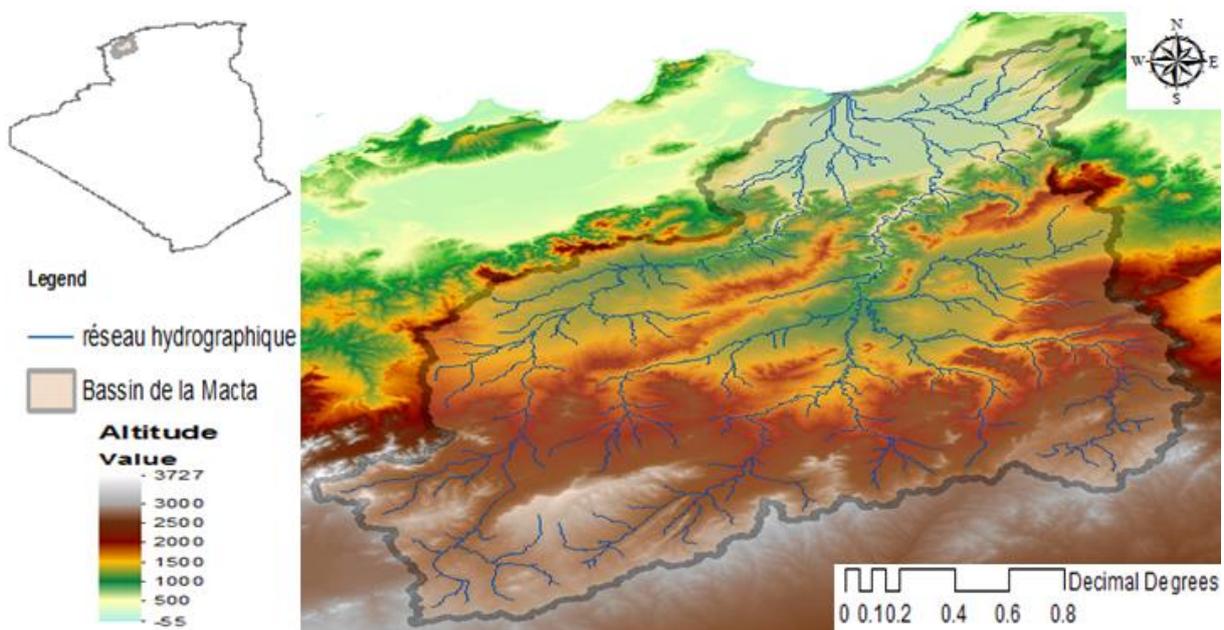


Figure I.3 : Bassin de la Macta.

I.2.3 Bassin du Chéllif

D'une superficie de 44 035 km², le bassin de Chéllif fait partie de la région hydrographique Chéllif-Zahrez d'une superficie 56227 Km², soit 22% de la surface de l'Algérie du Nord. Il est limité au nord par le bassin côtier Dahra, à l'ouest par le bassin Oranais, au sud par les hautes plaines et à l'est par le bassin algérois. Il regroupe deux grands

bassins, le Chéllif à l'aval du barrage Boughzoul (bas et moyen Chéllif) et le Chéllif à l'amont du barrage de Boughzoul (haut Chéllif).

L'oued Chéllif partagé entre deux grands domaines géographiques nettement différenciés, Hautes plaines et Telle, dont la partie aval se caractérise par un indice de forme élevé correspond à une forme allongée, l'altitude moyenne est estimée à 690 m, le relief montagneux est important, cette partie est relativement bien drainée en raison de la forte abondance pluviométrique et une faible perméabilité des affleurements géologiques. En revanche, la partie amont, domaine des Hautes plaines est d'un relief modéré, relativement plat et homogène, elle est drainée par l'oued Touil et Nahr Ouassel. La capacité de drainage est sensiblement faible en raison d'une part, de la faible abondance des précipitations à laquelle s'ajoute une évapotranspiration élevée, et d'autre part, de la perméabilité non négligeable des formations lithologiques.

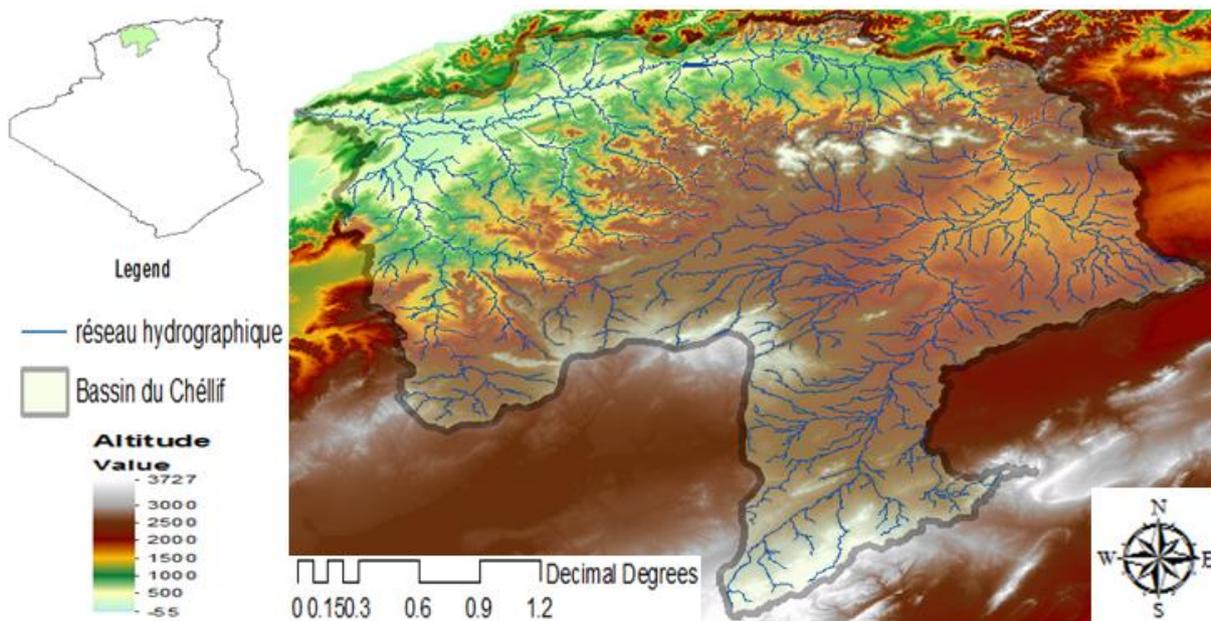


Figure I.4 : Bassin du Chéllif

I.3 Contexte climatique

La pluralité des domaines géographiques de l'Algérie, entraîne une grande variété de climat. Les parties nord des bassins situées sur l'étroite bande côtière constituant des plaines fertiles, subissent l'influence méditerranéenne, avec un climat sub-humide, pluvieux et doux en hiver et chaud et sec en été, et tempéré par des brises de mer. Les précipitations diminuant d'est en ouest (1000 - 400 mm) et du nord au sud (1000 à moins de 130 mm). Dans cette zone les températures moyennes minimales et maximales oscillent entre 5 et 15 °C en hiver et de 25 à 35 °C en été. Les vents humides venant de la mer apportent des pluies, de l'automne au printemps. Ces pluies sont plus abondantes de l'est qu'à l'ouest. Cependant l'influence du

désert se fait sentir jusque sur la côte par l'action du *sirocco* vent sec et chaud, redondant du sud au nord. Les chaînes montagneuses de l'Atlas, plus ou moins parallèle au littoral séparant l'Atlas des Hautes plaines (partie amont de la Macta, et le moyen et le haut Chéllif, qui se caractérisent par un climat semi-aride à aride en s'approchant de l'Atlas saharien, avec des précipitations faibles et irrégulières, de 200 à 400 mm par an. La température descend souvent au-dessous de zéro degré en hiver. En été elle dépasse 30 et même 40 degrés.

I.4 Tendances et variables observées

I.4.1 Pluie

La distribution de la pluie en l'Algérie septentrionale manifeste une grande hétérogénéité. Les zones les plus arrosées se trouvent à l'Est avec une moyenne annuelle dépassant les 1000 mm, par contre à l'Ouest la pluviométrie est faible varie entre 200 à 400 mm par an. En revanche, le centre reçoit une pluviométrie variant entre 400 et 800 mm. Cette variabilité est engendrée par l'effet de l'altitude, la longitude et la distance à la mer ainsi que la forme du relief (expositions au vent) (Meddi et Meddi, 2007).

L'analyse de l'évolution temporelle de la pluie dans la zone d'étude a montré une diminution progressive de la pluviométrie, une accentuation de l'irrégularité pluvieuse et raccourcissement de la saison humide (Aziz Hebal et al., 2012). Cette perturbation dans le régime pluviométrique a été produite à partir des années 70, touchant partiellement l'Ouest de l'Algérie. Ensuite, elle s'est propagée, en affectant l'ensemble des stations météorologiques durant la décennie 90 (Meddi & Humbert, 2000).

Cette réduction de la pluviométrie est la résultante d'une tendance à la baisse des totaux annuels ainsi que les totaux saisonniers (diminution des pluies d'hiver) (Meddi et al., 2002) et mensuels (Aziz Hebal et al., 2012), de même, la baisse de la fréquence des fortes précipitations (Matari et Douguedroit, 1995). Entraînant un déficit pluviométrique annuel estimé au moins à 20 % des totaux annuels dans le bassin de la Tafna et la Macta (Meddi et al. 2010). D'autres l'estiment à plus de 36 % dans les plaines de Mascara et à 20 % dans les plaines de la Mitidja (Meddi et Meddi. 2009). Par contre ce déficit se chiffre entre 16 et 43 % dans la région ouest, et à moins de 20 % au centre (Taibi et al., 2013)

La persistance du déficit pluviométrique de ces dernières décennies a instauré dans le Nord de l'Algérie en général, et dans sa partie Ouest en particulier, une sécheresse d'une grande ampleur, et d'une forte intensité (A. Matari, 2000). D'une part elle favorise l'évapotranspiration en détriment des autres termes de bilan hydrologique, d'autre part, il s'avère que la période sèche se caractérise par une aptitude au ruissellement superficiel plus

important que la période humide (Nekkache et al., 2010). Une telle sécheresse a plongé la majeure partie du littoral Ouest dans la semi-aridité, une croissance de l'aridité qui a augmenté le potentiel érosif des sols (Megnounif et al., 2007).

La tendance à la baisse de la pluviométrie prend une ampleur régionale. Des études ont révélé qu'au Maroc la baisse des pluies est généralisée et soulignée par une rupture dans les séries chronologiques entre 1976 et 1980 (Stephanie Singla et al., 2010). De même, en Tunisie centrale une baisse de la pluviométrie a été décelée entre 1976 et 1989 (Kingumbi et al., 2005).

I.4.2 Débit

L'interaction entre plusieurs facteurs (le régime des précipitations, la nature géologique du bassin versant, sa situation géographique, sa surface...), permettent de définir la nature du régime des rivières ainsi que la répartition temporelle des débits.

Dans les zones méditerranéennes, la nature du régime, en s'orientant du Nord vers le Sud, est de type simple, mixte, ou complexe (Touazi. M et al.; 2011). Le régime hydrométrique dépend essentiellement des précipitations. Ces dernières constituent sa première source d'alimentation, à cet effet tous changement dans le régime pluviométrique, influe directement sur le régime hydrologique des cours d'eau sur le plan qualitatif et quantitatif. La réduction de la pluie constatée ces dernières décennies, et qui s'est traduite par un déficit pluviométrique considérable, a affecté les écoulements des cours d'eau. D'une part, cette réduction a engendré une baisse de ruissellement (Hallouz et al., 2012). D'autre part, l'effet cumulatif de ce déficit a provoqué un rabattement dans les niveaux des nappes phréatiques, et a perturbé les échanges oued-nappe, nettement en fin de saison humide, marquant une forte baisse dans les lames d'eau écoulée (Meddi et Boucefiane, 2009) et (Halouz et al.; 2013). Cette double corrélation montre bien l'impact de changement climatique sur le régime hydrologique.

L'analyse des séries hydrologiques dans différents sites a mis en évidence la présence des ruptures à partir des années 70 (Meddi et al.; 2009). En effet, cette réduction coïncide avec celle détectée dans les séries pluviométriques, avec un certain décalage dans le temps. Cela montre que le changement dans le régime hydrologique est le résultat d'un changement climatique et non pas d'une mauvaise gestion de la ressource.

À l'échelle annuelle, suite à la diminution de la pluviométrie, la réduction de la lame d'eau écoulée dans la zone d'étude, est estimée entre 37 à 44 % dans sa partie Est, à 55 % au centre, et entre 61 à 71 % dans son côté extrême Ouest (Meddi et Hubert, 2003). En revanche,

sur l'échelle saisonnière, l'hiver et le printemps sont extrêmement touchés, mais la baisse n'a que peu ou pas touchée les écoulements d'automne (Meddi et al., 2009).

I.4.3 Température :

À l'échelle globale, les statistiques montrent qu'au cours du 20^{ème} siècle la terre s'est réchauffée de 0.76 °C. En outre, l'Afrique du Nord est la plus vulnérable à ce réchauffement, avec une hausse estimée entre 1.5 et 2 °C (Philippe, 2007).

Aux portes de la rive de la méditerranée, l'Algérie en général, et la zone d'étude en particulière ne sont nullement épargnées par cet aléa climatique, puisqu'elle enregistre une tendance prononcée vers la hausse des températures, qui s'est traduite par une succession des vagues de chaleurs, dont la durée, l'intensité et la fréquence sont exceptionnelles.

Plusieurs auteurs ont étudié l'évolution de la température dans le Nord-Ouest Algérien, et confirment que ce réchauffement est dû principalement à une hausse de la moyenne estivale, à partir des années quatre-vingt dix (Fernini-Haffif et Berezowska, 2015), ils ont estimés cette augmentation à 0.9 °C à Ghriss et à 1.2 °C à Mascara et Saida. De même (El Mahi et al, 2011) affirment une augmentation des températures annuelles maximales de 2 °C, et un réchauffement des extrêmes de 7 °C.

Une même tendance a été décelée dans les pays voisins, une augmentation de la température maximale moyenne de 1.3 °C, constatée à Béja en Tunisie (Chebil et al, 2011). Tandis que, au Maroc l'évolution des facteurs climatiques, nettement la température, confirme le réchauffement observé à l'échelle globale, avec des hausses significatives, particulièrement celle de l'été et du printemps (Sebbar et al, 2012).

Une telle accentuation dans les températures à un effet direct sur l'évaporation et l'évapotranspiration, dont elle augmente la quantité d'eau perdue dans les différents réservoirs, et affecte négativement la ressource en eau.

I.5 Choix de l'air d'étude

L'air d'étude porte sur trois grands bassins versant de nord-ouest de l'Algérie, à savoir le bassin de Chélif, Tafna et la Macta. Le choix se justifie par l'ampleur de la sécheresse au cours de ces dernières années sur cette zone. Outre, cette partie regroupe de nombreuses plaines fertiles avec un recours de plus en plus intense à l'irrigation, au détriment de l'équilibre des ressources en eau. 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 connaître en mieux les circonstances futures, afin de mettre en œuvre des outils de gestions efficaces et durables.

I.6 Constitution de la banque de données

Les dernières révélations montrent bien une extension des surfaces irriguées, ainsi qu'une forte augmentation de la population dans le milieu correspond à l'air d'étude. D'autre part, le bouleversement du climat est bien évident, dont nombreuses études affirment une progression des températures, accompagnée d'une régression bien marquée des précipitations. En effet, cette situation a épuisé les ressources en eau. En revanche, plusieurs voix estiment que la situation sera aggravée au futur.

Pour cette raison, une étude de l'évolution des grandeurs climatiques pour les horizons futurs, ainsi leurs impacts sur les ressources en eau, semble bien utile, dans un contexte très délicat. Afin, de prévoir les meilleurs outils de gestion de ces ressources. Une mission qui nécessite dès lors un grand nombre de données à une échelle spatiale et temporelle adoptée au projet d'étude.

I.7 Choix de l'échelle spatio-temporelle

Le choix de pas de temps mensuel est motivé par une série de contraintes liées à l'ambition de travail, à l'acquisition des données de base et aux simulations envisagées. L'échelle mensuelle est bien adoptée à la description des crues au Nord Africain, car leurs régimes sont bien corrélés à celui des pluies, représentant leur première source d'alimentation. Ainsi le problème d'acquisition des données, impose toujours le recours à des pas de temps plus fins. La robustesse et la fiabilité de modèle GR2M dans la prévision pluie-débit, dont leur exploitation implique moins de paramètres.

Dans le choix de pas spatial de la prévision, on a opté à la modélisation globale. Cette démarche considère chaque bassin versant drainé par une station hydrométrique comme une entité homogène. La prise d'une telle décision, se justifie par l'efficacité de la modélisation globale sous GR2M, en comparant avec la modélisation semi-distribué.

I.8 Données climatiques

I.8.1 Pluviométrie

I.8.1.1 Source

Les données pluviométriques utilisées dans cette étude proviennent de deux sources différentes. D'une part, de la banque SIEREM de l'UMR Hydrosiences Montpellier. Le projet SIEREM (Système d'information environnementale sur les ressources en eau et leur modélisation) dont la collecte est faite auprès des réseaux nationaux, diverses organisations internationales ou inter-états et des organismes de recherche, la mise à jour de la banque de données a été faite intérieurement par l'IRD. Les données sont spatialisées sur une grille de

0.5° de résolution en couvrant la période 1940 à 1999. D'autre part, on a eu recours aux données des stations pluviométriques comprises dans l'air d'étude. Les stations récupérées sont au nombre de 13, leurs noms, leurs coordonnées en degré sont illustrés dans le tableau 1.

Tableau I.1 : Codes et coordonnées des stations pluviométriques

Code de la station	Coordonnées (degré)		Période de mesure		Observation
	Latitude	Longitude	Début	Fin	
160303	34.864	-1.682	1953	2010	
160406	34.652	-1.533	1936	2010	
110802	34.914	-0.261	1936	2010	
111219	35.118	0.108	1936	2010	
011302	35.908	2.389	1936	2010	
011404	36.115	2.85	1936	2010	
012503	35.471	1.52	1936	2010	
012804	35.985	0.682	1936	2010	Lacunes 1962-1966
113004	35.057	0.885	1936	2010	
160403	34.667	-1.496	1941	2010	
011004	35.667	1.972	1936	2010	
110201	34.974	-0.734	1936	2010	
011803	36.274	2.110	1936	2010	

L'usage de deux types de données a pour objectif :

- La comparaison des pluies spatialisées de la banque de données SIEREM avec celles mesurées au niveau des stations pluviométriques, pour la période 1940-1999.
- Le comblement des lacunes dans les séries mesurées, on se réfère aux séries spatialisées de SIEREM.

I.8.1.2 Calcul de la pluie moyenne pour chaque bassin drainé par une station hydrométrique

I.8.1.2.1 Pluies spatialisées de SIEREM

Les données de pluie sont spatialisées sur une grille de 0.5° de résolution et couvrent la période 1940 à 1999. Après calage avec la zone d'étude, on a procédé au calcul de la pluie pondérée sur chaque bassin, par la sommation de la pluie correspond aux mailles contenues dans le bassin.

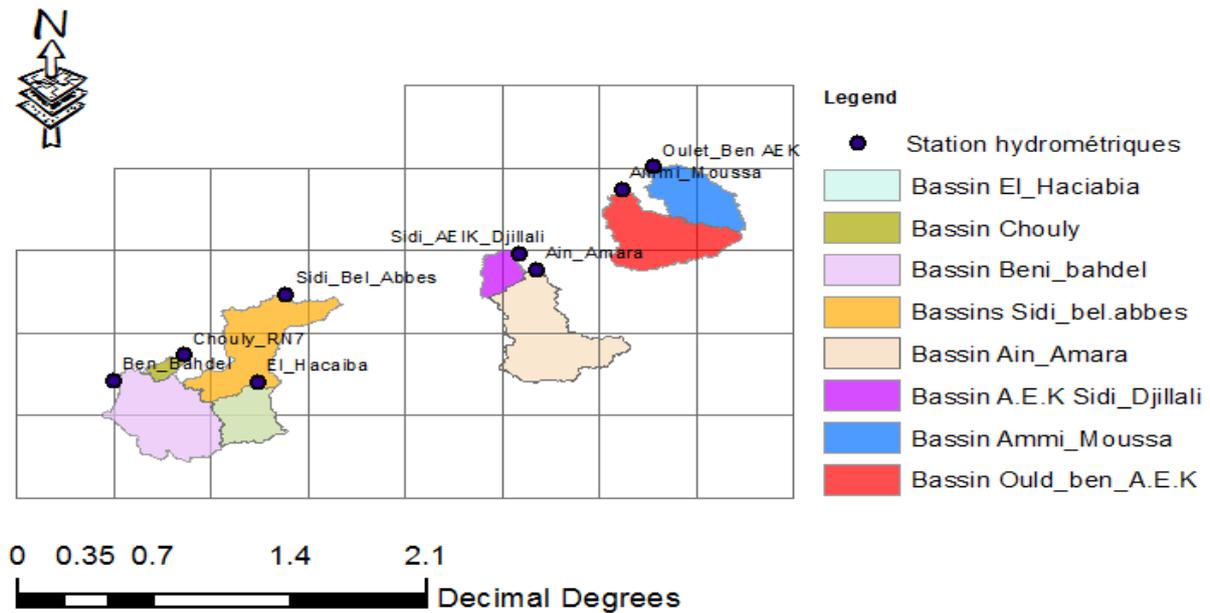


Figure I.5 : Interaction bassin et Grille de pluies spatialisées.

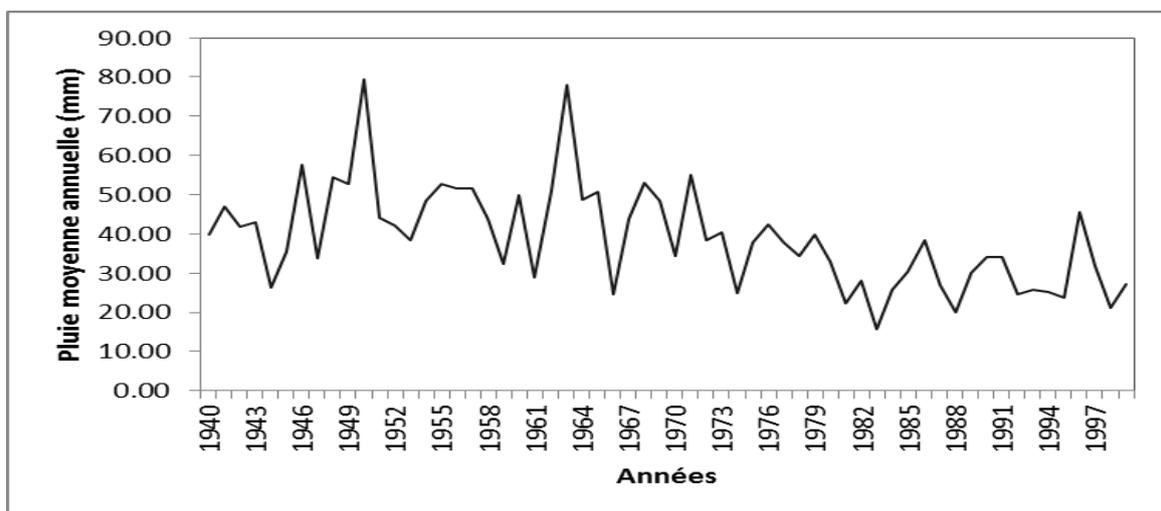


Figure I.6 : évolution de la pluie spatialisée sur le bassin de Beni_Bahdel

I.8.1.2.2 Pluies mesurées

Les réseaux pluviométriques offrent en chaque site instrumenté une mesure directe des précipitations au sol. Les mesures sont ponctuelles. En revanche, leurs structures spatiales sont inconnues. L'étude des grandeurs climatiques sur des entités géographiques nommées bassin versant, nécessite souvent l'estimation de la quantité des pluies tombée sur le site d'étude à partir des données ponctuelles obtenues en un nombre limité de stations pluviométriques. Plusieurs techniques d'interpolation spatiale sont disponibles, pour estimer ces quantités de pluies tombées sur un domaine donné. Dans cette étude, on a fait appel à la méthode de polygone de Thiessen. La démarche de calcul est donnée dans l'annexe I.

Les précipitations surfaciques moyennes pour chaque bassin drainé par une station hydrométrique sont regroupées dans l'annexe I.

Le graphe ci-dessous illustre l'évolution des précipitations de 1941 à 2010, sur le bassin de Beni_Bahdel.

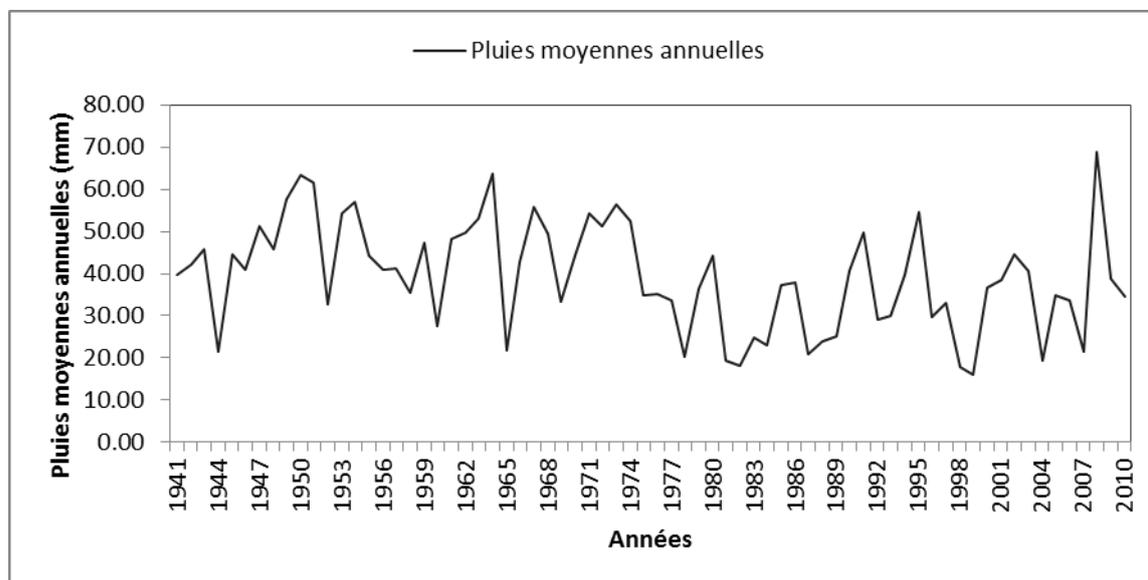


Figure I.7 : évolution de la pluie surfacique moyenne sur le bassin de Beni_Bahdel

I.8.1.3 Comparaison entre les pluies provient de la base SIEREM et les pluies moyennes surfaciques

On rappelle que la pluie spatialisée de la banque SIEREM de l'UMR, a été réalisée sur l'ensemble de l'Afrique. Concernant l'Algérie plusieurs stations pluviométriques, synoptiques sont prises en considération.

Dans cette partie, après la projection de la pluie spatialisée de SIEREM et le calcul des pluies moyennes surfaciques sur chaque bassin drainé par une station hydrométrique, on procède à la comparaison.

Les figures ci-dessous illustrent l'évolution des deux types de pluies, et la différence entre elles. Ainsi, leurs moyennes interannuelles sur l'ensemble de la période d'étude.

Partie I : Présentation de la zone d'étude

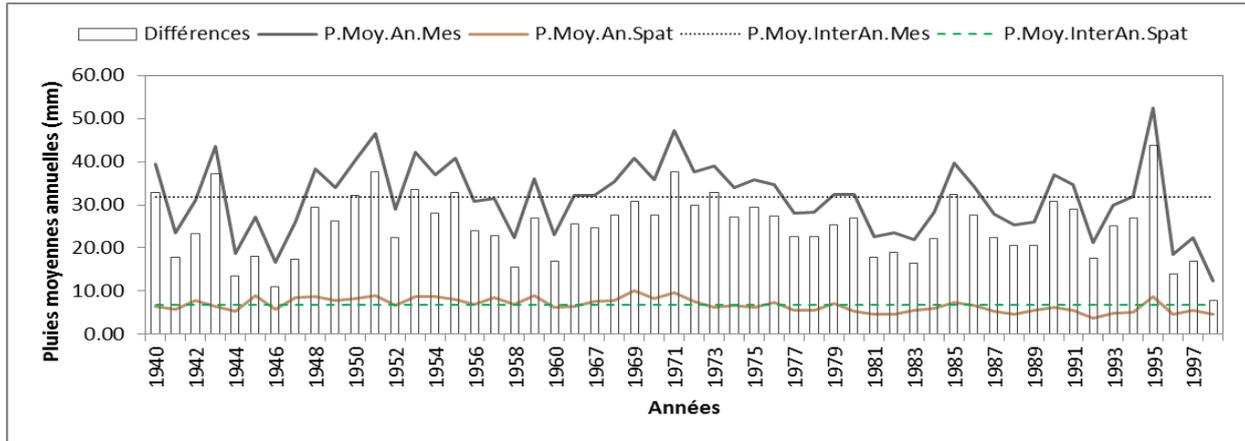


Figure I.8 : Pluie spatialisée de SIEREM et la pluie surfacique moyenne projetée sur le bassin de Sidi_Djillali

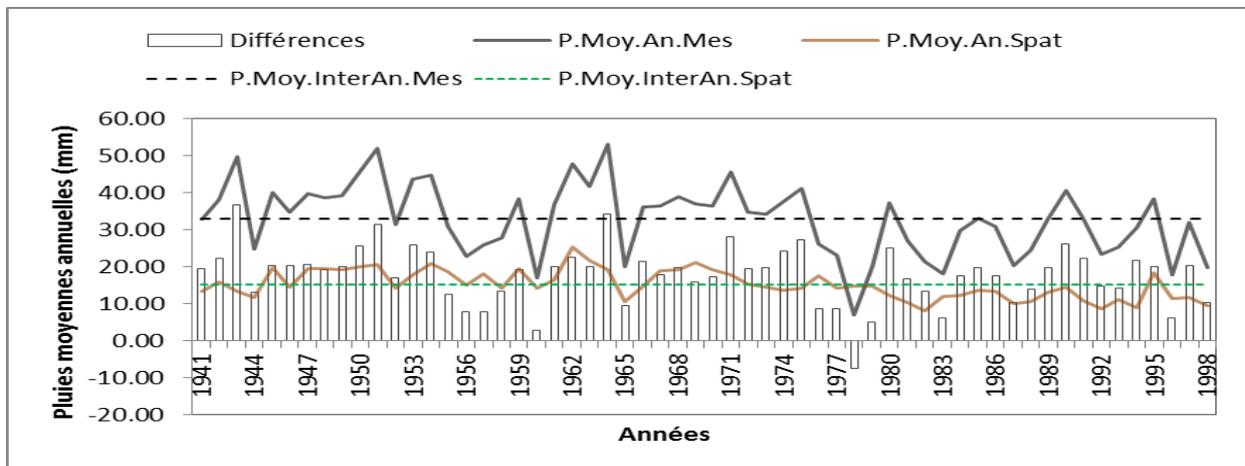


Figure I.9 : Pluie spatialisée de SIEREM et la pluie surfacique moyenne projetée sur le bassin de Haciabia

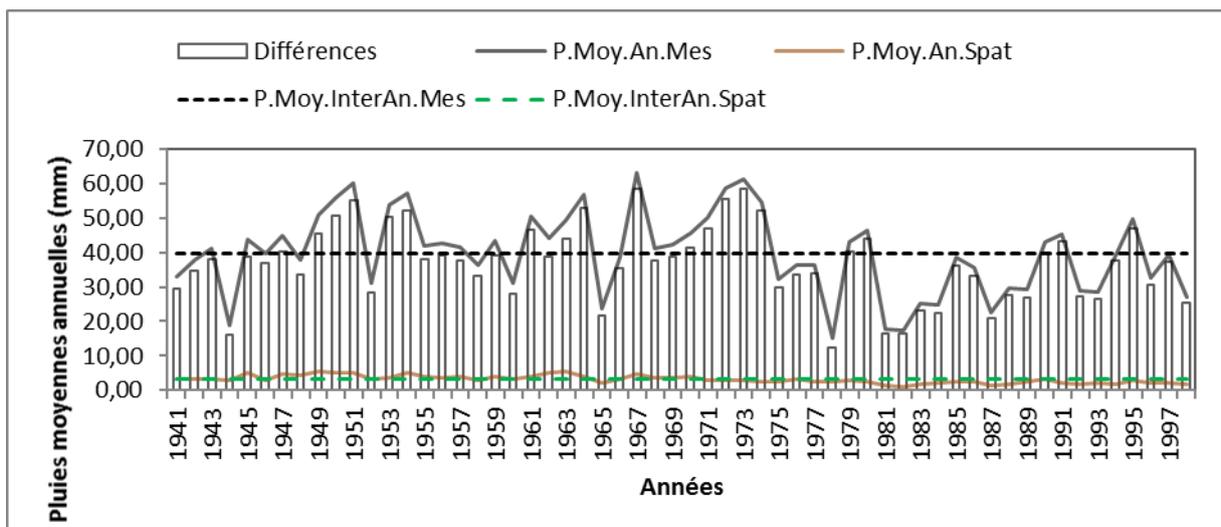


Figure I.10 : Pluie spatialisée de SIEREM et la pluie surfacique moyenne projetée sur le bassin de Chouly

Partie I : Présentation de la zone d'étude

Tableau I.2 : caractéristiques des deux séries de données et le coefficient de pondération.

Bassins	Période d'observation (ans)	Écarts (mm)		Moy. Interannuelle		Coefficient de pondération
		min	max	P.MES	P.SPAT	
Sidi_Djillali	53	7.77	43.75	31.76	6.76	4.70
Haciabia	57	8.18	25.30	32.92	15.22	2.16
Chouly	57	12.41	58.43	39.77	3.17	12.54

Les figures (4) (5) et (6), montrent des courbes marron en dessous de courbes noires. Outre, les écarts se différent d'années à l'autre, mais leurs valeurs reste importante tableau (2). La distance entre la ligne droite noire et la verte correspond à la différence entre les moyennes interannuelles des deux séries.

À travers ces figures, on constate que les pluies spatialisées provenant de la banque SIEREM sous-estiment excessivement les pluies moyennes surfaciques au sien des bassins Sidi_Djillali, Haciabia et Chouly. Un tel écart peut être dû d'une part, au nombre des stations prises en considération lors de ce projet, dont l'écartement entre stations est vraiment important. D'autre part, à la contrasté de climat, qui se caractérise par la présence des micros climats. Finalement, on peut dire que ces micros climats dans ces trois zones d'études sont mal interprétés par les stations témoins prises dans ce projet.

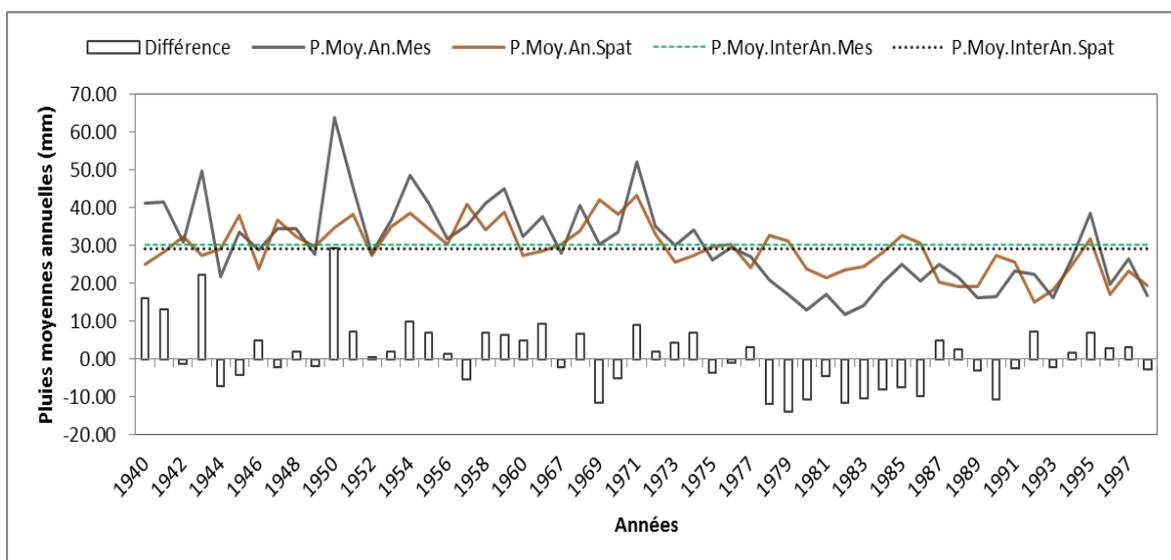


Figure I.11 : Pluie spatialisée de SIEREM et la pluie surfacique moyenne projetée sur le bassin d'Ammi_Moussa

Partie I : Présentation de la zone d'étude

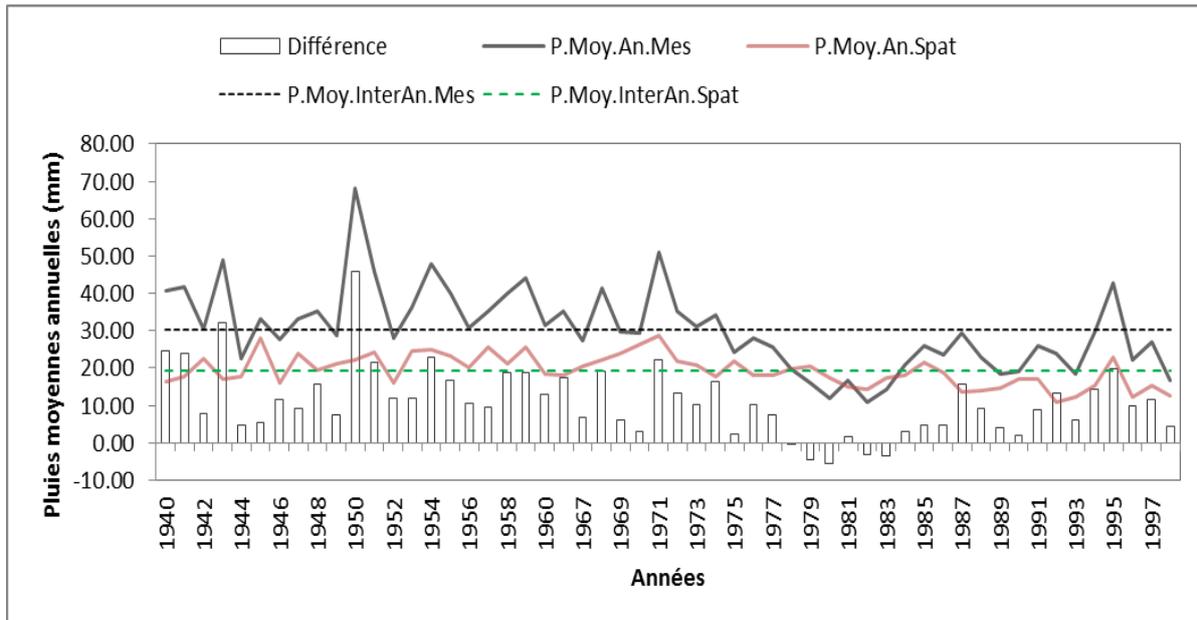


Figure I.12 : Pluie spatialisée de SIEREM et la pluie moyenne surfacique projetée sur le bassin d'Ouled Ben A.E.K

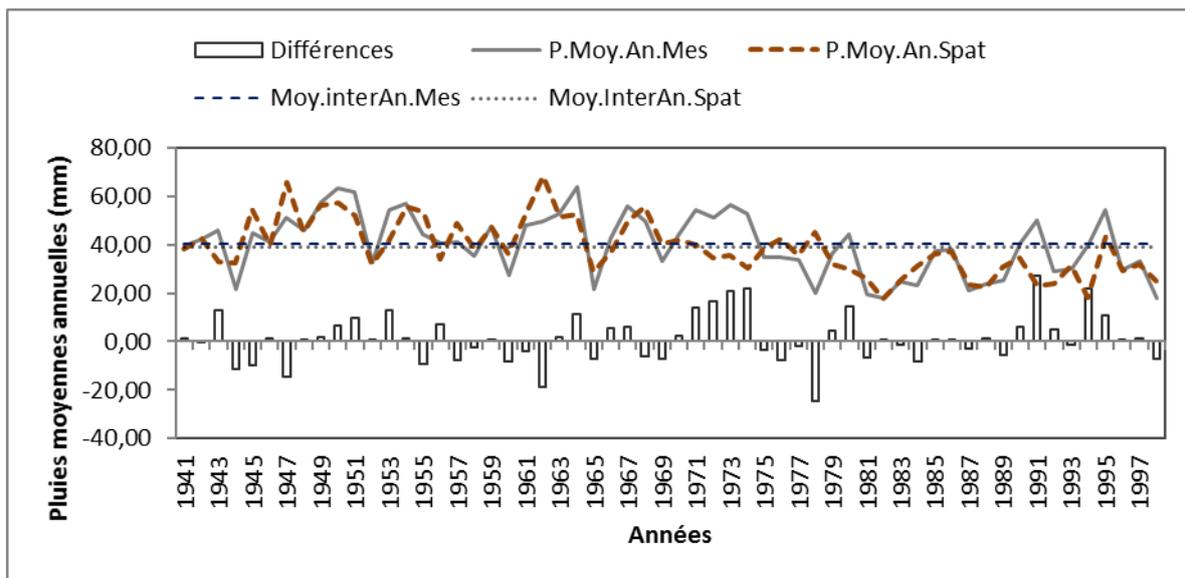


Figure I.13 : Pluie spatialisée de SIREM et la pluie moyenne surfacique projetée sur le bassin de Beni_Bahdel

Tableau I.3 : caractéristiques des deux types de données et les coefficients de pondération

Bassins	Période d'observation (ans)	Écart (mm)		Moy. Interannuelle		Coefficient de pondération
		min	max	P.MES	P.SPAT	
Amm_Moussa	53	-13.94	29.15	30.09	29.20	1.03
A.E.K	53	-5.51	45.69	30.36	19.36	1.57
Beni_Bahdel	57	-24.8	27.01	40.19	38.90	1.03

Les figures (7) (8) et (9), montrent des courbes noire et marron très proches l'une de l'autre. La différence entre les valeurs moyennes annuelles des deux séries est vraiment faible

sur l'ensemble de la période d'étude. La distance entre les deux droites qui correspondent à l'écart entre les moyennes interannuelles des deux séries est donnée dans le tableau.3 pour chaque bassin.

On peut conclure que, au niveau de ces trois bassins, les pluies moyennes spatialisées reproduisent d'une façon assez bonne les pluies réelles reçues par chaque bassin, puisque les deux courbes sont très semblables surtout pour le bassin de Ammi_Moussa et Beni_Bahdel. Cependant sur les trois figures, on constate une atténuation des événements extrêmes observés dans les séries des pluies moyennes surfaciques, en comparant avec les pluies moyennes spatialisées. De même, une légère augmentation des minimums. Cela peut être dû à l'effet de lissage lors de la spatialisation.

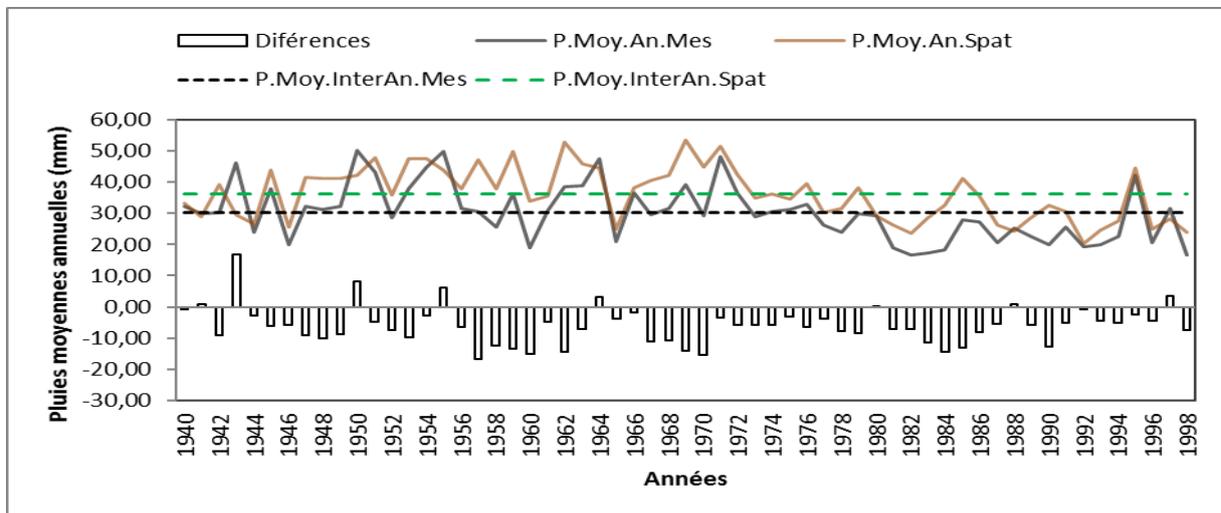


Figure I.14 : Pluie spatialisée de SIEREM et la pluie moyenne surfacique projetée sur le bassin d'Ain_Amara

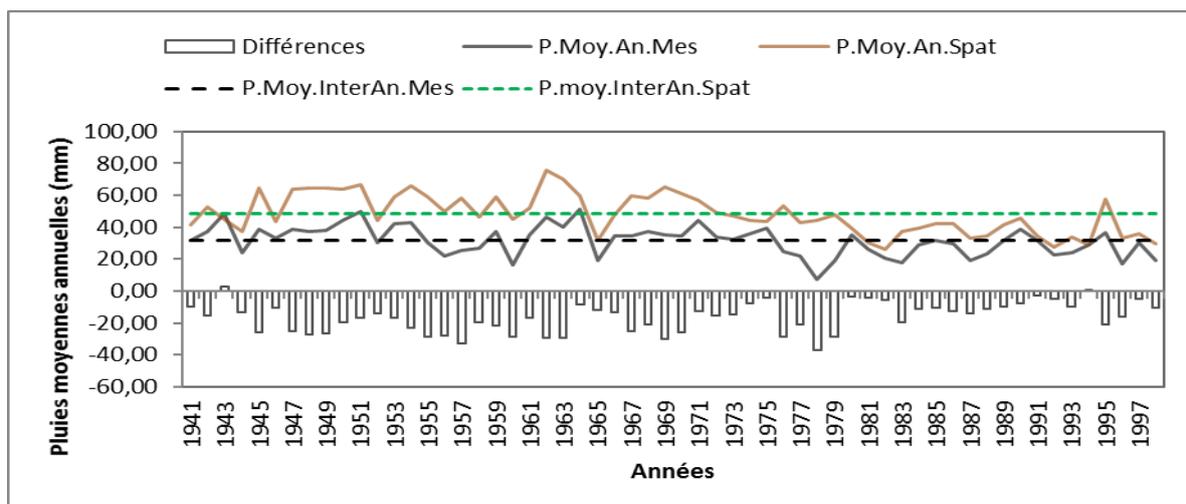


Figure I.15 : Pluie spatialisée de SIEREM et la pluie moyenne surfacique projetée sur le bassin de Sidi_Bel_Abbes

Tableau I.4 : caractéristiques des deux types des données et le coefficient de pondération

Bassins	Période d'observation (ans)	Écarts (mm)		Moy. Interannuelle		Coefficient de pondération
		min	max	P.MES	P.SPAT	
Ain_Amara	58	-16.87	16.87	30.30	36.24	0.84
Sidi-Bel-abbes	57	-36.98	3.01	31.66	48.25	0.66

Les figures.10 et 11 montrent la courbe des pluies moyennes spatialisées en dessus de la courbe des pluies moyennes surfacique. La différence entre les deux catégories des données est légèrement faible dans la figure 10, mais elle devient plus importante dans la figure 11. De même pour la distance entre les deux lignes droites, qui représente la différence entre les moyennes interannuelles des pluies.

Les pluies moyennes spatialisées surestiment les pluies surfaciques moyennes tombant sur les bassins Ain_Hamara et Sidi-Bel-abbes. De même, que le premier cas, ces résultats nous montrent le contraste du climat dans l'air d'étude.

Les résultats et les constatations tirées dans cette comparaison, mettent en évidence le contraste du climat dans la zone d'étude, et leur grande variation spatiale. Pour tenir compte des différentes particularités de la zone, on doit impliquer un grand nombre de stations témoin, une tâche qui n'est pas toujours faisable voire la rareté des données en quelques endroits et leurs acquisition qui n'est pas toujours facile.

Malgré la sur-estimation ou sous-estimation des pluies en quelques endroits, les pluies spatialisées montrent une interprétation régionale de la distribution des pluies assez acceptable, dont l'évolution des pluies sur l'ensemble de la période d'observation est totalement conforme. Outre, cette étude a couvert la totalité de l'Afrique, ce qui rend leur précision sur les micros- bassins difficiles à atteindre, mais sur le plan régional, les résultats sont convenables.

En revanche, les extrêmes ont subi une atténuation et les valeurs minimales sont un peu portées en dessus, sous l'effet de lissage. Cette modification rend leurs exploitations inutiles dans l'étude des extrêmes ou les minimales.

Finalement, dans notre travail, l'intérêt d'une telle comparaison est de voir la possibilité de compléter nos séries de données mesurées par celles des pluies spatialisées du SIEREM, dont on multiplie par des coefficients correcteurs.

I.8.1.4 Restitution des données

La restitution sert à compléter les lacunes dans nos séries où on a des longues années sans mesures, les séries qui représentent un tel manque sont celles de Sidi_Djilleli, Ammi_Moussa et A.E.K. la période des lacunes s'étale sur les années 1962, 1963, 1964,1965,

et 1966. On prenant la série des pluies mensuelles de la banque SIEREM projetée sur chaque bassin, et on va multiplier chaque valeur par le coefficient de pondération pour compléter les séries des pluies moyennes surfaciques pour chaque bassin.

I.8.2 Températures

I.8.2.1 Source

Les données de températures mensuelles sont issues du Climatic Research Unit CRU (Newetal., 2000) disponible sur le site (WWW.CRU.UAE.AC.UK). Les données récupérées correspondent à des séries brutes des températures de différentes stations de mesures localisées dans l'air d'étude. Les lacunes d'observation et la longueur des séries, différentes d'une station à l'autre. Pour cette raison, quelques séries sont écartées, dont on a pris en considération juste les séries qui contiennent moins de lacunes avec une période couvrant les 5 dernières décennies.

Le tableau ci-dessous illustre les différentes séries constituant la base de données de cette étude.

Tableau I.1 : Codes et coordonnées des stations

Code	Nom	Latitude	Longitude
604900	Oran	35.6	-0.6
605220	Maghnia	34.8	-1.8
605500	El_Bayath	33.7	1
60250	Chlef	36.2	1.3

I.8.2.2 Reconstitution des données

Parmi les quatre stations retenues, la station de Maghnia, El bayath et chelef présentent des lacunes. Les données manquantes ont été reconstituées d'une façon systématique sur l'ensemble de ces trois stations. Ce travail a permis de disposer de chroniques les plus complètes possibles, constituant la banque de données opérationnelle utilisée ensuite pour les simulations, en gardant à l'esprit que l'estimation des données manquantes est entachée d'incertitude, et ce, quelque soit le procédé mis en œuvre, nous allons décrire la méthodologie employée.

I.8.2.2.1 Choix des séries de références

Dans notre choix, on a opté pour les séries avoisinantes, qui représentent des séries complètes, avec la prise en considération de l'influence des facteurs géographiques. Tel que les stations situées en dessus de l'atlas ont été complétées par celles qui partagent la même position. De même, pour les séries en dessous de cette chaîne montagneuse.

I.8.2.2.2 Détection des ruptures et tendances dans les séries chronologiques des températures

L'évolution des paramètres climatiques, y compris les températures, n'était jamais stationnaire à travers les siècles, les années et les mois. Des baisses et des augmentations se manifestent à des instants donnés. Ces modifications peuvent être instantanées (ruptures) ou continues dans le temps (tendances). Dans la restitution on doit maintenir la qualité des séries, et leurs sens évolutifs. Pour cette raison, la connaissance des ces ruptures et tendances sont indispensables afin de comparer les dates des ruptures des séries et de sélectionner juste les périodes qui ont un sens évolutifs commun pour le comblement, pour éviter d'entacher la série à restituer des nouvelles erreurs et d'introduire des nouvelles ruptures non significatives.

La technique utilisée est celle d'Hubert et Pettitt, disponible dans Khronostat (1998), un logiciel d'analyses statistiques de séries chronologiques développé par l'IRD.

I.8.2.2.3 Étude de la corrélation

Cette technique il nous permet d'étudier la relation qui pourrait exister entre deux variables quantitatives X et Y. Dans cette étude, on utilise le coefficient de corrélation de Bravier-Person nommé r_{xy} . Cet indice statistique exprime l'intensité et les sens (positif ou négatif) de la relation linéaire entre deux variables quantitatives (MERCIER-COUBRIS 2013). La procédure de calcul est donnée en annexe I. on laisse présager une absence de liaison linéaire si $|r_{xy}| < 0.2$. Par contre, si $|r_{xy}| > 0.8$, la liaison linéaire existe.

La série de référence a été soumise à une étude des ruptures afin de faciliter son usage en vue de combler les séries incomplètes.

Par conséquent, la valeur du coefficient de corrélation confirme l'existence d'une relation linéaire entre les deux séries. De ce fait, on entame le processus de comblement dont on remplace la valeur manquante par une moyenne pondérée par la tendance mensuelle des stations pluviométriques. La formule de calcul de la valeur manquante est la suivante :

$$T_x = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \frac{\bar{T}_x}{\bar{T}_i} * T_i \dots \dots \dots (1)$$

Avec :

T_x : La valeur manquante de température à la station x.

\bar{T}_x : Température moyenne à la station x.

\bar{T}_i : Température moyenne à la station de référence.

T_i : Température à la station de référence.

n : nombre de stations de références.

$\frac{T_k}{T_1}$: Ce rapport donne la valeur de coefficient de pondération.

Les tableaux ci-dessous illustrent la démarche mise en œuvre. Le tableau.6 montre les dates de ruptures des séries de références prises pour compléter la série de la station de Meghnia, et le coefficient de corrélation entre les valeurs moyennes annuelles. Après avoir localisé l'année et le mois de la lacune, on considère les valeurs inter-mensuelles du mois sur la période sans lacune, sur lesquelles on calcul le coefficient de corrélation et le coefficient de pondération.

Tableau I.2 : les dates de ruptures des séries de références et le coefficient de corrélation

Station X	Stations de références	Dates de ruptures	Coefficient de corrélation
Meghnia	Mellila	1971 1978 1986	0.413
	Oran	1942 1966 1977 1996	0.55

La station d'Oran est mieux corrélée avec la station de Maghnia que la station de Mellila.

TableauI.3 : démarche de la reconstitution pour le mois de septembre

Station X	Station Y	Mois	Période sans rupture	Coef. De corrélation	Coef. de pondération
Meghnia	Oran	Septembre	1942-1965	0.918	1.090
			1966-1976	0.937	1.089
			1996-2011	0.718	1.097

I.8.2.3 Calcul de la température moyenne

La température est une grandeur qui dépend de l'altitude, est influencée beaucoup par le relief. Pour cette raison leur spatialisation diffère d'une zone à l'autre en fonction entre autres de ces deux paramètres. Il est conseillé de procéder avec des techniques à bases physiques pour les zones très accidentées, avec l'utilisation d'un modèle météorologique mécaniste à haute résolution spatiale et temporelle. Par contre, dans les milieux ouverts et ventilés, les variations spatiales des températures sont généralement faibles. Alors on peut utiliser l'une des méthodes classiques de l'interpolation.

Partie I : Présentation de la zone d'étude

Pour la présente étude, notre choix est porté sur la méthode de Thiessen, vu la simplicité et la robustesse de cette méthode.

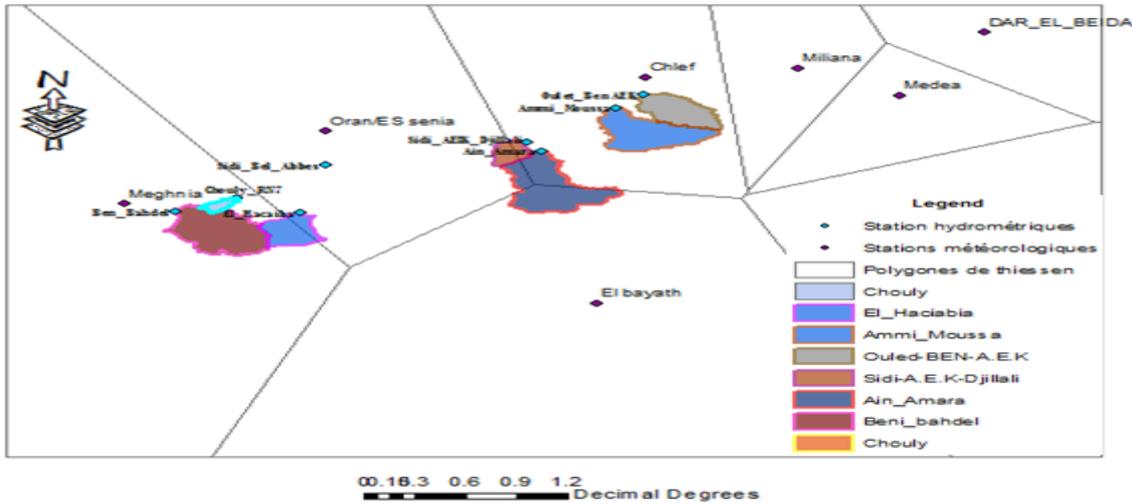


Figure I.16 : Spatialisation par les polygones de Thiessen

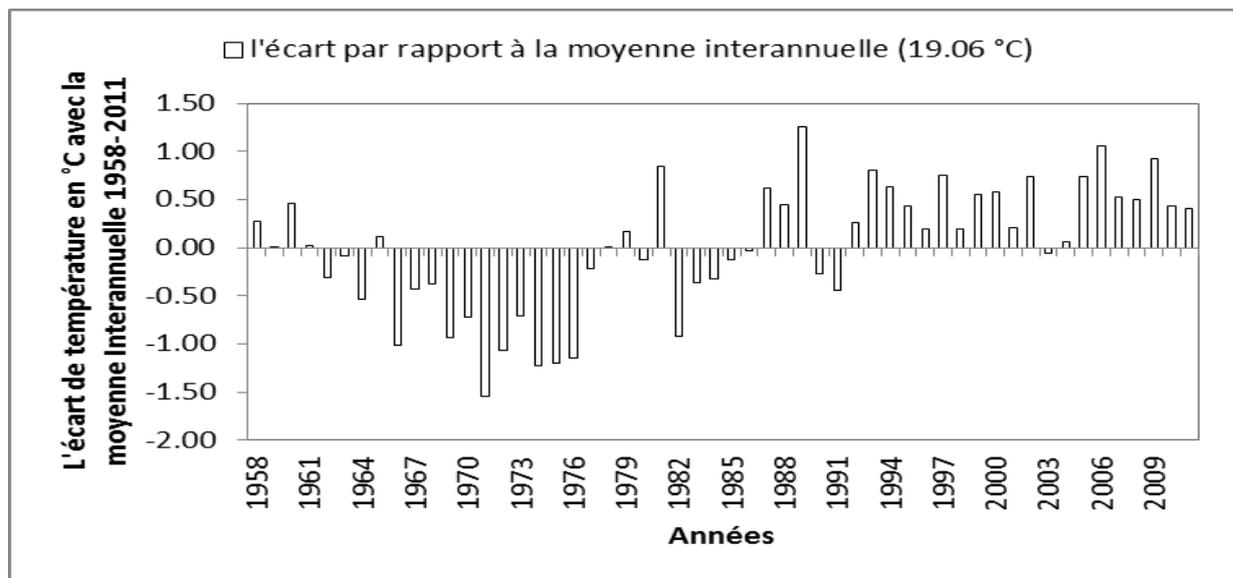


Figure I.17 : Différence de température par rapport à la moyenne interannuelle 1958-2011

La figure (13) montre que les deux dernières décennies se caractérisent par une hausse des températures, avec une augmentation qui alterne entre 0.1 à 1.07 °C par rapport à la moyenne interannuelle, estimée à 19.06 °C durant la période 1958 à 2011 sur le bassin d'Ammi_Moussa.

Sur l'ensemble des bassins, les températures ont tendance à la hausse à partir de la décennie soixante-dix, et ce phénomène a touché la grande partie de l'Algérie. Cette hausse de température se manifeste par des sécheresses dont l'intensité et l'ampleur sont sans précédent, avec un impact direct sur la ressource en eau, dont la quantité d'eau perdue par

évaporation s'accroît d'année en année. Les différents graphes montrant l'évolution de la température sur les autres bassins sont regroupés en annexe I.

I.8.3 Calcul de flux évaporatoire

La zone d'étude est soumise à un climat semi-aride, où la grande partie de la pluie reçue, rejoint l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau. Ce flux évaporatoire constitue une perte considérable pour les ressources en eau, dont le taux dépasse les 75% en Afrique (Musy et Higy, 2004). Des estimations de l'évaporation moyenne des bassins sont indispensables pour utiliser les modèles basés sur le bilan hydrique. En absence des mesures sur le terrain, on a eu recours à des méthodes empiriques pour l'évaluation indirecte. Parmi les méthodes citées dans la littérature, on évoque celles basées sur la température (formule de Thornwaite et de Blaney et Criddele) et les méthodes empiriques basées sur le rayonnement (méthode de Turc et de Priestly et Taylor), ainsi les méthodes combinées basées sur le bilan énergétique et le transfert de masse telles que la méthode de Penman-Monteith.

Les méthodes basées sur la température, sont les plus faciles à utiliser, vu le nombre des paramètres d'entrée, dont elles expriment l'ETP comme une fonction de la température, de l'humidité de l'air. Par contre, l'application des autres méthodes nécessite la connaissance de très nombreux paramètres.

Dans le présent travail, l'unique paramètre à notre disposition c'est les températures, pour cette raison on a penché pour la méthode de thornwaite. La démarche de la méthode ainsi les graphes montrant l'évolution de l'ETP dans les différents bassins sont évoqués dans l'annexe I.

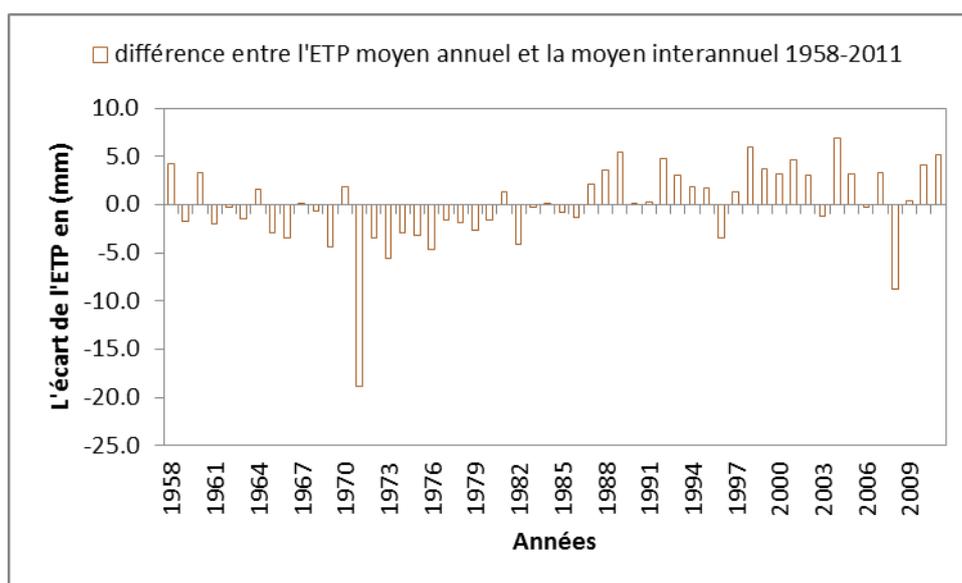


Figure I.18 : Ecart de l'ETP par rapport à la moyenne interannuelle 1958-2011

Comme elle le montre la figure.14, l'évolution de l'ETP sur le bassin d'Ammi Moussa a connu des valeurs supérieures à la moyenne interannuelle estimée à 80.9 mm durant la période 1958 à 2011. À partir de l'année 1987 jusqu'à 2011, excepté les années 1969, 2003, 2006 et 2008, l'ETP a enregistré une augmentation de 3.2 mm par rapport à la moyenne interannuelle. Du fait de l'augmentation de la température constatée sur le même bassin, une telle progression de l'ETP est bien attendue.

I.9 Calcul de la capacité en eau des sols

Le modèle retenu pour cette étude permet d'intégrer une certaine hétérogénéité des différents éléments du bassin versant, en particulier pour les caractéristiques des sols. Ainsi, la capacité en eau des sols constitue une véritable variable d'entrée au même titre que la pluie ou l'évaporation. Les trois jeux sur la capacité en eau des sols, utilisées dans cette étude sont issus de la carte des sols de FAO.

I.9.1 Carte des sols de la FAO

La couverture de données sur les sols a été extraite de la digitale Soil Map of the world (FAO-UNESCO, 1974-1981). La FAO définit des unités de sols en fonction de la profondeur des horizons et de la texture des constituants et auxquelles sont associées des classes de capacité de rétention en eau (Tableau.8). Cette dernière dépend principalement des caractéristiques granulométriques du sol et de la profondeur d'exploration du sol par les plantes qui est assimilée à la profondeur racinaire. La méthode développée par la FAO pour l'estimation de la capacité de rétention en eau s'appuie sur des valeurs de profondeur racinaire, du couvert végétal et des limites de succion standardisée (point de flétrissement et capacité au champ).

Tableau I.4 : Classification des sols selon la capacité de rétention en eau d'après FAO-UNESCO 1974-1981

Classes	Capacité de rétention en eau
A	>200 mm
B	150-200 mm
C	100-150 mm
D	60-100 mm
E	20-60 mm
F	0-20 mm
W (Wetland)	N.C

I.9.2 Evaluation de la capacité en eau pour chaque unité et pour chaque classe

Cette évaluation est réalisée par madame Claudine Dieulin responsable de la base de données cartographiques de SIEREM, dont la démarche est la suivante : à partir de la carte des unités de sols et les classes de capacités en eau pour chaque unité. Pour chaque classe de sol, ils ont retenu trois valeurs : limite inférieure, limite supérieure et moyenne arithmétique des limites de la classe considérée (Tableau.9). La FAO ne donne aucun renseignement quand à la valeur de capacité à attribuer à la classe Wetlands. Afin de garder une certaine homogénéité avec les études précédentes (Dray, 2001 ; Ouedraogo, 2001), ils ont attribué une valeur de 1000 mm pour la capacité en eau à cette classe, et ce quelles que soient les autres valeurs de capacité minimum, moyenne ou maximum (Claudine, 2005).

Tableau I.5 : Répartition des valeurs de capacité en eau (S) en mm

Classes	Smin	Smoy	Smax
A	200	250	300
B	150	175	200
C	100	125	150
D	60	80	100
E	20	40	60
F	0	10	20
W	1000	1000	1000

A présent, on dispose de la carte au format vectoriel de couverture des sols en fonction de leur capacité en eau, attachée à une table dans laquelle chaque classe de sols dispose de trois valeurs correspondant au minimum, moyenne et maximum de leurs capacités en eau (S). Ensuite, nous avons intersecté ces données des sols avec chaque bassin drainé par une station hydrométrique. Cette opération consiste à attribuer pour un bassin donné une valeur de capacité égale à la moyenne surfacique pondérée des polygones qui couvrent le bassin, et ce dans la limite du bassin.

Figure I.19 : Intersection entre les bassins de la carte des sols et les bassins drainés par les stations hydrométriques

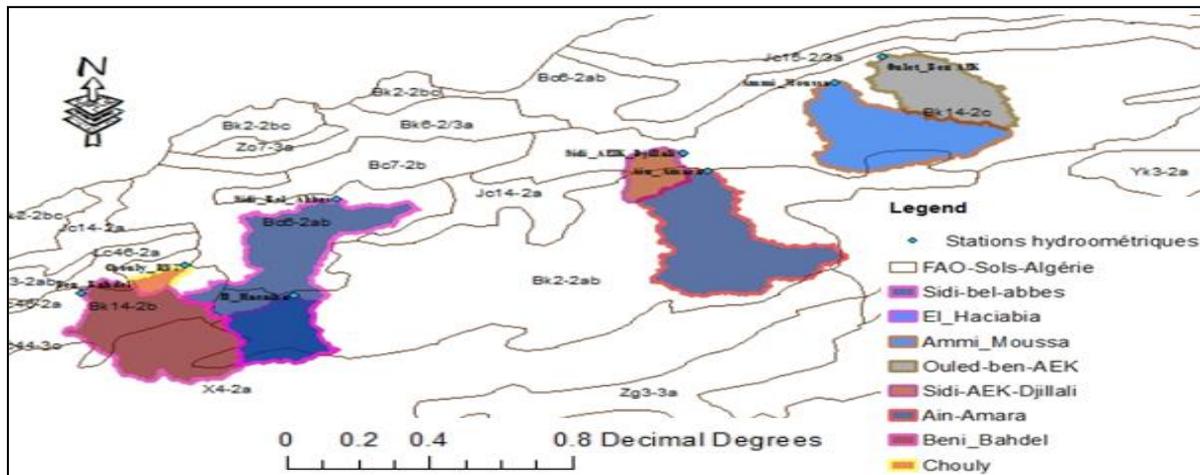


Tableau I.6 : les valeurs minimums, moyennes et maximums de capacité en eau de chaque bassin d'étude.

Bassins	Smin (mm)	Smoy (mm)	Smax (mm)
Beni_Bahdel	56.4	66.9	77.5
El_Haciabia	6.7	7.9	9.1
Ammi_Moussa	20.6	24.4	28.2
Ouled_ben_AEK	13.9	16.5	19.0
Sidi-Djillali	6.6	7.4	8.2
Ain_Amara	18.8	22.5	26.1
Chouly	8.3	9.9	11.5
Sidi-Bel-abbes	47.6	56.3	64.8

I.10 Les données hydrométriques

Les données hydrométriques proviennent de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). Dans cette étude on s'appuie sur les mesures de huit stations situées sur les trois grands bassins concernés par l'étude. Deux stations se trouvent sur le bassin de la Tafna et deux sur le bassin de la Macta et les quatre restantes sont localisées sur le bassin de Chéllif.

L'étude d'une telle thématique nous amène à écarter toutes les stations où l'effet anthropique sur le régime hydrométriques est bien évident. Ainsi celles qui se trouvent près des ouvrages hydrauliques, puisque la régulation implique toujours une modification de comportement des oueds. A ces deux critères, s'ajoute la disponibilité des données. Sous ces trois conditions les huit stations ont été sélectionnées.

Certains sont gérés depuis l'année 1941, alors que d'autres dates des années 70. Leurs localisations, codes, noms, l'année de mise en servies et la surface drainées par chaque station sont mentionnés dans le tableau.11.

Partie I : Présentation de la zone d'étude

Tableau I.7 : caractéristiques des stations hydrométriques

Grand bassin versant	Code	Station	Localisation (degré)		Oued	Mise en service	Surface (Km ²)
			Latitude	Longitude			
Tafna	16-04-02	Beni-Bahdel	34.71	-1.49	Tafna	1972	600
	16-06-01	Chouly RN7	34.86	-1.13	Chouly	1941	170
Macta	11-01-01	El-Haciabia	34.69	-0.75	Mekerra	1962	955
	11-03-01	Sidi Bel Abbes	35.32	-0.61	Mekerra	1962	3000
Chéllif	1-26-01	Ammi-Moussa	35.86	1.12	Rhiou	1958	1890
	1-33-02	Ain-Ammara	35.38	0.68	El Abd	1957	2480
	1-34-01	Sidi AEK Djillali	35.47	0.59	Haddad	1969	470
	1-23-11	Old Ben AEK	36	1.29	Sly	1965	1225

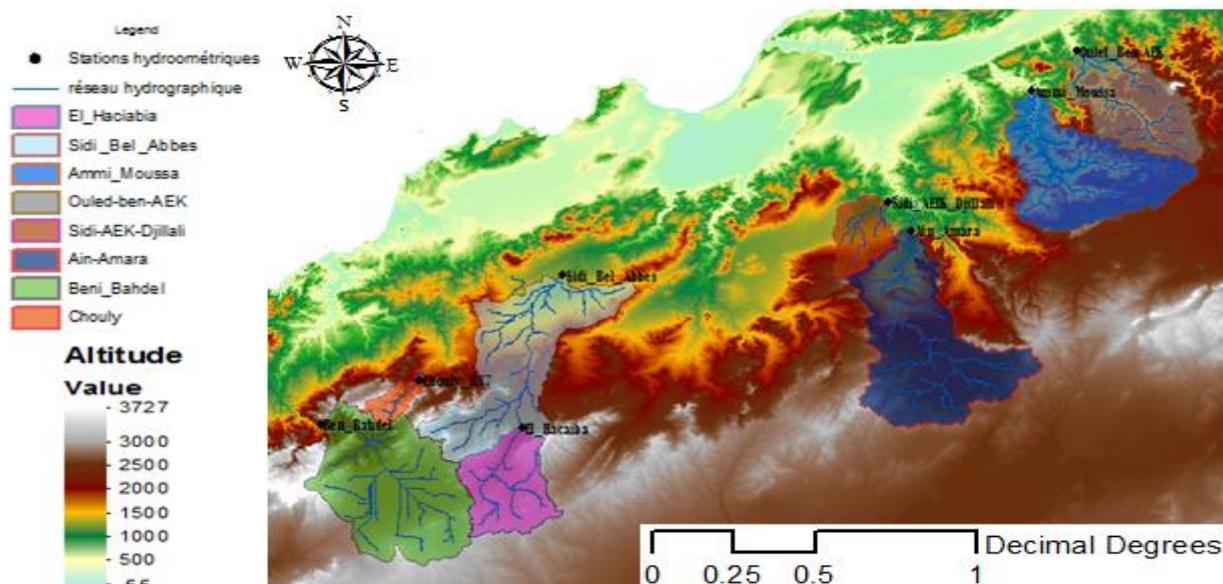


Figure I.20 : Localisation des différents sous bassins drainés par les différentes stations hydrométriques

I.10.1 Critiques des données hydrométriques

La comparaison entre l'évolution des débits dans les deux bassins Beni Bahdel et Chouly contenus dans le grand bassin de la Tafna, montre une parfaite concordance entre les deux régimes soit dans l'irrégularité interannuelle ou dans la distribution de maximums et les minimums. Du fait de la grandeur de la superficie du bassin de Beni Bahdel par rapport à celle de Chouly, l'ampleur des évènements sur le premier est légèrement plus importante que sur le deuxième. De même, pour les bassins de Haciabia et celui de Sidi-Bel-Abbès appartenus au bassin de la Macta, les débits partagent le même sens d'évolution. Pour le bassin de Chéllif l'évolution dans les deux bassins Ouled Ben A.E.K et Ammi Moussa situés l'un à côté de l'autre au milieu de ce grand bassin est semblable. Par contre, les bassins de Sidi AEK Djillali et Ain Hammara situés à l'extrémité ouest de Chéllif sont mal corrélés dans la dernière décennie. Les années 2008 et 2009 marquent des pics importants sur le bassin d'Ain Hamarra, et en moindre envergure sur le bassin de Sidi AEK Djillali. L'évolution des débits dans les autres bassins montre que ces deux années sont les plus pluvieuses durant la dernière décennie sur l'ensemble des bassins d'étude, dont les débits sont passés par exemple de $0.75 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2007 à $6.96 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2008 et $3.94 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2009 à Ammi Moussa. Étant donné que l'augmentation des débits durant cette période a été constatée sur tous les bassins, cela écarte l'hypothèse d'une rupture artificielle. Il reste à voir leur concordance avec l'évolution des pluies pour mieux déceler l'origine d'une telle réponse sur le bassin d'Ain Hammara. Les graphes illustrant cette comparaison sont donnés dans l'annexe I.

I.11 Analyse de ruptures et de tendances sur les séries hydrométéorologiques

Diverses études mettent en évidence des évolutions des températures, de la pluviométrie ou des débits dans les cours d'eau sur la période récente. L'ampleur et la réalité de ces évolutions dépendent des régions et des conditions hydro climatiques.

Avant tout travail sur les évolutions futures de ces grandeurs, une étape préliminaire consiste en l'établissement d'un diagnostic sur les années passées, à partir des séries des données existantes, afin d'identifier si des tendances sont déjà détectables.

Pour ce faire, des tests statistiques permettent de détecter, sur de longues séries chronologiques d'au moins trente à quarante ans, des ruptures (Test de Pettitt, 1979) et la procédure de segmentation de séries hydrométéorologiques (Hubert et Carbonnel, 1987 ; Hubert et al., 1989 ; Hubert et Carbonnel, 1993) ou des tendances linéaires à la baisse ou à la hausse (Test de corrélation sur les rangs Kendell et Stuart, WMO, 1996 ; Olaniran, 1991) et d'évaluer si les évolutions sont statistiquement significatives.

La description des différents tests utilisés dans cette étude est donnée dans l'Annexe I.

I.11.1 Principes des tests

Le test de Pettitt permet de détecter des ruptures dans les séries chronologiques. L'hypothèse H_0 testée est la suivante : « il n'y a pas de rupture ». Le test repose sur les signes des différences entre les valeurs qui forment l'échantillon, une série temporelle résultante est élaborée. Au maximum observé sur la série correspond vraisemblablement la date de rupture. La valeur P de la statistique permet de savoir si cette rupture est statistiquement significative au seuil α .

La procédure de segmentation d'Hubert est adoptée à la recherche de multiples changements de moyenne dans la série. Son principe est de « découper » la série en m segments ($m > 1$) de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit significativement différente de la moyenne du(ou des) segment(s) voisin(s).

Le test de corrélation sur le rang détecte la présence d'une tendance linéaire à la baisse ou la hausse. L'utilisation de ce test implique la vérification de l'hypothèse H_0 suivante : « la série des données est stationnaire ». Par conséquent la confirmation de l'hypothèse H_0 correspond à la présence d'une tendance dans la série concernée.

D'un point de vue pratique, les tests ont été appliqués en s'appuyant le logiciel Khronostat, proposé gratuitement par l'IRD contenant des fonctionnalités permettant la mise en œuvre de ces tests (<http://www.hydrosciences.org/spip.php?article264&lang=en>).

I.11.2 Résultats et discussion :

Le test de la corrélation sur le rang confirme la présence des tendances dans toutes les séries, soit celles des pluies ou celles des débits au niveau de tous les bassins, puisque l'hypothèse sur la stationnarité est rejetée au seuil de confiance de 99% sur toutes les séries. Cela confirme les résultats de plusieurs études sur l'évolution de climats dans le Nord-Ouest de l'Algérie, et en particulier dans la zone d'étude. Dont elles montrent une baisse dans le régime pluviométrique dans les années 70 ou même au début des années 80 avec des incidences très frappantes sur les régimes des cours d'eau, où la régression atteint des fois des seuils record.

Les pages ci-dessous regroupent les résultats de test de Pettitt et de la méthode de segmentation d'Hubert ainsi l'évolution de la pluviométrie et de débit sur chaque bassin, avec un commentaire sur les résultats obtenus.

Partie I : Présentation de la zone d'étude

I.11.2.1 Bassin de Beni_Bahdel

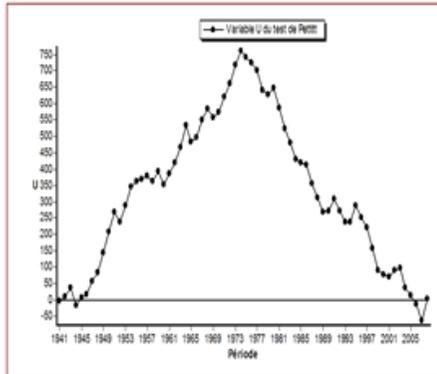


Figure 15 : Analyse des ruptures sur la série pluviométrique de Beni_Bahdel 1941-2009

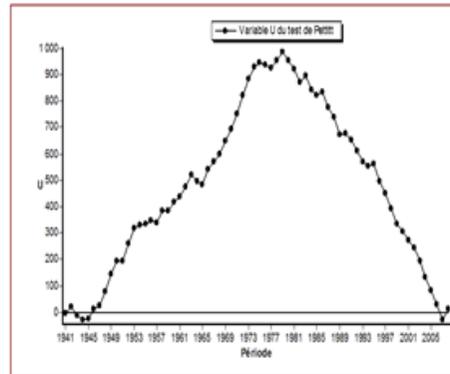


Figure 16 : analyse des ruptures sur la série hydrométrique de Beni_Bahdel 1941-2009

Tableau 11 : Segmentation de Hubert

Données	Périodes		Moyenne	Ecart-type
	Début	fin		
Pluies	1941	1974	46.226	10.68
	1975	2009	32.943	11.511
Débit	1941	1947	3.914	1.412
	1948	1953	8.383	2.965
	1954	1965	4.592	1.472
	1966	1974	8.344	3.046
	1975	2009	2.366	1.653

Signification du test de Scheffé 1%

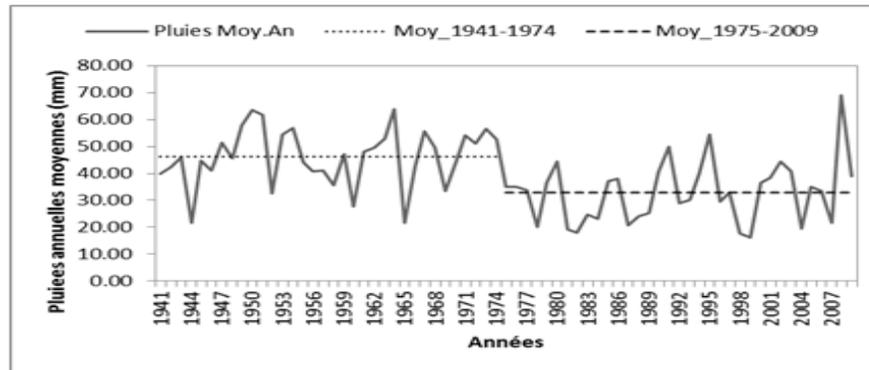


Figure 18 : évolution de la pluviométrie à Beni_Bahdel 1941-2009

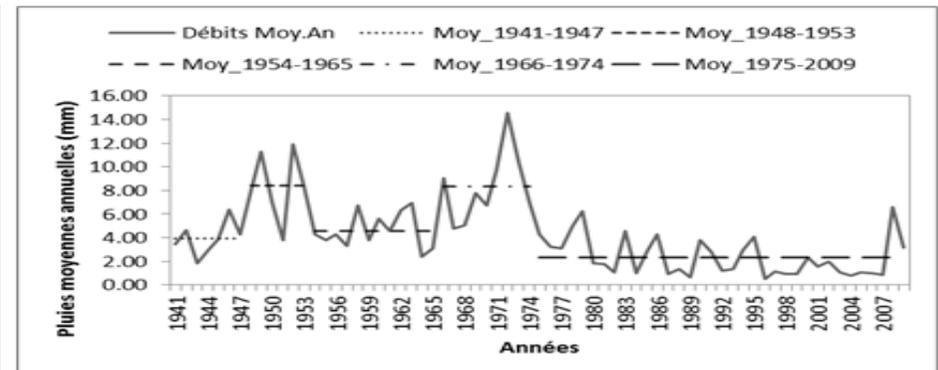


Figure 17 : évolution de Débit à Beni-Bahdel 1941-2009

Dans le bassin de Beni_Bahdel la rupture dans la stationnarité de la série pluviométrique a eu lieu dans l'année 1974. Les pluies moyennes annuelles avant et après cette date sont respectivement 46.226 mm et 32.943 mm. Le taux régression est de 29%. De même, la grande rupture dans la stationnarité de la série hydrométrique coïncide avec celle des pluies dont la moyenne annuelle a chuté de 8.344 à 2.366 m³/s (une réduction de 72%). Les figures 17 et 18 montrent une évolution semblable entre les deux grandeurs, mais la série des débits présente d'autres ruptures avant cette date, cela explique la grande sensibilité du régime hydrométrique aux variations pluviométriques sur ce bassin.

Partie I : Présentation de la zone d'étude

I.11.2.2 Bassin d'Ammi_Moussa

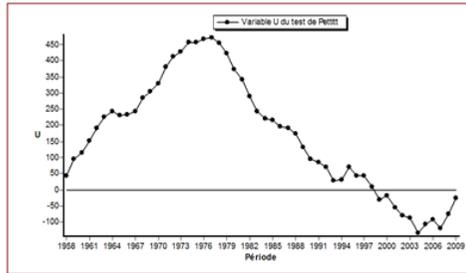


Figure 19 : analyse des ruptures sur la série pluviométrique d'Ammi_Moussa 1958-2010

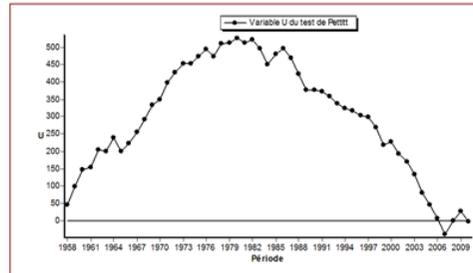


Figure 20 : analyse des ruptures sur la série hydrométrique d'Ammi_Moussa 1958-2012

Tableau 12 : Segmentation de Hubert

Données	Périodes		Moyenne	Ecart-type
	Début	fin		
Pluies	1958	1974	34.988	7.198
	1975	2007	21.621	6.286
	2008	2010	40.067	5.707
Débit	1958	1960	15	4.715
	1961	1961	2.7	0.00
	1962	1962	18	0.00
	1963	1970	4.575	2.868
	1971	1971	13	0.00
	1972	2012	2.217	1.371

Signification du test de Scheffé 1%

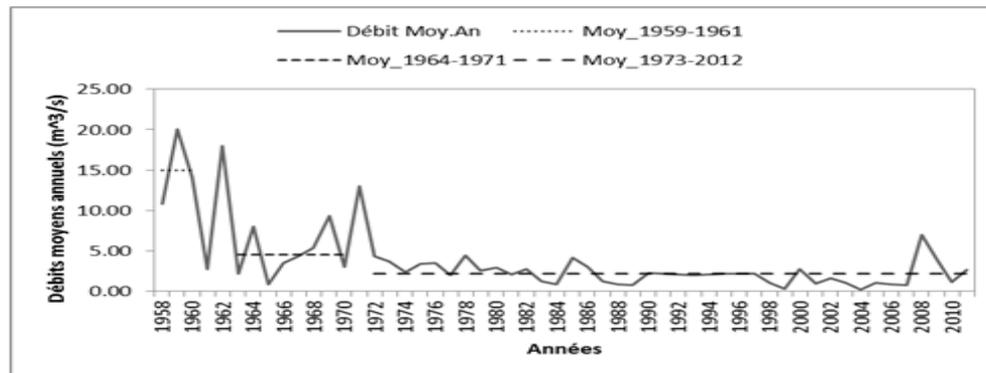


Figure 21 : évolution de Débit à Ammi_Moussa 1958-2012

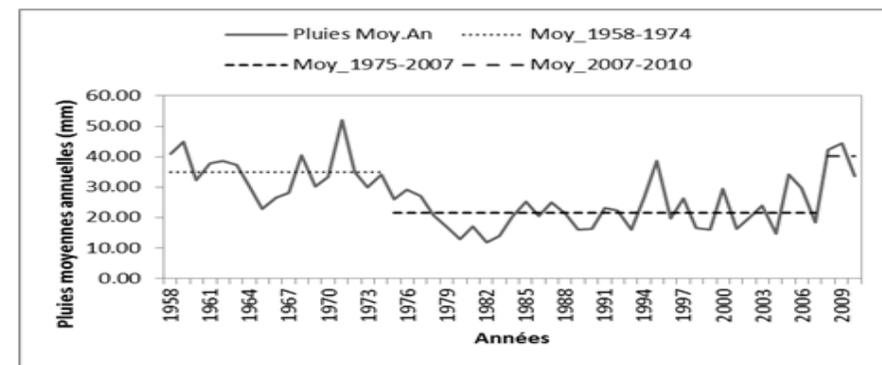


Figure 22 : évolution de la pluviométrie à Ammi_Moussa 1958-2010

La figure 19 montre une rupture dans la stationnarité de la série pluviométrique en 1977. En revanche, dans la série de l'évolution des débits la rupture est produite en 1980 (figure 20), un tel décalage est attendu vu la participation de la nappe dans l'alimentation des cours d'eau, qui dispose d'un réservoir plein après les années pluvieuses. Par contre elle sera affectée par la baisse juste après quelque année. Le taux de réduction est estimé à 32 % pour la pluviométrie, et 69 % sur le régime hydrométrique.

Le tableau 12 montre plusieurs ruptures dans la série hydrométrique avec des années dont la moyenne est vraiment importante, ces dernières correspondent aux années pluviométriques qui renferment des événements violents avec un ruissèlement marquant. Puisque les mêmes pics apparaissent sur l'évolution pluviométrique.

Partie I : Présentation de la zone d'étude

I.11.2.3 Sidi_Abelkader el Djillali

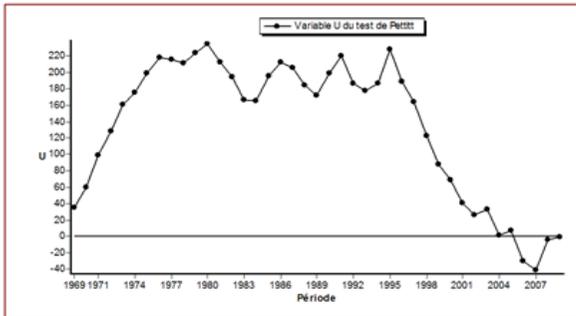


Figure 23 : Analyse de ruptures dans la stationnarité de la série pluviométrique de Sidi_Abelkader el Djillali 1969-2010

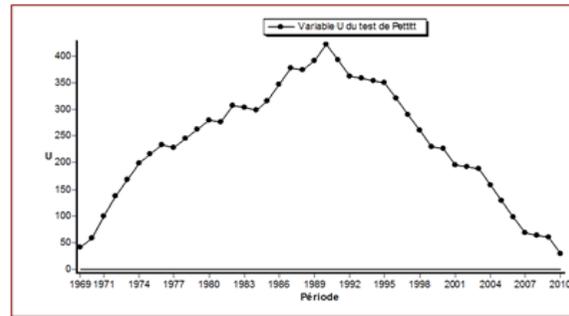


Figure 23 : Analyse de ruptures dans la stationnarité de la série hydrométrique de Sidi_Abelkader el Djillali 1969-2011

Tableau 13 : Segmentation de Hubert

Données	Périodes		Moyennes	Ecart-Types
	Début	Fin		
Pluies	1969	1976	41.225	4.792
	1977	2010	29.856	8.506
Débits	1969	1969	0.9	0.00
	1970	1970	0.24	0.00
	1971	1971	0.60	0.00
	1972	1990	2.22	0.09
	1991	2011	0.04	0.05

Signification de test de Scheffé 1%

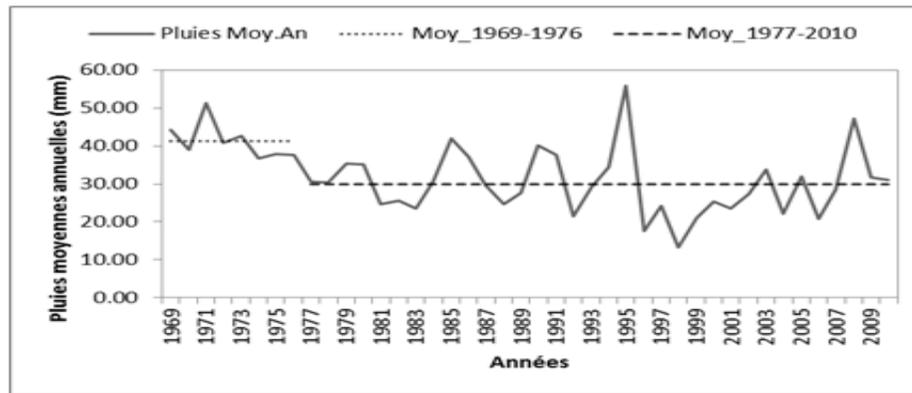


Figure 25 : évolution de la pluviométrie à Sidi_Abelkader el Djillali 1969-2010

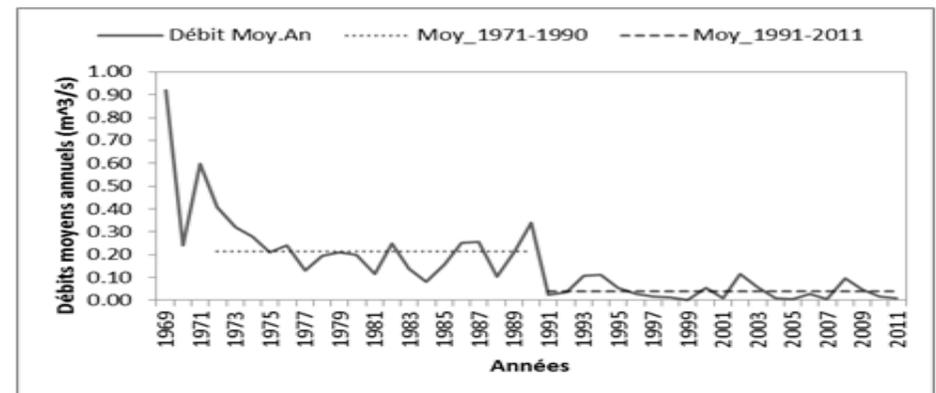


Figure 26 : évolution de débit à Sidi_Abelkader el Djillali 1969-2011

La figure 23 montre une rupture dans la stationnarité de la série pluviométrique à partir de l'année 1976, les pluies moyennes annuelles avant et après cette date sont respectivement 41.25 et 29.856 mm (le taux de régression est de 27.6 %). Par contre, la rupture dans la stationnarité de la série hydrométrique a été détectée en 1990, dont la moyenne annuelle passe de 2.22 à 0.04 avec une diminution de 98 %. On notera qu'à partir de l'année 1990 les débits ont considérablement diminués sur ce bassin. L'écart entre les périodes de rupture entre ces deux séries s'explique par le fait que la rupture dans la série pluviométrique s'est produite progressivement avec l'inclusion des années pluvieuses jusqu'à 1995 où elle devient brusque et permanente.

Par comparaison entre les figures 25 et 26, on constate qu'à partir de l'année 1990, l'effet des pics enregistrés dans la série pluviométrique sont moins marquant que la période précédente sur le régime de cours d'eau, peut être cela du à l'état sec dans lequel se trouve le bassin avant ces événements, ajoutant l'ampleur de l'évaporation dans cette zone.

Partie I : Présentation de la zone d'étude

I.11.2.4 Ouled Ben A.E.K

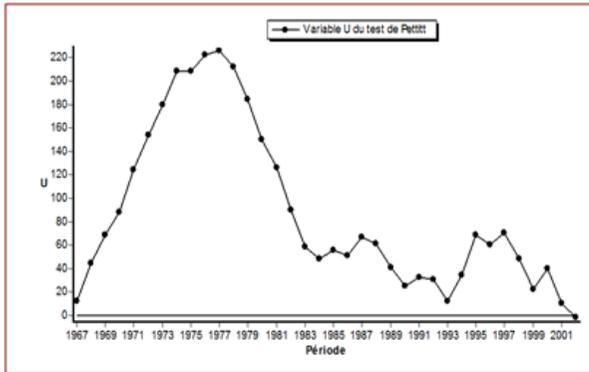


Figure 27 : Analyse de ruptures dans la stationnarité de la série pluviométrique Ouled Ben A.E.K 1967-2003

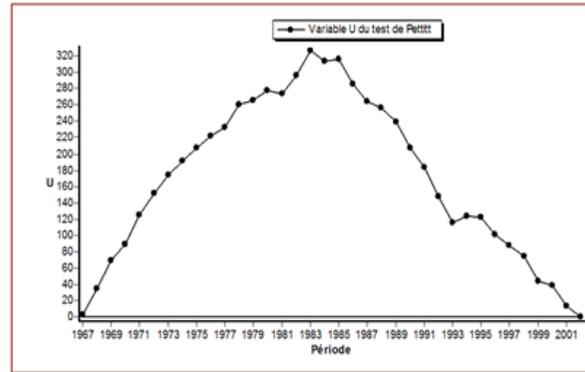


Figure 28 : Analyse de ruptures dans la stationnarité de la série hydrométrique d'Ouled ben A.E.K 1967-2003

Tableau 14 : Segmentation de Hubert

Données	Périodes		Moyennes	Ecart-Types
	Début	Fin		
Pluies	1967	1974	34.937	7.814
	1975	2003	22.117	6.576
Débits	1967	1967	2.1	0.00
	1968	1970	7.267	1.95
	1971	1971	12.6	0.00
	1972	1983	4.475	1.322
	1984	2003	1.405	0.571

Signification de test de Scheffé 1%

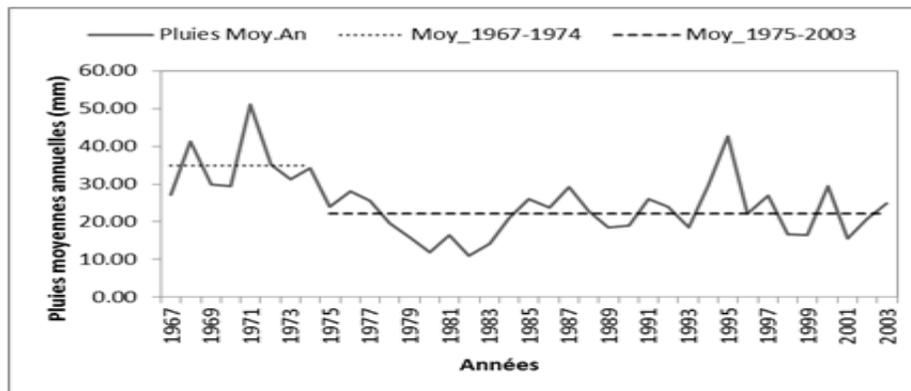


Figure 29 : évolution de la pluviométrie à Ouled ben A.E.K 1967-2003

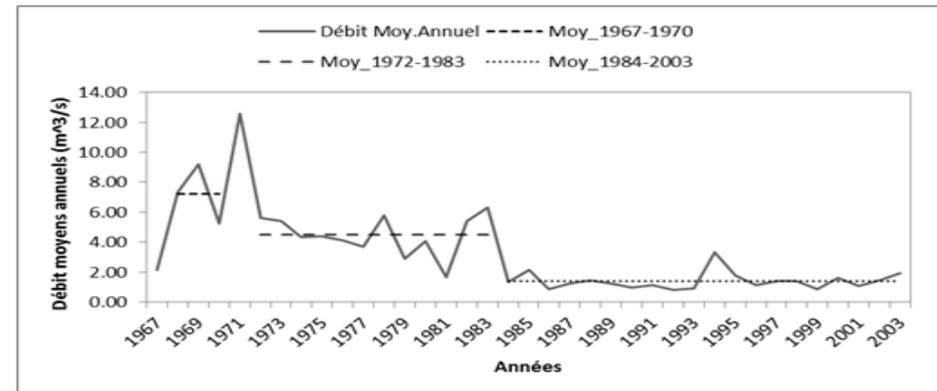


Figure 30 : évolution de débits à Ouled Ben A.E.K 1967-2003

La rupture dans la stationnarité de la série pluviométrique est produite en 1974, à partir de cette date les pluies ont diminuées de 12.82 mm. Une régression de 36 % par rapport à la période précédente. En revanche, la rupture dans la série des débits est venue après quelques années de celle des pluies, exactement en 1983, avec un taux de réduction de 68 %.

D'après les figures 29 et 30 on remarque que les variations dans les deux régimes ne se produisent pas simultanément, puisque la réponse des cours d'eau aux fluctuations marquantes dans l'évolution de la pluviométrie est toujours retardée, ce la peut être du à l'importance de réservoir souterraine et la présence d'une grande surface perméable. Par contre, à part ce décalage dans le temps, l'évolution des deux régimes reste presque semblable.

Partie I : Présentation de la zone d'étude

I.11.2.5 Sidi-Bel-abbes

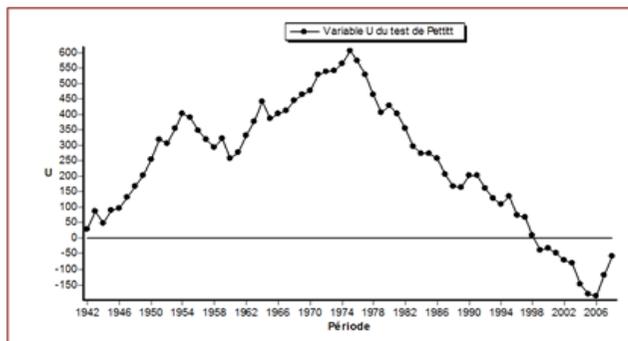


Figure 31 : Analyse de ruptures dans la stationnarité de la série pluviométrique de Sidi_Bel-abbes 1942-2009

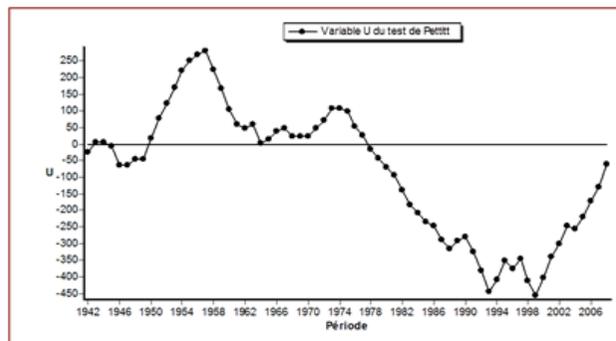


Figure 32 : Analyse de ruptures dans la stationnarité de la série hydrométrique de Sidi_Bel-abbes 1942-2009

Tableau 14 : Segmentation de Hubert

Données	Périodes		Moyennes	Ecart-Types
	Début	Fin		
Pluies	1942	1975	35.832	8.318
	1976	2006	25.661	7.151
	2007	2009	50.6	2.042
Débits	1942	1949	0.888	0.242
	1950	1954	2.16	0.527
	1955	1999	0.844	0.369
	2000	2007	1.787	0.692
	2008	2009	3.9	1.414

Signification de test de Scheffé 1%

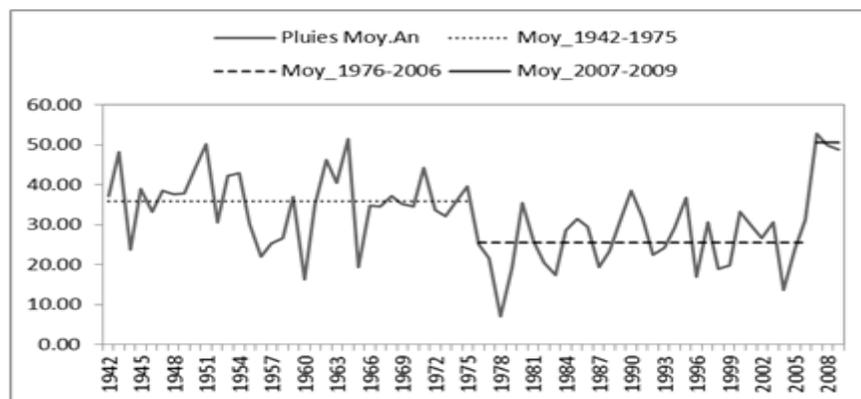


Figure 33 : évolution de la pluviométrie à Sidi_Bel-abbes 1942-2009

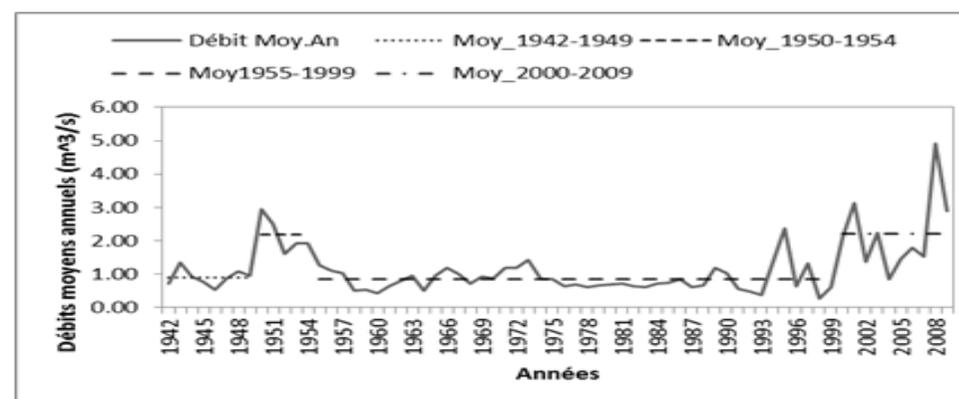


Figure 34 : évolution de débits à Sidi-Bel-abbes 1942-2009

La rupture dans la stationnarité de la série pluviométrique apparut en 1975, les pluies moyennes annuelles ont baissées de de 28% à partir de cette date, mais après plus de trois décennies les pluies ont repris la hausse en 2007 jusqu'à 2009 par manque des données on ne peut pas retrancher plus sur cette hausse. Outre, la série des débits manifeste des ruptures dans le même sens que celle des pluies, dont après une alternance entre les épisodes excédentaires et déficitaires, l'année 1955 marque une rupture significative avec une diminution de 60 % par rapport à la période avant. Après plusieurs années de diminution et de faibles débits, ces derniers ont augmenté, par effet, de l'augmentation de la pluie.

Dans les figures 33 et 34 on constate qu'après les plus bas niveaux de la pluie entre 1955 et 1958 les débits des cours d'eau sont affecté d'une manière irréversible, malgré les légères augmentations de la pluviométrie dans quelques années après, cela peut être dû aux grandes quantités d'eau sollicitées par les agricultures en amont de la station hydrométrique et à la perte par évaporation.

Partie I : Présentation de la zone d'étude

I.11.2.6 Le bassin de Haciabia

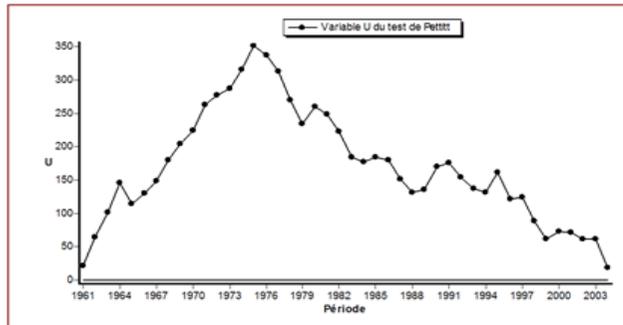


Figure 35 : Analyse de ruptures dans la stationnarité de la série pluviométrique de Haciabia 1961-2005

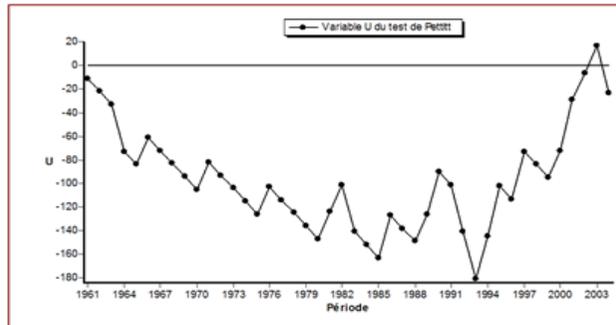


Figure 36 : Analyse de ruptures dans la stationnarité de la série hydrométrique de Haciabia 1961-2005

Tableau 16 : Segmentation de Hubert

Données	Périodes		Moyennes	Ecart-Types
	Début	Fin		
Pluies	1961	1975	38.567	7.394
	1976	2005	26.510	7.394
Débits	961	1993	0.118	0.073
	1994	2005	0.223	0.161

Signification de test de Scheffé 1%

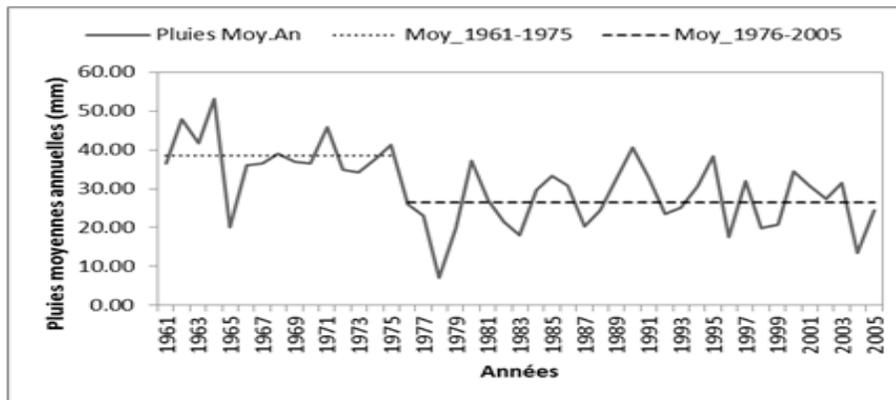


Figure 37 : évolution de la pluviométrie à Haciabia 1961-2005

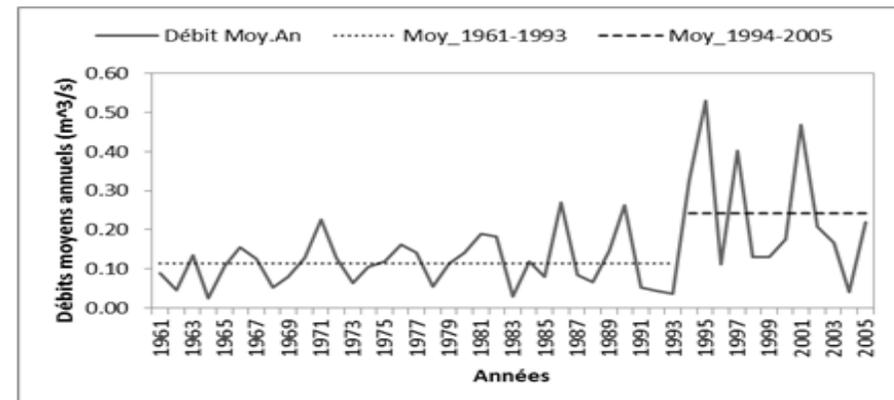


Figure 38 : évolution de débits à Haciabia 1961-2005

La rupture dans la stationnarité de la série pluviométrique apparut en 1975, avec une diminution de 31 % par rapport à la période qui précède la date de la rupture. Par contre, l'évolution des débits sur ce bassin sur la même période est totalement incompatible avec celle des pluies, dont on constate dans la figure 38 une hausse des débits à partir de l'année 1994. Tandis que, les pluies enregistrent leurs niveaux les plus bas à partir de la même année. De même que, la rupture détectée dans la série de pluie en 1974 est passée sans incidence sur le régime du cours d'eau ni dans la même année ni dans les années à venir. Cela nous ramène à s'interroger sur la qualité de ces données. Surtout, lorsqu'on voit que même leur évolution dans le temps est totalement singulière par rapport aux autres bassins même les plus proches. Où la présence d'autres apports que celui des pluies (peut être des apports provenant des bassins adjacents). Dans un tel contexte, et en l'absence de métadonnées on ne peut pas vraiment dire la vraie cause de ce comportement.

Partie I : Présentation de la zone d'étude

I.11.2.7 Le bassin de Chouly RN.7

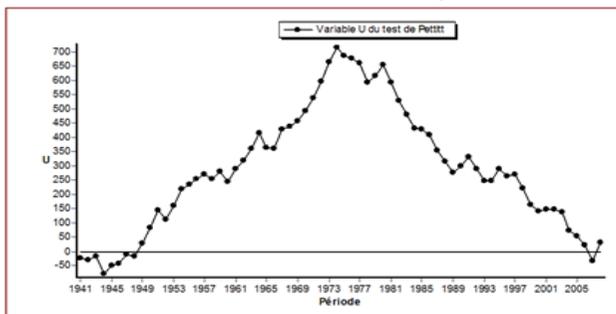


Figure 39: Analyse de ruptures dans la stationnarité de la série pluviométrique de Chouly RN7 1941-2009

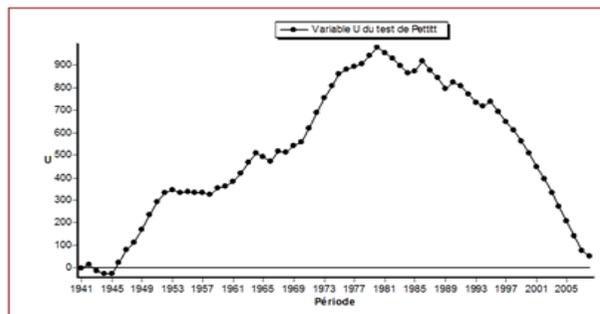


Figure 40 : Analyse de ruptures dans la stationnarité de la série hydrométrique de Chouly 1941-2009

Tableau 17 : Segmentation de Hubert

Données	Périodes		Moyennes	Ecart-Types
	Début	Fin		
Pluies	1941	1974	44.800	10.56
	1975	2009	32.963	10.064
Débits	1941	1945	3.8	1.334
	1946	1951	10.067	2.388
	1952	1970	5.384	1.751
	1971	1973	13.567	0.586
	1974	1980	6.971	1.617
	1981	2009	1.941	2.020

Signification de test de Scheffé 1%

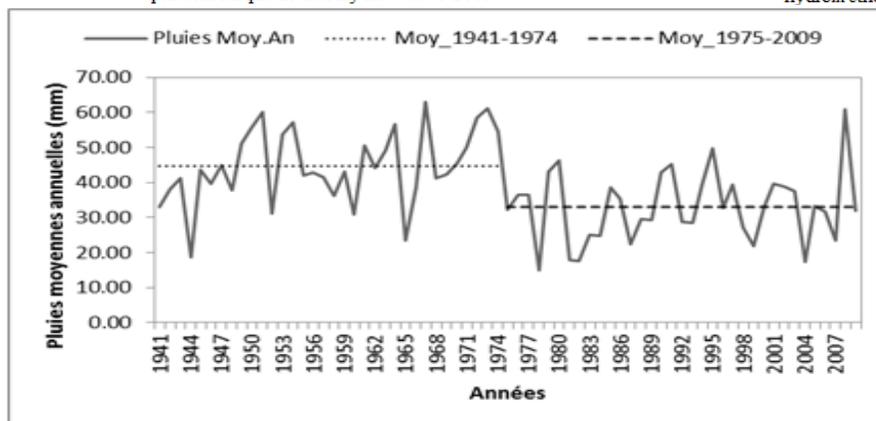


Figure 41 : évolution de la pluviométrie à Chouly RN7 1941-2009

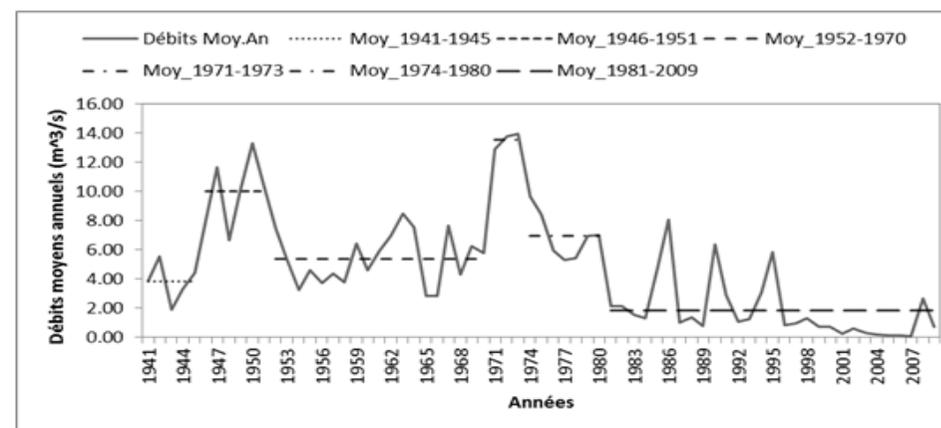


Figure 42: évolution de débits à Chouly RN7 1941-2009

Sur le bassin de Chouly RN.7, la rupture dans la stationnarité de la série pluviométrique est survenue en 1974. Le tableau 17 donne la moyenne annuelle des pluies avant et après cette date, le taux de réduction est estimé à 26 %. L'évolution des débits montre une irrégularité dans la distribution et une alternance des périodes déficitaires et excédentaires, mais l'année 1980 marque une rupture brusque dans la série des débits avec une diminution de 72 % par rapport à la période précédente.

D'après les figures 41 et 42 on constate que les années moyennement pluvieuses affectent peu le régime de cours d'eau. Par contre, les années d'une grande pluviosité qui renferment des événements violents affectent directement les débits de ce bassin, par les grandes quantités de ruissellement qui se génèrent sur les versants.

Partie I : Présentation de la zone d'étude

I.11.2.8 Le bassin d'Ain_Hamara

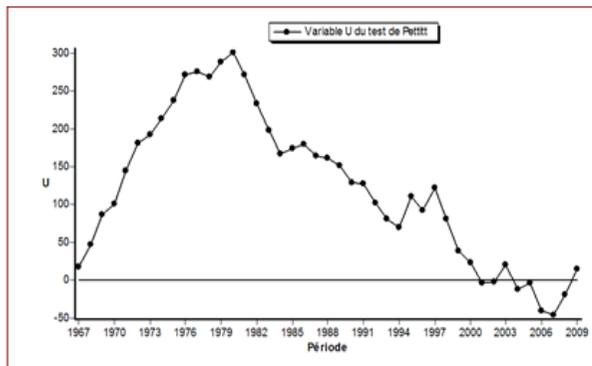


Figure 43 : Analyse de ruptures dans la stationnarité de la série pluviométrique d'Ain_Amara 1967-2010

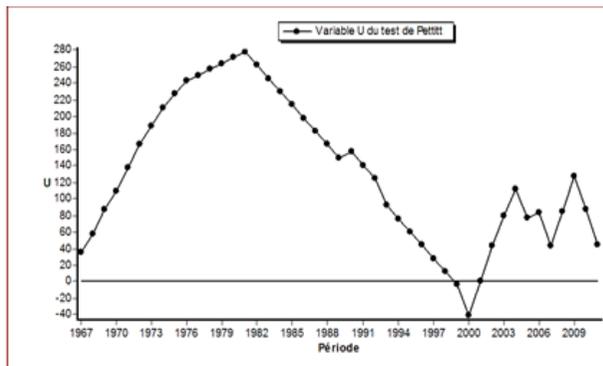


Figure 44 : Analyse de ruptures dans la stationnarité de la série hydrométrique d'Ain_Amara 1967-2012

Tableau 18 : Segmentation de Hubert

Données	Périodes		Moyennes	Ecart-Types
	Début	Fin		
Pluies	1967	1976	33.820	6.018
	1977	2010	23.774	5.942
Débits	1967	2007	1.241	0.302
	2008	2009	2.00	0.00
	2010	2012	0.333	0.231

Signification de test de Scheffé 1%

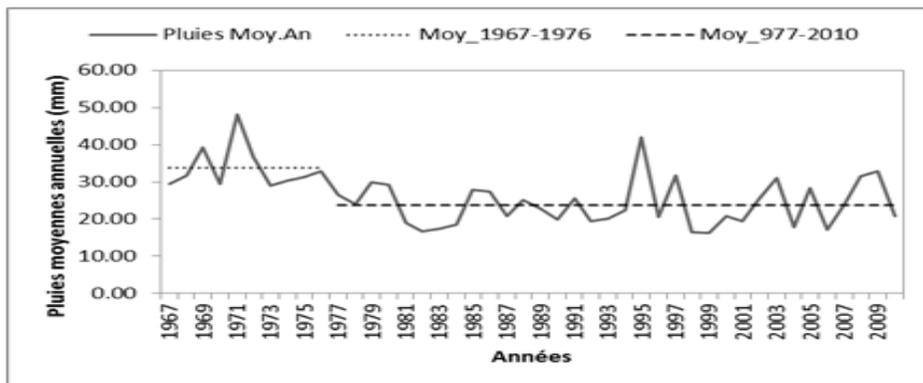


Figure 45 : évolution de la pluviométrie à Ain_Amara 1967-2010

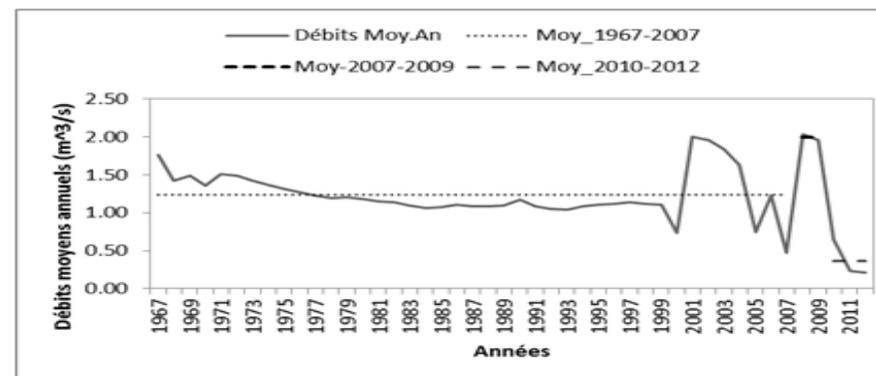


Figure 46 : évolution de débits à Ain_Amara 1967-2012

La figure 45 montre une rupture dans la stationnarité dans la série pluviométrique datée de 1974, avec un taux de réduction de 29%. La série des débits présente à partir de la même date une tendance à la baisse qui moins significative que celle des pluies. La dernière décennie témoigne d'une hausse marquante dans la série des débits. Certes, cette hausse est apparue dans la série des pluies, mais n'est pas d'une grande intensité pour impliquer une telle incidence dans le régime du cours d'eau.

Sachant que les pluies couvrant le bassin sont obtenues par une spatialisation des pluies reçues par les stations avoisinantes, cela sans d'autre, peut affecter leurs qualités surtout dans une telle zone, où le contraste de climat est très manifestée. Alors, une légère sous-estimation ou sur estimation est très attendue. D'autre part, les valeurs des débits mensuels montrent que les maximums sont enregistrés en septembre et octobre. Les événements survenus dans cette période sont généralement violents, et la majorité de la pluie tombée se transforme en ruissèlement vu l'état sec de sol dans le bassin.

À travers les différents graphes (18, 21, 25, 29, 33, 37, 41, 45) montrant l'évolution temporelle de la pluviométrie sur les différents bassins d'étude. On constate que, la pluviométrie a commencé sa tendance à la baisse à partir de l'année en 1974 dans le bassin de la Tafna, ensuite est la touchée le bassin de Macta en 1975. Par contre, une même tendance a été introduite dans le bassin de chéllif à partir de l'année 1976. Le déficit pluviométrique par rapport à la séquence humide varie entre 26% à 36% dans les bassins concernés. Outre, l'évolution des précipitations moyennes annuelles dans l'air d'étude ne présente pas la même ampleur et caractérisée par une irrégularité spatiale et temporelle marquante d'un bassin à l'autre. Donc, les valeurs maximales et minimales ne se placent pas aux mêmes dattes dans tous les bassins.

L'étude de la rupture dans la stationnarité des séries pluviométriques et hydrométriques, ainsi l'évolution de ces deux grandeurs dans le temps, montre que les ressources en eau dans la zone d'étude dépendant entièrement de la pluviométrie. Cette dépendance explique bien la réduction dramatique dans les écoulements de surface, qui a suivi la régression des pluies à partir des années 70.

Après les années des ruptures dans les séries hydrométriques, les écoulements ont subi des diminutions relatives de 72 % à la Tafna et de 60 % à la Macta et entre 68 % à 69 % sur le chéllif. Cependant, seul le bassin de Haciaibia qui fait l'exception avec une baisse avant l'année 1961 et une tendance à la hausse à partir de l'année 1994, un comportement totalement en discord avec celui des pluies soit en ampleur ou en sens d'évolution.

Du fait des variations interannuelles très importantes, la rupture de la stationnarité des chroniques des débits est cependant moins nette que celles des précipitations. Ce constat est bien évident dans les résultats de la méthode d'Hubert, avec plusieurs segments dont la moyenne alterne entre chaque deux segment qui succèdent. Du fait, du caractère aride à semi-aride du climat, avec des précipitations faibles et une évaporation élevée, les variations interannuelles des écoulements est forte liées aux épisodes pluviométriques les plus violents qui renferment les évènements extrêmes, susceptibles de générer de ruissellement sur les versants. Et leurs impacts sur les cours d'eau deviennent plus intenses lorsqu'ils se déclenchent au début de la saison pluvieuse. Vu l'état sec des sols qui favorise le ruissellement au détriment de l'infiltration.

Introduction

Toute étude sur l'estimation, la valorisation et la gestion de la ressource en eau nécessite l'utilisation d'un modèle hydrologique, mais avant d'attendre la phase de l'exploitation dans laquelle on se sert de cet outil pour reproduire la réalité hydrologique et faire des prévisions pour le futur proche ou lointain, il faut initier le modèle à nos données pour vérifier s'il reproduit les débit observés à travers la démarche du calage et validation dont on fait appel à l'une des fonctions critères pour évaluer la performance.

Le présent chapitre se consacre au choix d'un modèle hydrologique ainsi le pas de temps et d'espace de modélisation, ensuite on procède à la vérification de la capacité du modèle choisi à simuler la réponse réelle des différents bassins retenus dans cette étude aux différentes sollicitations météorologiques. Afin de l'exploiter dans la prévision des débits futurs en se basant sur les sorties des modèles climatiques régionales dans le cas où on a des résultats satisfaisants en calage et en validation.

II.1 Définition de la modélisation

La modélisation hydrologique consiste à développer une représentation mathématique d'un hydro système donné (effectué souvent à l'échelle de bassin versant) et des phénomènes hydrologiques qui s'y produisent de façon à pouvoir simuler tout ou partie de son comportement hydrologique (Benoit et al, 2009).

N.B : Pour le reste de ce document, on s'est inspiré du livre de Benoît Hingray et al. ; 2009

II.2 Définition d'un modèle hydrologique

C'est un outil numérique qui sert à représenter d'une manière simple le fonctionnement d'un bassin versant.

II.3 Structure et variables types d'un modèle hydrologique

La structure d'un modèle correspond à la représentation simplifiée de l'hydrosystème.

Elle concerne :

- ✓ la schématisation du milieu, dans laquelle on décrit sa géométrie, leur relief, structure du réseau hydrographique, la géométrie des réservoirs superficiels, ainsi la description des ces propriétés physiques (géologie, type du sol, l'occupation des terres) ;
- ✓ la mise en équation des processus vise la représentation du phénomène hydrologique d'intérêt pour l'hydrosystème considéré (ruissellement, perte par évaporation, infiltration, etc.) ;
- ✓ La précision de la nature de l'interaction entre les différents éléments de la discrétisation spatiale retenue .

Les différents variables types d'un modèle sont précisés ci-dessous :

- ✓ Variables d'entrées décrivent les sollicitations hydro climatiques (Précipitations, etc.) ;
- ✓ Variables de sorties sont les variables que la modèle peut produire par simulation ;
- ✓ Vecteur d'erreur de modélisation représente l'écart entre les sorties simulées et les valeurs observées ;
- ✓ Variables d'état sont les paramètres variables dans le temps, qui se trouvent dans les équations qui décrivent les processus hydrologiques (état d'humidité d'un sol, niveau d'un réservoir conceptuel, etc.) ;
- ✓ Vecteur de paramètres du modèle sont les grandeurs constantes apparaissent dans les équations du modèle, soit ils sont reliées à des caractéristiques physiques du milieu (capacité en eau des sols, conductivité hydraulique...) ou des grandeurs abstraites (capacité de stockage d'un réservoir conceptuel) ;
- ✓ Conditions aux limites du modèle définissent les interactions entre les frontières de l'hydrosystème considéré et son voisinage ;
- ✓ Conditions initiales sont les valeurs initiales affectées aux variables d'état.

II.4 Enjeux de la modélisation

La modélisation hydrologique est utilisée dans plusieurs fins (autre le domaine de la recherche, on la trouve impliquer dans la restitution des données, le dimensionnement des ouvrages, etc.). Dans la présente étude, l'intérêt de la modélisation pluie-débit consiste à la détermination des scénarios hydrologiques possibles ou probables, pour le contexte hydrométrique considéré, on se basant sur les scénarios météorologiques appropriés. Dans le but, d'estimer l'impact de changement climatique prévu sur la ressource en eau superficielle.

II.5 Classification des modèles

Selon la nature des équations retenues dans la schématisation du milieu et dans la description des phénomènes hydrologiques considérés. On distingue les modèles suivants :

- ✓ Modèle empirique : les lois utilisées sont issues de faits expérimentaux ;
- ✓ Modèle conceptuels : présentent les principaux processus hydrologiques de façon raisonnable sans recourir à la paramétrisation des lois physiques qui les gouvernent ;
- ✓ Modèle à base physique : utilise les lois issues de la physique pour décrire les différents processus hydrologiques.

La manière de représenter le milieu, en particulier, par la nature de l'unité spatiale à laquelle est attachée la résolution de l'équation utilisée pour décrire le processus. Nous permet de distinguer quatre classes de modèles :

- ✓ **Modèle globale** : décrit le bassin versant comme une seule unité hydrologique. La variabilité spatiale des processus hydrologiques considérés pour décrire son comportement n'est pas prise en considération ;
- ✓ **Modèle spatialisé** : cherche à donner une meilleure représentation de l'hétérogénéité de milieu par une discrétisation aux éléments fins en fonction de sa géomorphologie ;
- ✓ **Modèle semi-spatialisé** : Cette approche cherche à discrétiser le milieu en unités relativement homogènes, c'est-à-dire des zones sur lesquelles les processus hydrologiques sont comparable dans leur nature et leur importance relative ;
- ✓ **Modèle distribué** : le comportement hydrologique est représenté par un ensemble d'unités hydrographiques distinctes, dont la réponse du bassin sera donnée par une somme pondérée des réponses hydrologiques simulées par ces différentes unités.

II.6 Choix du modèle

Après que le choix de l'échelle spatiale et temporelle de la modélisation est fait. La question se tourne vers quel modèle à adopter pour aboutir à des meilleurs résultats, et une meilleure adéquation. A priori, on a recouru à la bibliographie présentant une large gamme des modèles, se répertoriant soit dans la même classe, ou appartient à des classes distinctes. Cette sélection est régit par des critères en lien avec l'objectif de l'étude et basée sur la disponibilité des données, la nature de modèle, ainsi la simplicité et la robustesse de modèle.

Pour des raisons de commodité, on a opté pour les modèles conceptuels, vu leurs structures simplifiés et une grande facilité dans l'estimation des paramètres. Contrairement, à des modèles à base physique où l'accès et la disponibilité des mesures des paramètres influent la réponse hydrologique n'est pas facile à obtenir.

Une large liste des modèles conceptuels à pas de temps mensuel se trouve dans la littérature, la différence entre les modèles réside dans la nature des formulations mathématiques qui régissent le fonctionnement des différents réservoirs et le nombre de paramètres mises en jeu. Au bout de notre recherche, on a retenu le modèle GR2M, qui se caractérise par moins de paramètres possibles (2 paramètres) et qui est simple et robuste, dont il a montré une bonne adéquation dans différentes zones du monde nord-africain (Kabouya et Michel 1991) (Bouanani et al. 2013), sur quelques bassins de l'Afrique de l'ouest (Dezetter et al. 2008) (Paturel et al. 2003) et sur quelques bassins de l'Europe et de l'Amérique latine (Mouelhi 2006).

II.7 Concept et architecture de GR2M

II.8.1 Description

La famille des modèles GR est construite afin d'être simple et efficace. Du fait de leur architecture ne sera pas compliqué que pour reproduire les débits réels et non pour satisfaire des conceptions a priori sur le cycle hydrologique (Michel, 1993).

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) est un modèle pluie-débit global à deux paramètres (α et β). Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1980, avec des objectifs d'application dans le domaine des ressources en eau et des étiages (Perrin et al. 2007).

Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement par (Kabouya, 1990), (Kabouya et Michel, 1991), (Makhlouf, 1994), (Makhlouf et Michel, 1994), (Mouelhi, 2003) et (Mouelhi, 2006b), qui ont permis d'améliorer progressivement les performances du modèle, ont l'adopté dans des contextes différents. La version présentée ici est celle de (Makhlouf, 1994) qui paraît la plus performante pour le territoire Algérien.

Le modèle GR2M produit des débits simulés à l'exutoire d'un bassin versant à partir des données initiales d'où les entrées sont la pluie et l'ETP.

II.8.2 Le réservoir sol

Ce réservoir se caractérise par sa capacité maximale A , et un niveau de remplissage variable S qui définira la fraction de pluie qui accèdera au réservoir d'eau gravitaire ainsi l'ETR qui pourra être fourni.

La valeur A dans le présent travail est prise égale à la valeur S_{\max} issue de la carte "Soil Map of the World" fournie par la FAO (FAO/UNESCO, 1974-1981). Contrairement aux valeurs de S_{\min} et S_{moy} , les S_{\max} conduisent aux valeurs des critères les plus élevés pour la majorité des cas quelque soit le modèle considéré (Ardoin, 2003).

II.8.3 La fonction de production et la fonction de transfert

La fonction de production met en évidence la répartition de l'eau précipitée entre les différents termes de bilan hydrique, elle permet essentiellement de déterminer l'ETR, le ruissellement superficiel et la partie de l'eau qui transite par la fonction de transfert. Tandis que, la fonction de transfert comme son nom l'indique assure la transformation d'une partie de la pluie nette en un hydrogramme de ruissellement direct à l'exutoire du bassin.

Architecture de modèle GR2M

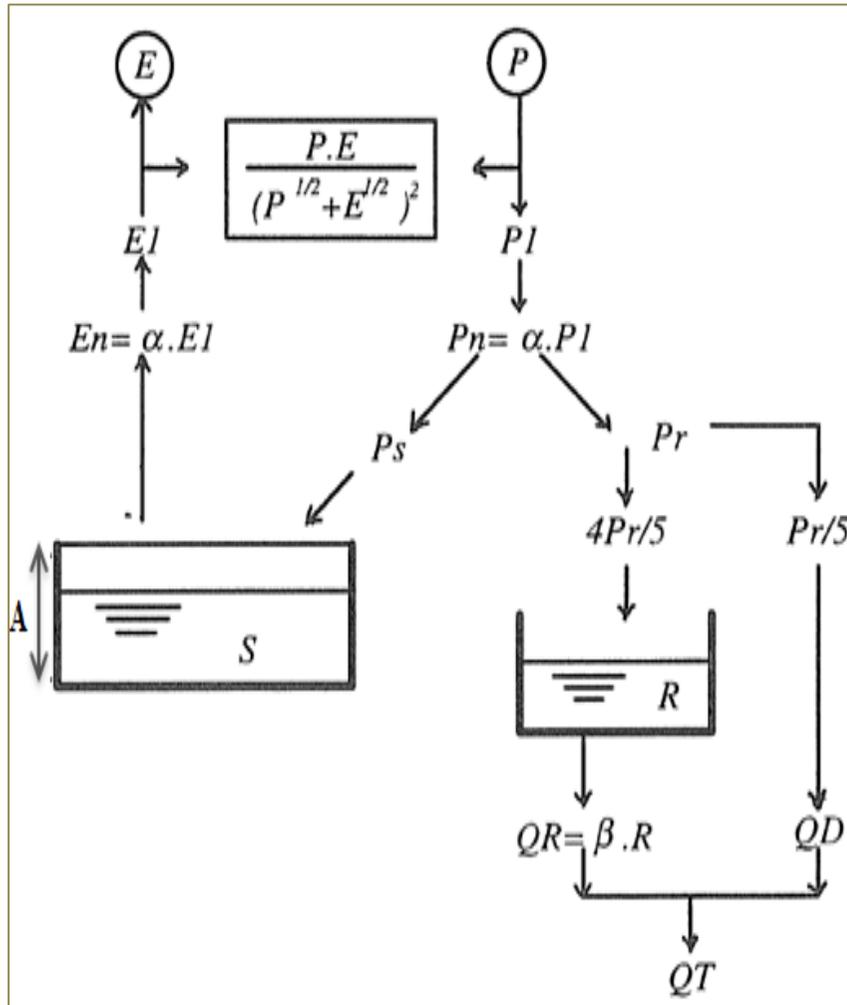


Figure II.1 : Architecture du modèle GR2M (Mouelhi, 2006)

$$E_1 = E - U$$

$$P_1 = P - U$$

$$P_s = S_1 - S$$

S : niveau initial du réservoir sol.

$$S_1 = (S + A \cdot \tanh(P_n/A)) / (1 + (S \cdot \tanh(P_n/A))/A)$$

$$P_r = P_n - P_s$$

$$E_n = S_1 - S_2$$

$$S_2 = (S_1 \cdot (1 - \tanh(E_n/A)) / (1 + (\tanh(E_n/A) \cdot (1 - (S_1/A))))$$

$$R_1 = R + (4/5) \cdot P_r$$

R : niveau initial du réservoir de routage

$$R_2 = R_1 - Q_R$$

$$Q_T = Q_R + Q_D$$

E et **P** sont les paramètres d'entrées.
Q c'est le paramètre de sortie.
alpha et **beta** : sont les deux paramètres de modèle.
S1 et **S2**, **R1** et **R2** : sont les paramètres d'états.
R et **S** : sont les conditions initiales.
Les conditions aux limites sont définies comme un flux nul.

Figure II.2 : les équations et les paramètres du modèle GR2M

II.8 Choix de la variable cible

Généralement, le souci du modélisateur hydrologique est de mettre au point un outil le plus simple possible, à efficacité donnée, permettant d'estimer des débits qui soient les plus proches possible des débits observés. Cet outil pourra être utilisé sur des bassins très différents tels que des bassins arides ou au contraire des bassins très arrosés. D'où l'intérêt de prendre en compte d'une façon équilibrée les différentes gammes de débits écoulés sans favoriser la qualité de reproduction des faibles valeurs ou bien celle des fortes valeurs. Cependant les résidus d'un modèle ne sont généralement pas homoscedastique, c.-à-d. que leur variance est dépendante de la valeur de débit. Nous assistons à des valeurs de variance élevées pour des débits élevés. Alors notre choix sur la variable cible porte sur la transformation puissance des débits qui permet de réduire le caractère homoscedasticité sans biaiser les calculs. Contrairement, si la variable cible porte sur les débits, il y aura une tendance à privilégier les bassins à fort écoulement, s'il correspond au coefficient d'écoulement les bassins humides et arides seront considérés d'une façon équivalente. En revanche, une transformation logarithmique permet de niveler les valeurs de débits.

II.9 Etalonnage du modèle

Cette étape consiste à estimer les paramètres du modèle. Deux approches pour faire cette tâche sont disponibles, soit on leur affecte une valeur sur la base des données décrivant le bassin versant, ou on l'estime par la procédure de calage. Les paramètres du modèle retenus n'ont pas un sens physique, puisque ils ne décrivent pas les caractéristiques physiques de milieu. Alors on procède à une estimation indirecte à partir des observations hydrométéorologiques nommées calage. Cette procédure nécessite à la fois un critère de qualité, et une méthode pour identifier les paramètres, ainsi que des séries de données destinées à fournir l'information nécessaire au calage (Sorooshian et Gupta, 1985). Du fait de la dépendance des paramètres obtenus à la fois au choix de la fonction objectif et à la méthode d'optimisation et des séries des données existantes. Alors les fonctions impliquées dans la résolution devront être choisies soigneusement.

II.10 Choix de la fonction critère

Le critère de Nash sur les racines de débits a été le critère de qualité retenue dans cette étude (Nash & Sutcliffe, 1970). Après une étude menée par l'ORSTOM (Servat et al., 1989) sur la prédominance de ce critère sur les autres formulations. Celui-ci permet de comparer l'écart quadratique moyen des racines des débits par rapport à la variance.

$$Nash = 100 * \left[1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^N (\sqrt{Q_0} - \sqrt{Q_c})^2}{\sum_{i=1}^N (\sqrt{Q_0} - \sqrt{Q_M})^2} \right) \right] \dots\dots\dots (II.1)$$

Avec :

Q_0 : Débit observé

Q_c : Débit simulé par le modèle.

Q_M : Moyenne des débits observés.

N : Le nombre d'observation.

II.11 Méthode d'optimisation retenue

L'optimisation des paramètres d'un modèle pluie-débit a pour but de trouver le jeu de paramètres qui rapproche le plus possible le comportement du modèle de celui du bassin modélisé. Autrement dit, c'est la recherche d'un optimum dans l'espace des paramètres. Pourvu que, cet optimum soit stable et acceptable. On distingue deux classes de stratégies d'optimisation, l'une basée sur les méthodes locales et l'autre sur les méthodes globales.

La procédure d'optimisation retenue est une méthode direct, nommée pas à pas intégrée dans la macro « Solver » et qui fait partie des méthodes locales. Le principe consiste à choisir un pas et une direction où ce que l'on appelle le jeu initial des paramètres, et le programme adopte une stratégie itérative, dont il démarre du jeu initial des paramètres et se déplace dans une direction qui améliore continuellement la valeur de la fonction critère jusqu'à ne plus pouvoir générer d'amélioration

II.12 Evaluation de la performance d'un modèle

L'évaluation d'un modèle vise à s'assurer qu'il répond bien aux objectifs sous entendus pour son développement. Elle consiste à valider le modèle en testant la plausibilité de sa structure et des jeux de paramètres retenus lors de sa calibration. L'unique technique qui peut nous informer sur la robustesse et les limites d'un modèle c'est sa confrontation avec la réalité hydrologique.

La technique la plus utilisée pour évaluer la robustesse d'un modèle est le double échantillon, dont on subdivise la période d'observation de chaque bassin versant en sous période avec calage sur une période et contrôle sur le reste des observations, tout en veillant à réserver une période de mise en route. Nous respectons cette tâche de façon à caler successivement sur toutes les sous périodes.

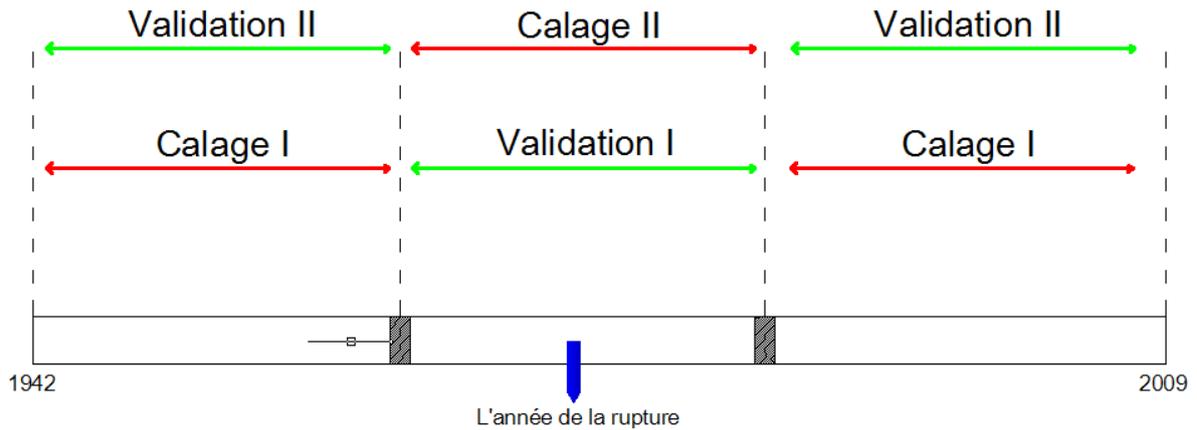


Figure II.3 : Schéma d'évaluation considéré dans ce travail

La période de mise en route consiste à prédéfinir des valeurs initiales pour les paramètres du modèle avant de passer à la phase d'optimisation ou autrement dit avant sa confrontation à la réalité hydrologique observée (données).

Le schéma d'évaluation considéré dans ce travail est illustré dans la figure (II.3).

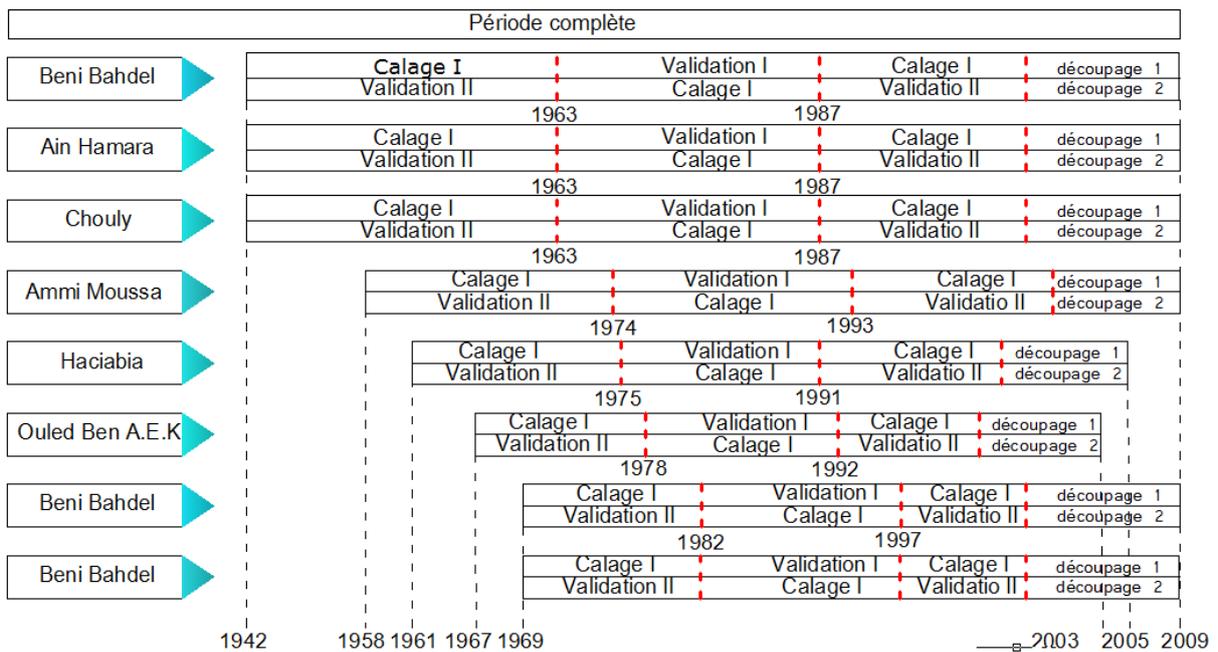


Figure II.4 : Différents découpages des périodes utilisées en calage et validation.

II.13 Présentation des résultats de calage et validation

Tableau II.1 : résultats de calage et validation du GR2M sur le bassin de Beni Bahdel

Bassin	Beni_Bahdel				
	α	β	Période de calage [1964-1986]	α	β
Période de calage [1942-1963/1987-2009]	0.65	0.04			0.71
	Nash (\sqrt{Q})		Nash (\sqrt{Q})		
	69.6		47.8		
Période de validation [1964-1986]	Nash (\sqrt{Q})		Période de validation [1942-1963/1987-2009]	Nash (\sqrt{Q})	
	44			65.9	

Tableau II.2 : résultats de calage et validation du GR2M sur le bassin d'Ain Hamara

Bassin	Ain_Hamara				
	α	β	Période de calage [1981-1995]	α	β
Période de calage [1967-1980/1996-2010]	0.34	0.03			0.27
	Nash (\sqrt{Q})		Nash (\sqrt{Q})		
	31.4		-2.9		
Période de validation [1981-1995]	Nash (\sqrt{Q})		Période de validation [1967-1980/1995-2010]	Nash (\sqrt{Q})	
	négatif			négatif	

Tableau II.3 : résultats de calage et validation du GR2M sur le bassin de Sidi Bel Abbès

Bassin	Sidi_bel_abbes				
	α	β	Période de calage [1983-1996]	α	β
Période de calage [1969-1982/1997-2010]	0.31	0.015			0.34
	Nash (\sqrt{Q})		Nash (\sqrt{Q})		
	37.9		58.9		
Période de validation [1983-1996]	Nash (\sqrt{Q})		Période de validation [1969-1982/1997-2010]	Nash (\sqrt{Q})	
	47.4			16.9	

La validation sur les périodes [1964-1986], [1981-1995] et [1983-1996] respectivement pour les bassins de Beni Bahdel, Ain Hamara et Sidi Bel Abbès donne un critère de Nash inférieure à 50% traduisant une qualité médiocre du modèle à représenter les débits observés. De même, la corrélation pluie débit est de mauvaise qualité, dont on a constaté une réponse hydrologique faible au niveau des exutoires des bassins aux différentes sollicitations météorologiques. Cela s'explique par la sécheresse frappant cette zone à partir des années 70, suite à la baisse de la pluviométrie. En revanche, l'évaporation augmente au détriment des autres termes de bilan hydrique et la grande partie de la pluviométrie reçue récompense le déficit et une fraction s'évapore.

Tableau II.4 : résultats de calage et validation du GR2M sur le bassin de Haciabia

Bassin	Haciabia				
	α	β	Période de calage [1964-1986]	α	β
Période de calage [1961-1975/1991-2005]	0.15	0.003			0.16
	Nash (\sqrt{Q})		Nash (\sqrt{Q})		
	62.2		82.3		
Période de validation [1976-1990]	Nash (\sqrt{Q})		Période de validation [1961-1975/1991-2005]	Nash (\sqrt{Q})	
	59.6			67.7	

Tableau II.5 : résultats de calage et validation du GR2M sur le bassin de Chouly

Bassin	Chouly RN7				
	α	β	Période de calage [1964-1986]	α	β
Période de calage [1942-1963/1987-2009]	0.33	0.21			0.42
	Nash (\sqrt{Q})		Nash (\sqrt{Q})		
	65.6		73.5		
Période de validation [1964-1986]	Nash (\sqrt{Q})		Période de validation [1942-1963/1987-2009]	Nash (\sqrt{Q})	
	57.7			59	

Tableau II.6 : résultats de calage et validation du GR2M sur le bassin de Sidi Djillali

Bassin	Sidi_Djillali				
	α	β	Période de calage [1983-1996]	α	β
Période de calage [1969-1982/1997-2010]	0.13	0.76			0.14
	Nash (\sqrt{Q})		Nash (\sqrt{Q})		
	69.4		69.8		
Période de validation [1983-1996]	Nash (\sqrt{Q})		Période de validation [1969-1982/1997-2010]	Nash (\sqrt{Q})	
	63			63.5	

La validation sur les périodes [76-1990], [1964-1986] et [1983-1996] respectivement pour le bassin de Haciabia, Chouly et Sidi Djillali donne un critère de Nash au voisinage de 60%, traduisant une qualité moyenne du modèle à reproduire la réalité hydrologique caractérisant ces bassins. Cette amélioration de la qualité par rapport aux bassins précédents s'explique par la superficie moyennement petite des présents bassins, et un cheminement hydraulique relativement court donnant naissance à un temps de concentration faible. Ce qui diminue les pertes dues aux infiltrations, évaporations et aux prélèvements.

Tableau II.7 : résultats de calage et validation du GR2M sur le bassin d'Ammi Moussa

Bassin	Ammi_Moussa				
	α	β	Période de calage [1975-1992]	α	β
Période de calage [1958-1974/1993-2010]	0.51	0.86			0.63
	Nash (\sqrt{Q})		Nash (\sqrt{Q})		
	71.1		80.2		
Période de validation [1975-1992]	Nash (\sqrt{Q})		Période de validation [1958-1974/1993-2010]	Nash (\sqrt{Q})	
	73.6			62.2	

Tableau II.8 : résultats de calage et validation du GR2M sur le bassin d'Ouled Ben AEK

Bassin	Ouled Ben A.E.K				
	α	β	Période de calage [1979-1991]	α	β
Période de calage [1967-1978/1992-2003]	0.46	0.73			0.51
	Nash (\sqrt{Q})		Nash (\sqrt{Q})		
	73.5		77.9		
Période de validation [1979-1991]	Nash (\sqrt{Q})		Période de validation [1967-1978/1992-2003]	Nash (\sqrt{Q})	
	75.8			70.7	

La dynamique générale des écoulements sur les bassins d'Ami Moussa et Ouled Ben AEK est assez bien reproduite. La validation donne un critère de Nash de 73.6% et 75.8% traduisant une bonne qualité du modèle à simuler les débits manifestant sur ces deux cours d'eau. Cette situation s'explique par la position géographique de ces deux bassins situés au centre de Chéllif. Une zone mieux arrosée que l'extrême ouest de ce bassin et l'Ouest de l'Algérie.

Conclusion

Afin de bien mener ce travail la technique de modélisation retenue : la variable cible est la racine des débits ; la méthode de calage est celle dite pas à pas ; l'évaluation de la performance repose sur la technique du double échantillon et le critère de performance sera celui présenté par Nash et Sutchliff (1970). Cependant le fonctionnement d'un modèle exige la détermination d'un état initial du système qui reste purement arbitraire, on utilise généralement une période de mise en route durant laquelle les résultats ne sont pas pris en compte.

La confrontation du modèle GR2M à la réalité hydrologique des différents bassins, montre une bonne qualité d'adaptation sur deux bassins Ammi Moussa et Ouled Ben AEK, et une reproduction de moyenne qualité des débits observés sur les bassins de Haciabia, Chouly et Sidi Djillali. Par contre, le modèle donne une mauvaise interprétation des débits constatés

sur le bassin de Beni Bahdel, Sidi Bel Abbes et Ain Hamara. Pour le reste de l'étude les modèles dont la validation est médiocre sont écartés.

Introduction

Dans cette section on va donner une description globale de la circulation générale et de l'effet de serre, ensuite on essaiera de comprendre comment le changement climatique peuvent perturber cette circulation et influera sur le cycle de l'eau. De même, on va parler sur les modèles climatiques, après on procède à l'extraction des précipitations et températures projetées pour le futur, dans le but d'évaluer les changements envisagés par le modèle dans les différents bassins concernés par l'étude.

III.1 La circulation générale

C'est l'ensemble des grands mouvements horizontaux et verticaux de la couche d'air entourant la terre sur toute l'étendue du globe (Circulation atmosphérique) et la circulation permanente à grande échelle de l'eau des océans (Circulation océanique).

III.2 L'origine de la circulation générale

Le moteur principal de la circulation générale est le soleil. Comme la terre est un sphéroïde, la radiation solaire incidente au sol varie entre un maximum aux régions faisant face directement au soleil situé selon les saisons plus au moins de l'équateur, et un minimum à celles très inclinés par rapport à ce dernier, proches des pôles (figure III.1), et la radiation réémise par le sol est liée à la quantité d'énergie reçue.

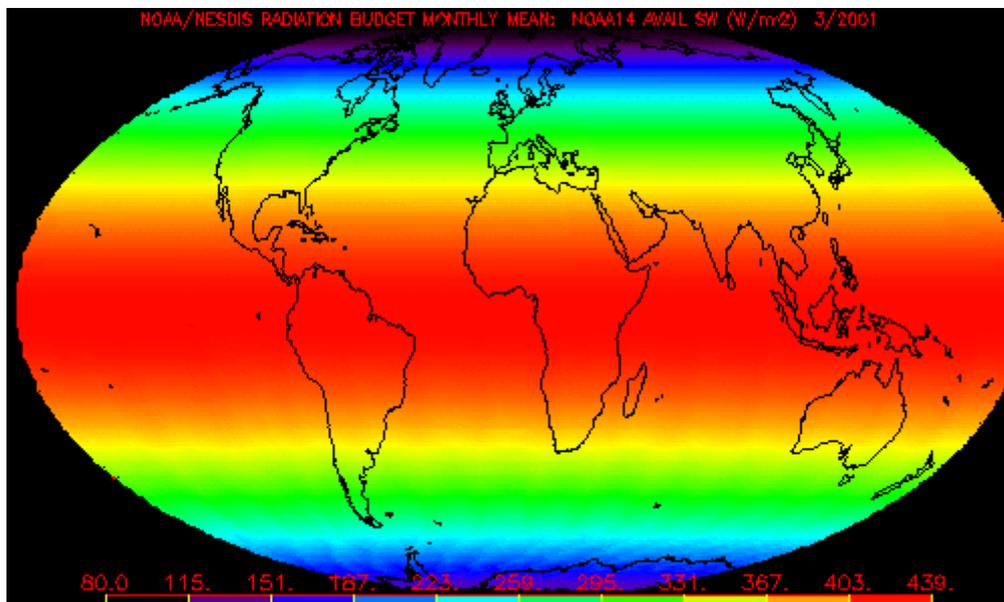


Figure III.1 : montre la répartition de flux d'énergie solaire sur le globe terrestre en w/m^2
(www.emse.fr)

III.3 La circulation atmosphérique

L'énergie reçue contribue au réchauffement des particules d'air qui se trouvent dans les basses couches de l'atmosphère. D'une part, la différence d'énergie incidente entre les zones

près de l'équateur et celles proches des pôles, donne naissance à un réchauffement différentiel, qui à pour conséquence l'apparition d'un gradient de pression entre les zones de hautes et des basses pressions, et entraîne des mouvements horizontaux de l'atmosphère. D'autre part, dans les zones à forte incidence solaire, l'air réchauffé situé juste au dessus de la surface est devenu moins dense. Alors il va avoir une tendance à monter progressivement et se refroidi en altitudes. Ce mouvement vertical est nommé mouvement de convection.

Le mouvement de convection donne naissance à un mouvement circulaire, dont la masse d'air monte en altitude au près de l'équateur et retombe aux alentours de 30° en latitude nord et sud et revenir à l'équateur par aspiration. De telle boucle de circulation porte le nom de cellule.

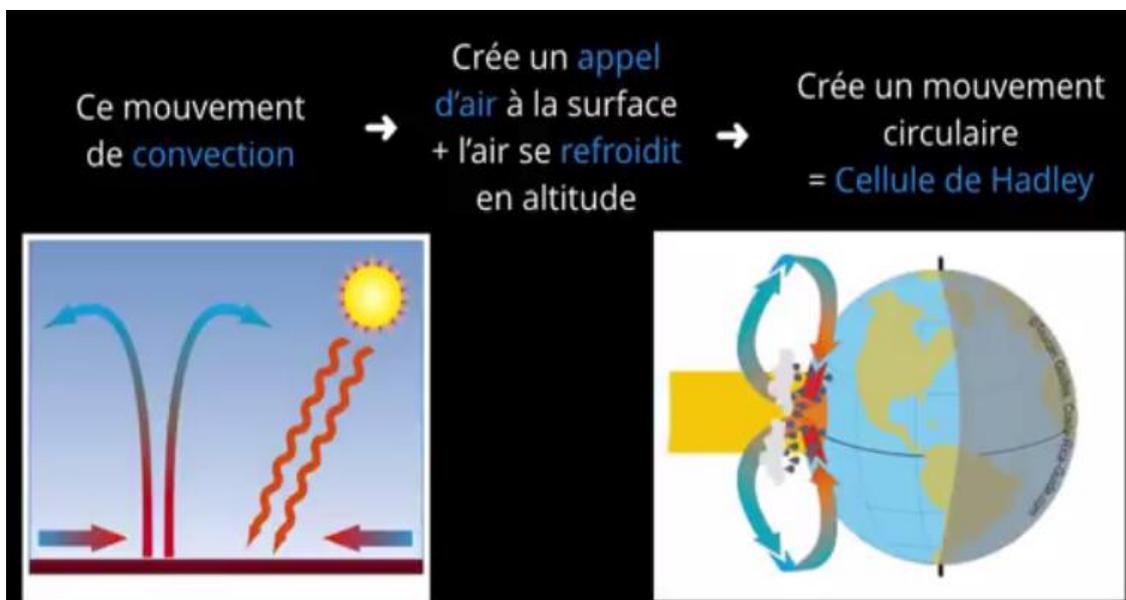


Figure III.2 : Illustration de mouvement de convection et la formation de la cellule de Hadley.

III.3.1 Les cellules de convections

Les différentes cellules sont disposées en bandes selon les altitudes. Entre l'équateur et les pôles on distingue trois zones de circulation des vents (orienté des zones de hautes pressions vers les basses pressions) :

- **La cellule de Hadley** : Il s'agit d'une cellule thermique caractérisée par une expansion ascendante près de l'équateur, divergeant en altitude vers les pôles (anticyclone). Cette zone convective crée une région de basses pressions appelée la zone de convergence intertropicale (ITCZ). Cette zone provoque un courant de subsidence à 30° de latitude qui converge vers l'équateur en surface.
- **La cellule de Ferrel** : C'est une cellule thermique indirecte qui assure la circulation de l'air entre la haute pression subtropicale et la dépression subpolaire.

- **La cellule Polaire :** Il s'agit d'une cellule thermique qui résulte du flux polaire orienté d'Ouest en Est.

Entre ces trois zones, on retrouve les courants-jets circulant autour de la planète à une altitude variant entre 10 à 15 Km et qui sont le lieu de frontogénèse.

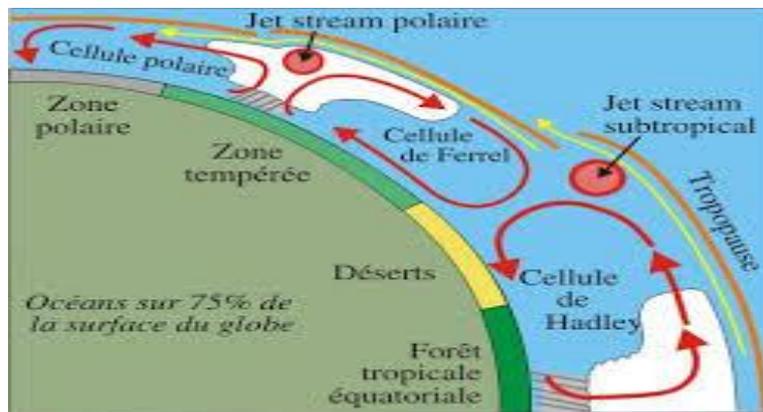


Figure III.3 : La distribution des cellules zonales dans l'hémisphère nord (www.u-picardie.fr).

III.3.2 Les champs de pression, leur répartition et leur origine

Dans les régions d'ascendance, la pression atmosphérique est inférieure à la moyenne estimée à 1015 hectopascals, il se forme une dépression. Au contraire, dans les zones de subsidence, la pression atmosphérique s'élève, il y a formation d'un anticyclone. Cette répartition spatiale des hautes et basses pressions constitue le champ de pression.

Toute la circulation dérive de cet excès de pression et de ce mouvement descendant au voisinage des tropiques. L'air s'écoule des hautes pressions vers les basses pressions. Ainsi, l'anticyclone répandant l'air de leur centre vers l'extérieur, soufflant sur les régions voisines. Inversement, les dépressions aspirent l'air périphérique de pression plus forte. Pour cela, on dit que les champs de pression se caractérisent par des positions variables au cours de l'année déterminant la circulation générale de l'atmosphère.

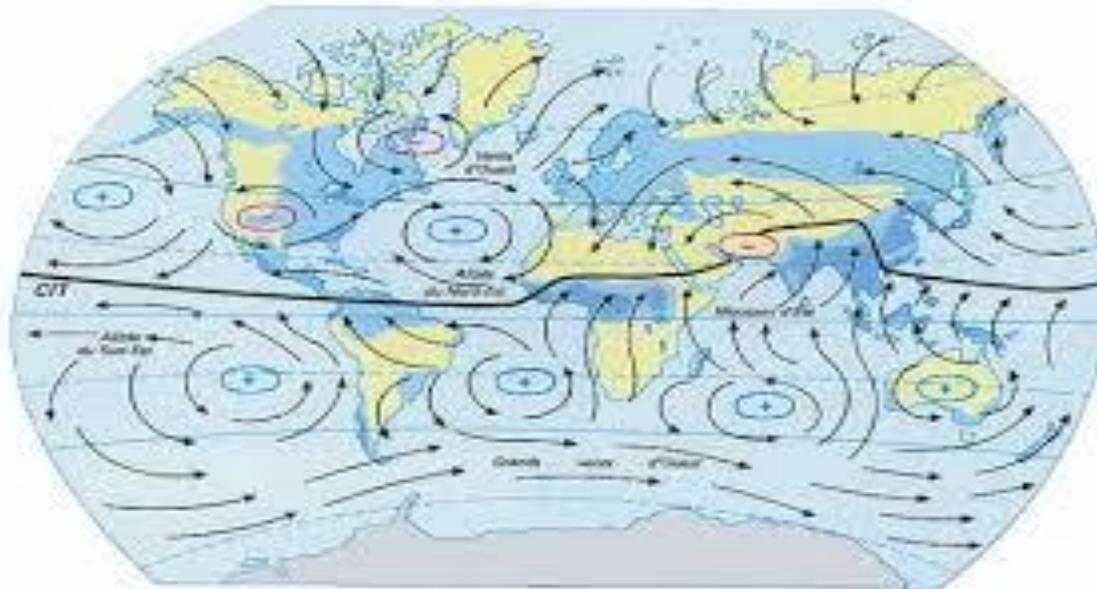


Figure III.4 : Répartition des champs de pression sur le globe en mois de Janvier
(www.memoireonline.com).

III.4 La circulation océanique

III.4.1 Définition

La circulation océanique correspond à l'ensemble des mouvements et des déplacements de l'eau à l'échelle planétaire.

III.4.2 L'origine de la circulation océanique

Rappelons que la masse volumique d'un liquide est en relation avec sa température et son degré de salinité. Cette masse volumique évolue comme une fonction décroissante de la température, et une fonction croissante de degré de salinité.

L'eau des océans se déplace constamment, autant en surface et profondeur. De nombreux facteurs sont responsables de ce déplacement de l'eau : la température, la salinité, la rotation de la terre, les radiations solaires etc. La mise en mouvement de ces gigantesques masses d'eau repose sur le mouvement de convection, entraîné par la présence d'un gradient de masse volumique entre ces masses d'eau. Ce gradient est le résultat d'une différence de température due à la répartition inégale des rayons solaires incidents et d'un contraste dans le degré de salinité entre les océans. Et de l'action des vents entraînant en mouvement les couches superficielles des océans.

Il existe principalement deux types de courants marins : les courants de surface et les courants de profondeur. Étroitement liés, ils forment ensemble la circulation océanique (thermohaline).

III.4.2.1 Les courants de surface

Les courants de surface sont des grands mouvements continus d'eau provoqués par les grands courants atmosphériques par la friction des vents. Ainsi, ces courants marins de surface suivent généralement la même trajectoire que les vents dominants, et leur direction est influencée par la force de Coriolis due à la rotation de la terre (figure.5). Mais, contrairement aux vents dominants, les courants de surface sont aussi déviés par la présence des continents. Du coup, cinq grands tourbillons océaniques sont présents à l'échelle de la planète figure.6.

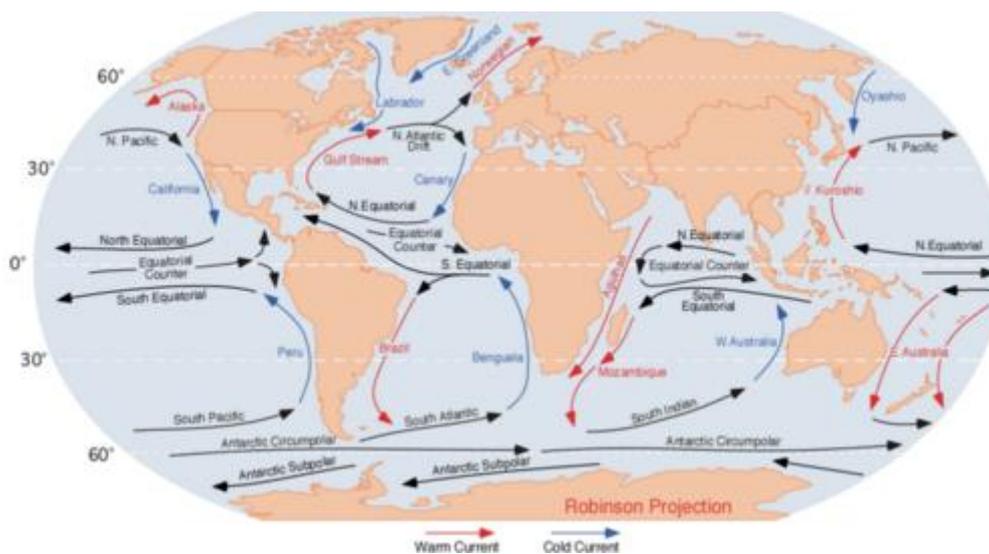


Figure III.5 : Principaux courants de surface. En rouge les courants relativement chauds, et les courants relativement froids sont en Blue (<http://www.alloprof.qc.ca>)

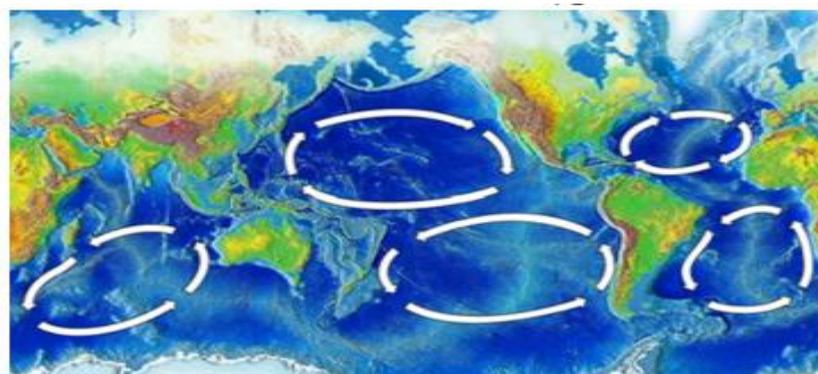


Figure III.6 : Les cinq grands tourbillons formés par les courants de surface (<http://www.alloprof.qc.ca>)

III.4.2.2 Les courants de profondeur

Les courants de profondeur, aussi nommés courants de densité, sont engendrés par des différences de température et de salinité dans l'océan. Les vents n'ont plus d'influence sur l'eau située en grande profondeur, à plus de 800 mètres. C'est la densité de

l'eau qui joue un rôle dans la formation de courants marins de profondeur. L'eau plus dense plonge en profondeur alors que l'eau moins dense remonte en surface

Lorsque l'eau part de l'équateur, elle est chaude puisqu'elle est soumise aux radiations solaires. Lorsqu'elle se rapproche des pôles, elle se refroidit, puis elle gèle. Toutefois, l'eau sous forme solide ne contient pas de sel: tous les sels restent donc dans l'eau. L'eau toujours sous forme liquide devient donc très froide et très salée (lorsque la banquise se forme, la salinité de l'eau augmente), ce qui fait en sorte que l'eau des régions polaires est très dense. Cette eau plonge en profondeur, créant ainsi le courant de profondeur.

III.4.3 La circulation Thermohaline

Les courants marins de surface et les courants marins de profondeur forment une immense boucle de circulation que l'on nomme boucle thermohaline.

Une telle Boucle assure le maintien de la vie dans les océans, et avec la circulation atmosphérique ils permettent le transport d'énergie excédentaire sous forme de chaleur de l'équateur vers les zones polaires en équilibre la balance énergétique dans le système terre atmosphère.

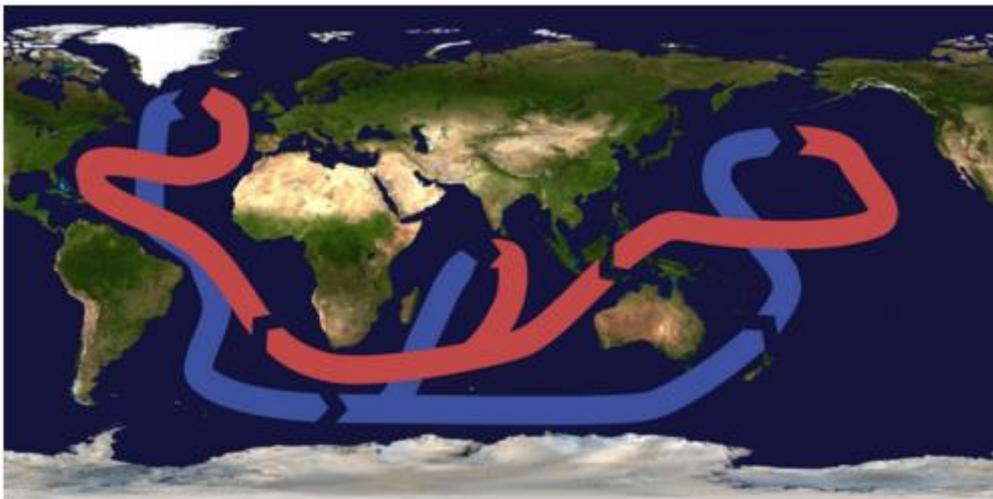


Figure III.7 : Aperçu sur la boucle Thermohaline. En bleu, ce sont les eaux froides et salées qui circulent en profondeur. En rouge, ce sont les eaux chaudes et moins salées qui circulent plus en surface. (<http://www.alloprof.qc.ca/BV/pages/s1343.aspx>)

III.5 Qu'est-ce que l'effet de serre?

L'effet de serre est un phénomène naturel par lequel une partie de l'énergie solaire qui est émise par la terre est absorbée et retenue sous forme de chaleur dans la basse atmosphère. L'effet de serre est causé par des gaz contenus dans l'atmosphère, principalement la vapeur

d'eau. D'autres gaz jouent un rôle dans l'effet de serre : le dioxyde de carbone, le méthane, les oxydes d'azote, l'ozone et les hydrocarbures.

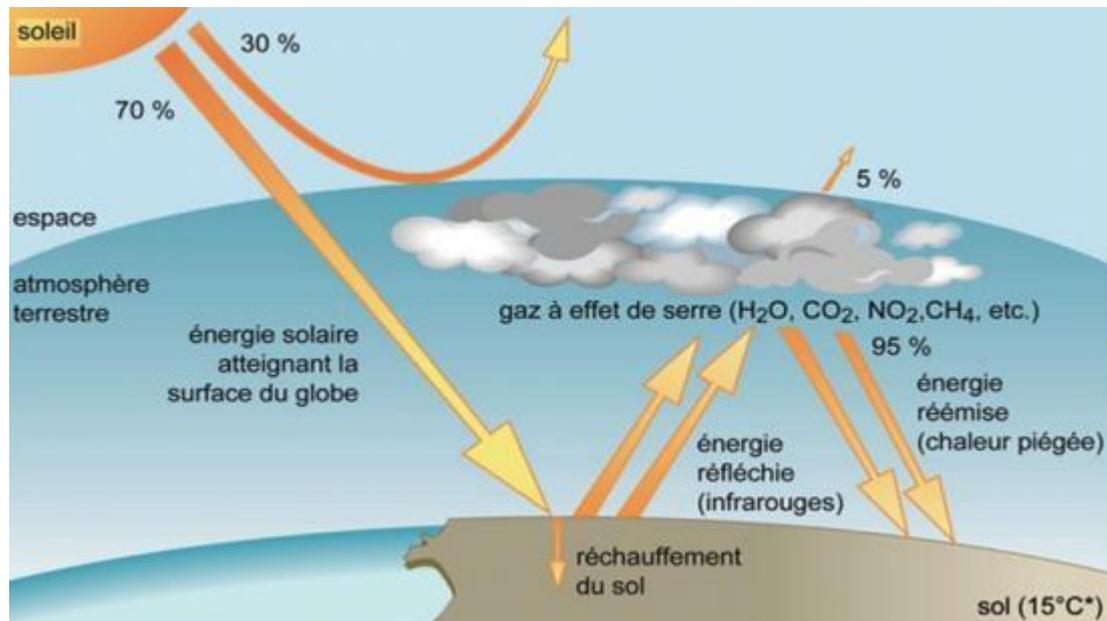


Figure III.8 : L'action de l'effet de serre (tpecyclones.e-monsite.com)

III.5.1 L'effet de serre naturel

Les gaz à effet de serre absorbent le rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre, par l'atmosphère elle-même du fait de la présence de ces mêmes gaz et par les nuages. Le rayonnement atmosphérique est émis dans toutes les directions, y compris vers la surface de la Terre. Ainsi, les gaz à effet de serre retiennent la chaleur dans le système surface troposphère. C'est ce qu'on appelle l'effet de serre naturel.

III.5.2 L'effet de serre renforcé

Un accroissement de la concentration de gaz à effet de serre entraîne une plus grande opacité de l'atmosphère au rayonnement infrarouge et, par conséquent, un rayonnement effectif vers l'espace à partir d'une altitude plus élevée et à une température plus basse. Il en résulte un forçage radiatif, un déséquilibre qui ne peut être compensé que par une hausse de la température du système surface-troposphère. C'est ce qu'on appelle l'effet de serre renforcé. (<http://www.greenfacts.org/climate-change/effet-serre/effet-serre.htm>)

III.6 Le réchauffement climatique modifie-t-il la circulation générale et le cycle de l'eau ?

La différence de chaleur reçue du soleil entre les différentes régions de la terre est le moteur de la circulation générale. L'effet de serre additionnel va engendrer un forçage radiatif positif est sera suivi par une augmentation de la température. Cette modification des

différences de températures devrait donc, en théorie, modifier d'une part la circulation atmosphérique. Or les modèles climatiques montrent que les hautes latitudes (zones tempérées et polaire) devraient plus se réchauffer que les tropiques. La différence de température entre les tropiques et les hautes latitudes devrait donc diminuer, ce qui pourrait ralentir la circulation atmosphérique. D'autre part, l'une des hypothèses avancées sur la modification de la circulation océanique est le ralentissement de Gulf Stream. Ce courant chaud d'Atlantique nord qui réchauffe l'Europe disparaît lorsque ses eaux se mélangent avec celles, plus froides et plus salées, de l'Arctique, ce qui augmente leur densité et provoque leur plongée dans les profondeurs. Or le réchauffement climatique, par ses effets sur la température des eaux et la fonte des glaces, modifie ce phénomène. Cet échauffement et l'arrivée de plus grandes quantités d'eau douce diminuent la densité des eaux de l'Arctique et pourraient ralentir leur plongée, et par la même ralentir toute la circulation mondiale.

Par ailleurs, le réchauffement dû à l'effet de serre tend à accélérer le cycle de l'eau en intensifiant l'évaporation et les précipitations. Les mesures des précipitations terrestres révèlent une tendance à l'accroissement des précipitations depuis le milieu du 20^e siècle. Les données montrent cependant qu'il existe une variation spatiale, avec une augmentation des précipitations au niveau des hautes latitudes et une diminution en Afrique tropicale et dans le sud de l'Asie. Par conséquent, le changement climatique devrait se traduire par une intensification des phénomènes de sécheresse et d'inondation à travers le monde, signes de l'accélération du cycle hydrologique. Cette intensification provoque une accumulation d'air humide, ce qui diminuera la vitesse des vents de la circulation atmosphérique du Pacifique (cellule de Walker) de 3%. (www.futura-sciences.com)

III.7 Le 5^{ème} rapport de GIEC

Le 5^e rapport de groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) utilise un nouvel ensemble de nouvelles simulations des impacts futurs du changement climatique, à partir d'une gamme de différentes hypothèses de scénarios possibles d'évolution des missions.

III.7.1 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 (pour Representative Concentration Pathways), ont été utilisés

pour les simulations des modèles climatiques réalisées pour ce 5ème 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

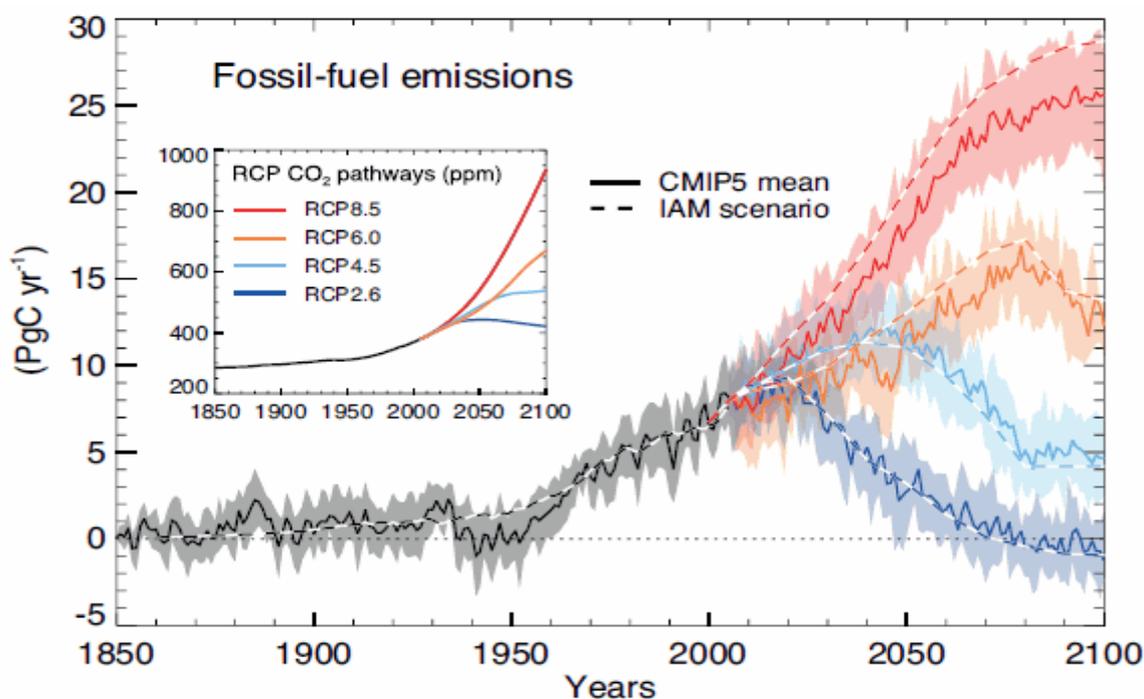


Figure III.9 : les émissions de combustibles fossiles compatibles simulées par les modèles CMIP5 pour les quatre scénarios RCP (IAM : modèle d'évaluation intégré utilisés pour définir les scénarios RCP)

III.7.2 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°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 subissaient 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 théorie 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.

III.8 Modèle climatique

III.8.1 Définition

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

III.8.2 Construction classique d'un modèle

Un modèle climatique est construit de façon à être le plus précis possible est surtout le plus efficace. Traditionnellement, un modèle climatique est construit comme suit :

- On établit un maillage artificiel de la surface géographique, la taille de la maille conditionnera le temps de calcul informatique.

- On prend en compte le volume atmosphérique et océanique concerné en créant des « des boîtes à chaussures » le long de la verticale, avec quelques dizaines de niveaux de boîtes en tout.
- Pour chaque système (terre, atmosphère, océan), on sélectionne les paramètres considérés comme caractéristiques pour le système dans son ensemble, par exemple la température moyenne et sa répartition, la salinité et la température des océans, le taux d'humidité, la couverture végétale. Etc.
- On exprime ensuite les relations physiques entre chaque paramètre et chaque «boîtes à chaussures» on exprime alors les relations mathématiques unissant la température de surface et l'évaporation, ou encore les équations auxquelles l'atmosphère doit obéir en permanence comme la conservation d'énergie, le cycle biogéochimique, ainsi les échanges océan-atmosphère. Etc.
- On programme l'ensemble de ce modèle mathématique, en langage informatique.

III.8.3 Les principaux items pris en compte dans les modèles d'aujourd'hui

- Les échanges d'énergie, en particulier sous forme de rayonnement électromagnétique entre la terre, l'océan, l'atmosphère et l'espace.
- Les transferts radiatifs dans l'atmosphère, c'est-à-dire la manière dont le rayonnement solaire et celui émis par la terre traversant l'atmosphère ou sont absorbés par divers gaz à effet de serre.
- La circulation de l'air dans l'atmosphère, et donc les transports d'eau qui y sont associés.
- La circulation océanique, et les interactions entre l'océan et l'atmosphère.
- La formation et la fonte de la glace de mer.
- Les nuages, mais une modélisation correcte des nuages reste un des points où la marge de progression est très importante.
- Les échanges de carbone entre l'atmosphère et la planète.
- Certaines rétroactions du réchauffement sur les émissions naturelles de gaz à effet de serre. (<http://www.manicore.com>)

III.8.4 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.

III.8.5 Modèle Climatique régionale (MRC)

Contrairement au modèle climatique globale, les modèles climatiques régionaux (MRC) et empiriques downscaling statistique (EDD) appliqués 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'impact des changements climatiques sur les ressources en eau 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 à 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.

Dans le cadre de ce projet, une grande communauté scientifique du climat s'engage dans l'étude, l'évaluation et la compréhension du climat régional afin de mieux comprendre les phénomènes pertinents régionaux / locaux climatiques, leur variabilité et les changements, par le biais des modèles régionaux. Pour évaluer et améliorer les modèles et les techniques de mise à l'échelle du climat régional et pour produire des ensembles coordonnés de projections régionales dans le monde entier régionalisés. A propos de ce dernier point, le monde est divisé en plusieurs domaines, chaque domaine correspond à une région pour laquelle l'application de modèle régional a eu lieu. Dans notre étude on travail sur le domaine Africain dans lequel se trouve notre zone d'étude. (<http://www.cordex.org>)

Le CORDEX Africain utilise les modèles CQCJ du CLM Communauté (climat limitée zone de modélisation communautaire) et se compose de deux partie :

- Une évaluation du CQCJ pour la période 1989 à 2008 avec les données ERA-Interim utilisées comme données de forçage.
- Pour la mise en échelle, quatre MCG de conduite sont retenus dans le CORDEX Africain ESM-LR, HadGEM2, CNRM-CM5 et EC-Earth et deux scénarios d'émission ont été utilisés RCP4.5 et RCP8.5. Les simulations ont été réalisées avec CORDEX grille espacement standard 0.44°.

Une étude comparative (www.imk-tro.kit.edu) des différentes projections élaborées pour l'Afrique a révélé les résultats suivants : Le HadGEM2 montre la plus grande augmentation de température, mais le plus petit changement de précipitation, le EC-Earth et ECHAM6 sont plutôt rapproché et montrent la plus forte baisse des précipitations et la CNRM-CM5 montre le changement de température le plus faible. Les figures ci-dessous illustrent les résultats des projections.

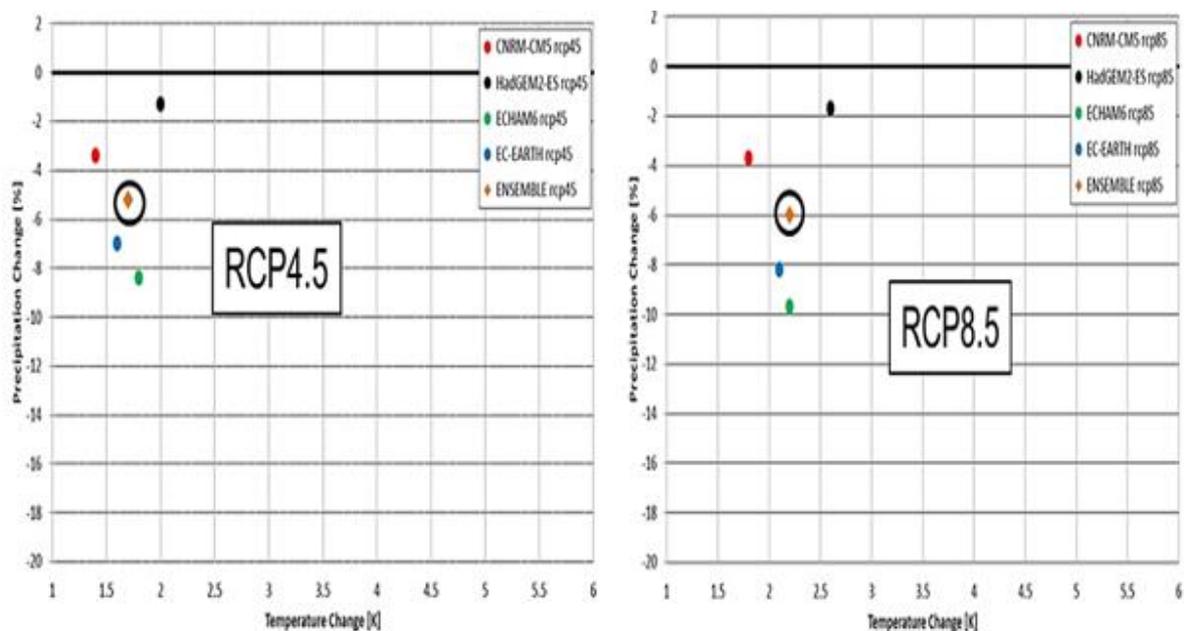


Figure III.10 : Résultats de RMC : signal de changement climatique pour le continent africain incl. Madagascar 2031-2060 (période de référence 1971-2000) (www.imk-tro.kit.edu)

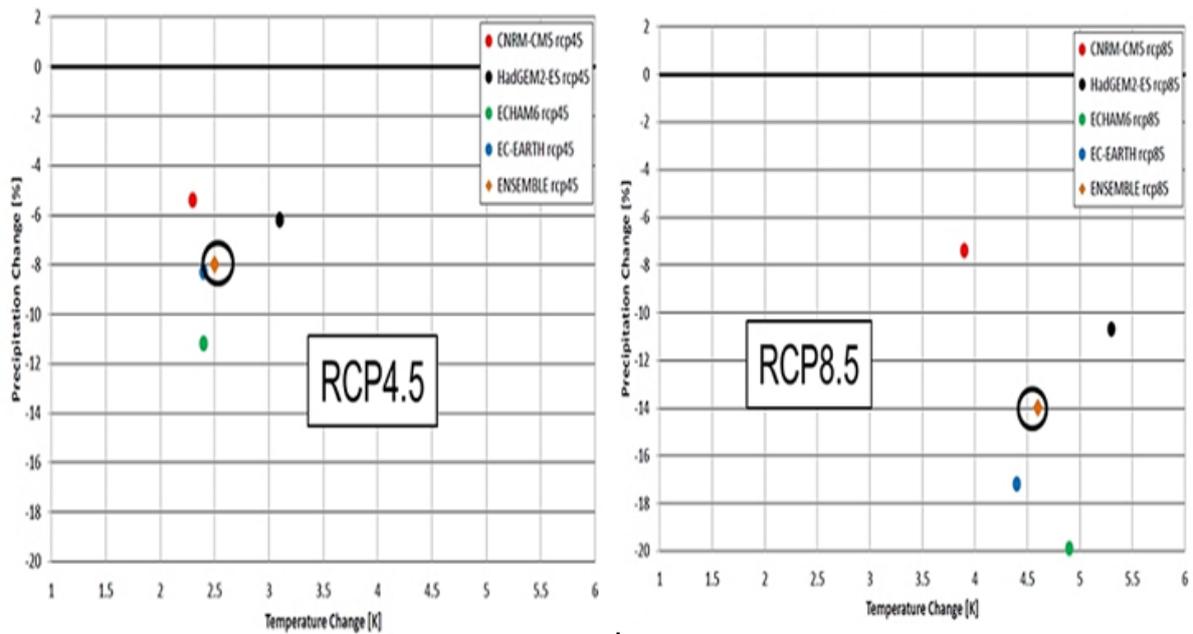


Figure III.11 : Résultats de RMC : signal de changement climatique pour le continu africain incl. Madagascar 2071-2099 (période de référence 1971-2000) (www.imk-tro.kit.edu)

Le modèle régional retenu pour l'étude de l'impact de changement climatique sur les ressources en eau au Nord Ouest de l'Algérie est le CNRM-CM5, dont le modèle globale utilisé comme conditions aux limite pour marcher ce modèle est le SMHI-RCA4 de l'institut Swedish Metéological and Hydrological Institute. Comme illustré dans les figures 10 et 11 ce modèle présente la plus faible augmentation de température pour l'avenir proche (2031-2060) et la fin du 21e siècle (2071-2099) et la plus faible diminution de précipitation pour la fin du 21e siècle (2071-2099) pour les deux scénarios retenus dans le projet CORDEX. Alors nous sommes en train d'étudier la situation la plus optimiste en termes de projections. (<http://www.clm-community.eu/index.php?menuid=254>).

III.9 Evaluation de la pluviométrie et de la température projetée au nord ouest de l'Algérie par le modèle CNRM-CM5

Dans cette partie, on procède à l'évaluation du changement futur projeté dans les différents bassins, pour la pluviométrie et les températures par la version du modèle CNRM-CM5, avec l'utilisation de deux scénarios 8.5 et 4.5 inclut dans la liste des modèles utilisés dans le projet CORDEX Africain.

La constitution des futures séries des précipitations et des températures pour chaque bassin et pour chaque mois se fait par la sommation des valeurs de l'ensemble des mailles contenues dans le bassin, dans le cas où la maille appartient partiellement au bassin on procède par pondération.

Pour l'évaluation des changements projetés pour le futur dans les différents bassins, on a opté pour la formule suivante :

$$\Delta i = (F_i - R_i) / R_i * 100 \dots\dots\dots(III.1)$$

Δi : Changement des précipitations ou de températures projetés pour l'horizon i.

F_i : La moyenne de précipitation (ou de températures) pour le mois (ou la saison) i calculé sur la période future.

R_i : La moyenne mensuelle (ou saisonnière) calculée sur la période de référence 1970-1999.

L'évaluation des pluies moyennes saisonnières pour les quatres saisons de l'année et pour les trois horizons futurs avec celle de la période de référence pour chaque bassin sont illustrées dans les figures ci-dessous. Et les graphes montrent la comparaison entre les pluies moyennes mensuelles des horizons futurs avec la moyenne de la période de référence sont donnés en Annexe.

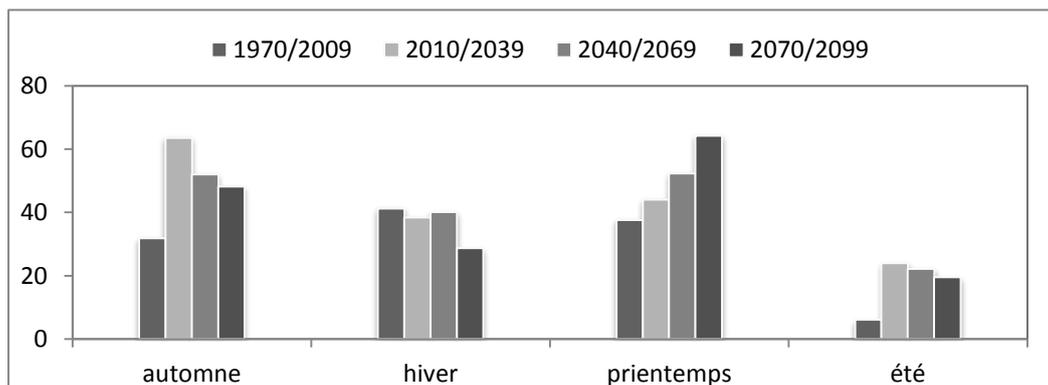


Figure III.12 : Evaluation des pluies moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Sidi Bel Abbès.

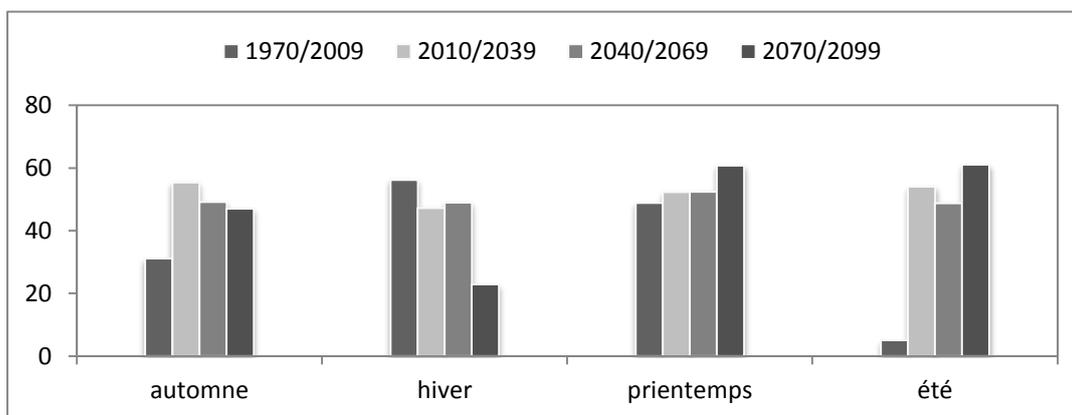


Figure III.13 : Evaluation des pluies moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Beni Bahdel.

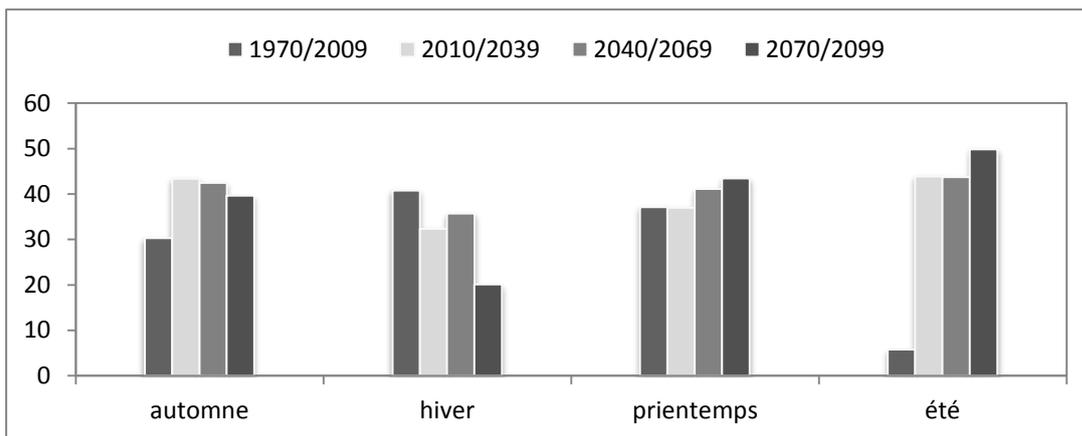


Figure III.14 : Evaluation des pluies moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Haciaibia.

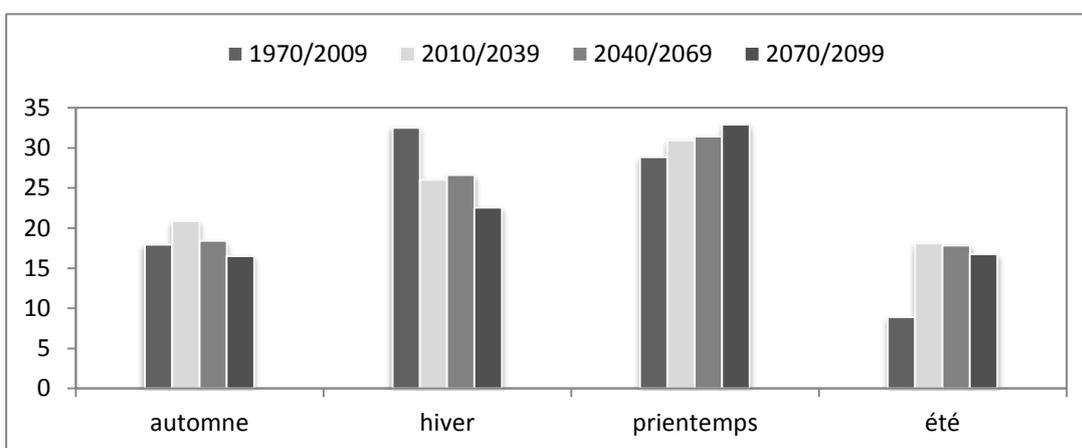


Figure III.15 : Evaluation des pluies moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Sidi Djillali.

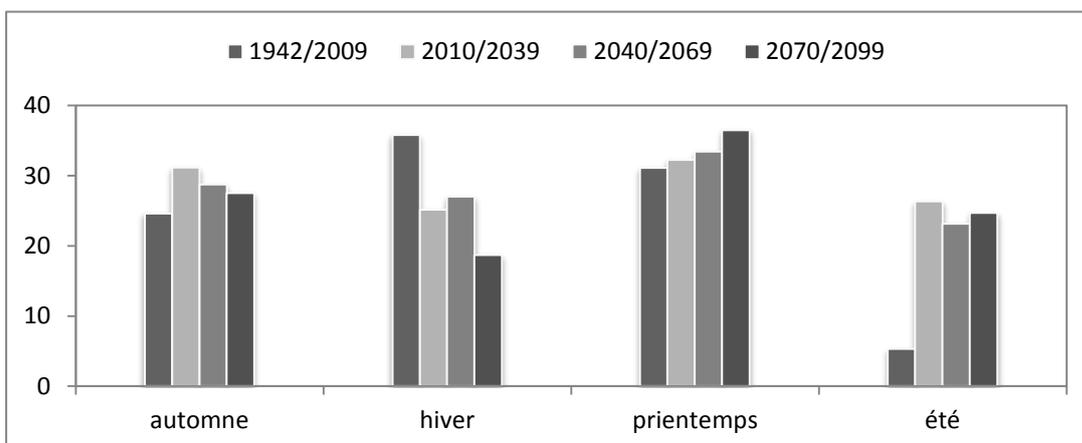


Figure III.16 : Evaluation des pluies moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin d'Ammi Moussa

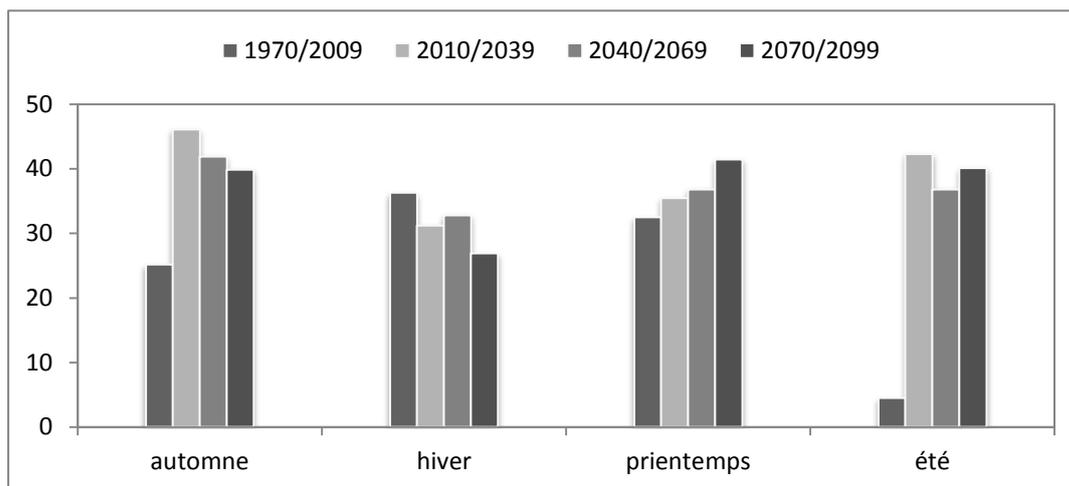


Figure III.17 : Evaluation des pluies moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin d'Ouled Ben A.E.K.

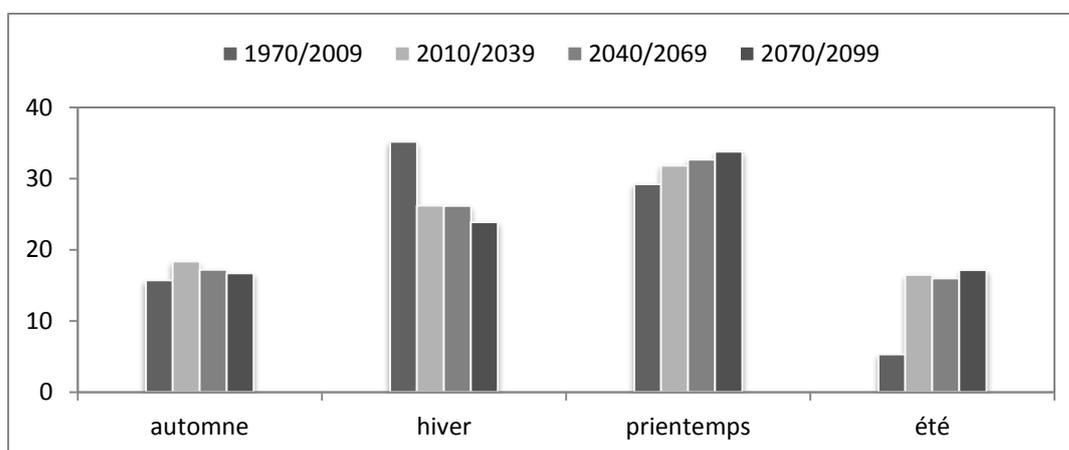


Figure III.18 : Evaluation des pluies moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Chouly.

L'évaluation des changements futurs projetés, pour la pluviométrie en Nord Ouest de l'Algérie par le modèle CNRM-CM5 avec le scénario 8.5. Montre une surestimation des pluies moyennes saisonnières de l'été et de l'automne. Pour la saison d'hiver tous les bassins connaîtront une diminution des moyennes pluviométriques. En revanche, la saison de printemps sera marquée par une augmentation progressive des pluies moyennes d'un horizon à un autre.

Le tableau ci-dessous regroupe les taux de variation de la pluie moyenne saisonnière projetée par le modèle CNRM-CM5 avec le scénario 8.5 est calculée pour les différents horizons futurs. Par rapport à la moyenne saisonnière de la période de référence s'étalant de 1970 à 2009.

Tableau III.1 : Changement futurs de précipitations saisonnières moyennées sur les différents horizons

		automne	hiver	printemps	été
Sidi Bel Abbes	2010-2039	99	-7	17	293
	2040-2069	63	-3	39	264
	2070-2099	51	-30	71	221
Beni Bahdel	2010-2039	78.1	-15.9	7.2	971.7
	2040-2069	58.1	-12.8	7.3	866.2
	2070-2099	51.2	-59.3	24.4	1110.4
Haciabia	2010-2039	43.2	-20.6	-0.4	660.4
	2040-2069	40.3	-12.3	10.7	657.7
	2070-2099	31.0	-50.7	16.9	763.8
Sidi Djillali	2010-2039	16.46	-20.02	7.26	103.41
	2040-2069	2.62	-18.17	9.02	100.12
	2070-2099	-7.87	-30.63	14.13	88.08
Ammi Moussa	2010-2039	83.14	-13.95	9.14	839.07
	2040-2069	66.47	-9.59	13.36	717.63
	2070-2099	58.39	-25.93	27.59	791.16
Ouled Ben A.E.K	2010-2039	26.53	-29.74	3.76	396.56
	2040-2069	16.77	-24.55	7.52	336.63
	2070-2099	11.78	-47.74	17.37	365.83
Chouly	2010-2039	16.91	-25.49	8.92	210.89
	2040-2069	9.36	-25.65	11.87	201.30
	2070-2099	6.33	-32.17	15.71	223.57

Le changement saisonnier moyen des précipitations sur l'ensemble des bassins (tableau III.1) pour chacune des quatre saisons de l'année montre que le 1^{er} horizon de l'hiver sera marquée par une baisse variant de 7 % (une valeur constaté sur le bassin de Sidi Bel Abbes) jusqu'à 29 % pour le bassin d'Ouled Ben A.E.K. La plus petite baisse pour le 2^{ème} horizon se manifeste dans le bassin de Sidi Bel Abbes avec un taux de 3% et la plus grande est estimé à 25 % sur le bassin de Chouly. De même, dans le 3^{ème} horizon la baisse continuer de s'accroître et atteint les 59 % sur le bassin de Beni Bahdel. Le modèle prévoit une augmentation des précipitations de printemps qui varie entre 7% à 20%, dont la plus grande hausse a été constaté sur le bassin de d'Ammi Moussa avec un taux de 27 % pour la fin de 21^{ème} siècle. Pour la pluviométrie saisonnière de l'été et de l'automne on constate que le modèle donne des pluies surestimé en comparant à celle de la période de référence.

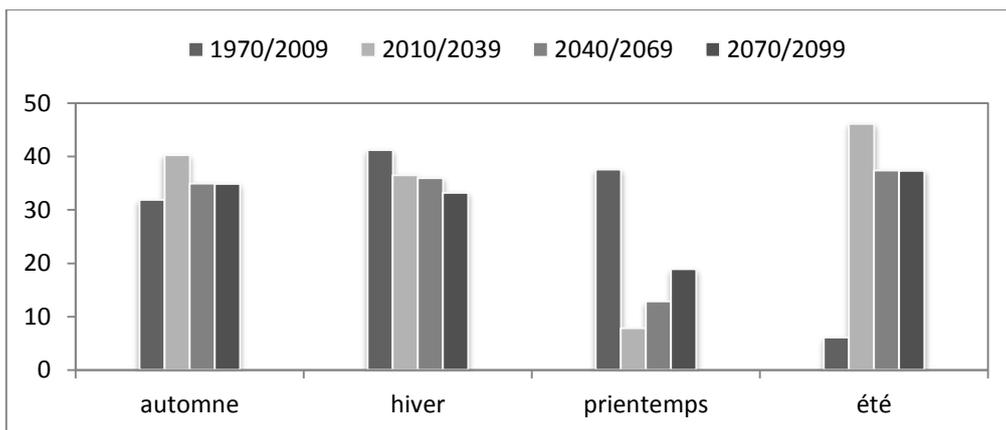


Figure III.19 : Evaluation des pluies moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Sidi bel Abbas.

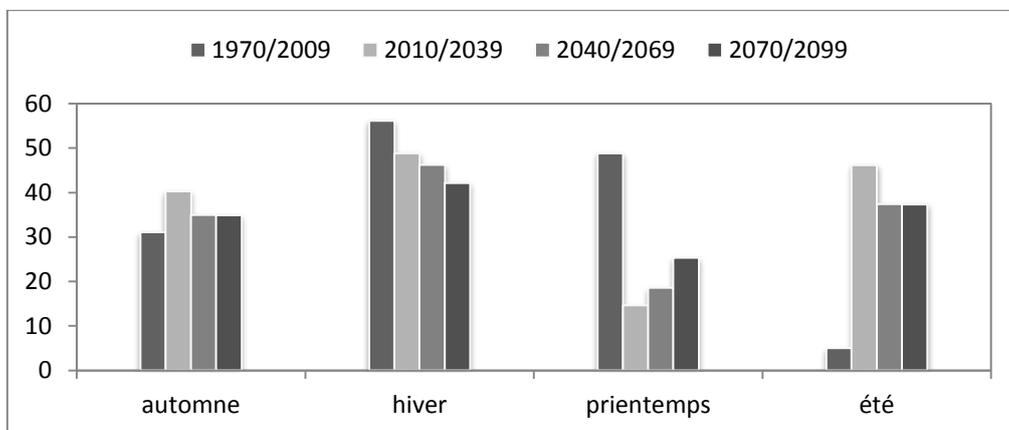


Figure III.20 : Evaluation des pluies moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Beni Bahdel.

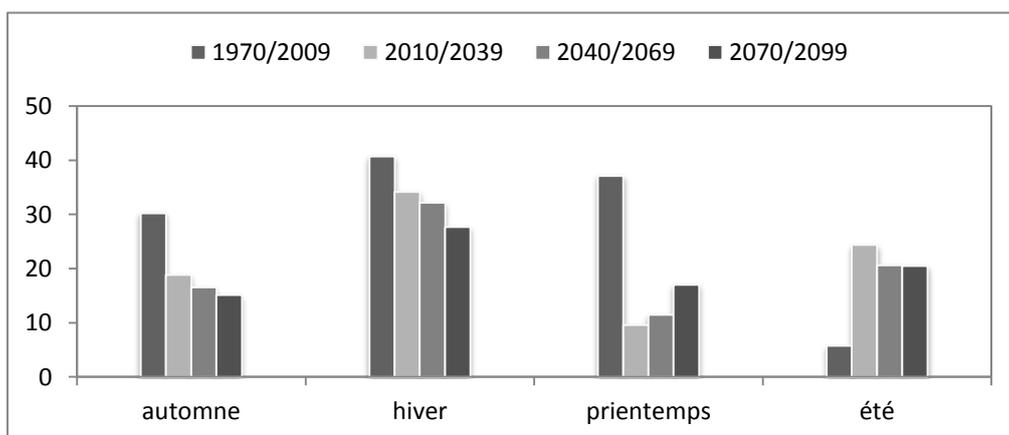


Figure III.21 : Evaluation des pluies moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Haciaibia.

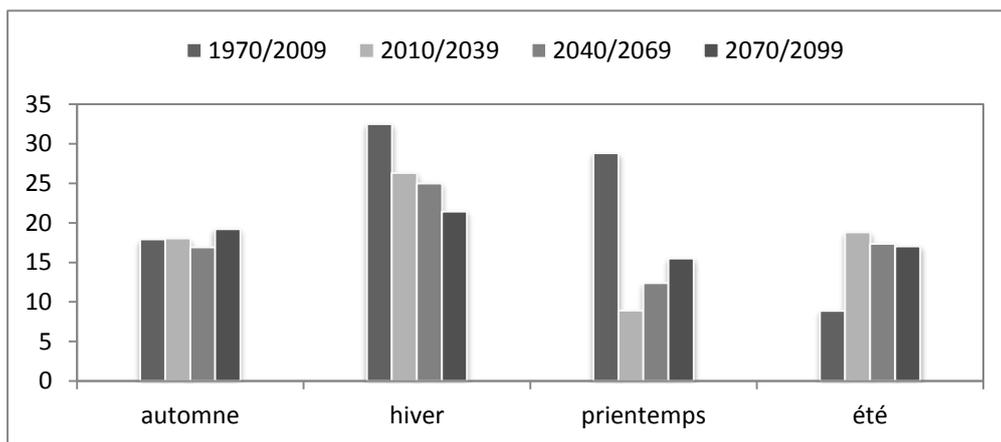


Figure III.22 : Evaluation des pluies moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Sidi Djillali

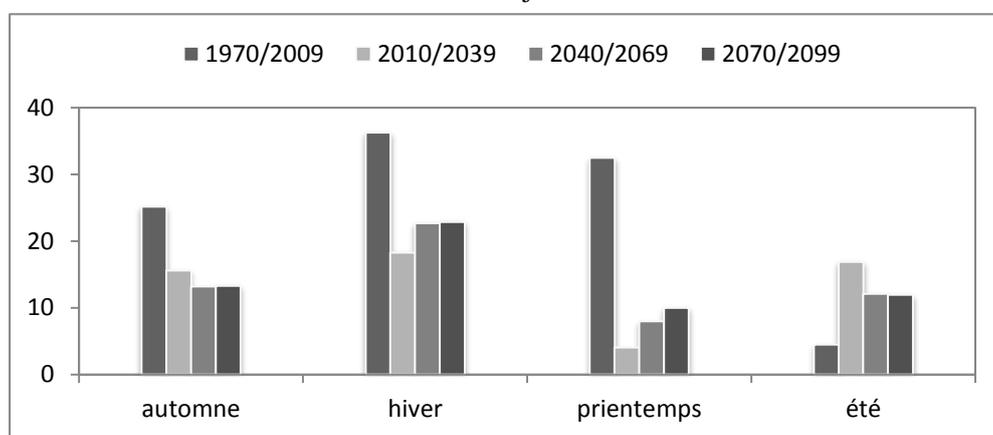


Figure III.23 : Evaluation des pluies moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin d’Ammi Moussa

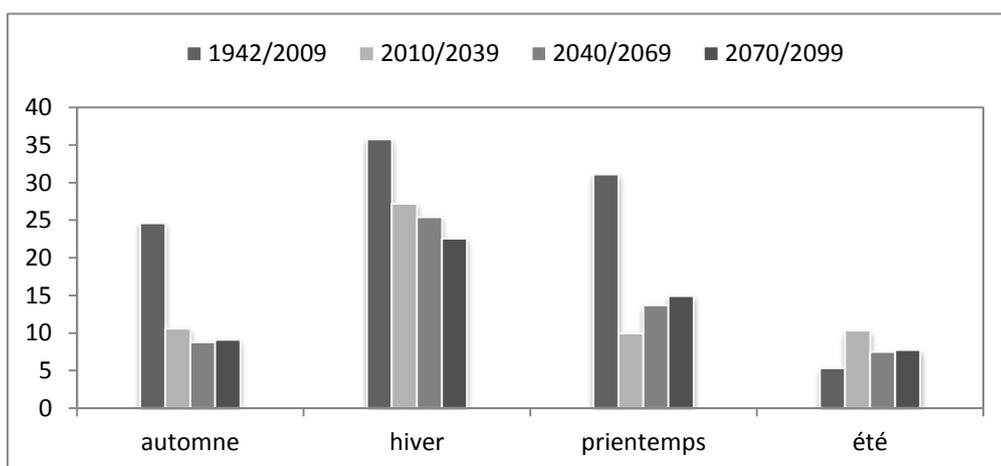


Figure III.24 : Evaluation des pluies moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin d’Ouled Ben A.E.K.

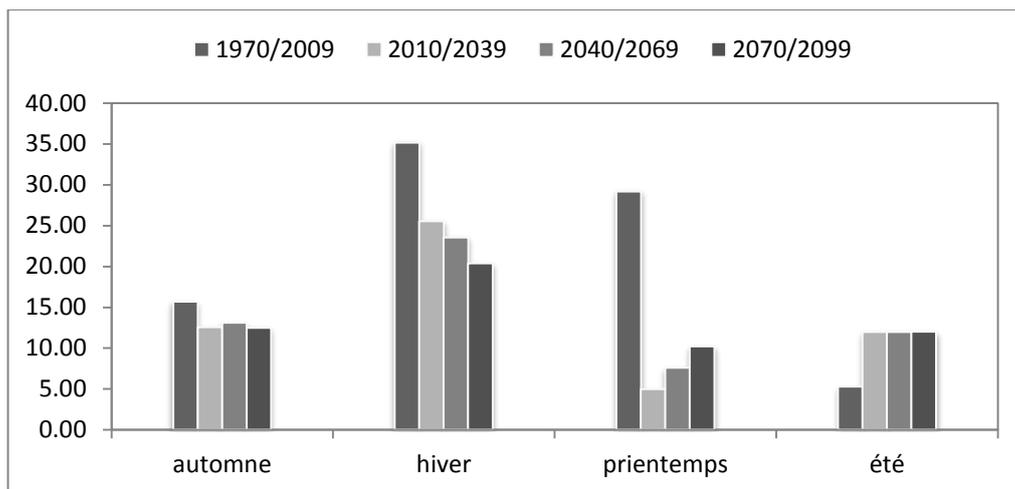


Figure III.25 : Evaluation des pluies moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Chouly.

L'évaluation des précipitations issues de la projection CNRM-CM5 (scénario 4.5) avec celle de la période de référence prise entre 1970 et 2009 montre une diminution progressive des apports pluviométriques hivernaux pour tous les horizons. Les pluies de printemps vont connaître une régression brusque pour le 1^{er} horizon. Cette baisse sera significative pendant le 2^{ème} horizon et la fin de 21^{ème} siècle mais elle sera moins marquante que celle de 1^{er} horizon. Pour la saison estivale, le modèle surestime les pluies. La pluviométrie d'automne est instable sur l'ensemble des bassins dont elle augmente sur quelques-uns et diminue sur d'autres.

Le tableau ci-dessous regroupe les taux de variation de la pluie moyenne saisonnière projetée par le modèle CNRM-CM5 avec le scénario 4.5. Et calculée pour les différents horizons futurs. Par rapport à la moyenne saisonnière de la période de référence s'étalant de 1970 à 2009.

Tableau III.2 : Changement futurs de précipitations saisonnières moyennées sur les différents horizons

		automne	hiver	printemps	été
Sidi Bel Abbes	2010-2039	26	-11	-79	656
	2040-2069	10	-13	-66	513
	2070-2099	10	-19	-50	512
Beni Bahdel	2010-2039	29	-13	-70	815
	2040-2069	12	-18	-62	641
	2070-2099	12	-25	-48	641
Haciabia	2010-2039	-38	-16	-74	423
	2040-2069	-45	-21	-69	358
	2070-2099	-50	-32	-54	356
Sidi Djillali	2010-2039	1	-19	-69	112
	2040-2069	-6	-23	-57	95
	2070-2099	7	-34	-46	91
Ammi Moussa	2010-2039	-38	-50	-88	275
	2040-2069	-48	-37	-75	169
	2070-2099	-47	-37	-69	165
Ouled Ben AEK	2010-2039	-57	-24	-68	95
	2040-2069	-64	-29	-56	41
	2070-2099	-63	-37	-52	46
Chouly	2010-2039	-20	-27	-83	126
	2040-2069	-17	-33	-74	126
	2070-2099	-20	-42	-65	127

Le changement futur des précipitations moyennes saisonnières issu de la projection CNRM-CM5 avec l'utilisation du scénario d'émission 4.5 prévoit une baisse des précipitations hivernale sur l'ensemble des bassins avec un taux variant de 11 à 50 % pour le 1^{er} horizon et de 13 à 37 % pour le 2^{ème} horizon, de 19 à 42 % pour la fin de 21^{ème} siècle. La pluviométrie printanière connaîtra une baisse considérable variant de 50 à 88 % sur tous les bassins. Par contre, les pluies de l'été sont surestimées par le modèle, dont il prévoit des augmentations très importantes. L'évolution de la pluie de l'automne diffère d'un bassin à l'autre, elle montre une tendance à la baisse sur tous les bassins, mais sur le bassin de Beni Bahdel et Sidi Bel Abbes le cumul pluviométrique des horizons à venir est plus grand que celui de la période de référence.

Les températures projetées dans la projection CNRM-CM5 avec l'utilisation de deux scénarios 8.5 et 4.5 sont évaluées dans les graphes ci-dessous.

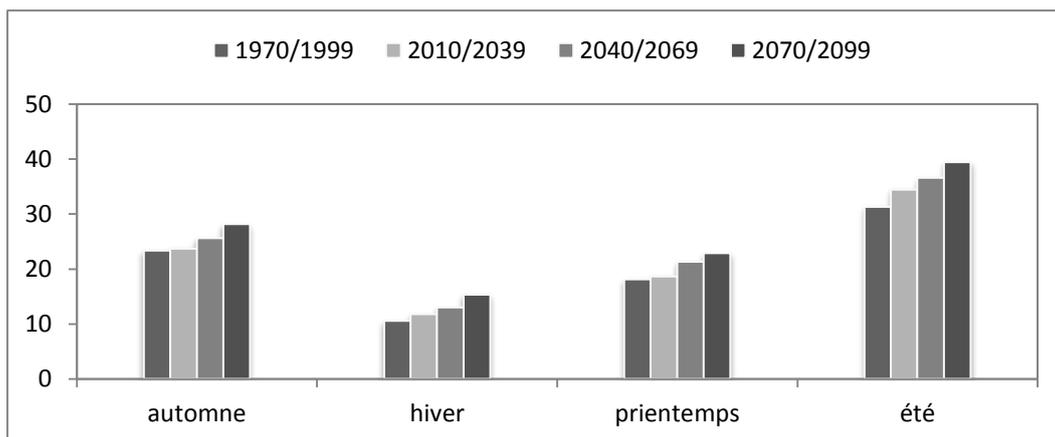


Figure III.26 : Evaluation des températures moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Sidi Bel Abbas.

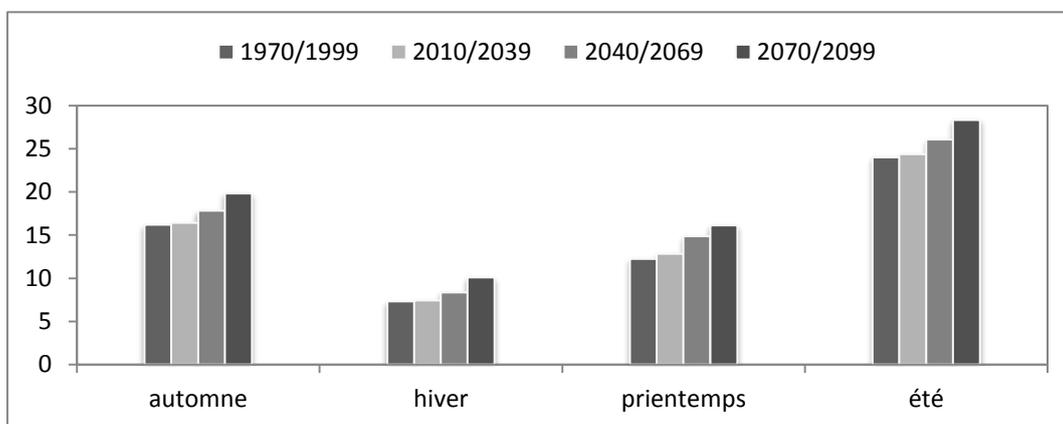


Figure III.27 : Evaluation des températures moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Beni Bahdel.

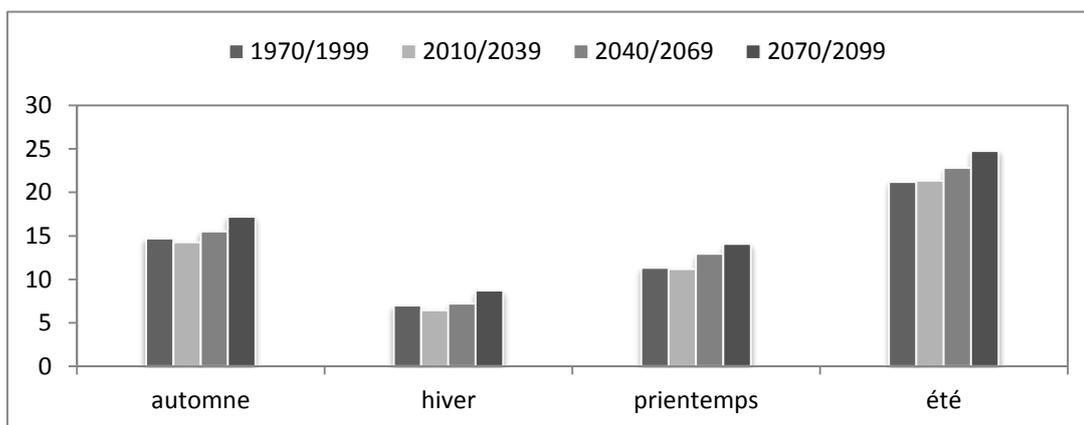


Figure III.28 : Evaluation des températures moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Haciaibia.

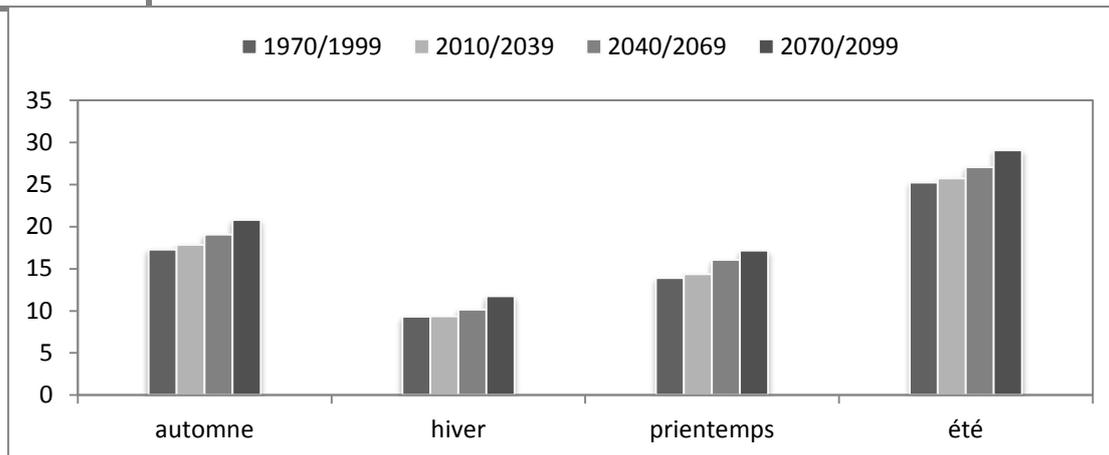


Figure III.29 : Evaluation des températures moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Sidi Djillali.

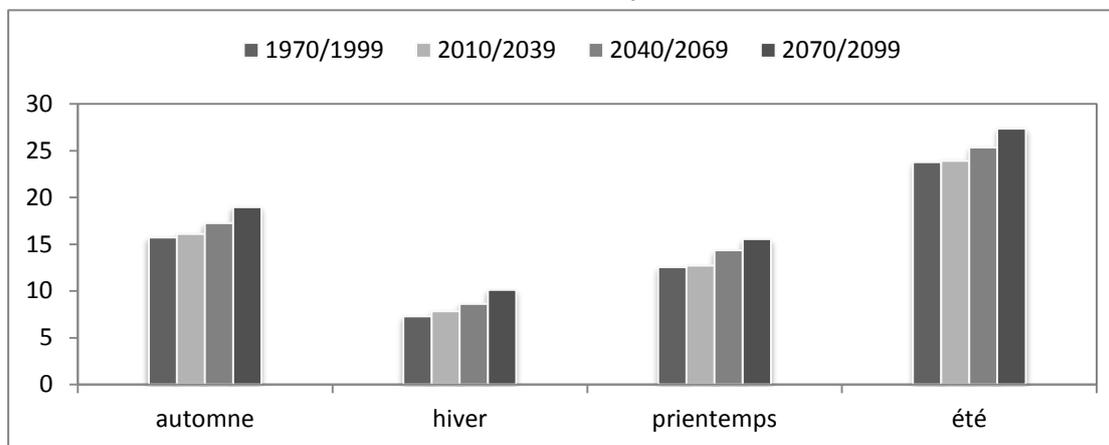


Figure III.30 : Evaluation des températures moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin d’Ammi Moussa.

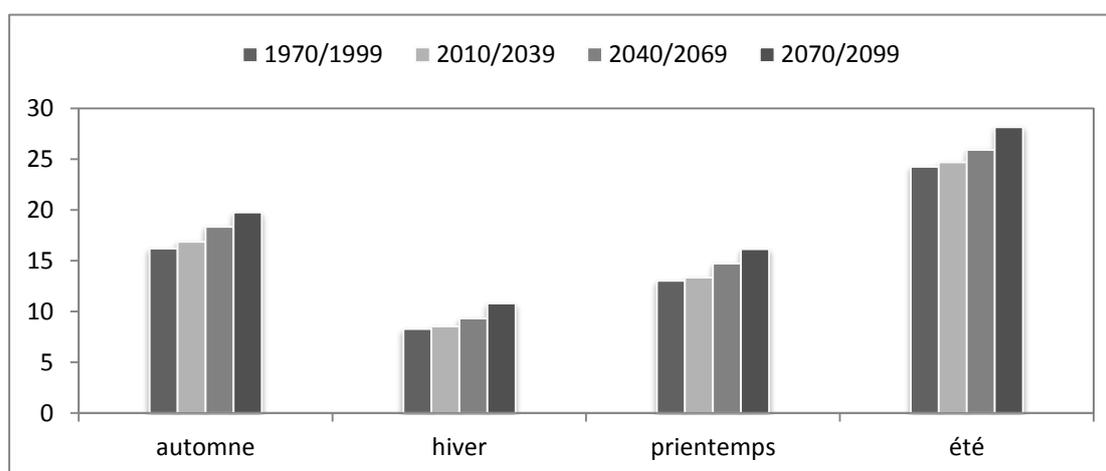


Figure III.31 : Evaluation des températures moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin d’Ouled Ben A.E.K.

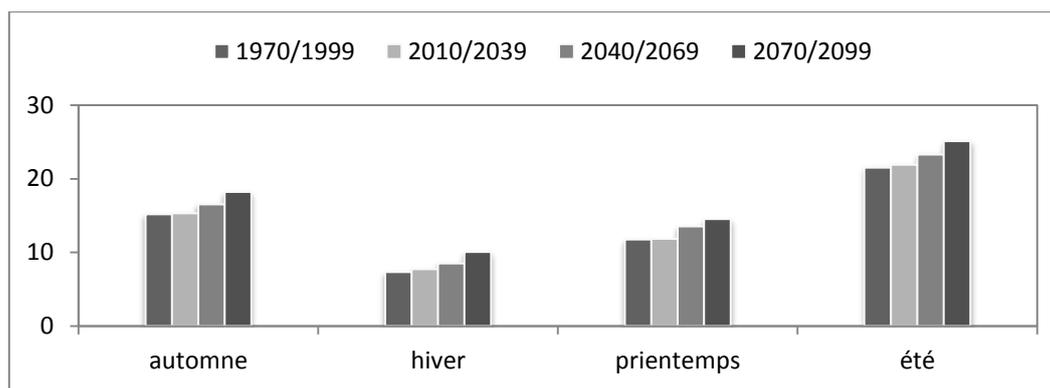


Figure III.32 : Evaluation des températures moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Chouly.

La projection du CNRM-CM5 pour les horizons futurs comparativement à la période de référence 1970-1999 donne pour tous les bassins du nord ouest de l'Algérie une augmentation de la température moyenne saisonnière pour les quatre saisons de l'année de 0.5 °C en moyenne pour le 1^{er} horizon et de 2 °C pour le 2^{ème} horizon, un réchauffement de 3 à 4 °C est prévu pour la fin de 21 siècle. Le tableau ci-dessous récapitule les écarts saisonniers en °C entre la moyenne de la période de référence et la moyenne de chaque horizon futur.

Tableau III.3 : Les écarts entre les moyens des horizons futurs et celle de la période de référence

Bassin	Horizon	automne	hiver	printemps	été
Sidi Bel Abbes	2010-2039	0.36	1.22	0.55	3.11
	2040-2069	2.24	2.45	3.20	5.26
	2070-2099	4.80	4.78	4.81	8.15
Beni Bahdel	2010-2039	0.22	0.10	0.58	0.34
	2040-2069	1.63	1.02	2.61	2.06
	2070-2099	3.63	2.77	3.87	4.32
Haciabia	2010-2039	-0.43	-0.58	-0.15	0.15
	2040-2069	0.80	0.22	1.63	1.64
	2070-2099	2.50	1.71	2.75	3.59
Sidi Djillali	2010-2039	0.54	0.03	0.44	0.51
	2040-2069	1.76	0.85	2.14	1.83
	2070-2099	3.52	2.43	3.24	3.84
Ammi Moussa	2010-2039	0.36	0.55	0.18	0.13
	2040-2069	1.52	1.33	1.83	1.58
	2070-2099	3.24	2.81	3.00	3.59
Ouled Ben A.E.K	2010-2039	0.65	0.25	0.32	0.42
	2040-2069	2.13	1.02	1.70	1.67
	2070-2099	3.54	2.52	3.12	3.89
Chouly	2010-2039	0.11	0.38	0.07	0.37
	2040-2069	1.33	1.19	1.76	1.76
	2070-2099	3.01	2.73	2.77	3.59

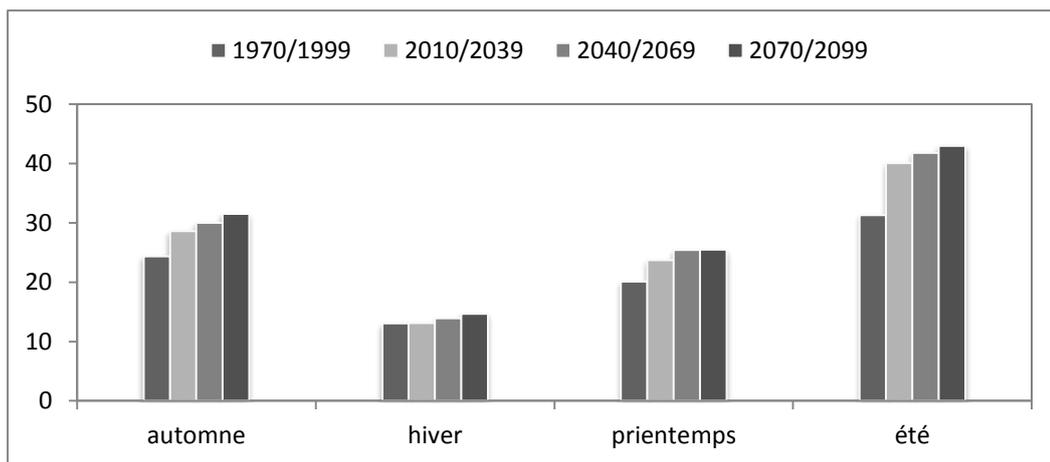


Figure III.33 : Evaluation des températures moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Sidi Bel Abbas.

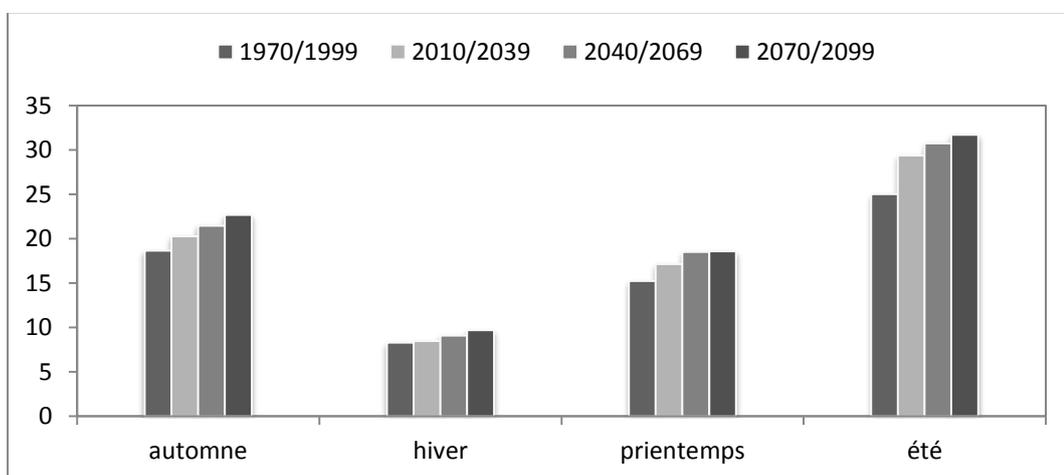


Figure III.34 : Evaluation des températures moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Beni Bahdel.

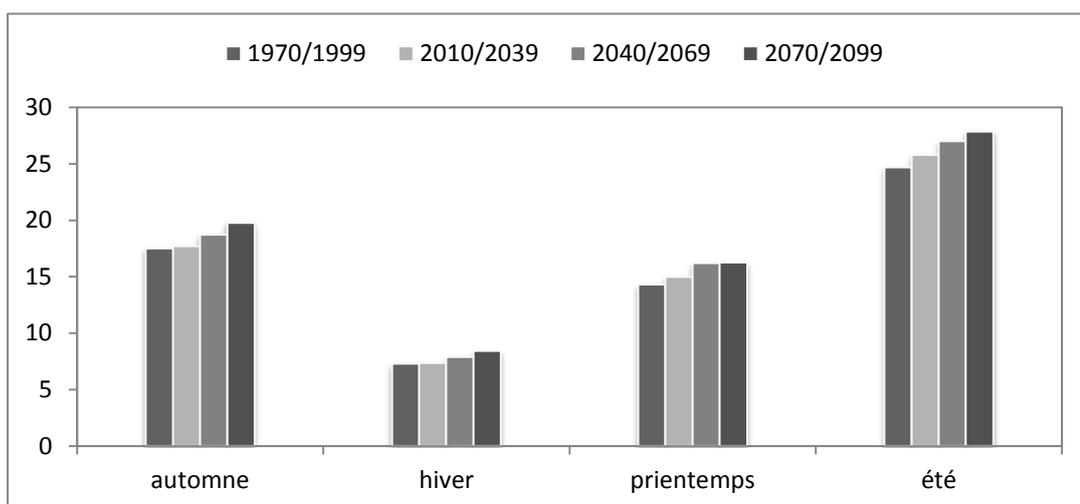


Figure III.35 : Evaluation des températures moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Haciaibia.

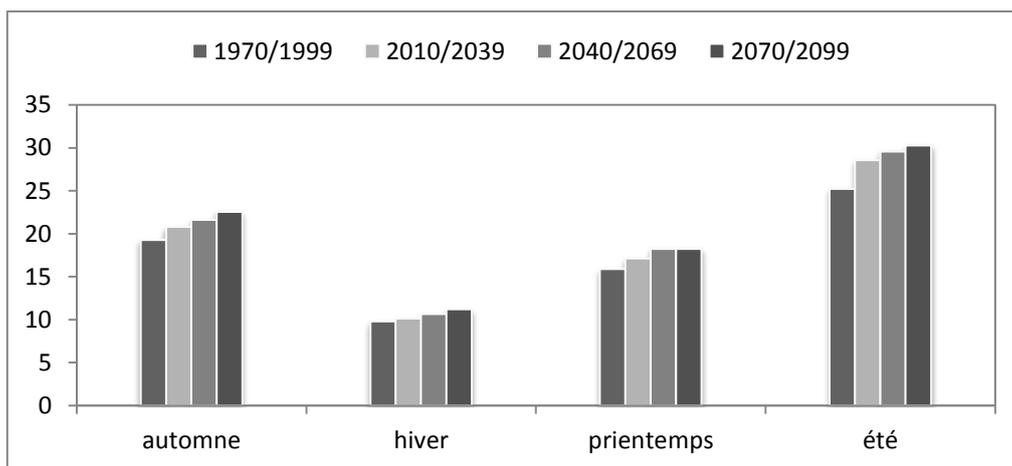


Figure III.36 : Evaluation des températures moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Sidi Djillali.

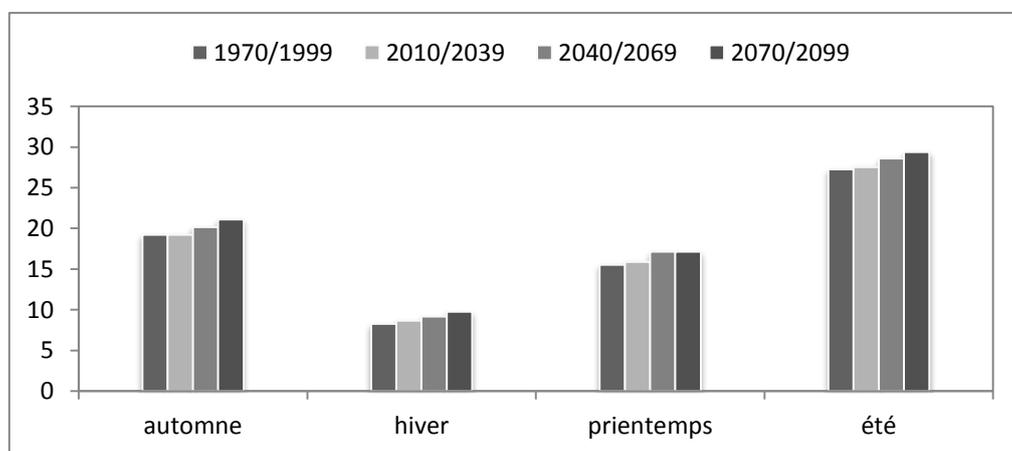


Figure III.37 : Evaluation des températures moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin d'Ammi Moussa.

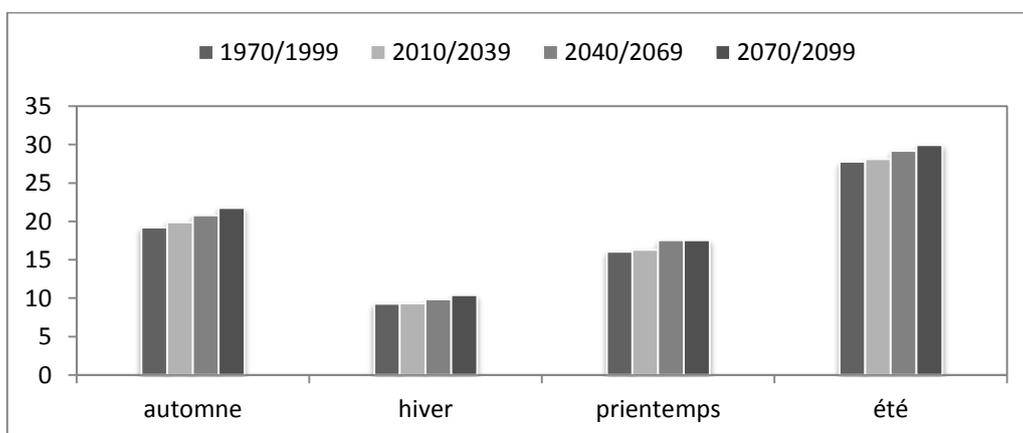


Figure III.38 : Evaluation des températures moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin d'Ouled Ben A.E.K.

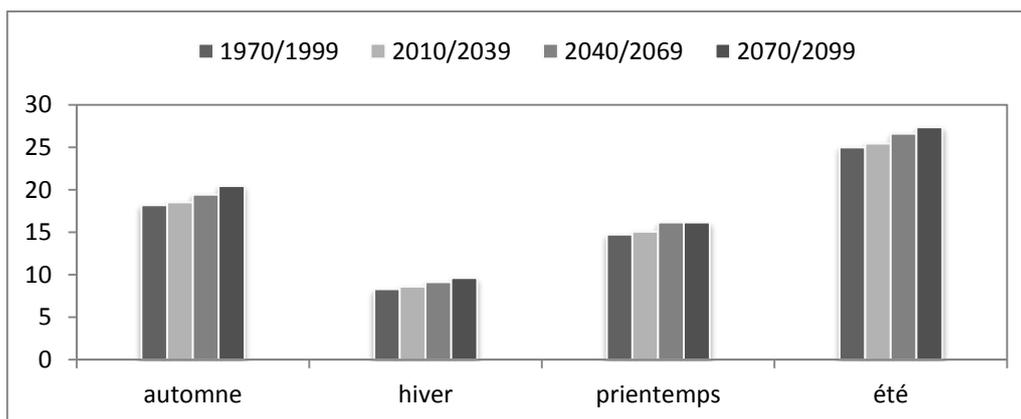


Figure III.39 : Evaluation des températures moyennes saisonnières projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec celle de la période de référence sur le bassin de Chouly.

Le scénario 4.5 de la projection du CNRM-CM5 pour les horizons futurs comparativement à la période de référence 1970-1999 donne pour tous les bassins du Nord-Ouest de l'Algérie une augmentation de la température moyenne saisonnière pour les quatre saisons de l'année de 1.3 °C en moyenne pour le 1^{er} horizon et de 2.3 °C pour le 2^{ème} horizon. Un réchauffement de 3 °C est prévu pour la fin de 21 siècle. Le tableau ci-dessous récapitule les écarts saisonniers en °C entre la moyenne de la période de référence et la moyenne de chaque horizon futur, pour chaque bassin.

Tableau III.4 : Les écarts entre les moyens des horizons futurs et celle de la période de référence

Bassin	Horizon	automne	hiver	printemps	été
Sidi Bel Abbès	2010-2039	4.24	0.05	3.62	8.74
	2040-2069	5.65	0.85	5.34	10.47
	2070-2099	7.18	1.63	5.38	11.66
Beni Bahdel	2010-2039	1.62	0.17	1.91	4.36
	2040-2069	2.79	0.79	3.29	5.74
	2070-2099	4.03	1.40	3.37	6.71
Haciabia	2010-2039	0.19	0.05	0.67	1.12
	2040-2069	1.23	0.59	1.89	2.32
	2070-2099	2.28	1.12	1.95	3.17
Sidi Djillali	2010-2039	1.52	0.33	1.23	3.36
	2040-2069	2.36	0.85	2.36	4.35
	2070-2099	3.29	1.41	2.35	5.07
Ammi Moussa	2010-2039	0.03	0.40	0.37	0.29
	2040-2069	0.95	0.90	1.61	1.35
	2070-2099	1.90	1.48	1.61	2.13
Ouled Ben A.E.K	2010-2039	0.67	0.03	0.27	0.36
	2040-2069	1.57	0.55	1.50	1.42
	2070-2099	2.53	1.12	1.51	2.16
Chouly	2010-2039	0.37	0.30	0.32	0.43
	2040-2069	1.27	0.81	1.42	1.59
	2070-2099	2.27	1.32	1.43	2.36

Conclusion

Suite à la perturbation des caractéristiques atmosphériques et océaniques sous l'action de l'effet de serre, aucune observation ou mesure a démontré un changement irréversible dans le système climatique. En revanche, plusieurs chercheurs et observateurs avancent l'existence d'un point où un changement brusque pourrait se produire une fois un certain seuil atteint. Sur cette hypothèse les modèles climatiques sont fondés.

L'analyse des changements projetés pour les précipitations par les deux scénarios RCP 8.5 et 4.5 issus du modèle CNRM-CM5 montre selon le RCP 8.5 une diminution des pluies d'hiver pour les trois horizons futurs, et une hausse va marquer les pluies de printemps. Par contre, le scénario 4.5 prévoit une diminution de la pluviométrie hivernale et printanière. D'autre part, la température continuera sa tendance à la hausse et s'accroîtra d'un horizon à l'autre.

Introduction

L'effet de changement climatique futur sur les pluies et les températures est bien évident selon les sorties des modèles climatiques. Plusieurs zones du monde vont connaître des bouleversements irréversibles, le régime climatique actuel sera perturbé. Concernant notre zone d'étude le modèle CNRM-CM5 prévoit une diminution des pluies de l'hiver et une augmentation des pluies du printemps, pour la saison d'été et celle d'automne le modèle surestime la pluviométrie et anticipe des quantités importantes. Dans un tel contexte, le devenir du régime hydrologique, totalement lié au régime pluviométrique sera marqué par des modifications qualitatives et des changements dans leur distribution temporelle.

Dans cette section on va modéliser les pluies futures issues du modèle CNRM-CM5 à l'aide du modèle GR2M calé et validé sur l'ensemble des bassins concerné par l'étude, afin d'analyser et d'évaluer les changements projetés pour les débits mensuels moyens futurs.

IV.1 Calcul de l'ETP moyenne mensuelle projetée pour le futur

L'évapotranspiration moyenne mensuelle est calculée par la méthode de Thornwaite (Annexe 1), en utilisant les températures moyennes mensuelles projetées pour le futur par le modèle CNRM-CM5.

Les graphes ci-dessous montrent l'évaluation de l'ETP moyenne mensuelle projetée par le CNRM-CM5 avec deux scénarios d'émission (8.5 et 4.5) et pour les trois horizons futurs avec l'ETP de la période de référence (1970-1999), pour les quatre saisons de l'année. Les graphes donnant l'évolution de l'ETP moyenne mensuelle sont donnés dans l'annexe (1).

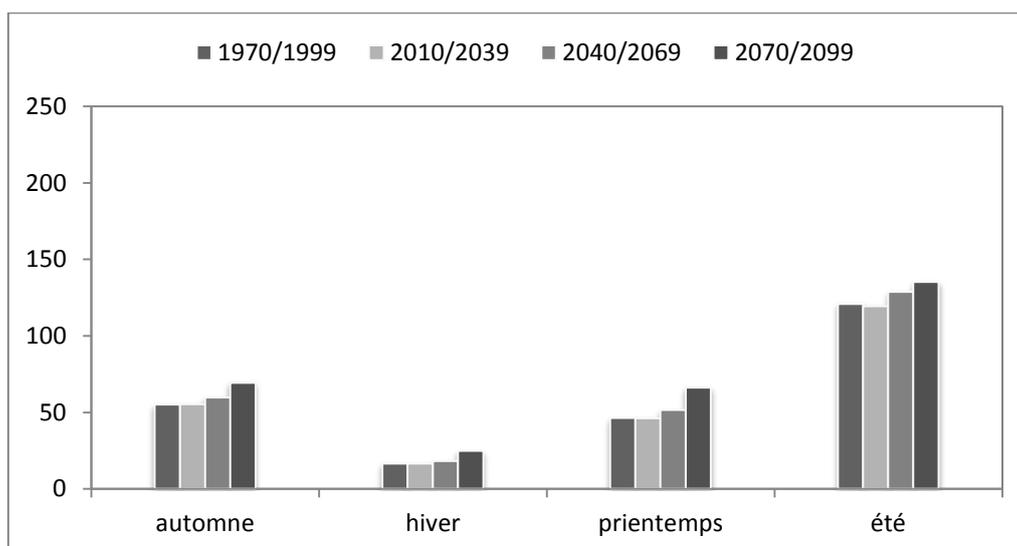


Figure IV.1 : évaluation de l'ETP moyenne saisonnière projetée par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celles de la période de référence (1970-1999) sur le bassin de Haciaibia.

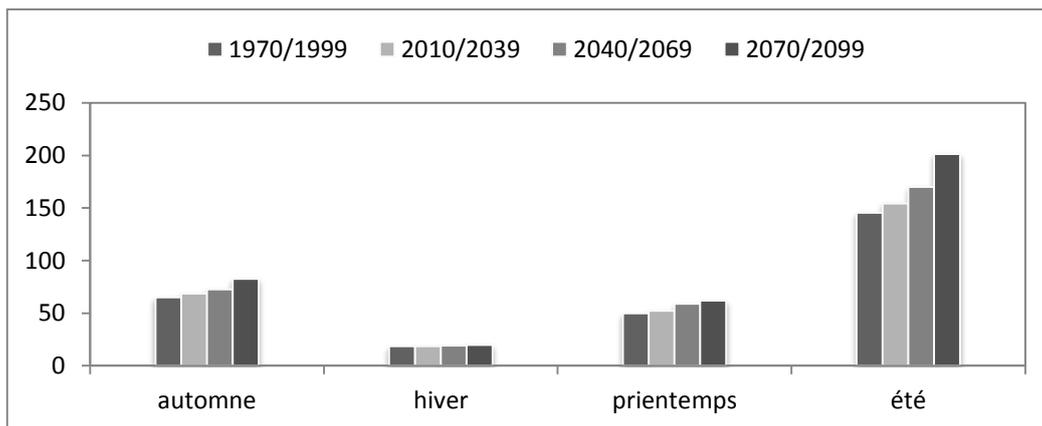


Figure IV.2 : évaluation de l'ETP moyenne saisonnière projetée par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celles de la période de référence (1970-1999) sur le bassin de Sidi Djillali.

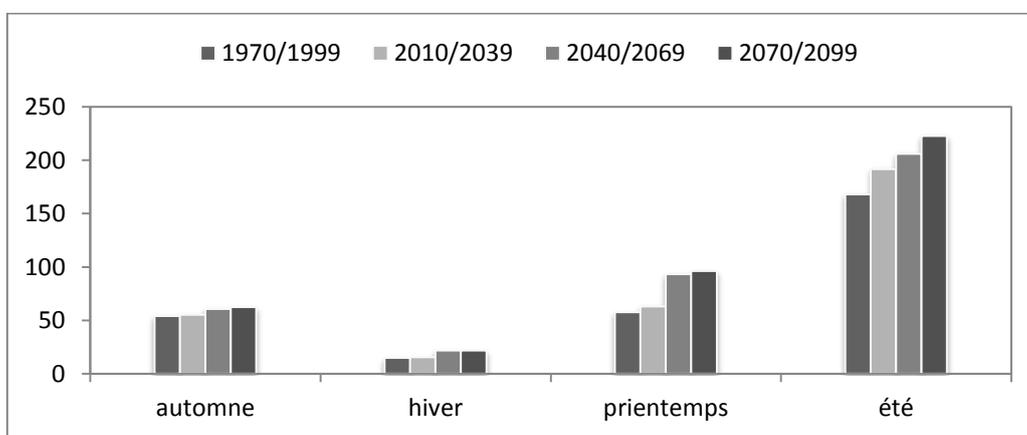


Figure IV.3 : évaluation de l'ETP moyenne saisonnière projetée par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec celles de la période de référence (1970-1999) sur le bassin d'Ammi Moussa.

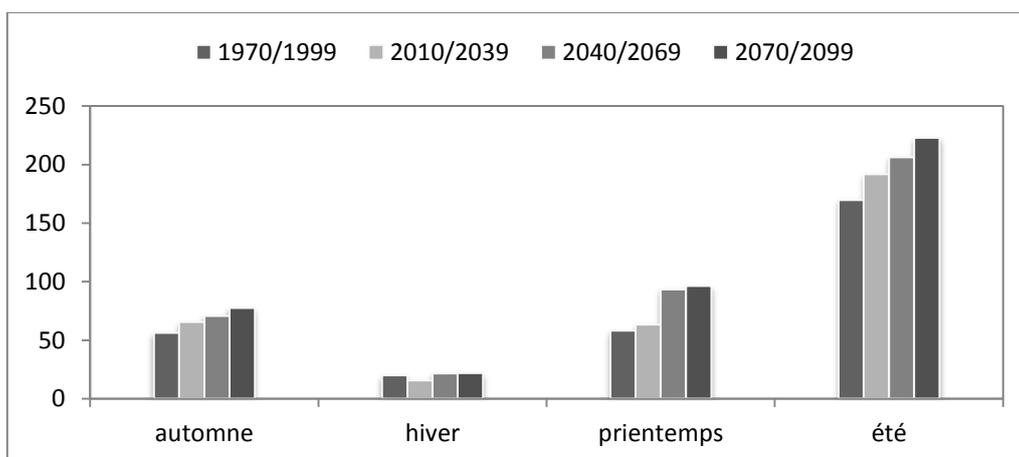


Figure IV.4 : évaluation de l'ETP moyenne saisonnière projetée par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec ceux de la période de référence (1970-1999) sur le bassin d'Ouled Ben A.E.K.

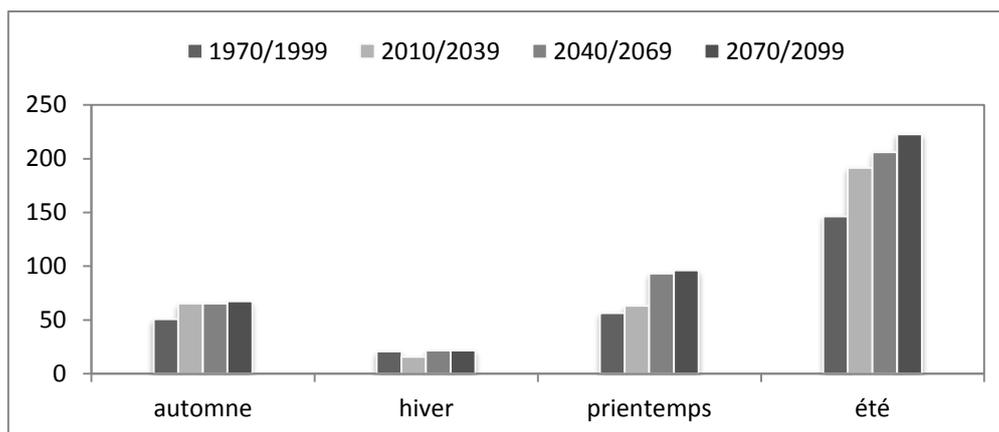


Figure IV.5 : évaluation de l'ETP moyenne saisonnière projetée par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec ceux de la période de référence (1970-1999) sur le bassin de Chouly.

L'ETP étroitement liée à la température connaîtra des augmentations pour toutes les saisons et pour tous les horizons futurs en comparant à celui de la période de référence (1970-1999).

Le tableau ci-dessous récapitule les écarts entre les moyennes saisonnières projetées pour les horizons futurs et celles de la période de référence.

Tableau IV.1 : changement futur pour l'ETP moyenne saisonnière sur les différents horizons

		Automne	Hiver	Printemps	été
Haciabia	210-2039	0.15	0.05	-0.44	-1.25
	2040-2069	8.31	10.79	11.33	6.44
	2070-2099	25.74	50.26	43.04	11.87
Sidi Djillali	210-2039	5.33	0.21	5.42	6.05
	2040-2069	11.50	4.03	18.68	16.77
	2070-2099	27.12	8.15	24.70	38.37
Ammi Moussa	210-2039	2.25	5.92	9.68	14.07
	2040-2069	12.27	46.77	62.07	22.71
	2070-2099	15.40	47.72	66.91	32.58
Ouled Ben AEK	210-2039	16.41	-21.34	8.99	13.05
	2040-2069	26.07	9.00	61.06	21.62
	2070-2099	38.00	9.71	65.87	31.39
Chouly	210-2039	28.66	-24.96	11.70	30.89
	2040-2069	28.66	3.99	65.06	40.81
	2070-2099	32.81	4.66	69.99	52.13

Le changement futur estimé pour l'ETP moyenne saisonnière on se basant sur les températures futures projetées par le modèle CNRM-CM5 montre une augmentation de 6 mm en moyenne pour les quatre saisons de l'année pour le 1^{er} horizon et une hausse de 25

mm en moyenne pour le 2^{ème} horizon, la fin de 21^{ème} siècle sera marquée par un accroissement de 35 mm.

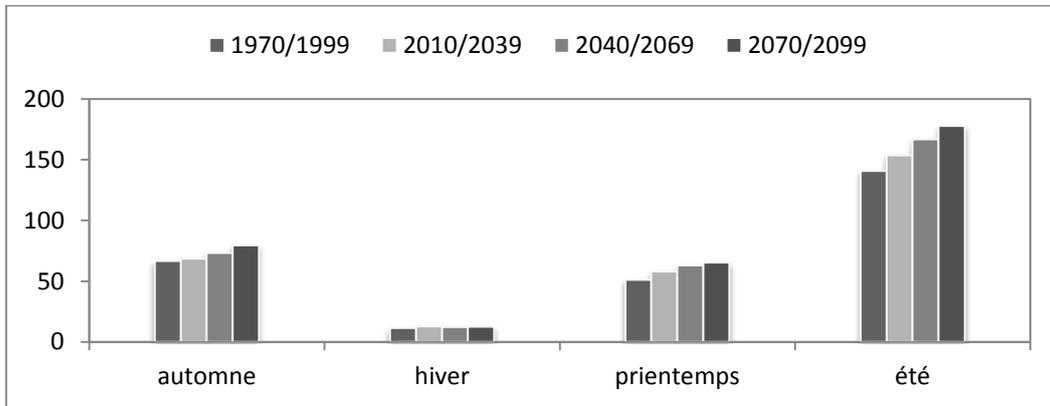


Figure IV.6 : évaluation de l'ETP moyenne saisonnière projetée par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec ceux de la période de référence (1970-1999) sur le bassin de Haciabia.

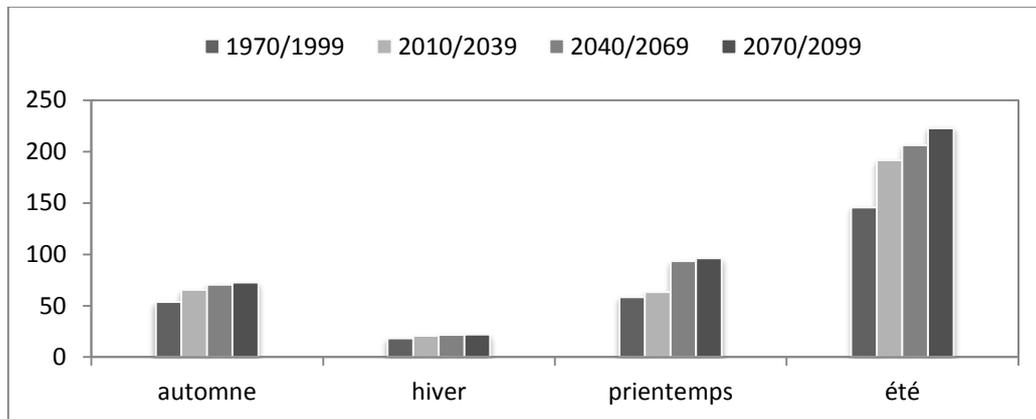


Figure IV.7 : évaluation de l'ETP moyenne saisonnière projetée par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec ceux de la période de référence (1970-1999) sur le bassin de Sidi Djillali.

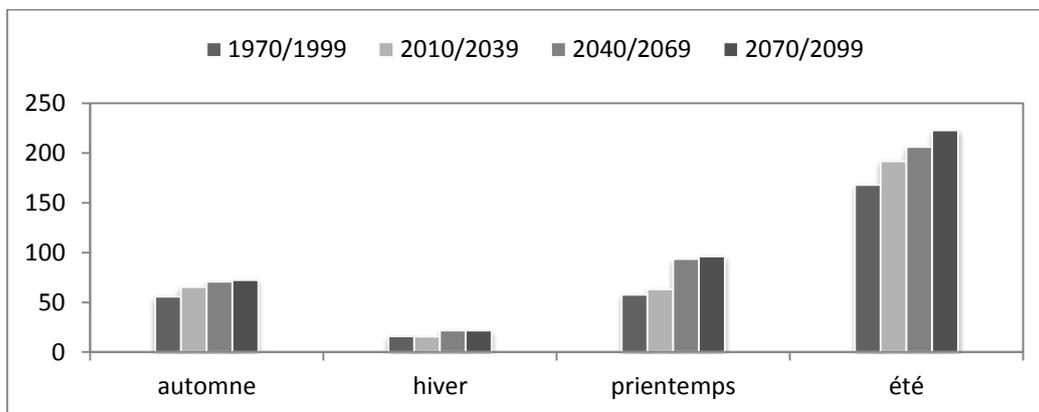


Figure IV.8 : évaluation de l'ETP moyenne saisonnière projetée par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec ceux de la période de référence (1970-1999) sur le bassin d'Ammi Moussa.

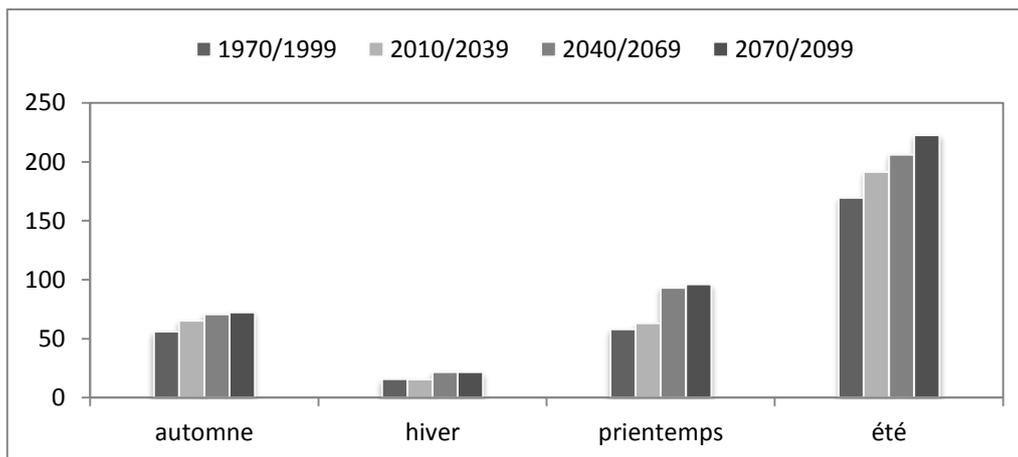


Figure IV.9 : évaluation de l’ETP moyenne saisonnière projetée par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec ceux de la période de référence (1970-1999) sur le bassin d’Ouled Ben A.E.K.

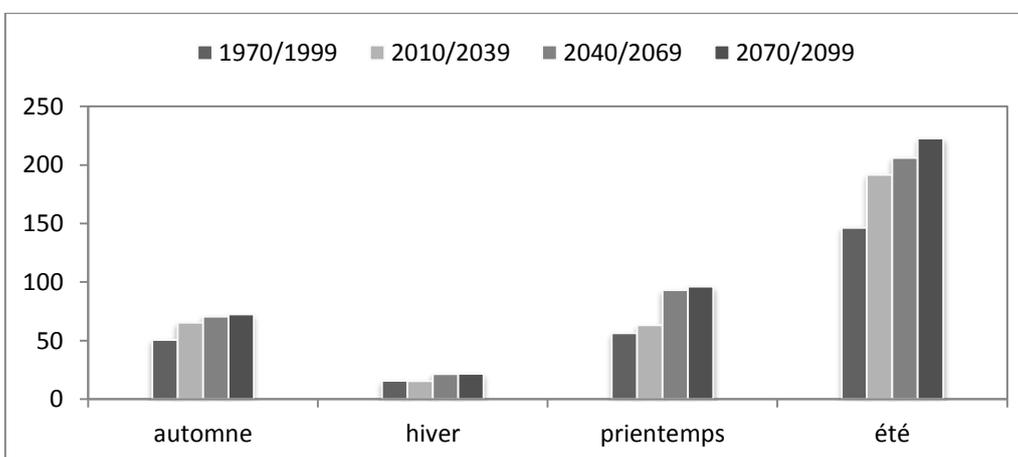


Figure IV.10 : évaluation de l’ETP moyenne saisonnière projetée par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec ceux de la période de référence (1970-1999) sur le bassin de Chouly.

De même, que le scénario 8.5 de la projection CNRM-CM5, le scénario 4.5 montre une hausse de l’ETP moyenne saisonnière pour tous les horizons futurs. L’ETP de la saison hivernale connaîtra une légère augmentation qui se stabilisera durant le 2ème horizon, la saison de l’été connaîtra la plus grande hausse pendant le 1er horizon qui continuera à progresser durant les deux derniers horizons. Concernant la saison d’automne et celle du printemps elles se caractérisent par une petite augmentation graduelle d’un horizon à l’autre.

Le tableau ci-dessous récapitule les écarts entre les moyennes saisonnières projetées pour les horizons futurs et celle de la période de référence.

Tableau IV.2 : changement futur pour l'ETP moyenne saisonnière sur les différents horizons

		Automne	Hiver	Printemps	été
Haciabia	2010-2039	2.86	10.68	13.03	9.15
	2040-2069	10.17	6.95	22.92	18.48
	2070-2099	19.67	10.30	27.33	26.20
Sidi Djillali	2010-2039	21.66	14.25	8.27	31.61
	2040-2069	31.38	19.92	59.99	41.58
	2070-2099	34.90	20.70	64.77	52.97
Ammi Moussa	2010-2039	17.08	-0.81	9.68	14.07
	2040-2069	26.80	37.45	62.07	22.71
	2070-2099	29.83	38.33	66.91	32.58
Ouled Ben AEK	2010-2039	16.41	-1.50	8.99	13.05
	2040-2069	26.07	36.49	61.06	21.62
	2070-2099	29.09	37.37	65.87	31.39
Chouly	2010-2039	28.66	-1.19	11.70	30.89
	2040-2069	39.33	36.92	65.06	40.81
	2070-2099	42.66	37.81	69.99	52.13

L'ETP moyenne saisonnière va augmenter en moyenne pour les quatre saisons de l'année pendant le 1er horizon de 13 mm, dont la plus grande hausse est enregistrée sur le bassin de Sidi Djillali en saison d'été, par contre une légère baisse de 1.5 mm se manifeste sur le bassin Ouled Ben A.E.K. Le 2ème horizon se caractérise par une hausse de 35 mm en moyenne pour toutes les saisons avec un maximum sur le bassin de Ammi Moussa pendant la saison du printemps estimé à 65.06 mm et un minimum de 6.95 mm sur le bassin Haciabia pendant l'hiver. Finalement, la fin de 21ème siècle sera marquée par une hausse de 40 mm en moyenne, et l'ETP atteint des valeurs maximales sur l'ensemble des bassins.

IV.2 La prévision et l'analyse des débits futurs

Après avoir caler et valider le modèle GR2M sur les huit bassins concernés par l'étude on a constaté que le modèle GR2M reproduit de très bons résultats sur le bassin d'Ammi Moussa et Ouled Ben A.E.K et des résultats moyennement bons sur les bassins de Haciabia, Chouly et Sidi Djillali. Par contre, sur le bassin de Sidi Bel Abbes et Beni Bahdel ainsi que celui d'Ain Hamara la reproduction du modèle de la réalité hydrologique caractérisant ces bassins est moins bonne. Donc, on a gardé juste les bassins où on a un bon calage et une bonne validation qui sont au nombre de cinq pour faire les prévisions futurs des débits en se basant sur les pluies futurs projetées par CNRM-CM5 avec les deux scénarios d'émissions 8.5 et 4.5, et l'ETP calculée pour le futur en utilisant les températures issues du modèle climatique CNRM-CM5.

L'évaluation des changements saisonniers futurs projetés pour les débits dans les différents bassins sont données dans les graphes ci-dessous. En revanche, la comparaison entre les débits moyens saisonniers des différents horizons à venir et ceux de la période de référence sont donnés dans l'annexe.

Note : la formulation utilisée dans la présente évaluation est donnée déjà dans le chapitre précédent (III.1).

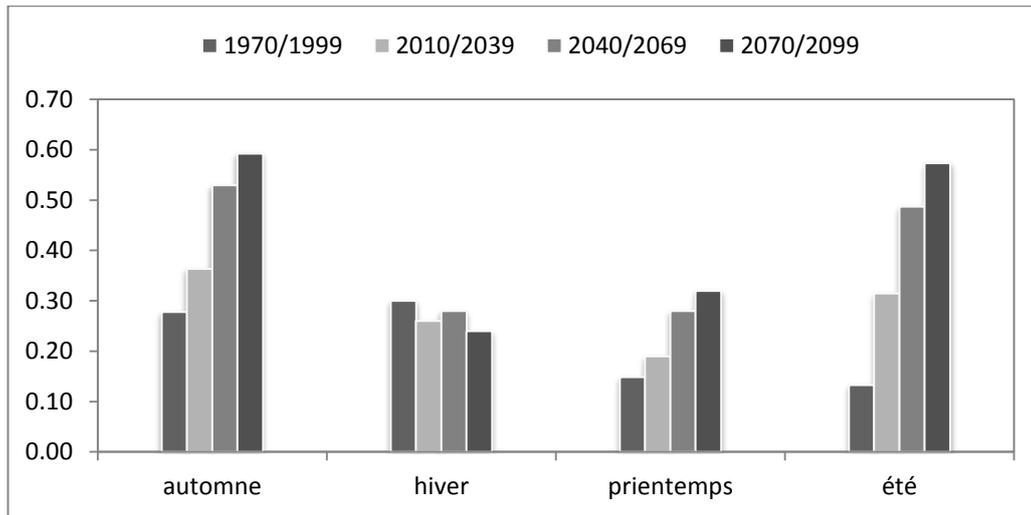


Figure IV.11 : évaluation des débits moyens saisonniers simulés par le modèle GR2M, en utilisant les pluies projetés par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec ceux de la période de référence (1970-1999) sur le bassin de Haciabia.

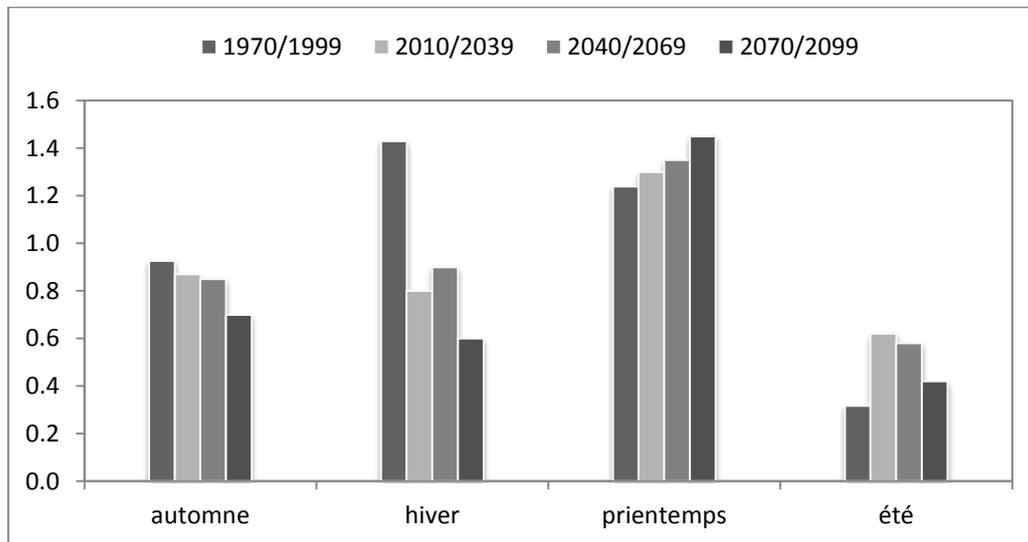


Figure IV.12 : évaluation des débits moyens saisonniers simulés par le modèle GR2M, en utilisant les pluies projetés par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec ceux de la période de référence (1970-1999) sur le bassin de Sidi Djillali.

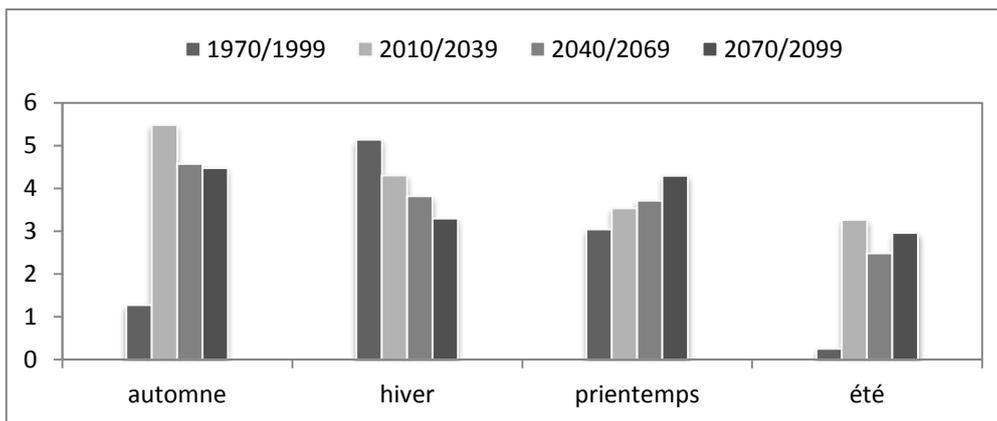


Figure IV.13 : évaluation des débits moyens saisonniers simulés par le modèle GR2M, en utilisant les pluies projetés par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec ceux de la période de référence (1970-1999) sur le bassin d’Ammi Moussa.

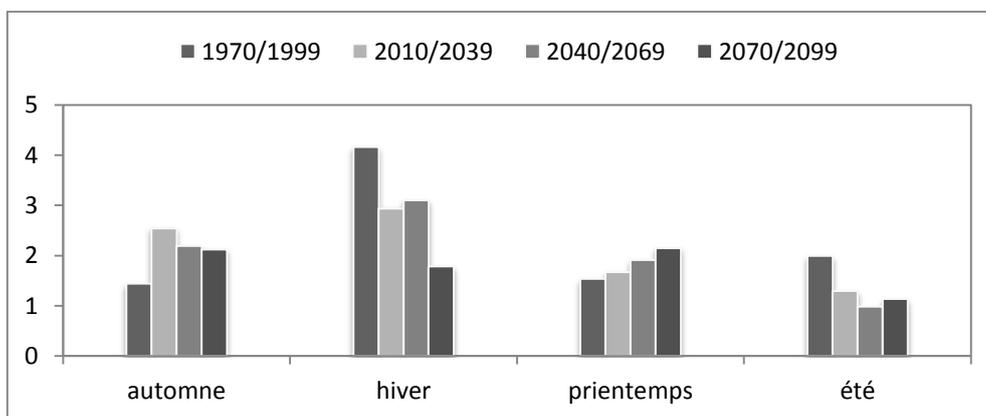


Figure IV.14 : évaluation des débits moyens saisonniers simulés par le modèle GR2M, en utilisant les pluies projetés par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec ce de la période de référence (1970-1999) sur le bassin d’Ouled Ben AEK.

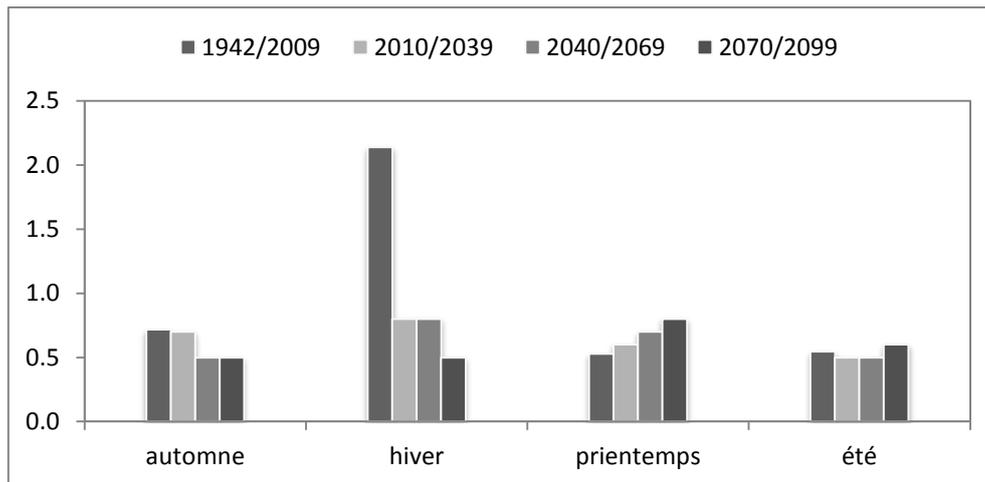


Figure IV.15 : évaluation des débits moyens saisonniers simulés par le modèle GR2M, en utilisant les pluies projetés par le modèle CNRM-CM5, scénario 8.5 pour les différents horizons futurs avec ce de la période de référence (1970-1999) sur le bassin de Chouly.

La comparaison des débits futurs et actuels (période de référence) simulés par le modèle GR2M montre comme résultats pour les différents bassins graphes V.11 à 15 une diminution notable des débits moyens d'été pour le 1er horizon, ensuite les débits vont augmenter légèrement durant le 2ème horizon, et la baisse reprend place à la fin de 21ème siècle. En revanche, les débits printaniers connaîtront une hausse progressive d'un horizon à l'autre pour tous les bassins. Les changements projetés dans les débits futurs pour la saison d'été et celle d'hiver dans les différents bassins donnent des évolutions parfois difficiles à analyser en tenant compte des changements projetés pour les températures et les précipitations, dont on constate des augmentations sur le bassin Haciaibia, Ouled Ben A.E.K et Ammi Moussa et une baisse sur le bassin de Sidi Djillali et Chouly. Comme les pluies et l'ETP augmentent considérablement sur l'ensemble des bassins durant les saisons d'été et d'automne, en ajoutant l'influence des débits de ses deux saisons inclus dans la période de référence qui sont très faible sur la fixation des paramètres du modèle rendent la réponse du modèle à une telle sollicitation entachée d'erreur et d'incertitude. De ce fait, les résultats donnés pour ces deux saisons ne traduisent la réalité hydrologique marquant la zone d'étude.

Le tableau ci-dessous récapitule les écarts entre les moyennes saisonnières projetées pour les horizons futurs et celle de la période de référence.

Tableau IV.3 : Les écarts entre la moyenne des débits saisonnière de la période de référence et celle des différents horizons futurs (en %)

		Automne	Hiver	Printemps	été
Haciabia	210-2039	30.95	-13.33	27.74	136.53
	2040-2069	90.59	-6.67	88.24	265.89
	2070-2099	113.28	-20.00	115.14	330.94
Sidi Djillali	210-2039	-6.13	-44.06	4.94	95.52
	2040-2069	-8.29	-37.06	8.98	82.91
	2070-2099	-24.47	-58.04	17.05	32.45
Ammi Moussa	210-2039	329.05	-16.15	16.09	1153.39
	2040-2069	257.62	-25.69	21.95	852.47
	2070-2099	250.11	-35.84	41.04	1035.50
Ouled Ben AEK	210-2039	76.52	-29.48	8.52	-35.21
	2040-2069	52.23	-25.56	24.14	-50.58
	2070-2099	47.11	-57.19	39.40	-43.08
Chouly	210-2039	-2.48	-62.62	13.21	-0.08
	2040-2069	-30.34	-62.62	32.08	-0.08
	2070-2099	-30.34	-76.64	50.94	0.10

En terme de différence entre la moyenne saisonnière de la période de référence et des différents horizons futurs, le tableau V.3 montre une diminution des débits moyens de l'hiver en moyenne de 33 % pour tous les bassins pour le 1er horizon, le bassin de Chouly enregistre la plus grande baisse estimée à 62.62 %, par contre la baisse la moins marquée se manifeste sur le bassin de Haciabia. La baisse se stabilise durant le 2ème horizon avec un taux de 31 % en moyenne, ensuite elle va s'accroître à la fin de 21ème siècle et touchera les 50 % en moyenne sur l'ensemble des bassins avec un maximum de 76.6 % sur le bassin de Chouly et un minimum de 20 % sur le bassin de Haciabia. Pendant, la saison de printemps les débits vont augmenter de 14 % pour le 1er horizon, de 35 % sur le 2ème horizon et une hausse de 50 % est prévue pour la fin de 21ème siècle. Le bassin de Haciabia est le plus touché par cette hausse avec un taux de 115 % pour le 3ème horizon. Comme c'est déjà noté les débits projetés pour les deux autres saisons présentent des écarts notables dépassant en moyenne les 200 % et les 70 % en respectivement en été et en hiver.

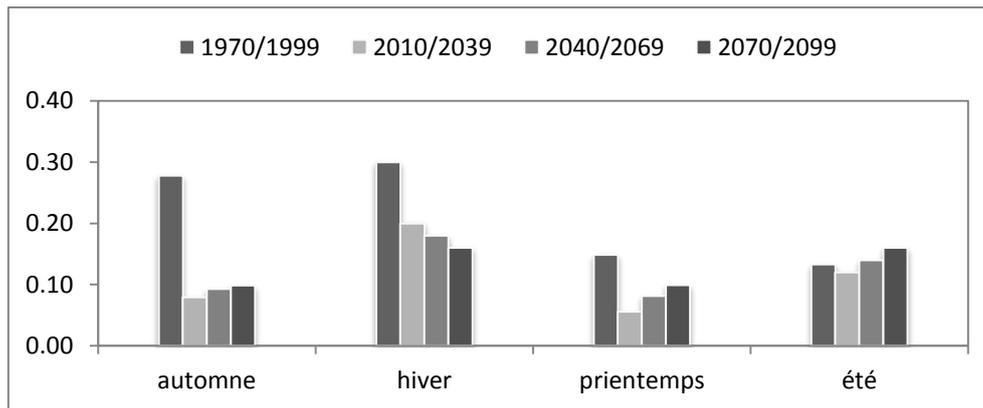


Figure IV.16 : évaluation des débits moyens saisonniers simulés par le modèle GR2M, en utilisant les pluies projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec ceux de la période de référence (1970-1999) sur le bassin de Haciaibia.

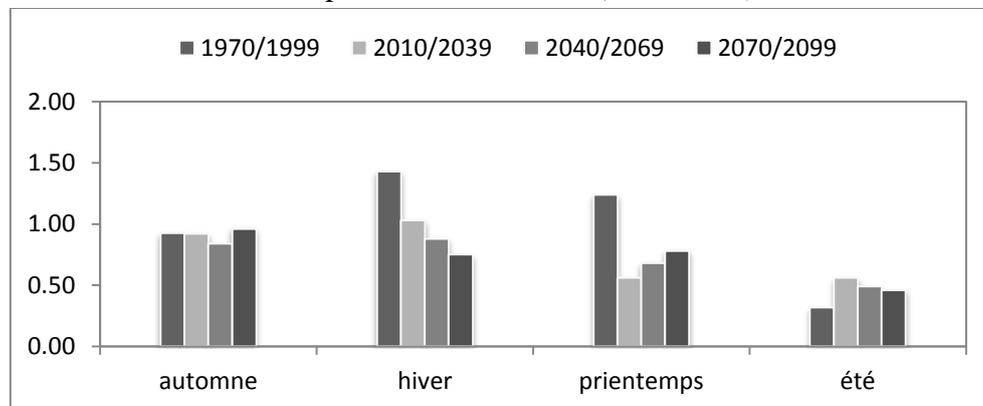


Figure IV.17 : évaluation des débits moyens saisonniers simulés par le modèle GR2M, en utilisant les pluies projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec ceux de la période de référence (1970-1999) sur le bassin de Sidi Djillali.

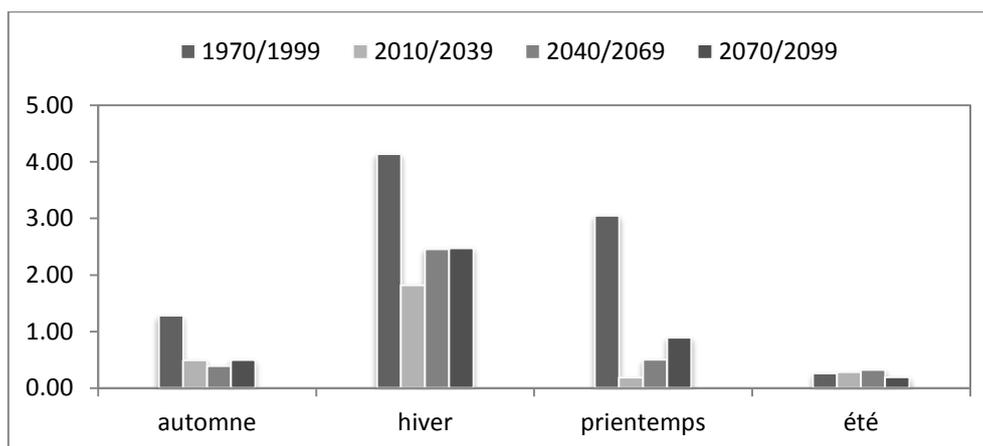


Figure IV.18 : évaluation des débits moyens saisonniers simulés par le modèle GR2M, en utilisant les pluies projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec ceux de la période de référence (1970-1999) sur le bassin d'Ammi Moussa.

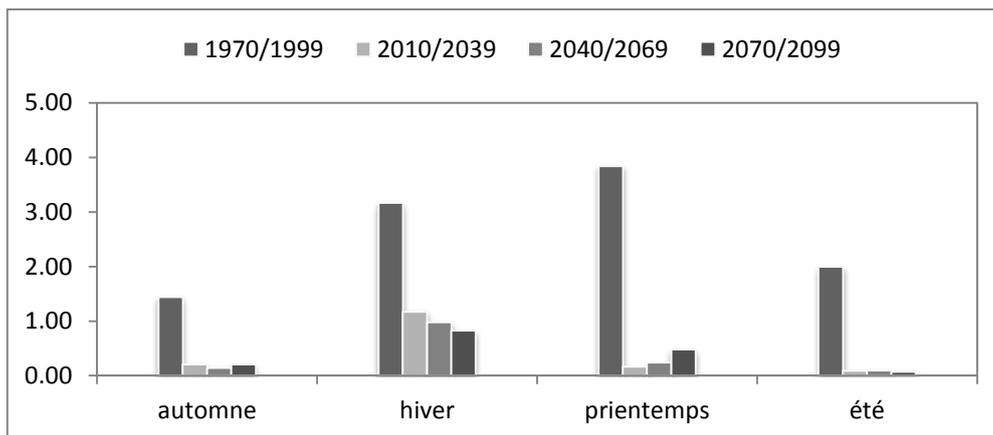


Figure IV.19 : évaluation des débits moyens saisonniers simulés par le modèle GR2M, en utilisant les pluies projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec ceux de la période de référence (1970-1999) sur le bassin d'Ouled Ben A.E.K.

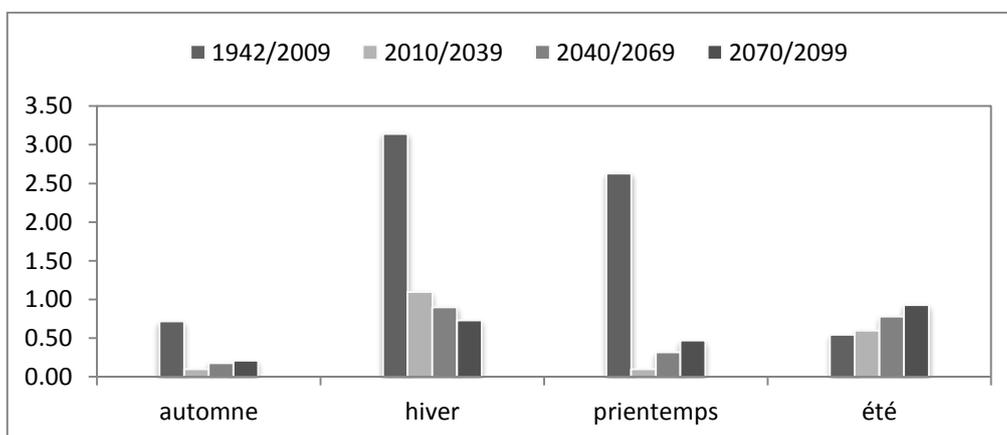


Figure IV.20 : évaluation des débits moyens saisonniers simulés par le modèle GR2M, en utilisant les pluies projetées par le modèle CNRM-CM5, scénario 4.5 pour les différents horizons futurs avec ceux de la période de référence (1970-1999) sur le bassin de Chouly.

Selon les graphes V.16 à 20 montrant l'évaluation des moyens saisonniers des débits futurs avec la moyenne de la période de référence (1970-1999) on constate une diminution considérable des débits de l'hiver et ceux de printemps pour le 1^{er} horizon, la baisse continuera à s'accroître en hiver dans tous les bassins, sauf le bassin d'Ammi Moussa qui fait l'exception avec une légère augmentation durant le 2^{ème} et le 3^{ème} horizon en comparant à l'horizon précédent. Pour le 1^{er} horizon de la saison printanière le modèle prévoit une quasi disparition des débits sur l'ensemble des bassins et particulièrement sur le bassin d'Ammi Moussa, Chouly et Ouled Ben AEK, ensuite les débits vont connaître une petite augmentation sur les deux horizons restants, mais cette hausse reste faible en comparant à la moyenne saisonnière de la période de référence. Concernant la saison d'été et celle d'automne elles seront marquées par des baisses sur certains bassins et des hausses sur d'autres.

Le tableau ci-dessous récapitule les écarts entre les moyennes saisonnières projetées pour les horizons futurs et celle de la période de référence.

Tableau IV.4 : Les écarts entre la moyenne des débits saisonniers de la période de référence et celle des différents horizons futurs (en %)

		Automne	Hiver	Printemps	été
Haciabia	2010-2039	-71.44	-33.33	-62.33	-9.84
	2040-2069	-66.65	-40.00	-45.45	5.18
	2070-2099	-64.60	-46.67	-33.44	20.21
Sidi Djillali	2010-2039	-0.74	-27.97	-54.80	76.60
	2040-2069	-9.37	-38.46	-45.11	54.53
	2070-2099	3.58	-47.55	-37.04	45.07
Ammi Moussa	2010-2039	-61.74	-56.12	-93.95	6.62
	2040-2069	-69.86	-40.71	-83.59	22.34
	2070-2099	-61.16	-40.23	-70.83	-26.96
Ouled Ben AEK	210-2039	-85.54	-62.90	-95.72	-95.32
	2040-2069	-90.02	-69.04	-93.71	-95.11
	2070-2099	-85.45	-73.82	-87.50	-96.26
Chouly	210-2039	-86.07	-64.99	-96.20	9.89
	2040-2069	-74.92	-71.36	-87.83	42.86
	2070-2099	-70.74	-76.77	-82.13	70.33

Les écarts entre la moyenne des différents horizons futurs et celle de la période de référence montrent une grande baisse des débits d'hiver pour le 1^{er} horizon et pour tous les bassins, le taux de la baisse est estimé en moyenne à 50 %, dont le maximum se manifeste sur le bassin de Chouly avec 65 % et un minimum de 28 % est enregistré dans le bassin de Sidi Djillali. De même, dans le 2^{ème} horizon la baisse augmente et atteint les 52 % en moyenne sur tous les bassins, le bassin de Chouly sera marqué par la plus grande hausse de 76.77 %, et le bassin de Sidi Djillali connaîtra la plus petite baisse avec un taux de 38.46 %. Pour la fin de 21^{ème} siècle la baisse s'aggrave et touchera les 60 % en moyenne sur l'ensemble des bassins. Une hausse de 77 % et 40 % est constatée respectivement sur le bassin de Chouly et Ammi Moussa. Le 1^{er} horizon de la saison de printemps sera marqué par une baisse notable estimée en moyenne à 80%, quoiqu'elle dépasse les 90 % sur le bassin de Chouly et varie autour de 37 % sur le bassin de Sidi Djillali. Pour le 2^{ème} et le 3^{ème} horizon la baisse diminue légèrement, mais elle reste toujours considérable en comparant à la moyenne de la période de référence dont elle varie entre 50 et 60 % en moyenne sur l'ensemble des bassins. Concernant la saison d'été et celle d'automne le taux de diminution ou d'augmentation varie d'un bassin à l'autre, la baisse est estimée à 60 % en moyenne pour l'automne. Par contre le taux d'augmentation est de 6% en moyenne pour l'été.

IV.2.1 Commentaire

L'évaluation des débits estimés par le modèle GR2M calé et validé sur l'ensemble des bassins concernés par l'étude, en utilisant les précipitations de la projection CNRM-CM5 avec deux scénarios d'émissions RCP 8.5 et 4.5 ainsi que l'ETP estimée pour le futur à l'aide de la formule de Thornwaite en se basant sur les températures issues de la même projection climatique, montre une diminution notable des débits hivernaux avec un taux de 38 % et 53 % respectivement pour le scénario RCP 8.5 et 4.5. La saison de printemps sera marquée par une régression brusque pour le 1^{er} horizon, elle est estimée en moyenne à 80 % selon le scénario 4.5. Par contre, le scénario 8.5 prévoit une augmentation de 35 %. Pour l'été et l'automne l'évolution des débits est irrégulière d'un bassin à l'autre pour le même scénario. Dont, on constate des diminutions sur quelques bassins et des augmentations sur d'autres, malgré la hausse dans la pluviométrie caractérisant l'ensemble des bassins et l'augmentation de l'ETP. En rappelant que le régime hydrologique est étroitement lié au régime pluviométrique au sein de la zone d'étude ce qui nous ramène à conclure que les débits projetés pour la saison d'été et celle d'automne ne représentent pas vraiment la réalité hydrologique des bassins.

Conclusion

L'évaluation du changement futur projeté dans les différents bassins pour l'ETP et le débit montre une augmentation graduelle de l'ETP pour tous les bassins et une baisse des débits hivernaux pour les deux scénarios utilisés dans la projection. Par contre ceux du printemps vont connaître une augmentation selon le scénario RCP 8.5 et le scénario 4.5 prévoit une diminution. Cependant, les débits de l'été et d'automne sont surestimés sur tous les bassins.

Conclusion générale

Ces dernières années, une des questions sensibles aux cœurs des grands débats mondiaux concerne l'impact de changement climatique sur l'hydrosystème en général et sur les ressources en eau en particulier. L'Algérie située au bord de la méditerranée, une zone fragilisée par l'effet de l'action anthropique sur l'environnement est décrite comme la plus vulnérable à ce bouleversement. L'implication de ce changement sur les ressources en eau est particulièrement forte, avec des répercussions qui touchent de nombreux secteurs d'activités. Un tel contexte nécessite l'étude de l'impact de ce changement sur les ressources en eau dans le but d'en élaborer des stratégies permettant leur l'estimation et leur gestion durable. Dans cette optique s'inscrit la présente étude qui s'intéresse au devenir de la ressource en eau dans les bassins de Chéllif, Tafna et la Macta situés respectivement dans le Centre et l'Ouest de l'Algérie.

Afin de bien mener cette étude, une banque de donnée constituée des pluies et débits mesurées aux différentes stations situées dans l'air d'étude et les pluies spatialisée du SIEREM, ainsi les températures du CRU. Les différentes données sont complétées, analysées et critiquées dans le but d'avoir les séries les plus complètes possibles tout en garantissant une bonne qualité.

De même, une étude comparative entre les pluies provenant de la banque de données du SIEREM et celles mesurées au niveau des stations pluviométriques a révélé une interprétation régionale assez acceptable de la distribution des pluies, particulièrement dans les bassins à grande surface.

L'étude de l'évolution des précipitations passées a montré une tendance à la baisse de celles-ci à partir de la décennie 80. Cette baisse estimée en moyenne à 30% par rapport à la période précédente, sur l'ensemble des bassins. Suite à la diminution des pluies, les débits des cours d'eau ont connus une réduction notable estimée en moyenne à 70%. En outre, les températures manifestent une hausse progressive d'une décennie à l'autre. De même, l'ETP étroitement liée à la température est marquée par une tendance semblable à celle des températures. Cette situation a engendré une sécheresse d'une grande ampleur et d'une intensité sans précédent, et a augmenté la pression sur les ressources en eau.

Le modèle hydrologique GR2M a été confronté à la réalité hydrologique des cours d'eau concernés par l'étude. Les valeurs attribuées au paramètre de Nash traduisant une bonne qualité du modèle à reproduire les débits observés sur les bassins d'Ouled Ben Abdelkader et Ammi Moussa, et une qualité moyenne sur les bassins de Haciabia, Chouly et Sidi Djillali.

Conclusion générale

Par contre, les valeurs du Nash dans les bassins de Beni Bahdel et Sidi Bel Abbas sont inférieures à 50 %, ce qui indique une mauvaise simulation des débits observés.

Dans le but d'évaluer les changements projetés pour les précipitations et les températures par les scénarios issus du modèle CNRM-CM5 tourné à haute résolution sur l'Algérie (40 à 50 Km), on a procédé à une comparaison de la pluviométrie moyenne saisonnière et mensuelle de chaque horizon futur avec celle de la période de référence. Les résultats constatés et obtenus après le calcul ont montrés selon le scénario RCP8.5, une diminution des pluies d'hiver de 38 % en moyenne pour le 1^{er} horizon et de 31 % pendant le 2^{ème} horizon, et pour la fin de 21^{ème} siècle une baisse de 40% a été constatée. En outre, les pluies de printemps vont augmenter de 17 % en moyenne sur les trois horizons futurs. Par contre, le scénario RCP4.5 prévoit une baisse des pluies d'hiver et celles de printemps de 27%, 65 % respectivement. Les températures vont continuer leurs hausses dans les années avenir, avec de 2°C en moyenne en chaque horizon.

L'évaluation de l'impact de changement climatique sur les bassins de Haciabia, Sidi Djillali, Ammi Moussa, Ouled Ben AEK et Chouly est faite à l'aide du modèle hydrologique GR2M en utilisant les données de scénarios climatiques issues du modèle CNRM-CM5.

Pour les horizons futurs les débits hivernaux ont accusé une nette tendance à la baisse engendrée principalement à la diminution des pluies et l'augmentation de l'ETP, selon les deux scénarios RCP 8.5 et 4.5. Par contre, ceux du printemps vont augmenter selon RCP 8.5 et connaîtront une baisse selon RCP 4.5. En termes d'écart observés, le scénario RCP 8.5 prévoit une diminution des débits de l'hiver de 33 % en moyenne sur l'ensemble des bassins à l'horizon 2039, de 31 % pour le 2^{ème} horizon. Une baisse de 50 % est prévue pour la fin du 21^{ème} siècle. Le scénario RCP4.5 envisage une diminution de 50 à 60 % sur chaque horizon. Par ailleurs, la baisse est estimée à 80% pour les débits de printemps selon le scénario RCP4.5. Par contre, le scénario RCP8.5 pour la même saison, prévoit une augmentation de 25%.

L'utilisation d'un seul modèle hydrologique pour la prévision des débits sur plusieurs bassins, a montré la limite de ce dernier à reproduire la réalité hydrologique sur certains bassins. Il serait donc intéressant de procéder avec une approche multi-modèle, afin de sélectionner le plus adéquat et de minimiser les incertitudes liées à la prévision.

La comparaison des données utilisées dans le réanalyse pour initier le modèle climatique avec celles des séries de mesure constituant la période de référence, nous permet d'homogénéiser les données de bases et d'améliore la qualité des projections sur la zone

Conclusion générale

d'étude concernée. De même, l'analyse de la relation entre les différents termes de bilan hydrique nous permet de vérifier l'équilibre de ce dernier en chaque moment.

Chaque projection climatique prévoit un certain changement dans les facteurs climatiques à venir en se basant sur les connaissances actuelles des systèmes climatiques et des scénarios futurs possibles d'émissions des gaz à effet de serre. Malgré que les scénarios pris en compte sont communs, la description des processus constituant la circulation générale et le système climatique diffère d'un modèle à l'autre. A ce stade, il sera intéressant de prendre plusieurs modèles afin de cerner tous les changements futurs possibles.

Références bibliographiques

Meddi, H., & Meddi, M. (2007). Variabilité spatiale et temporelle des précipitations du Nord-Ouest de l'Algérie. *Géographia technica*, 2, 49-55.

Aziz Hebal et al., (2012). Etude de la variabilité spatiotemporelle des pluies dans le Nord Algérien. ResearchGate, 277077455.

Meddi, M., & Hubert, Pierre (2003). Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du Nord-Ouest de l'Algérie. IAHS publication, 229-235.

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.

Matari, A., & Douguedroit, A. (1995). Chronologie des précipitations et des sécheresses dans l'ouest Algérien. Les stratégies pour le contrôle des sécheresses, 9-9.

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. (2009). Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie. *Science et changements planétaires/Sècheresse*, 20(1), 57-65.

Taibi, Sabrina, Meddi, Mohamed., Souag, Doudja, & Mahé, G. (2013). Évolution et régionalisation des précipitations au nord de l'Algérie (1936–2009). *Climate and land surface changes in hydrology*, IAHS Publ, 359, 191-197.

A. Matari. (2000). Sècheresse en Algérie.

Ghenim, A.N., Megnounif, A., Seddini, A., & Terfous, A. (2010). Fluctuations hydro pluviométriques du bassin-versant de l'oued Tafna à Béni Bahdel (Nord-Ouest algérien). *Science et changements planétaires/Sècheresse*, 21(2), 115-120.

Megnounif, A., Terfous, A., Ghenaim, A., & Poulet, J. B. (2007). Processus clefs influençant l'érosion et le transport des sédiments dans une région semi-aride Méditerranéenne: le bassin versant de la Haute Tafna, Algérie. *Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques*, 52(6), 1271-1284.

Singla, Stephanie, Mahé, G., Dieulin, C., Driouech, Fatima, Milano, Marianne, El Guelai, F. Z., & Ardoin-Bardin, S. (2010). Evolution des relations pluie-débit sur des bassins versants du Maroc. *Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources*, 679-687.

Références bibliographiques

- Kingumbi, A., Bargaoui, Z., & Hubert, P. (2005).** Investigation of the rainfall variability in central Tunisia/Investigations sur la variabilité pluviométrique en Tunisie centrale. *Hydrological sciences journal*, 50(3).
- Touazi, M., Bhiry, N., Laborde, J. P., & Achour, F. (2011).** Régionalisation des débits moyens mensuels en Algérie du nord. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 24(2), 177-191.
- Hallouz, F., Meddi, M., & Mahé, G. (2012).** Relation débit liquide-transport de matières en suspension dans le bassin de l'Oued Mina en Algérie.
- MEDDI, M., & BOUCEFIANE, A. (2009).** Impacte des changements climatique sur le renouvellement des ressources en eau souterraines: Cas du Bassin Hydrographique Chélif-Zahrez. *IAHS-AISH publication*, 135-142.
- Hallouz, F., Meddi, M., & Mahe, G. (2013).** Modification du régime hydro climatique dans le bassin de l'oued mina (nord-ouest d'Algérie. *Revue des sciences de l'eau*, 26(1), 33.
- Meddi, M., Talia, A., & Martin, C. (2009).** Évolution récente des conditions climatiques et des écoulements sur le bassin versant de la Macta (Nord-Ouest de l'Algérie). *Physio-Géo. Géographie, physique, et environnement, (Volume 3)*, 61-84.
- Meddi, M., & Hubert, Pierre. (2003).** Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du Nord-Ouest de l'Algérie. *IAHS publication*, 229-235.
- Philippe, J, 2007.** Pratiques agricoles, gestion des ressources naturelles et changement climatique au Maghreb et en Afrique subsaharienne. Conférence internationale « Solidarité internationale pour une stratégie contre le changement climatique en Afrique.
- Fernini-Haffif, A., & Berezowska–Azzag, P. E.** université de Bretagne occidentale Changements climatique, aménagement de l'espace et transition urbanistique Brest, 5–6 octobre 2015.
- Mahi Tani, W. (2011).** Aménagement intègres des bassins versants et développement durable dans la région de Maghnia cas du barrage hammam Boughrara Tlemcen (Algérie).
- Chebil, A., Mtimet, N., & Tizaoui, H. (2011).** Impact du changement climatique sur la productivité des cultures céréalières dans la région de Béja (Tunisie). *African Journal of Agricultural and Resource Economics*, 6(2), 144-54.

Références bibliographiques

- Sebbar, A., Hsaine, M., Fougrach, H., & Badri, W. (2012).** Étude des variations climatiques de la région centre du Maroc. Les climats régionaux: observation et modélisation, 709-714.
- Driouech, F., Mahé, G., Deque, M., Dieulin, C., EL Heirech, Tarik., & Milan02, Marianne. (2010).** Evaluation d'impacts potentiels de changements climatiques sur l'hydrologie du bassin versant de la Moulouya all Maroc.
- Ardoin-Bardin, S., Dezetter, A., Servat, E., Mahé, G., Paturel, J. E., Dieulin, C. & Casenave, L. (2005)** Évaluation des impacts du changement climatique sur les ressources en eau d'Afrique de l'Ouest et Centrale. (Proc. Symp. S6 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguacu, Brazil, April 2005). IAHS Publ. 296. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Hogrefe, C., Ku, J. Y., Civerolo, K., Lynn, B., Werth, D., Avissar, R., ... & Gaffin, S. (2004).** Modeling the impact of global climate and regional land use change on regional climate and air quality over the northeastern United States. In Air Pollution Modeling and Its Application XVI (pp. 135-144). Springer US.
- Musy, A., & Higy, C. (2004).** Hydrologie: Une science de la nature (Vol. 21). PPUR presses polytechniques.
- Dieulin, C. (2005).** Calcul des capacités en eau des sols (Water Holding Capacity-WHC) à partir de la carte des sols de la FAO: note interne.
- Pettitt, A. N. (1979).** A non-parametric approach to the change-point problem. Applied statistics, 126-135.
- Hubert, P., & Carbonnel, J. P. (1993).** Segmentation des séries annuelles de débits de grands fleuves africains. Bulletin de liaison du CIEH, 92(3).
- Hingray, B., Picouet, C., & Musy, A. (2009).** Hydrologie: Une science pour l'ingénieur (Vol. 2). PPUR presses polytechniques.
- Simonneaux, V., Lepage, M., Helson, D., Metral, J., Thomas, S., Duchemin, B., ... & Chehbouni, A. (2009).** Estimation spatialisée de l'évapotranspiration des cultures irriguées par télédétection: application à la gestion de l'irrigation dans la plaine du Haouz (Marrakech, Maroc). Science et changements planétaires/Sècheresse, 20(1), 123-130.

Références bibliographiques

Kabouya, M., & Michel, C. (1991). Estimation des ressources en eau superficielle aux pas de temps mensuel et annuel, application à un pays semi-aride. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 4(4), 569-587.

Djellouli, F., Bouanani, A., & Baba-Hamed, K. (2013). Modélisations pluie-débit par une approche globale: cas du bassin versant d'oued Louza (Oued El-Hammam-Macta) NW algérien. *Séminaire International sur l'hydrogéologie et l'Environnement*.

Dezetter, A., Paturel, J. E., Ruelland, D., Ardoin-Bardin, S., Ferry, L., Mahé, G., ... & Servat, E. (2008, September). Modélisation semi-spatialisée des ressources en eau du fleuve Niger à Koulikoro. In *Prise en compte des variabilités spatio-temporelles. World Water Congress* (pp. 1-4).

Ardoin-Bardin, S., Dezetter, A., Servat, E., Mahé, G., Paturel, J. E., Dieulin, C., & Boyer, J. F. (2003). Analyse de la variabilité des ressources en eau en Afrique de l'Ouest sahélienne par modélisation hydrologique à grand pas de temps et d'espace. *Journal de l'Eau et de l'Environnement*, 3, 5-13.

Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., & Andréassian, V. (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 318(1), 200-214.

Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2007). Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR). Rapport, Edition CEMAGREF.

Kabouya, M. (1990). Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale. Université Paris-Sud, Paris, France.

Makhlouf, Z., & Michel, C. (1994). A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology*, 162(3), 299-318.

Ardoin-Bardin, S. (2004). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne (Doctoral dissertation, Unesco, Paris).

Gupta, V. K., & Sorooshian, S. (1985). The relationship between data and the precision of parameter estimates of hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 81(1-2), 57-77.

Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.

Callède, J. (1977). Oscillations journalières du débit des rivières en l'absence de précipitations. ORSTOM.

Références bibliographiques

Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied statistics*, 126-135.

Lubes-Niel, H., Masson, J. M., Paturol, J. E., & Servat, E. (1998). Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 11(3), 383-408.

Hubert, P., Carbonnel, J. P., & Chaouche, A. (1989). Segmentation des séries hydrométéorologiques—application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'ouest. *Journal of hydrology*, 110(3), 349-367.

Hubert, P., & Carbonnel, J. P. (1987). Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of hydrology*, 95(1), 165-183.

Kendall, M. G., & Alan, S. (1961). The advanced theory of statistics. Vols. II and III.

Abdelguerfi A. (2003) : Evaluation des besoins en matière de renforcement des capacités nécessaires à l'évaluation et la réduction des risques menaçant les éléments de la diversité biologique en Algérie. FEM/PND, Projet ALG/97/G31. Plan d'action et stratégie Nationale sur la biodiversité – Tome V. 93p.

EllouzeM, Abiba H (2008) Regional flood frequency analysis in Tunisia : identification of regional distributions. *Water Resour Manag* 22 :943-957.

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, 996p.

IPCC, 2013 : *Climate Change 2013*. Publication du Volume 1 du 5e Rapport d'évaluation du GIEC, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K.

Knippertz P., Christoph M., Speth P (2003a) Long-term précipitation variability in Morocco and the link to the large-scale circulation in recent and future climates. *Meteorol Atmos Phys* 83 :67-88.

Benoît Hingray, Cécile Picouet, André Musy, (2014) Hydrologie une science pour l'ingénieur 1ère édition, Science et ingénierie de l'environnement.

Références Sito-graphiques

WWW.CRU.UAE.AC.UK

www.emse.fr

www.u-picardie.fr

www.memoireonline.com.

<http://www.alloprof.qc.ca>.

tpecyclones.e-monsite.com.

<http://www.greenfacts.org/climate-change/effet-serre/effet-serre.htm>.

www.futura-sciences.com.

<http://www.manicore.com>

<http://www.cordex.org>.

www.imk-tro.kit.edu

www.clm-community.eu/index.php?menuid=254.

V.1 Méthode de Thiessen

La méthode de Thiessen est une méthode arithmétique dans laquelle on attribue à chaque pluviomètre un poids proportionnel à une zone d'influence présumée, telle qu'un point situé dans cette zone soit plus près, en distance horizontale, du pluviomètre correspond que de tout autres pluviomètres, la méthode tient compte de la distribution spatiale en plan des stations (Callède 1977).

Le calcul de la pluie moyenne surfacique se fait par l'application de la relation suivante :

$$P_{moy} = \sum_{i=1}^n \frac{P_i * S_i}{S_T} \dots \dots \dots (V.1)$$

Avec :

P_{moy} : Pluie surfacique moyenne sur le bassin.

P_i : Pluie tombée à la station i.

S_i : Surface de la zone d'influence de la station i.

S_T : Surface totale de bassin versant.

n : nombre de stations.

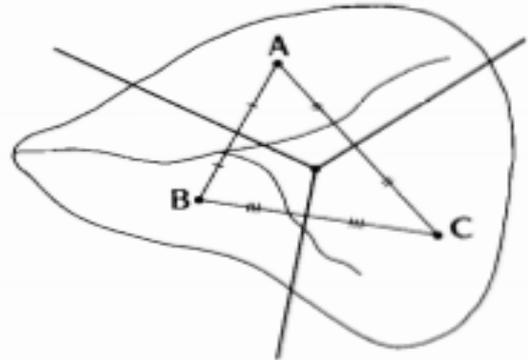


Figure I.V : Méthode de thiessen

V.2 L'évolution des pluies surfaciques moyennes sur les bassins d'études

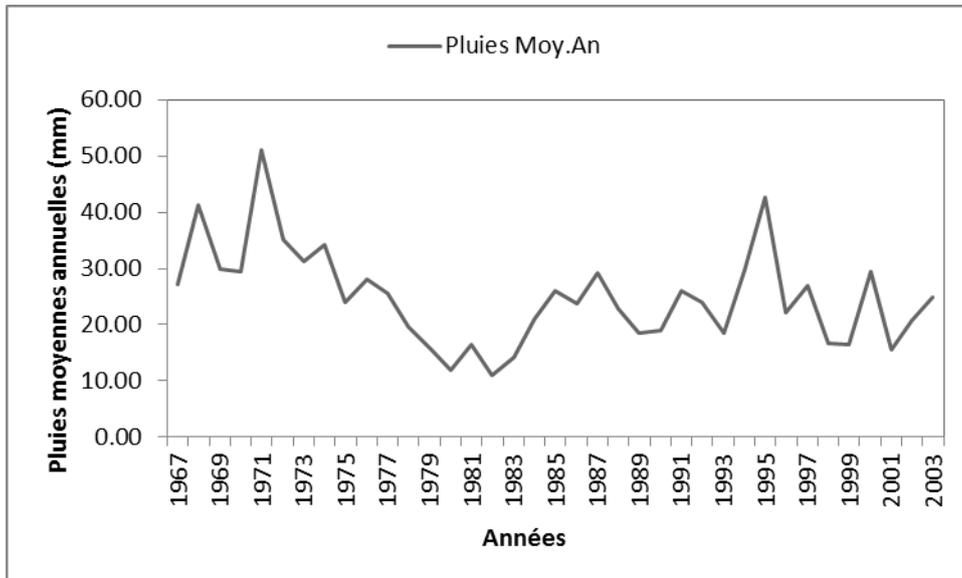


Figure V.2 : évolution de la pluie surfacique moyenne sur le bassin d'Ouled Ben AEK

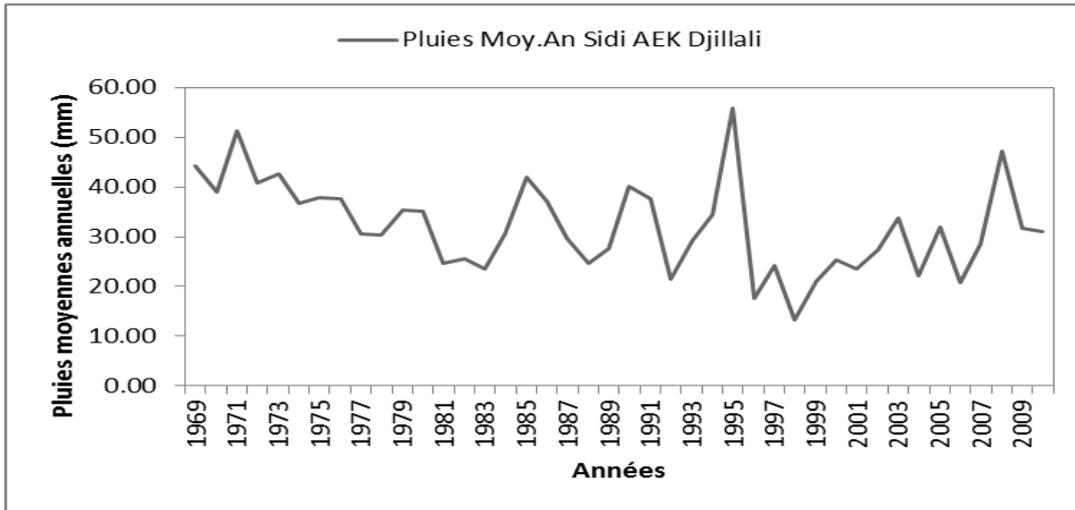


Figure V.3 : évolution de la pluie surfacique moyenne sur le bassin de Sidi AEK Djillali

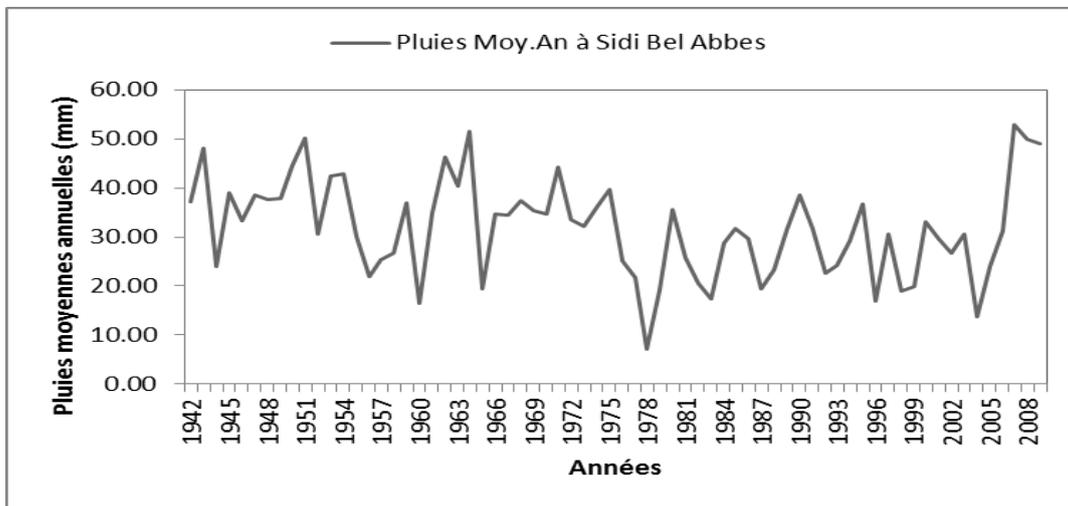


Figure V.4 : évolution de la pluie moyenne surfacique sur le bassin de Sidi Bel Abbas

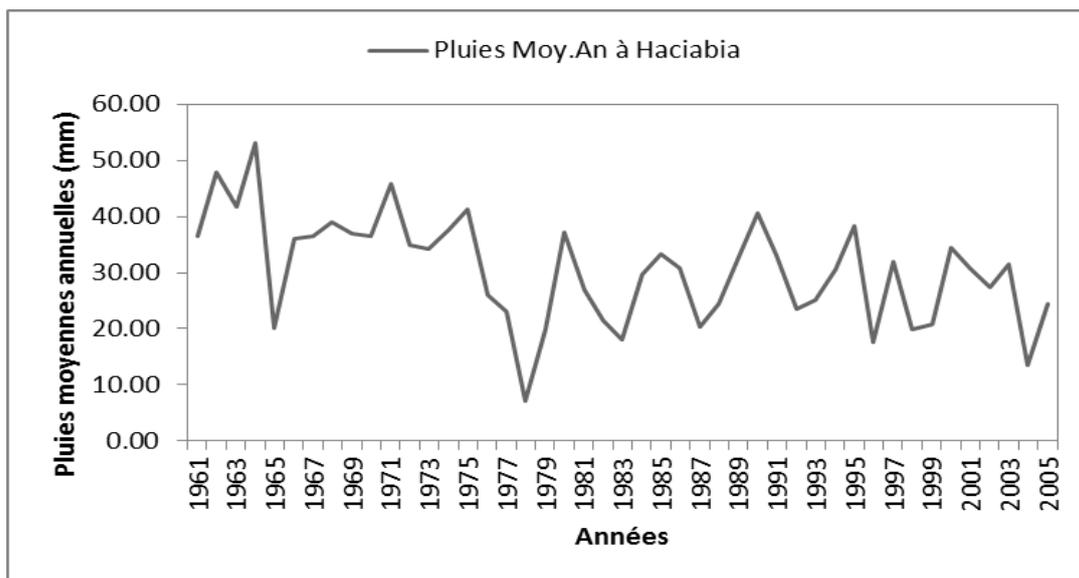


Figure V.5 : évolution de la pluie moyenne surfacique sur le bassin de Haciabia

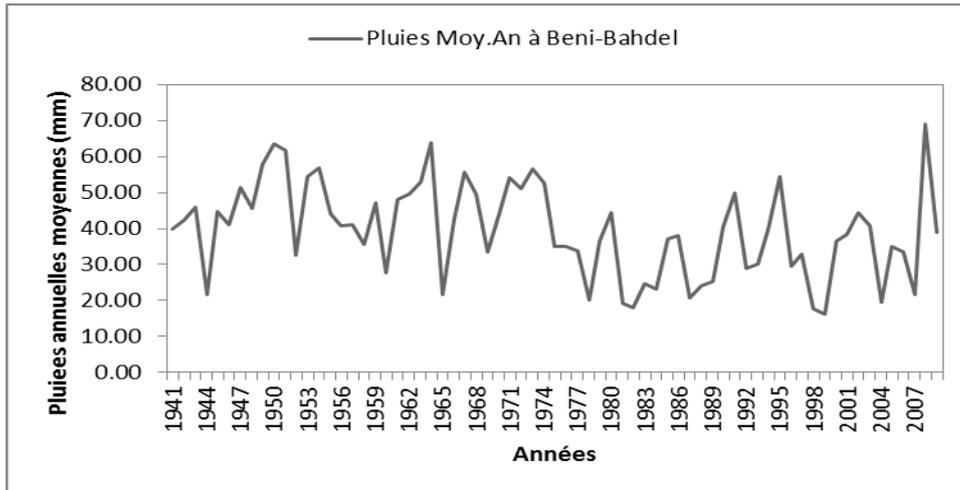


Figure V.6 : évolution de la pluie moyenne surfacique sur le bassin de Beni Bahdel

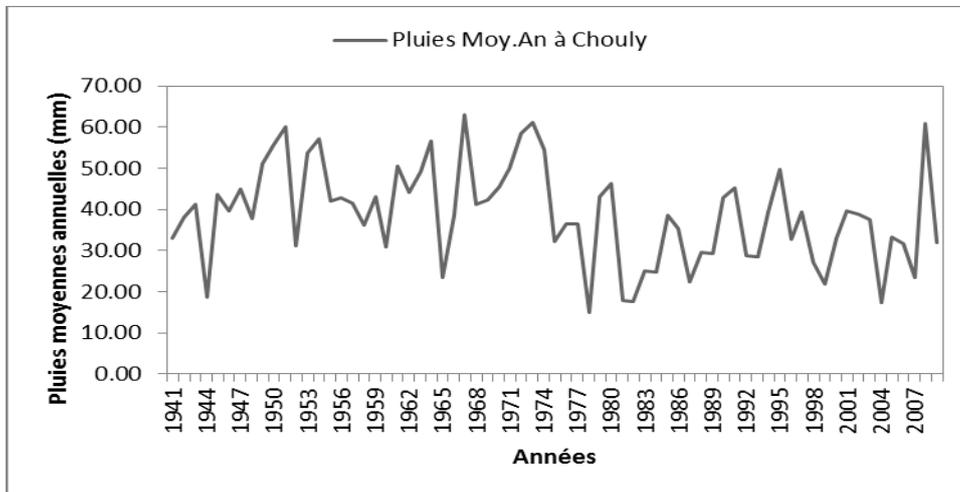


Figure V.7 : évolution de la pluie moyenne surfacique sur le bassin de Chouly

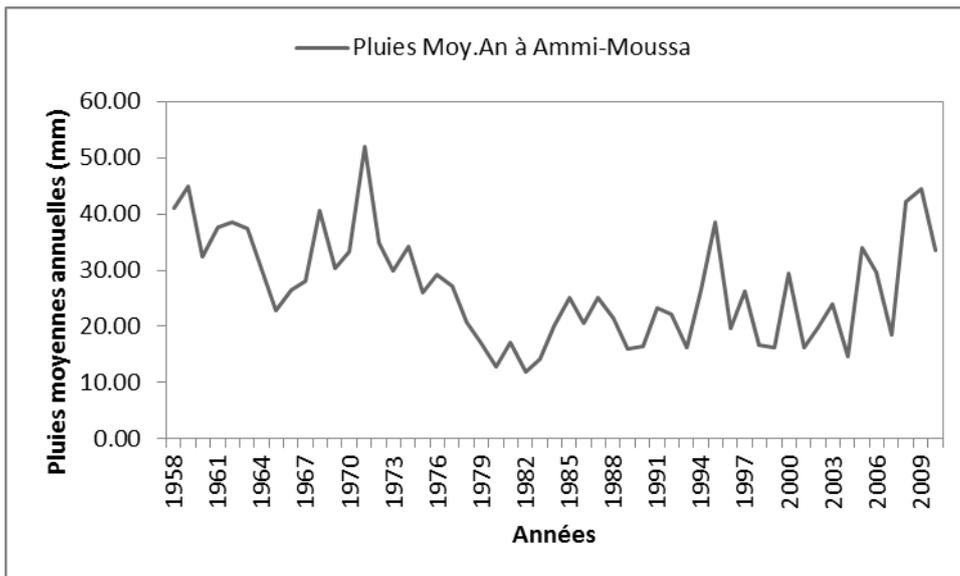


Figure V.8 : évolution de la pluie moyenne surfacique sur le bassin d'Ammi Moussa

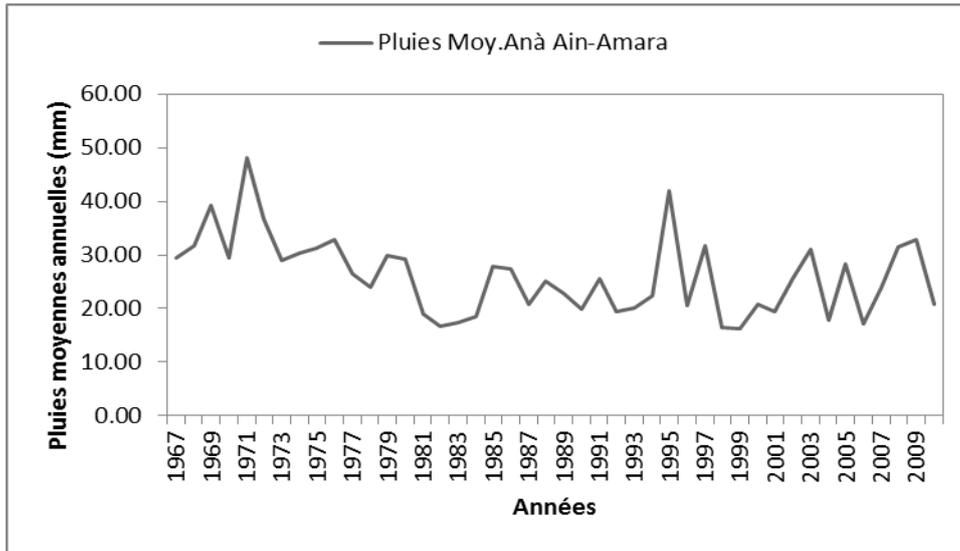


Figure V.9 : évolution de la pluviométrie sur le bassin d’Ain Hamara

V.3 Coefficient de corrélation de Bravier_Person

Ce coefficient permet de détecter la présence ou l'absence d'une relation linéaire entre deux caractères quantitatifs continus.

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 * \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{cov(X, Y)}{S_x * S_y} \dots\dots\dots (V. 2)$$

Avec :

\bar{x} et \bar{y} : sont les moyennes des deux séries.

S_x S_y : Sont les variances des deux séries.

cov : covariance.

V.3.1 Interprétation de r(X,Y)

Si $r_{xy} = 1$, il existe une relation linéaire exacte entre les deux séries, avec une liaison croissante.

$r_{xy} = -1$, Il existe entre les deux variables une relation linéaire exacte décroissante.

$r_{xy} = 0$, absence de relation linéaire entre les deux variables.

Si $0 < |r_{xy}| < 1$, cas intermédiaire, relation monotone plus au moins flou.

Si $|r_{xy}| < 0.2$, laisse présager une absence de liaison linéaire.

Si $|r_{xy}| > 0.8$, laisse présager une liaison linéaire.

V.4 Évolution des températures moyennes

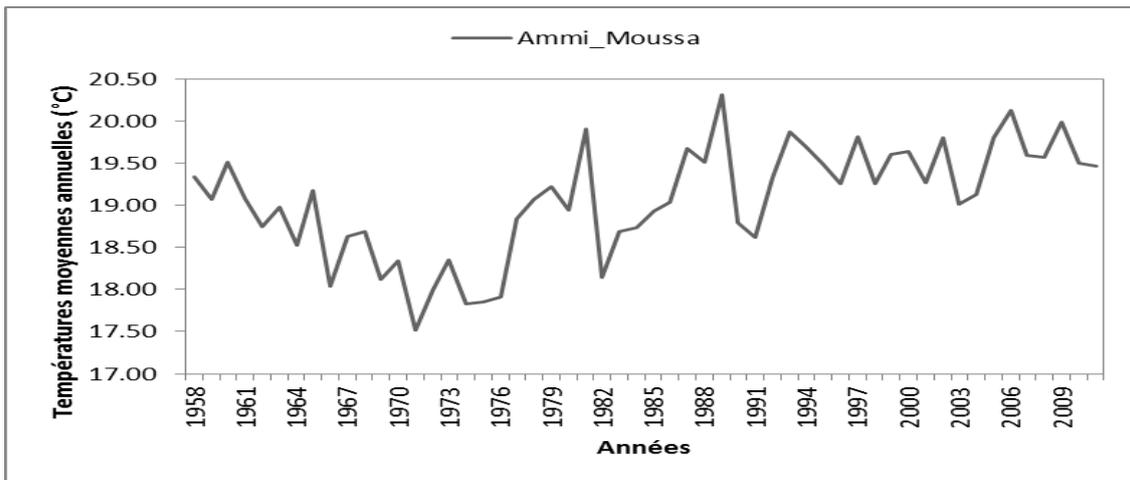


Figure V.10 : évolution des températures moyennes annuelles sur le bassin d'Ammi Moussa

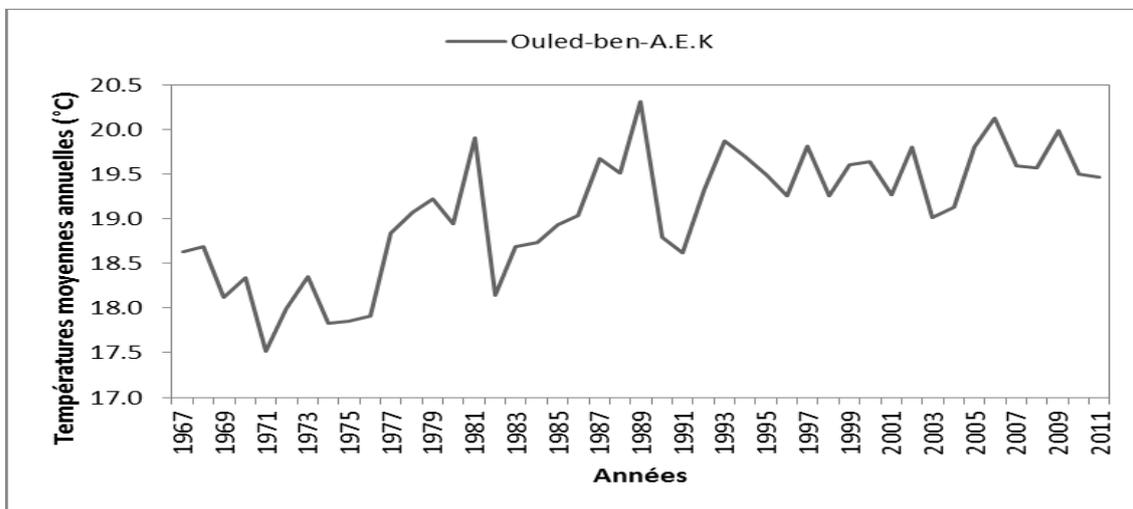


Figure V.11 : évolution des températures moyennes annuelles sur le bassin d'Ouled Ben AEK

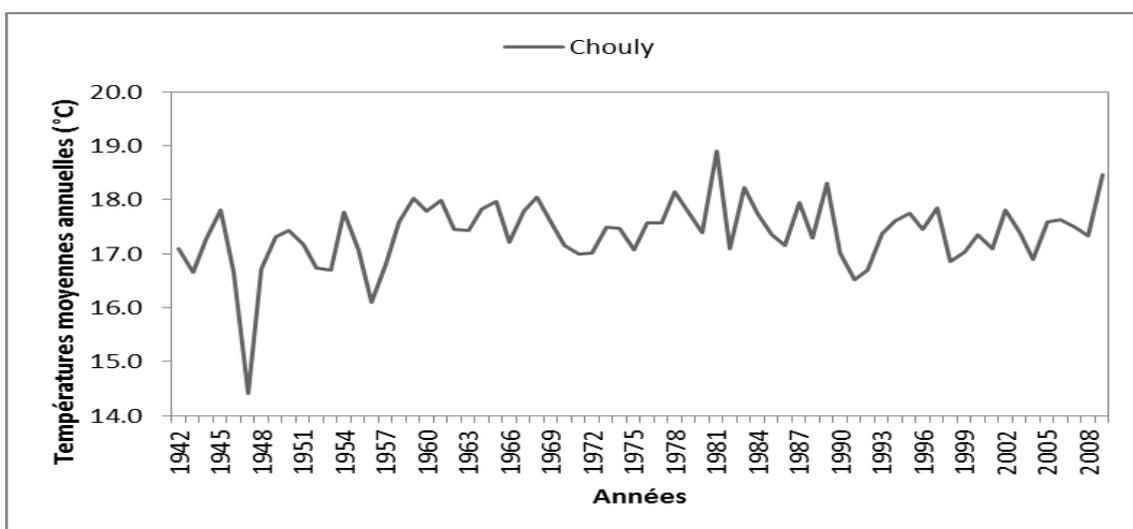


Figure V.12 : évolution des températures moyennes annuelles sur le bassin de Chouly

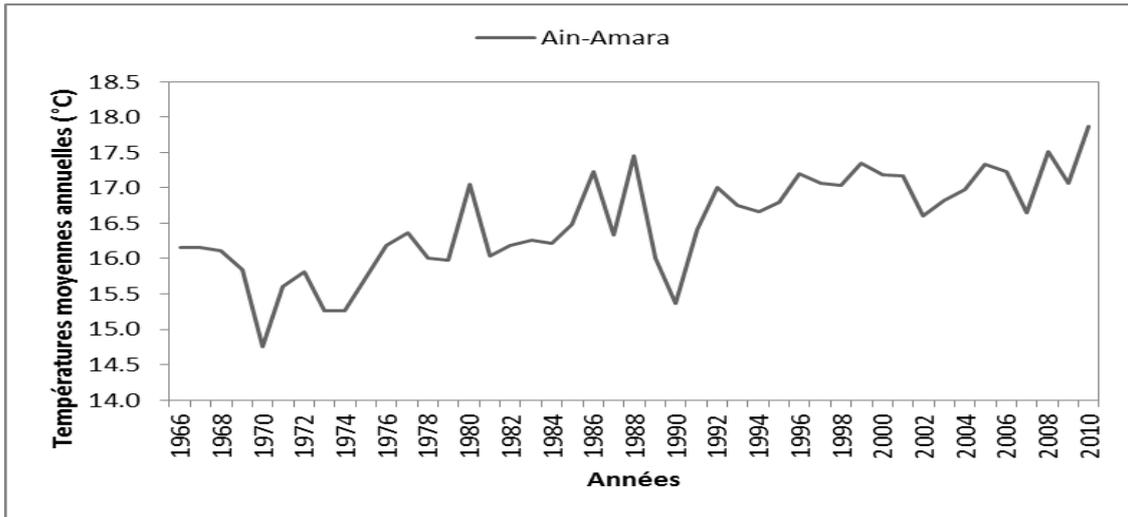


Figure V.13 : évolution des températures moyennes annuelles sur le bassin d'Ain Hamara

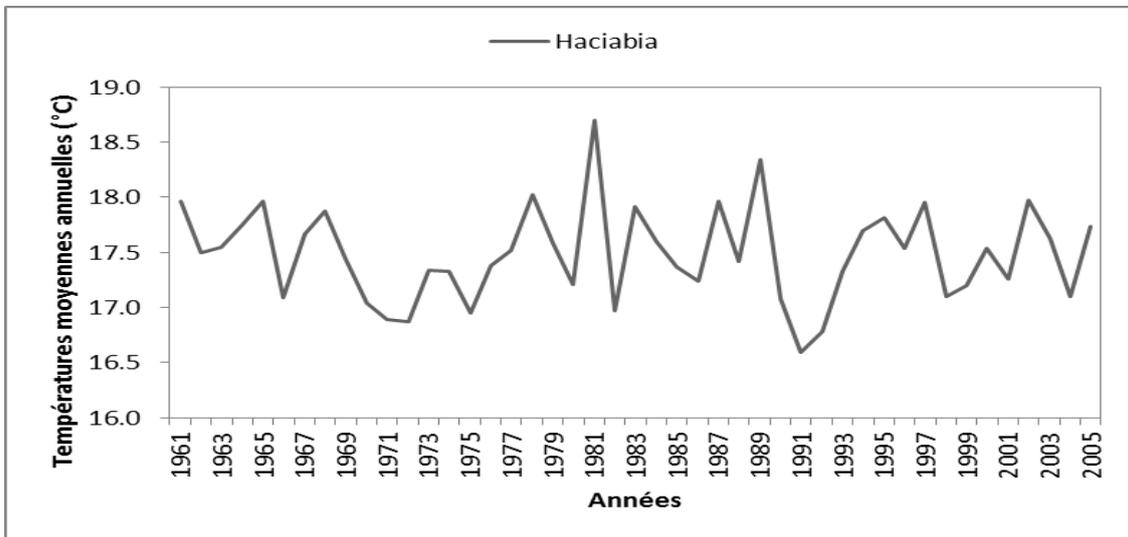


Figure V.14 : évolution des températures moyennes annuelles sur le bassin de Haciabia

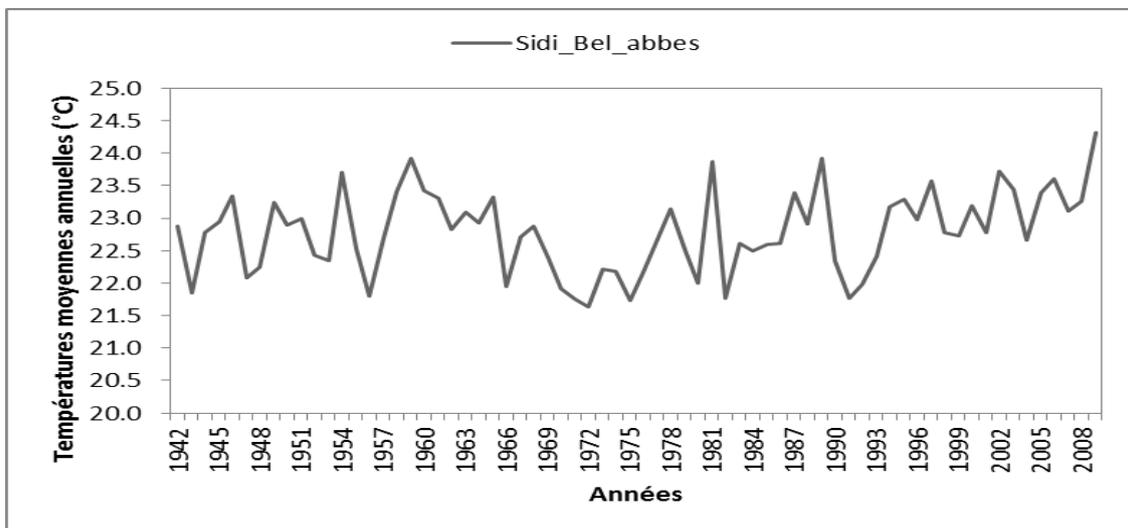


Figure V.15 : évolution des températures moyennes annuelles sur le bassin de Sidi Bel Abbès

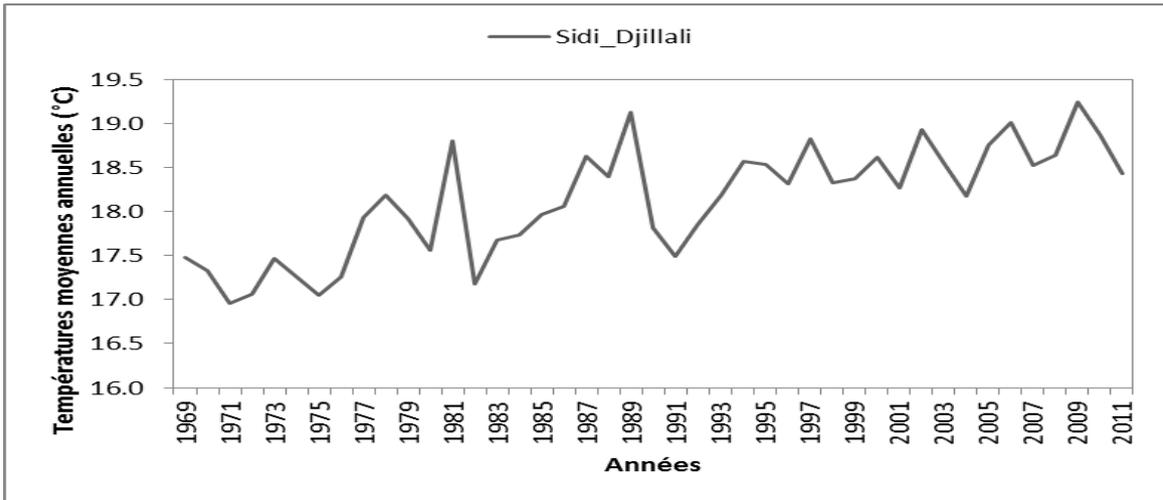


Figure V.16 : évolution des températures moyennes annuelles sur le bassin de Sidi AEK Djillali

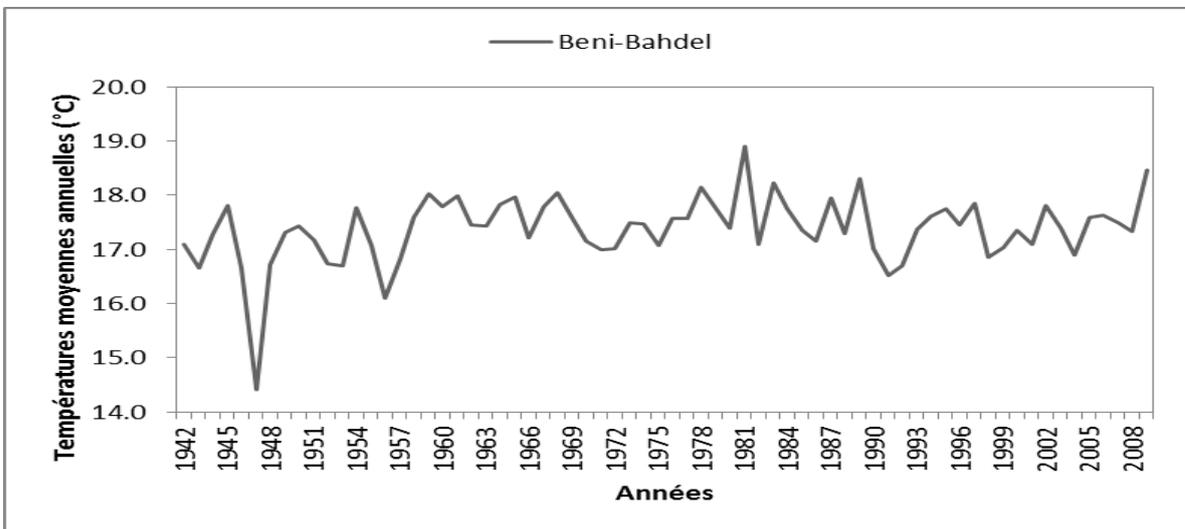


Figure V.17 : évolution des températures moyennes annuelles sur le bassin de Beni Bahdel

V.5 Calcul de flux évaporatoire « méthode de Thornwaite »

La formule de Thornthwaite est utilisée lorsqu'on ne dispose que de la température comme seule donnée climatique. Elle exprime l'évapotranspiration potentielle (ETP) par la formule suivante :

$$ETP_m = 16 * \left[\frac{10 * \bar{T}_{(M)}}{I} \right]^a * F(m, \varphi) \dots \dots \dots (V.3)$$

Avec :

ETP_m : L'évapotranspiration mensuelle.

I : Indice thermique annuel, égal à ; $I = \sum_{i=1}^n i_{(m)}$.

i_(m) : Indice thermique mensuel ; $i_{(m)} = \left[\frac{\bar{T}_{(m)}}{5} \right]^{1.514}$

$\bar{T}_{(M)}$: Moyenne annuelle des températures °C.

a : coefficient en fonction de I. $a = 0.016 * I + 0.5$

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

V.6 Évolution de l'évapotranspiration dans les différents bassins

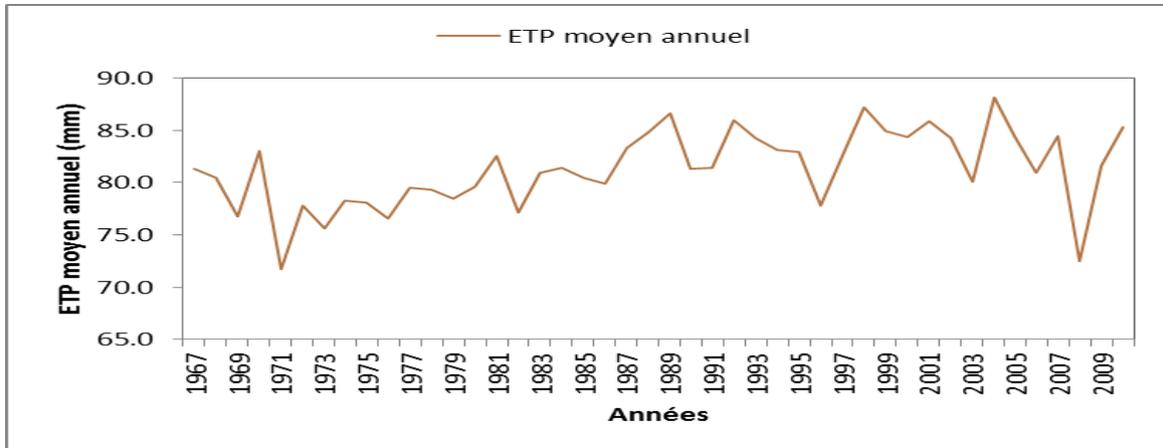


Figure V.18 : évolution de l'ETP moyen annuel sur le bassin d'Ouled Ben AEK

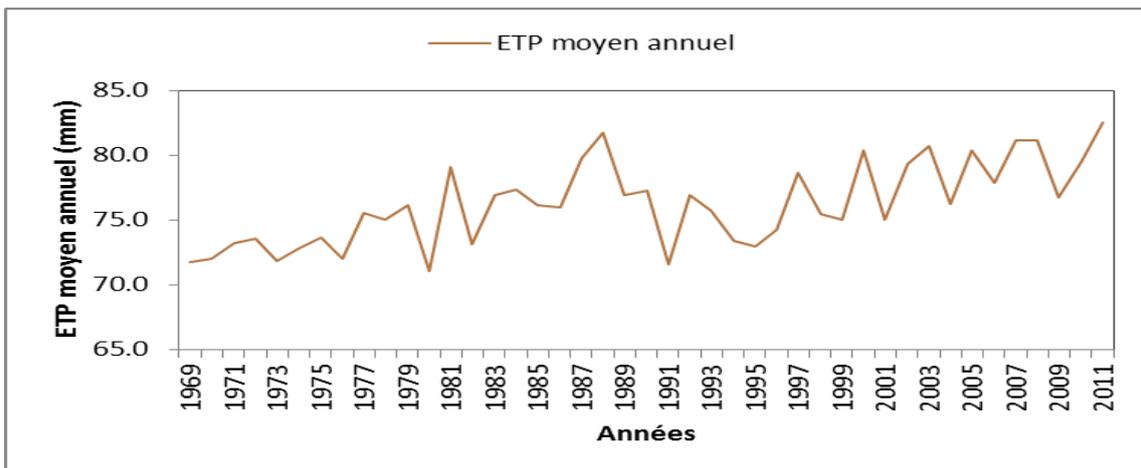


Figure V.19 : évolution de l'ETP moyen annuel sur le bassin de Sidi AEK Djillali

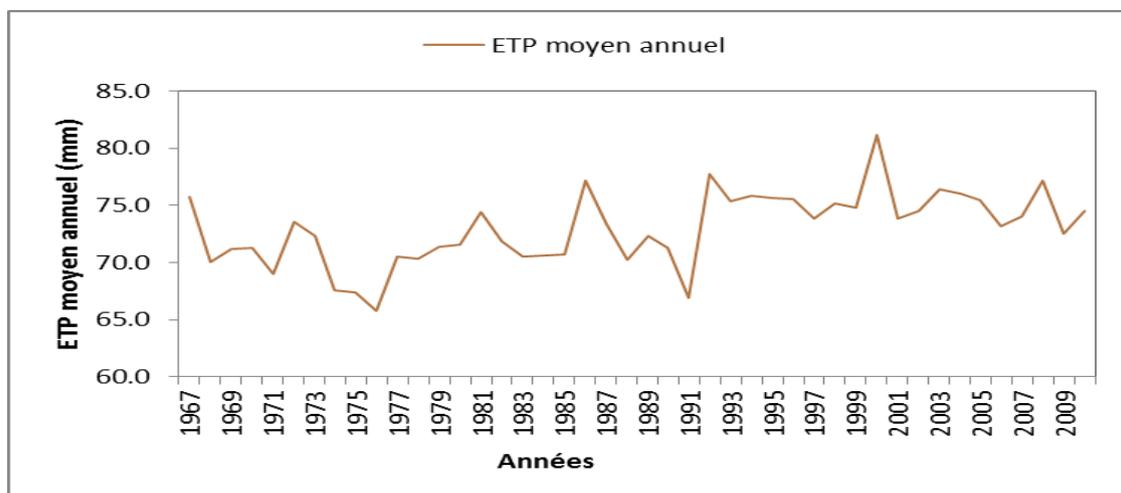


Figure V.20 : évolution de l'ETP moyen annuel sur le bassin d'Ain Hamara

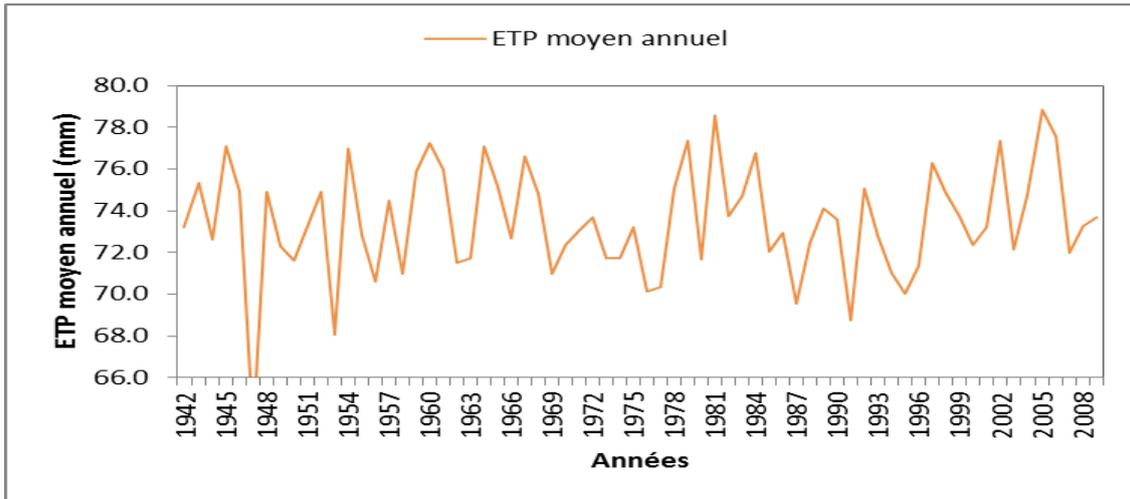


Figure V.21 : évolution de l'ETP moyen annuel sur le bassin de Beni Bahdel

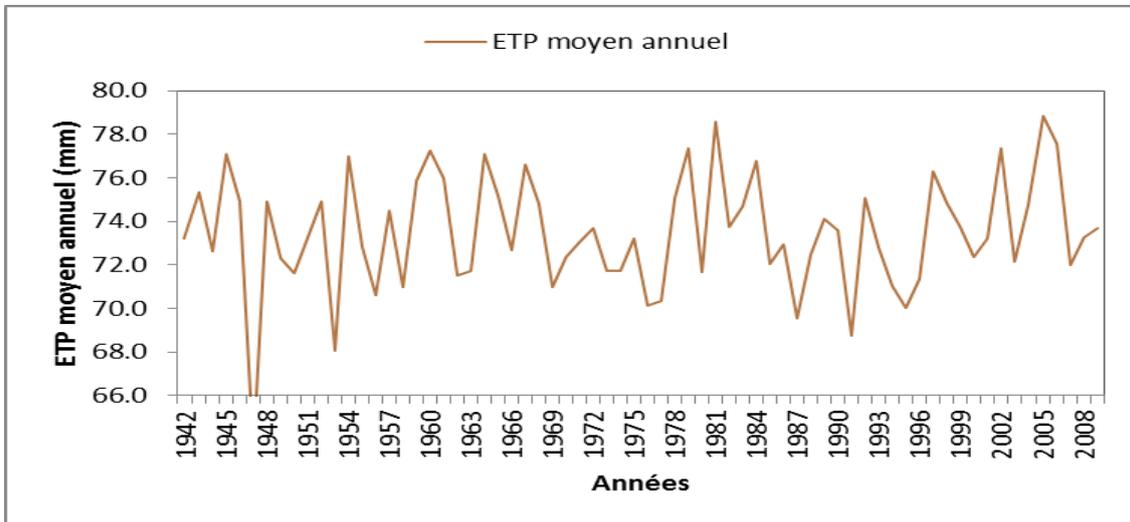


Figure V.22 : évolution de l'ETP moyen annuel sur le bassin de Chouly

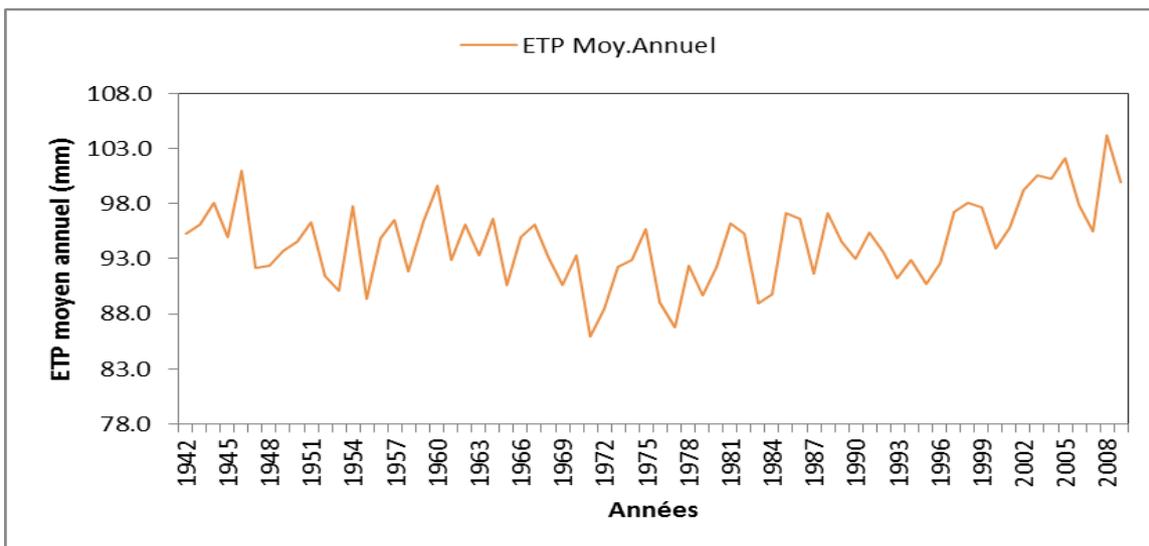


Figure V.23 : évolution d'ETP moyen annuel sur le bassin de Sidi Bel Abbas

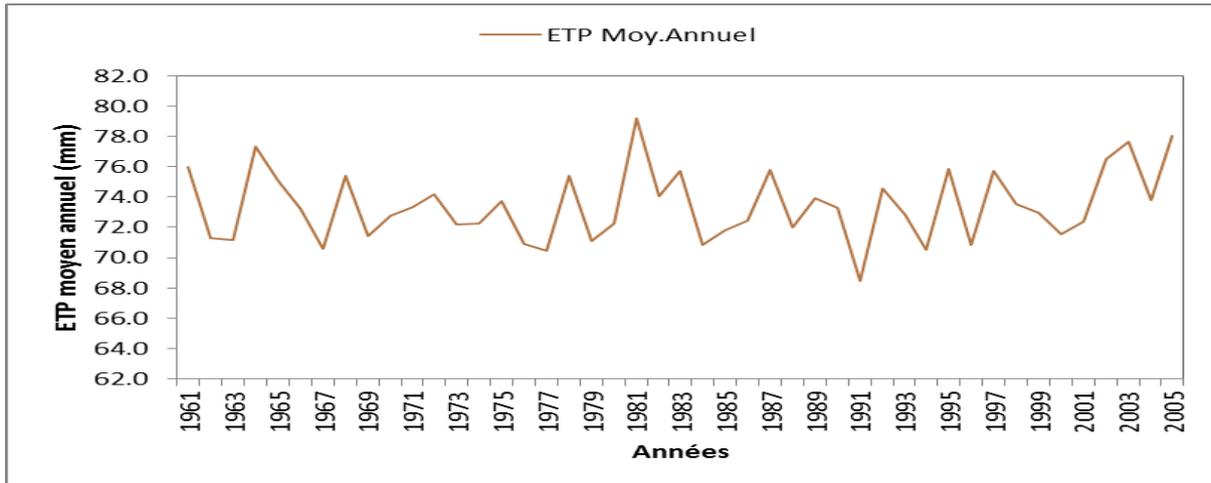


Figure V.24 : évolution d'ETP moyen annuel sur le bassin de Haciabia

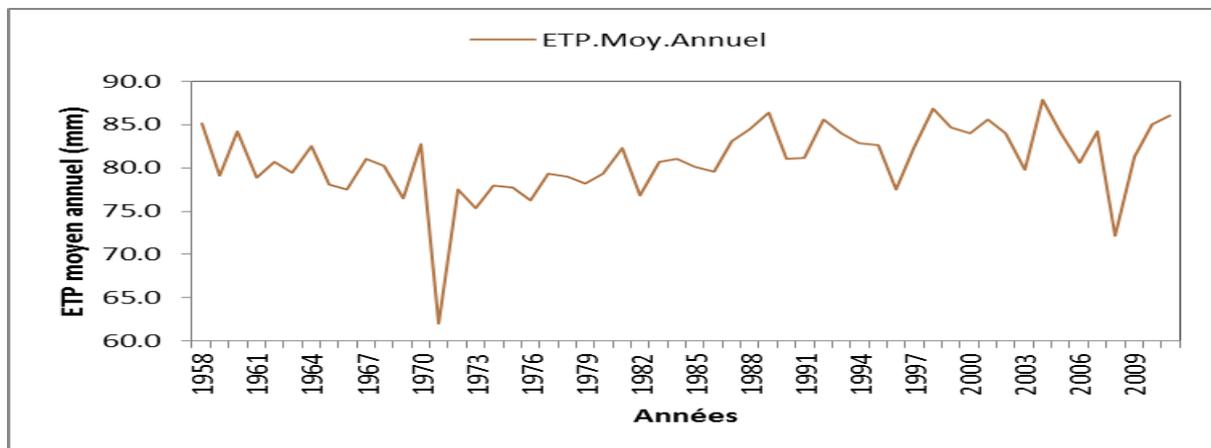


Figure V.25 : évolution de l'ETP moyen annuel sur le bassin d'Ammi Moussa

V.7 Évolution des débits dans les sous bassins appartenus au même grand bassin

V.7.1 Bassin de la Tafna

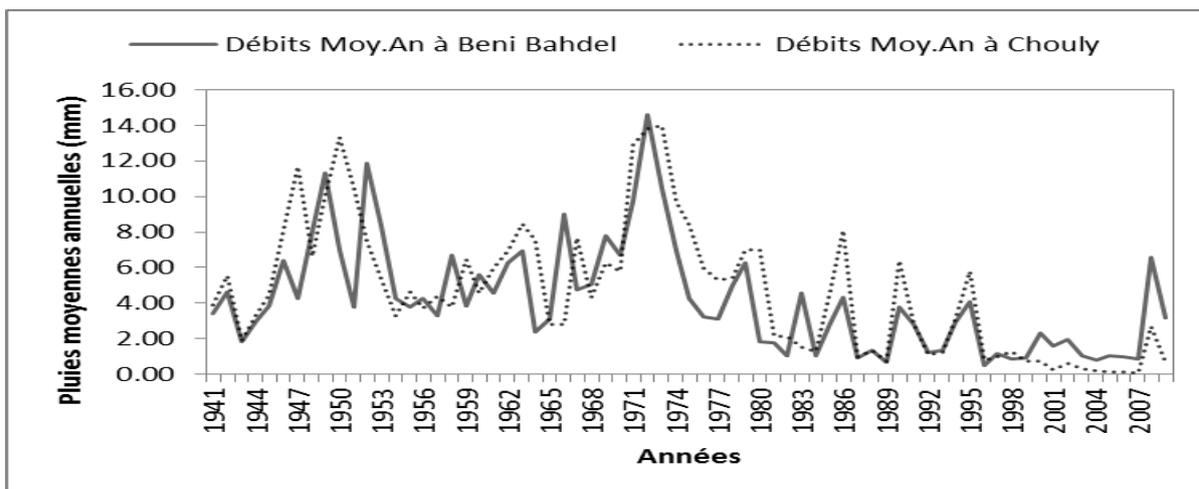


Figure V.26 : évolution des débits dans le bassin de Beni Bahdel et Chouly

V.7.2 Bassin de la Macta

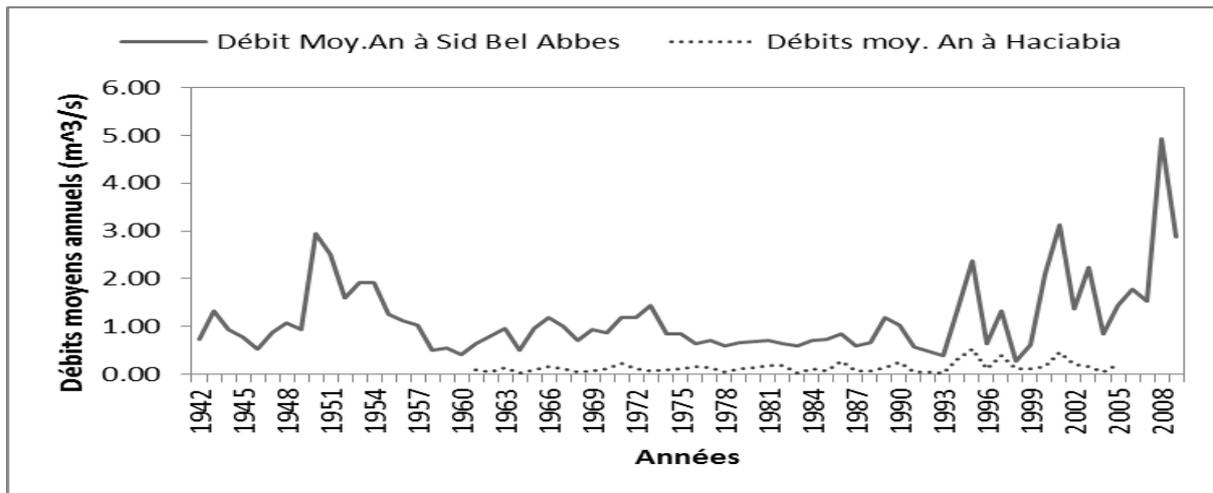


Figure V.27 : évolution des débits dans le bassin de Sidi Bel Abbas et Haciaibia

V.7.3 bassin de Chéllif

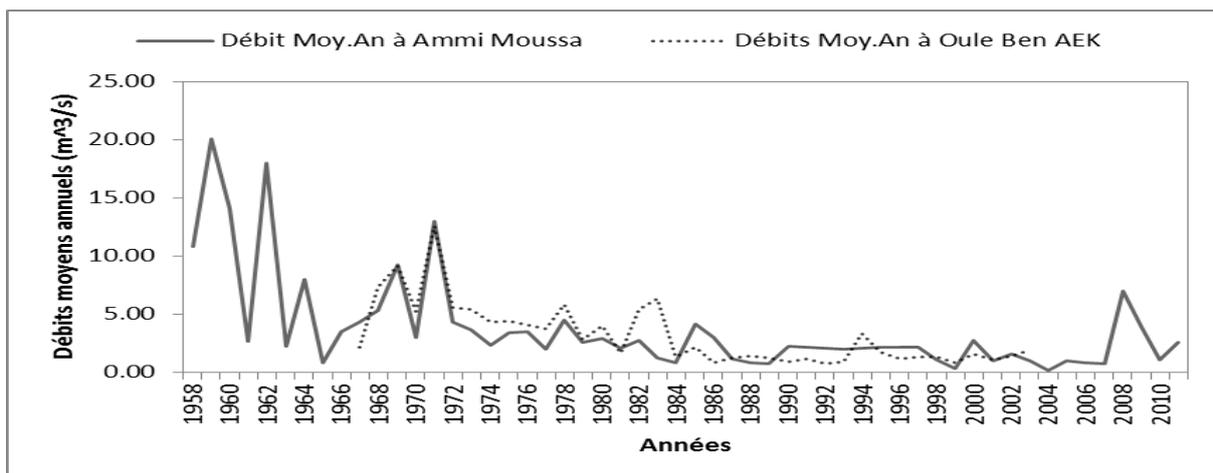


Figure V.28 : évolution des débits dans le bassin d'Ammi Moussa et Ouled Ben AEK

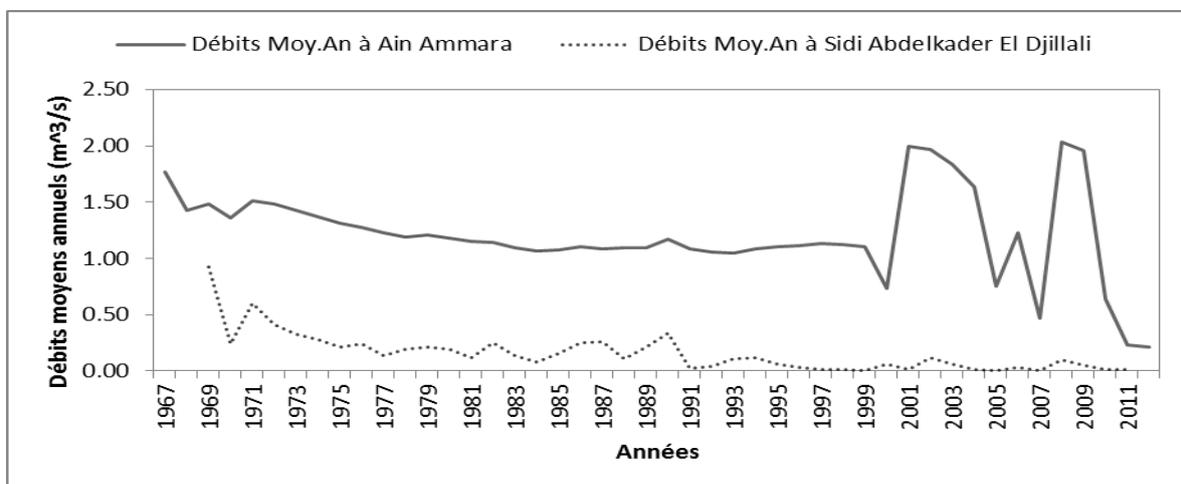


Figure I.29 : évolution des débits dans le bassin d'Ain Ammara et Sidi Abdelkader Djillali

V.8 Présentation des méthodes statistiques utilisées

V.8.1 Méthodes de détection des ruptures

V.8.1.1 Test de Pettitt (Pettitt, 1979 ; H. Lubes-Niel et al ; 1998)

Pour décrire le test de Pettitt des extraits du papier original de Pettitt sont repris ici. Pettitt considéré une séquence de variable aléatoire indépendante X_1, X_2, \dots, X_N . La séquence est censée contenir un point de rupture à τ si les X_t pour $t = 1, \dots, \tau$ ont une distribution commune $F_1(X)$ et les X_t , pour $t = \tau + 1, \dots, N$ ont une distribution commune $F_2(X)$ différente de $F_1(X)$. L'hypothèse nulle de « non-rupture », $H_0 : \tau = N$ contre l'hypothèse alternative de « rupture », $H_1 : 1 \leq \tau < N$, est testée au moyen d'un test statistique non paramétrique. Aucune condition particulière n'est requise pour les formes fonctionnelles de F_1 et F_2 exceptée la continuité.

Pettitt montre comment une formulation appropriée du test de Mann-Whitney (Dagnélie, 1970) peut être utilisée pour tester H_0 contre H_1 .

Si $D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j)$ où $\text{sgn}(X) = 1$ si $X > 0$; 0 si $X = 0$ et -1 si $X < 0$, alors, la variable

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \dots \dots \dots (V.4)$$

Est équivalente à la statistique de Mann-Whitney pour tester l'appartenance des deux échantillons, X_1, \dots, X_t et X_{t+1}, \dots, X_N à la même population.

La statistique $U_{t,N}$ est considérée pour les valeurs de t comprise contre 1 et N . **Pour** tester H_0 contre H_1 , Pettitt propose d'utiliser la variable

$$K_N \max |U_{t,N}| \dots \dots \dots (V.5)$$

En utilisant la théorie des rangs, Pettitt donne la probabilité de dépassement approximative d'une valeur K par :

$$\text{Prob}(K_N > K) \sim 2 \exp\left(\frac{-6K^2}{(K^3 + K^2)}\right) \dots \dots \dots (V.6)$$

Pour un risque α de première espèce donné, H_0 est rejetée si cette probabilité est inférieure à α . Dans ce cas, la série présente une rupture au temps $t = \tau$ définissent K_N .

Le test est plus particulièrement sensible à un changement de moyenne.

V.8.1.2 Procédure de segmentation des séries hydrométéorologiques (Hubert et Carbonnel, 1987)

La procédure de segmentation de séries hydrométéorologiques n'est pas, en toute rigueur, un test statistique. Cette méthode est adaptée à la recherche de multiples changements de moyenne dans la série. Son principe est de « découper » la série en m segments ($m > 1$) de

telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit significativement différente de la moyenne du (ou des) segment(s) voisin(s).

Toute série $X_i, i=i_1, i_2$ avec $i_1 \geq 1$ et $i_2 \leq N$ où $i_1 < i_2$, constitue un segment de la série initiale des (X_i) . Toute partition de la série initiale en m segments est une segmentation d'ordre m pratiquée sur la série initiale, on définit :

$I_k, K = 1, 2, \dots, m$, le rang dans la série initiale de l'extrémité terminale de $K^{i\text{ème}}$ segment :

\bar{X}_k La moyenne de $K^{i\text{ème}}$ segment ;

D_m , l'écart quadratique entre la série et la segmentation considérée

$$D_m = \sum_{k=1}^{k=m} d_k \text{ avec } d_k = \sum_{i=i_{k-1}+1}^{i=i_k} (x_i - \bar{x}_k)^2 \dots \dots \dots (V.7)$$

La segmentation retenue au terme de la mise en œuvre de la procédure doit être telle que pour un ordre m de segmentation donné, l'écart quadratique D_m soit minimum et que les moyennes de deux segments contigus soient significativement différentes. Cette dernière contrainte est satisfaite par application de test de Scheffé (Kendall et Stuart, 1943) qui repose sur le concept de contraste (Danélie, 1970).

V.8.2 Méthode d'étude de la stationnarité

V.8.2.1 Le test de corrélation sur le rang (Kendall et Stuart, 1943 ; WMO ; 1966)

Le test de corrélation sur le rang est basé sur le calcul du nombre P de paires (X_i, X_j) pour lequel $X_i > X_j$ ($j > i, i = 1, \dots, N-1$). Sous l'hypothèse nulle (H_0) de stationnarité de la série, la variable ω définie par :

$$\omega = \frac{4P}{N * (N - 1)} - 1 \dots \dots \dots (V.8)$$

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

$$\sigma_1^2 = \frac{2 * (2N + 5)}{9N(N - 1)} \dots \dots \dots (V.9)$$

Pour un risque α de première espèce donné, l'acceptation de H_0 est définie par l'appartenance de ω à l'intervalle $\left[-U_{1-\frac{\alpha}{2}}\sigma_t, U_{1-\frac{\alpha}{2}}\sigma_t\right]$, $U_{1-\frac{\alpha}{2}}\sigma_t$ désigne la valeur de la variable normale réduite de probabilité de non-dépassement $1 - \frac{\alpha}{2}$.

L'hypothèse alternative de ce test est celle d'une tendance.

V.9 Les changements projetés pour les précipitations mensuelles futurs par le scénario RCP 8.5.

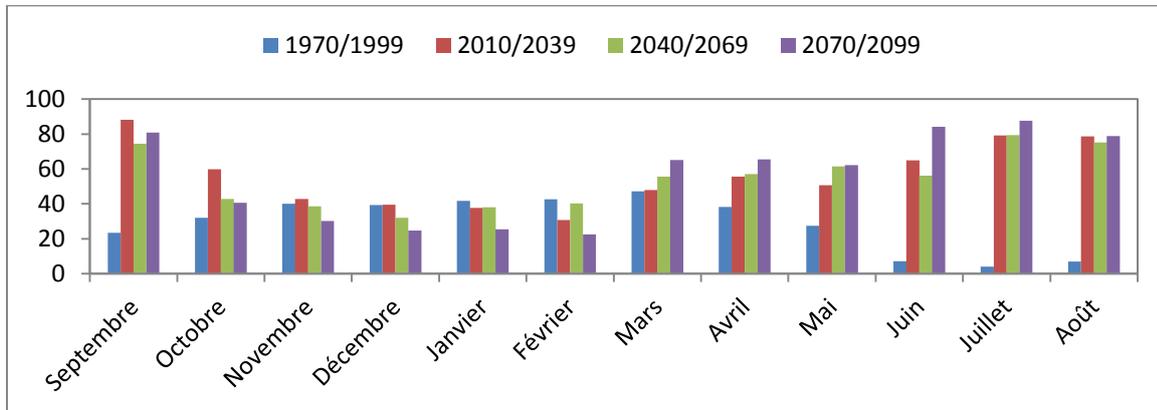


Figure V.30 : Evaluation des précipitations moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Sidi Bel Abbas.

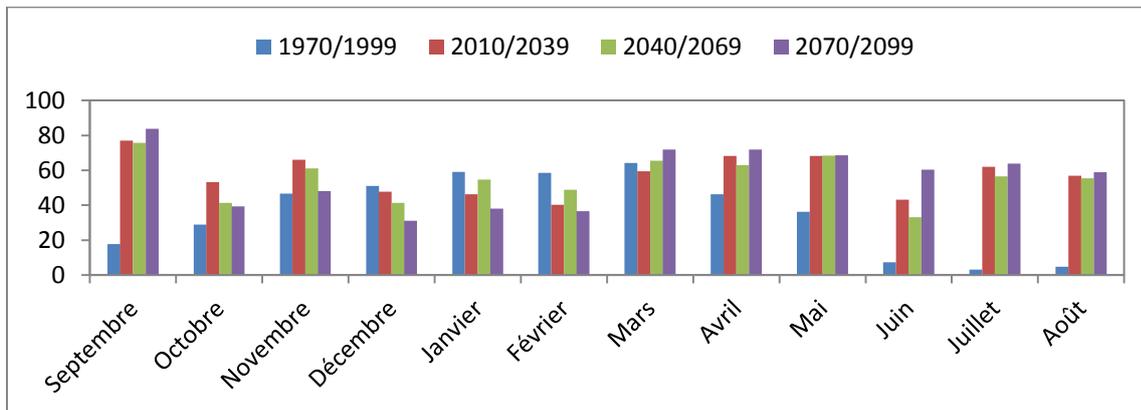


Figure V.31 : Evaluation des précipitations moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Beni Bahdel.

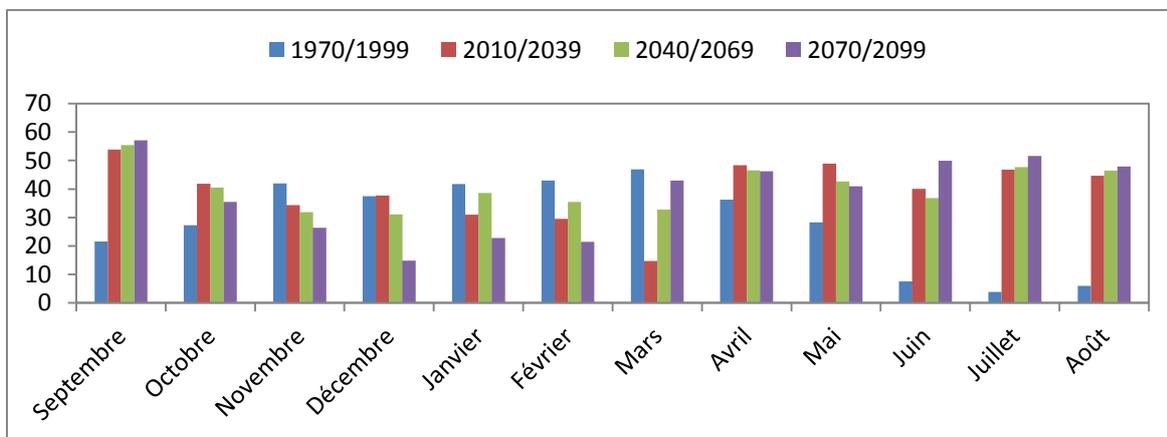


Figure V.32 : Evaluation des précipitations moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Haciabia.

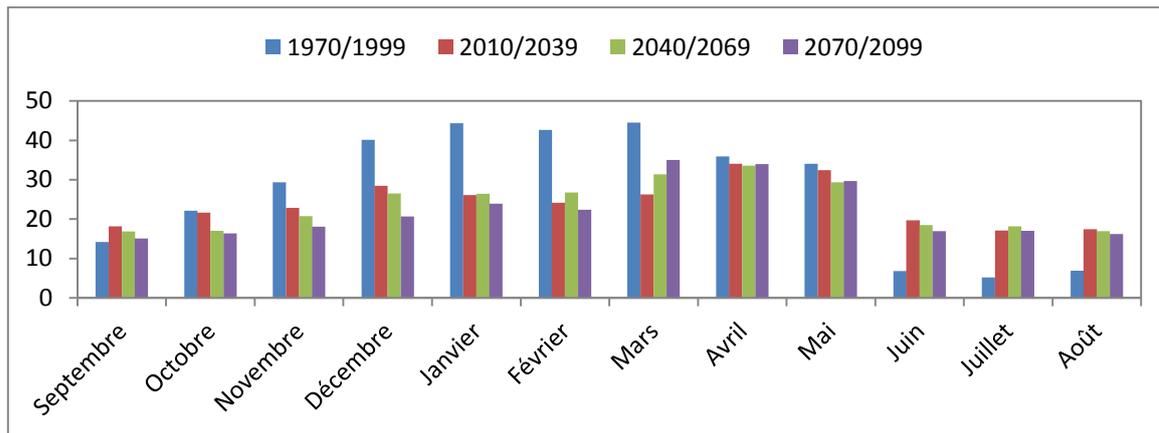


Figure V.33 : Evaluation des précipitations moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Sidi Djillali.

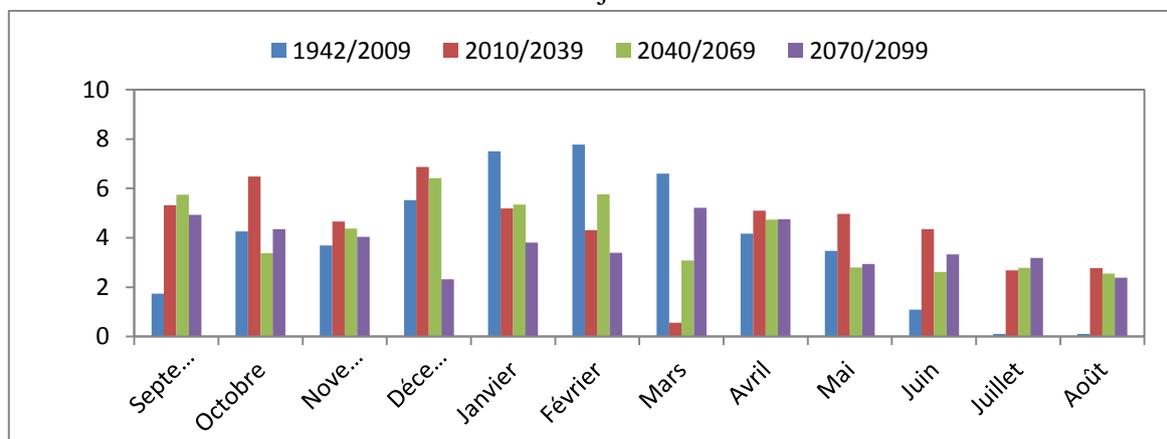


Figure V.34 : Evaluation des précipitations moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin d'Ammi Moussa.

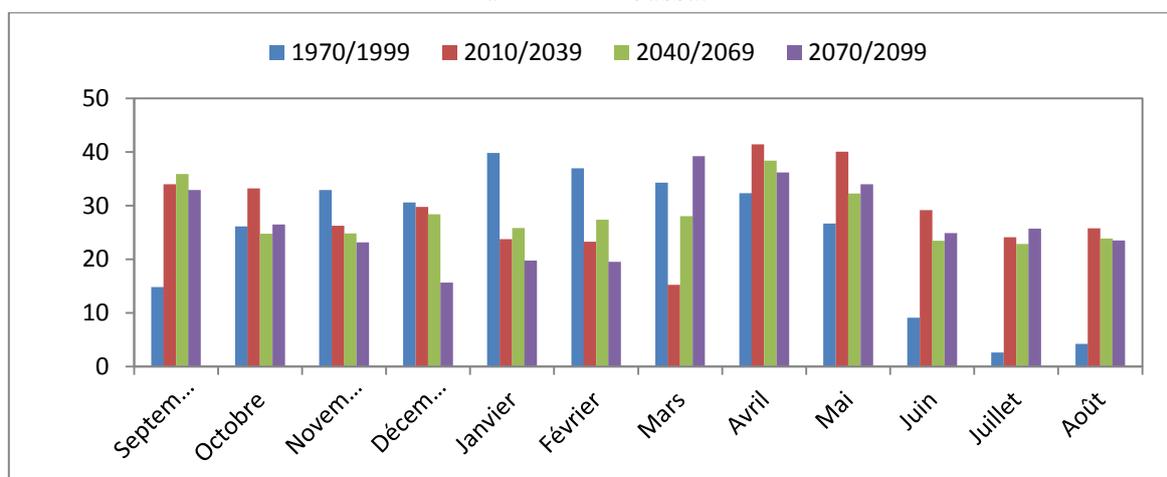


Figure V.35 : Evaluation des précipitations moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin d'Ouled Ben A.E.K.

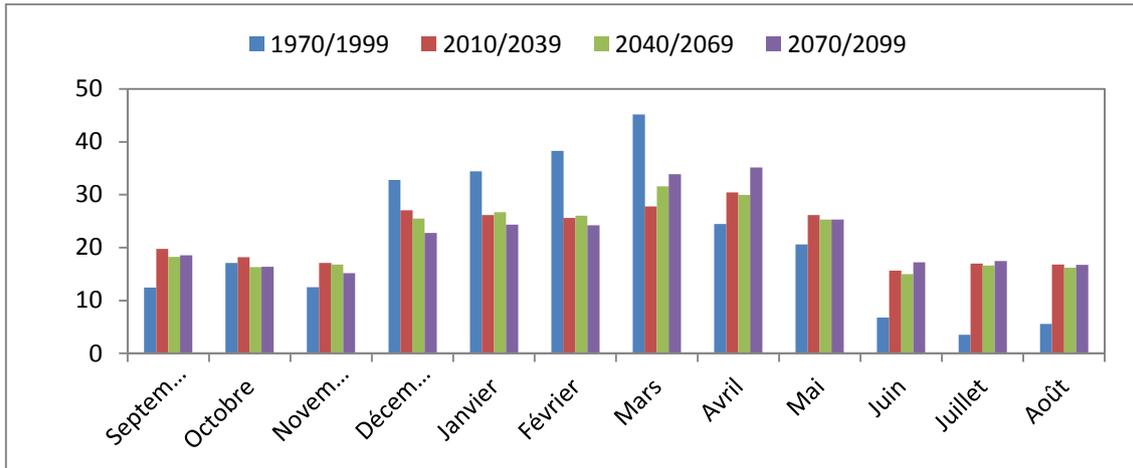


Figure V.36 : Evaluation des précipitations moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Chouly

V.10 Les changements projetés pour les précipitations mensuelles futurs par le scénario RCP 4.5.

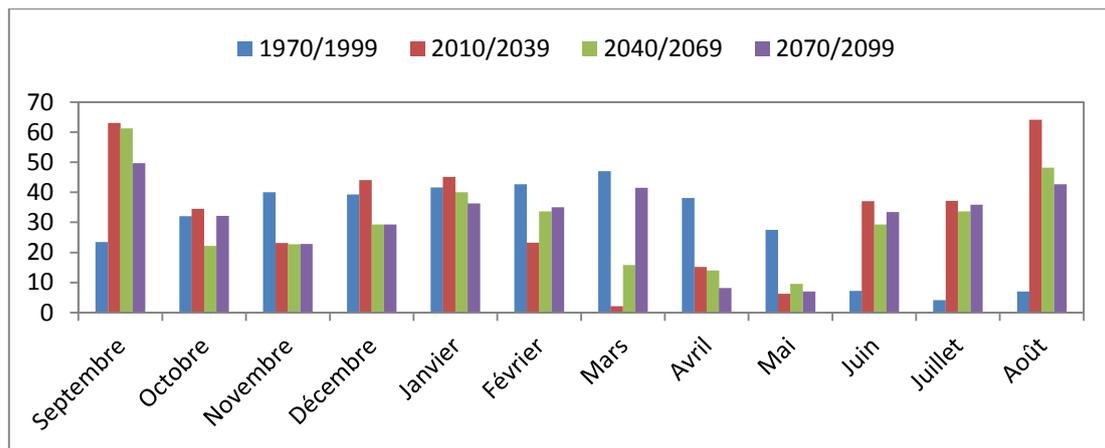


Figure V.37 : Evaluation des précipitations moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Sidi Bel Abbas

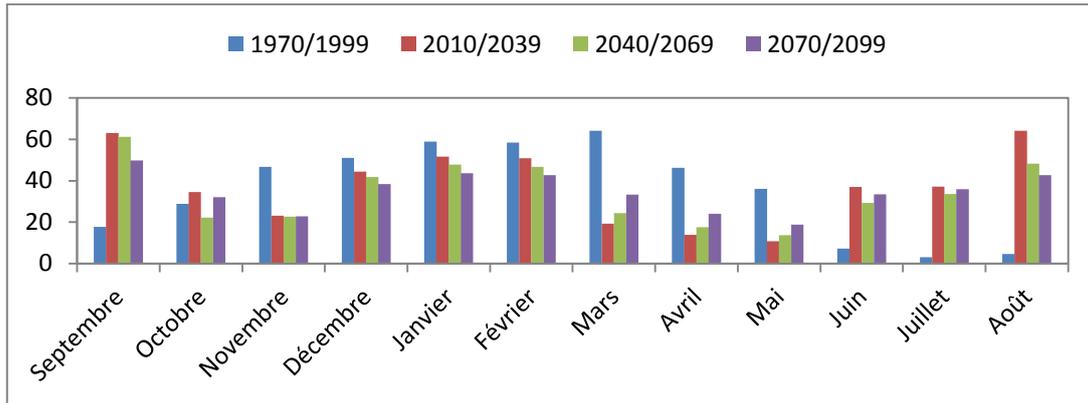


Figure V.38 : Evaluation des précipitations moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Beni Bahdel.

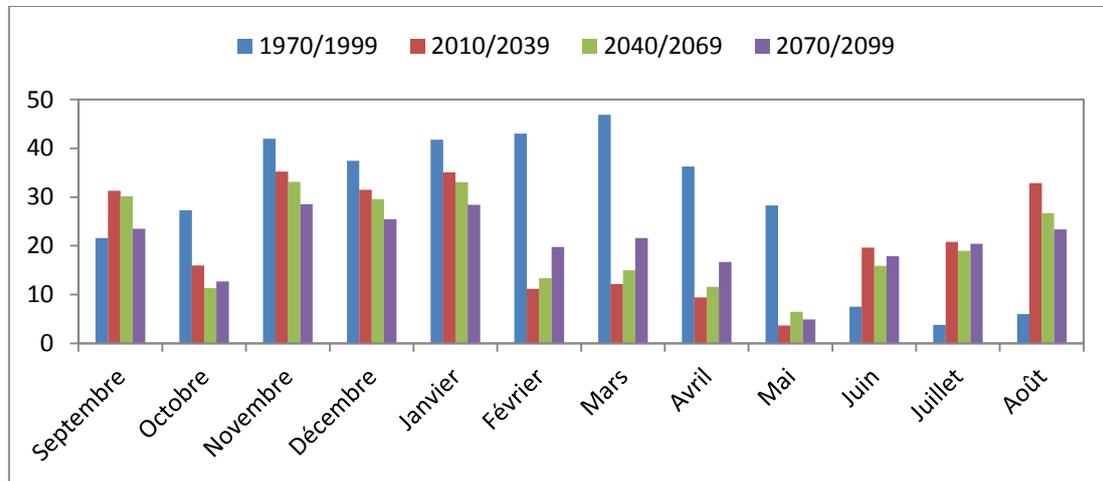


Figure V.39 : Evaluation des précipitations moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Haciafia.

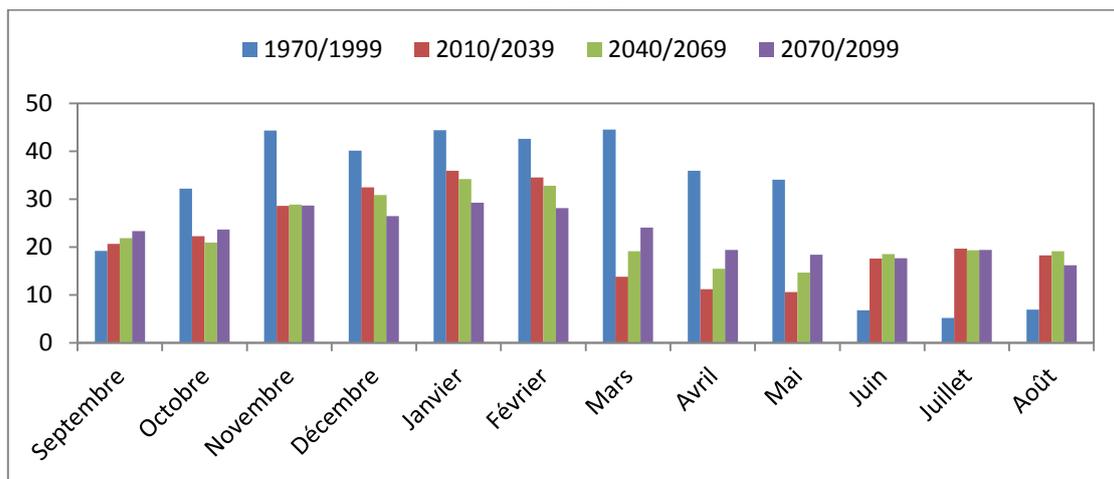


Figure V.40 : Evaluation des précipitations moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Sidi Djillali.

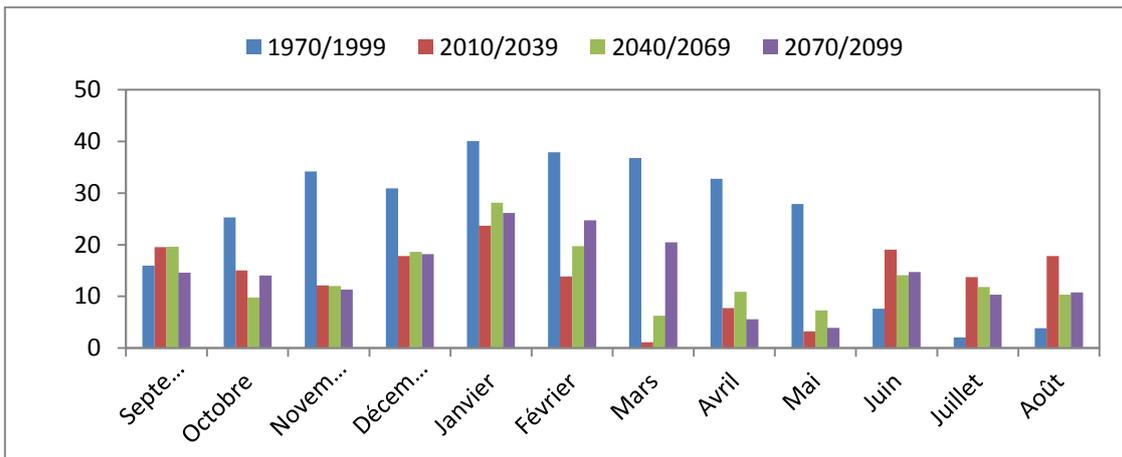


Figure V.41 : Evaluation des précipitations moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin d'Ammi Moussa.

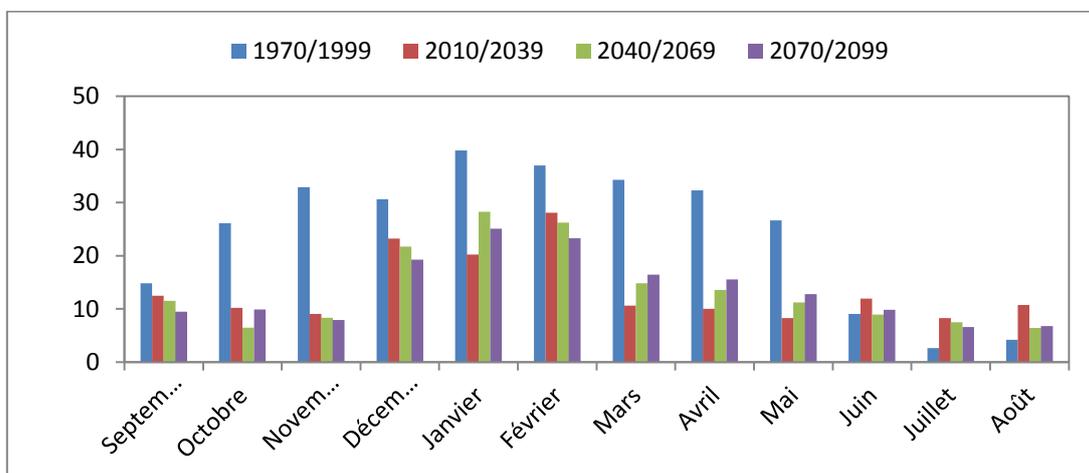


Figure V.42 : Evaluation des précipitations moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin d'Ouled Ben A.E.K.

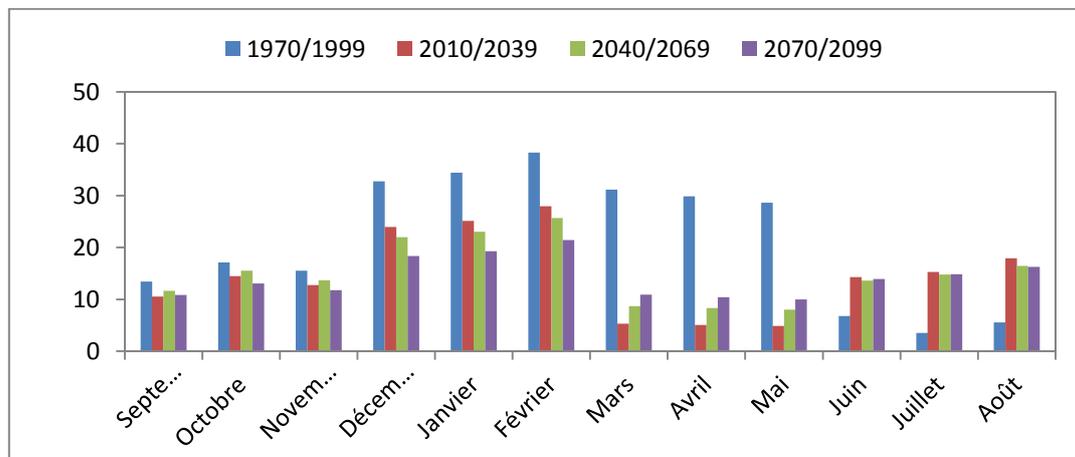


Figure V.43 : Evaluation des précipitations moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Chouly.

V.11 Les changements projetés pour les températures mensuelles futurs par le scénario RCP 8.5.

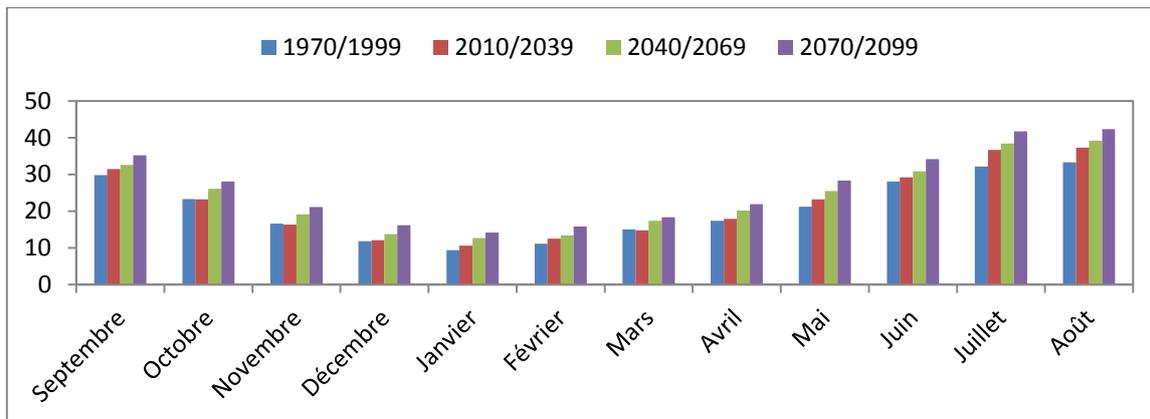


Figure V.44 : Evaluation des températures moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Sidi Bel Abbas.

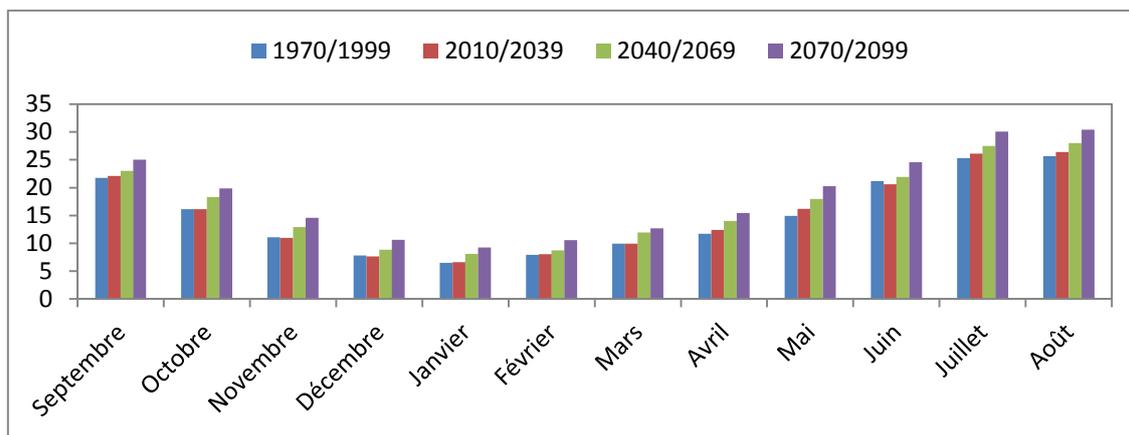


Figure V.45 : Evaluation des températures moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Beni Bahdel.

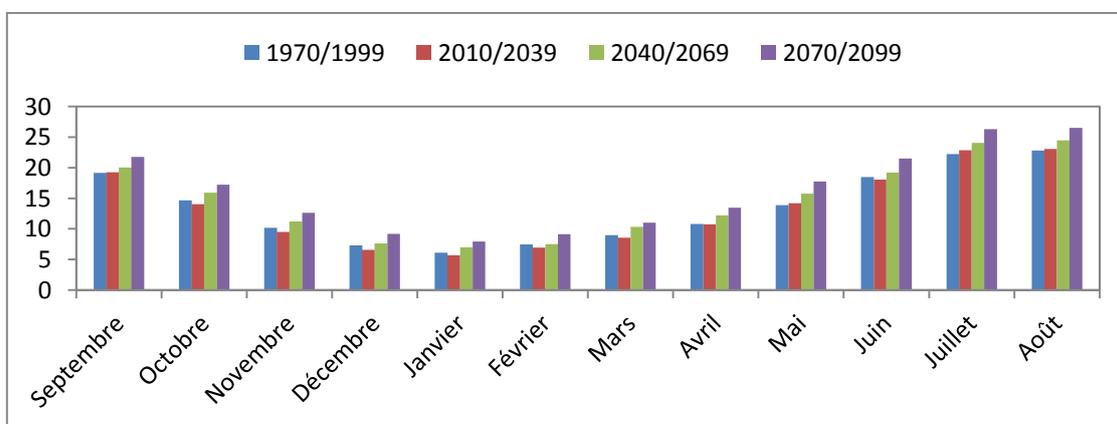


Figure V.46 : Evaluation des températures moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Haciaibia.

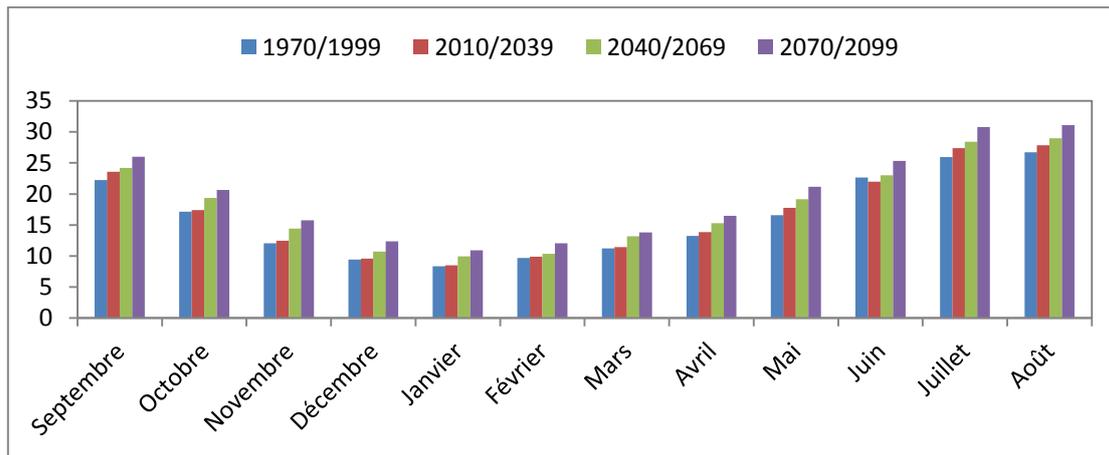


Figure v.47 : Evaluation des températures moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Sidi Djillali.

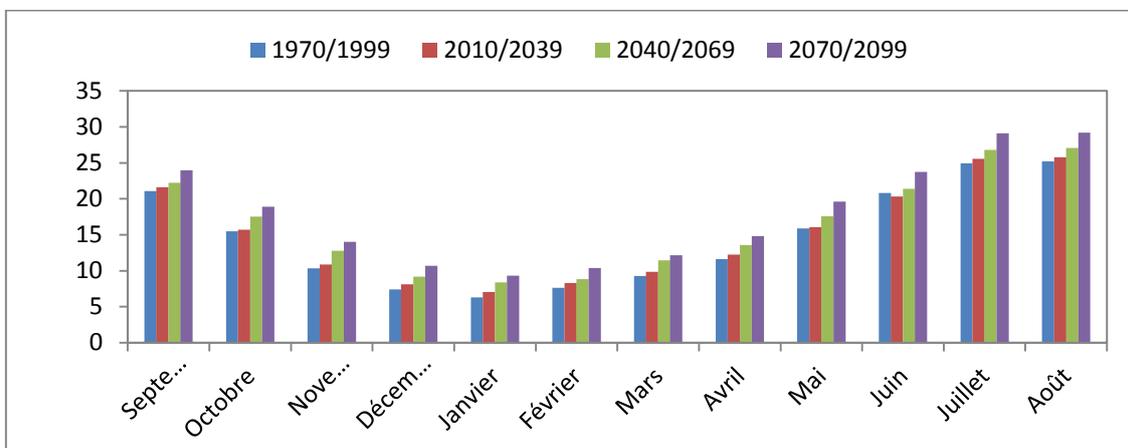


Figure V.48 : Evaluation des températures moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin d'Ammi Moussa.

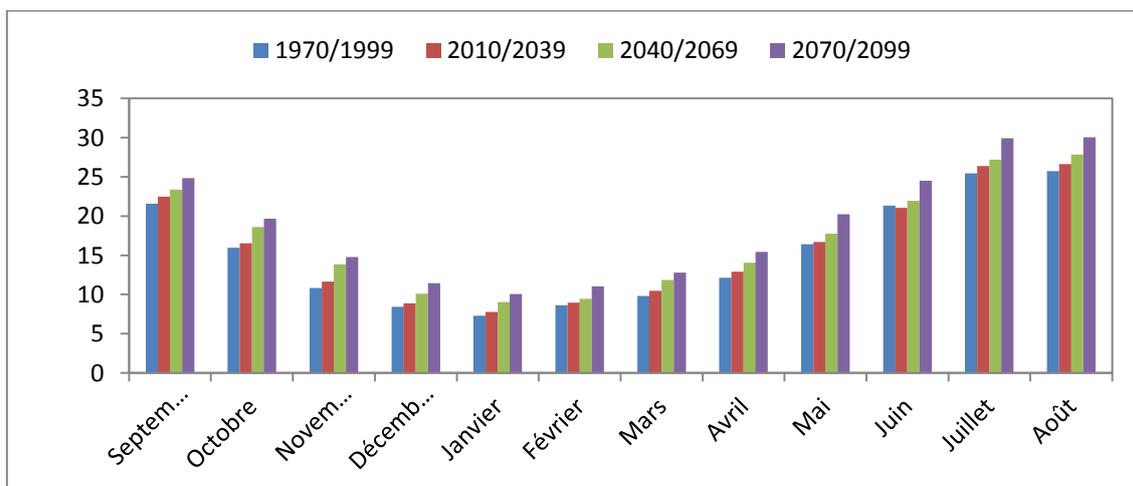


Figure v.49 : Evaluation des températures moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin d'Ouled Ben A.E.K.

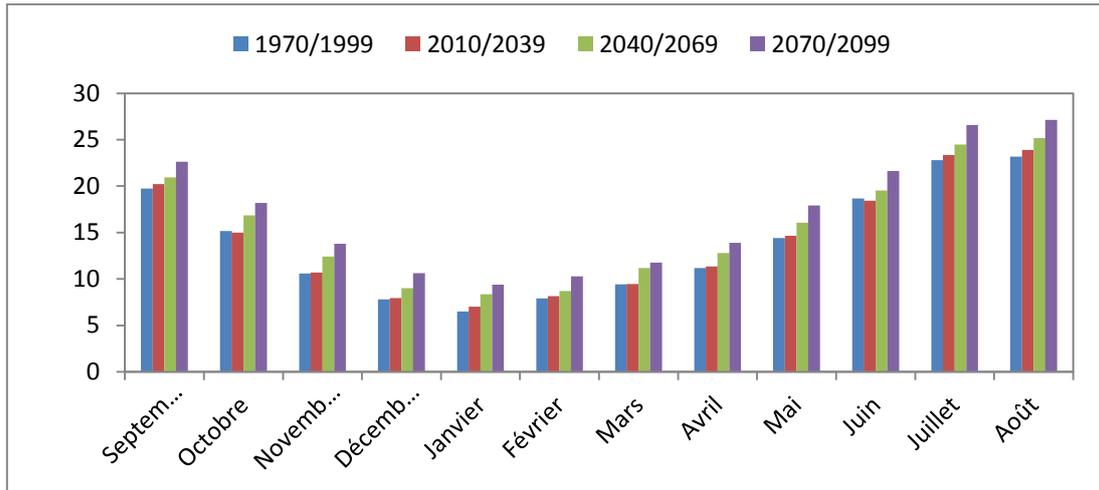


Figure V.50 : Evaluation des températures moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Chouly.

V.12 Les changements projetés pour les températures mensuelles futurs par le scénario RCP 4.5.

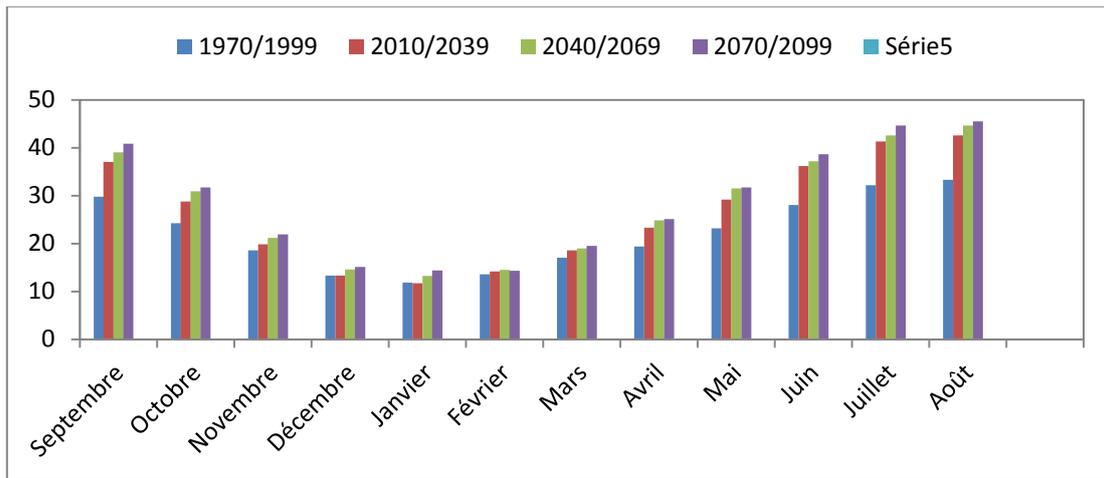


Figure V.51 : Evaluation des températures moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Sidi Bel Abbas.

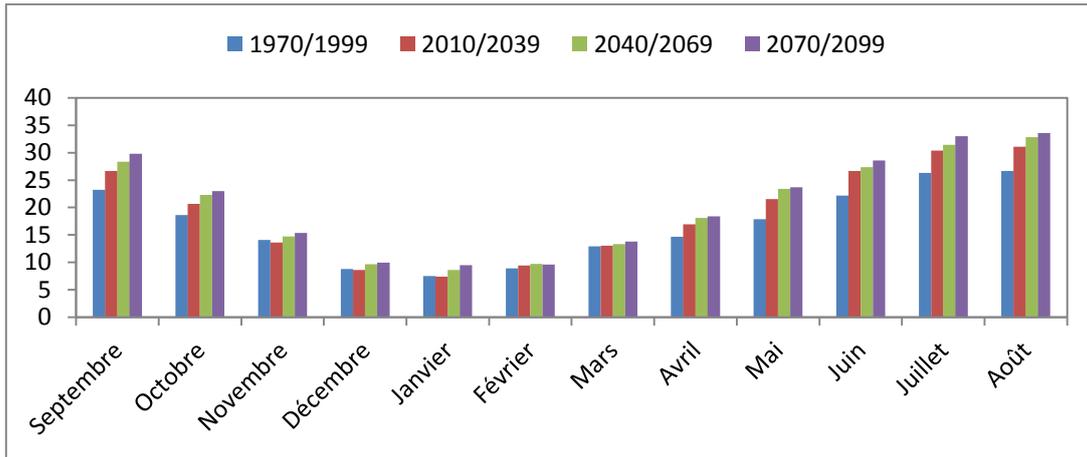


Figure V.52 : Evaluation des températures moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Beni Bahdel.

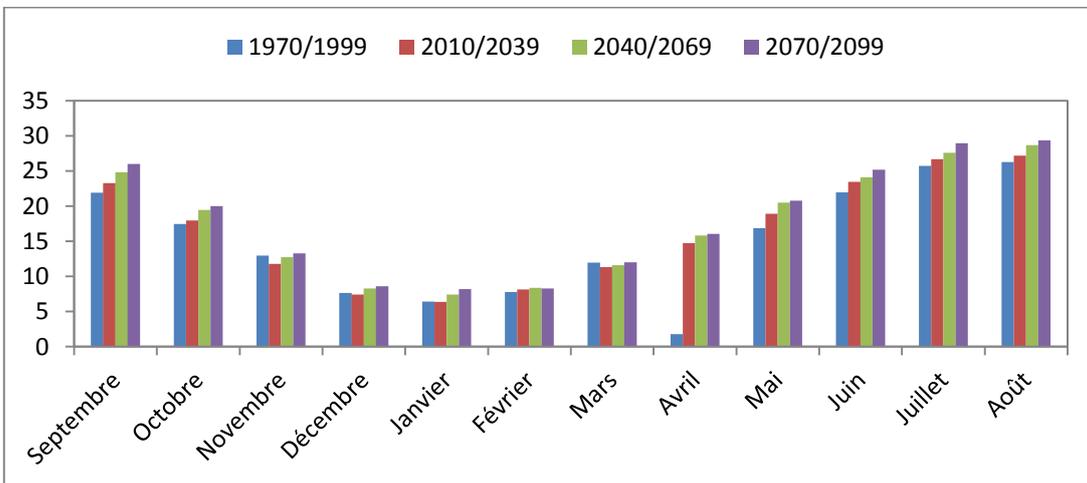


Figure V.53 : Evaluation des températures moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Haciabia.

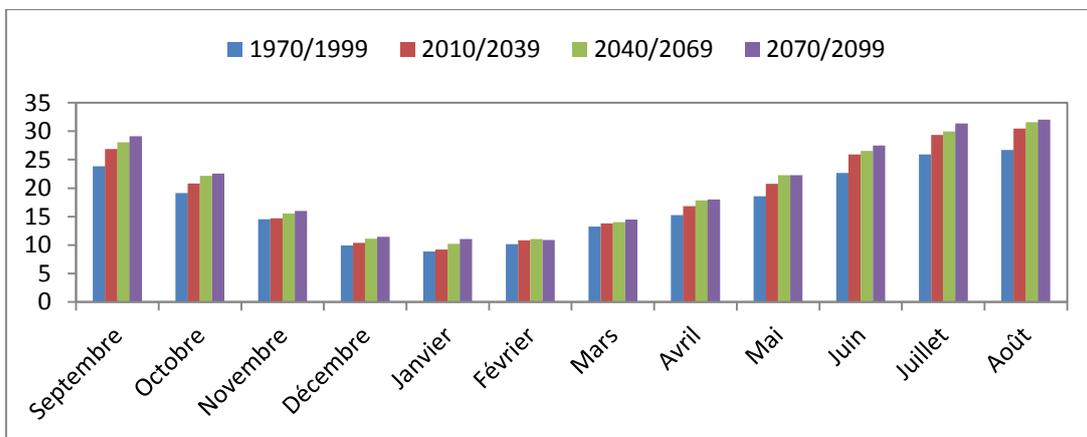


Figure V.54 : Evaluation des températures moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Sidi Djillali.

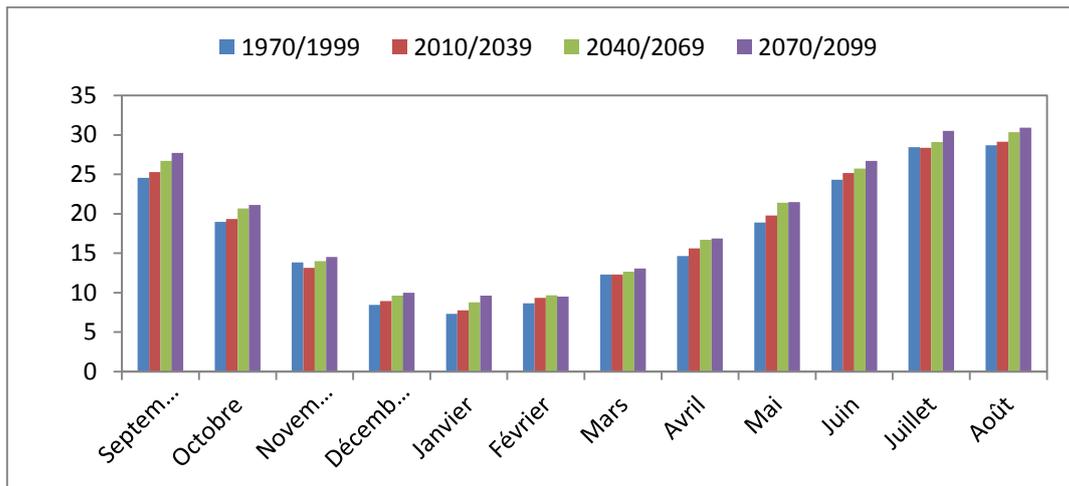


Figure V.55 : Evaluation des températures moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin d'Ammi Moussa.

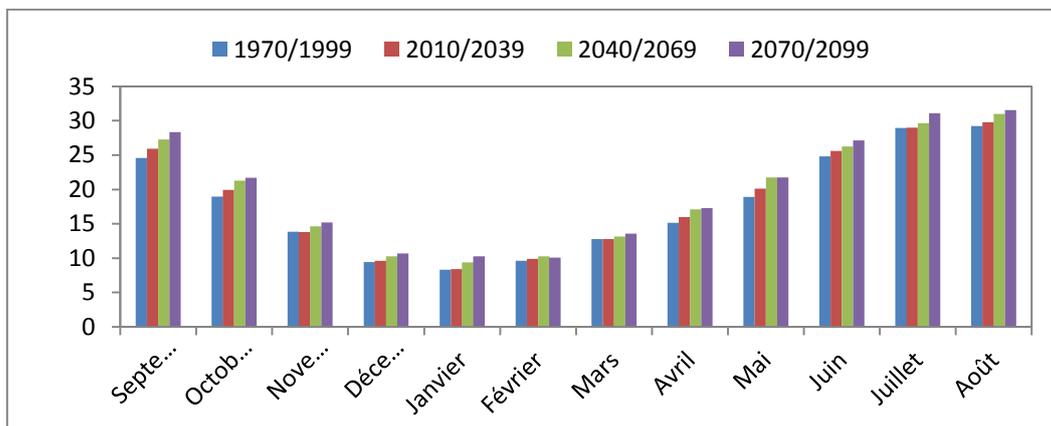


Figure V.56 : Evaluation des températures moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin d'Ouled Ben A.E.K.

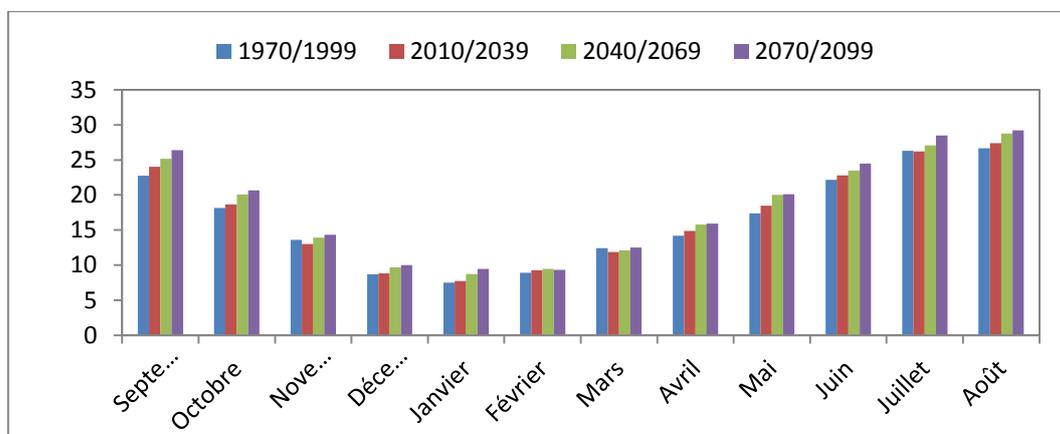


Figure V.57 : Evaluation des températures moyennes inter-mensuelles issues de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Chouly.

V.13 Les changements projetés pour les débits futur par le scénario RCP 8.5

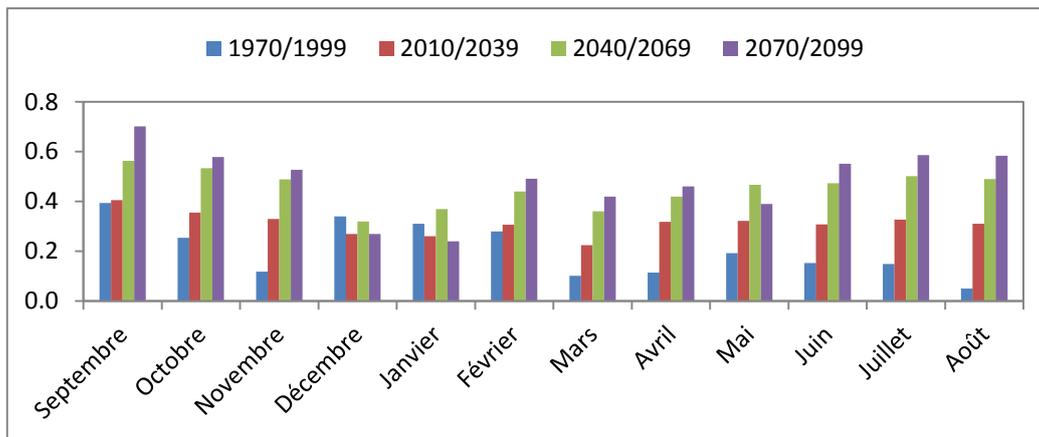


Figure V.58 : Evaluation des débits moyennes inter-mensuelles simulés par le modèle GR2M, en utilisant les sorties de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Haciaibia.

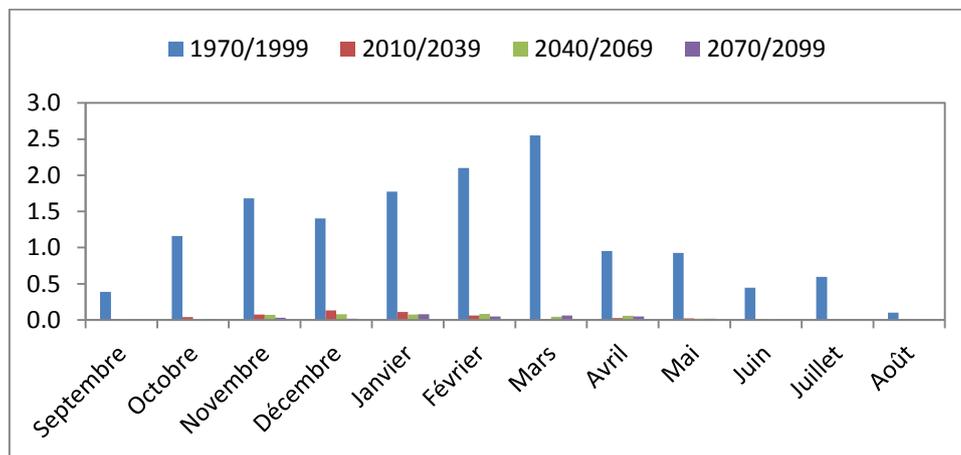


Figure V.59 : Evaluation des débits moyennes inter-mensuelles simulés par le modèle GR2M, en utilisant les sorties de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Sidi Djillali.

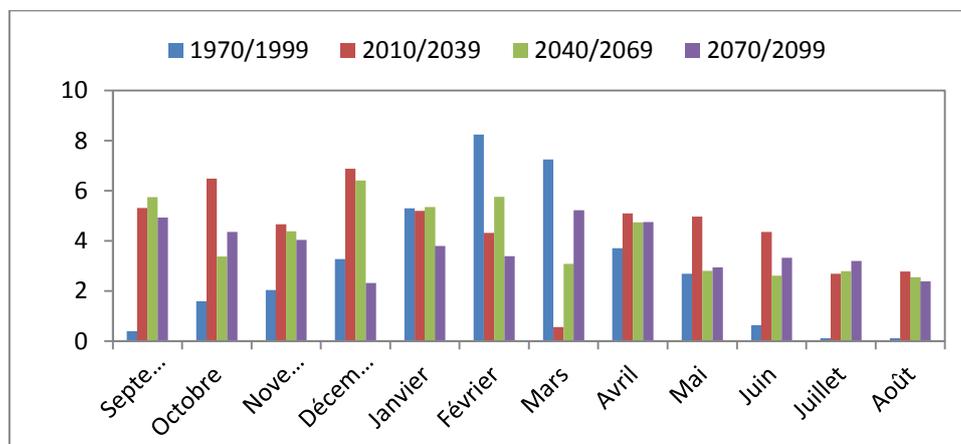


Figure V.60 : Evaluation des débits moyennes inter-mensuelles simulés par le modèle GR2M, en utilisant les sorties de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin d'Ammi Moussa

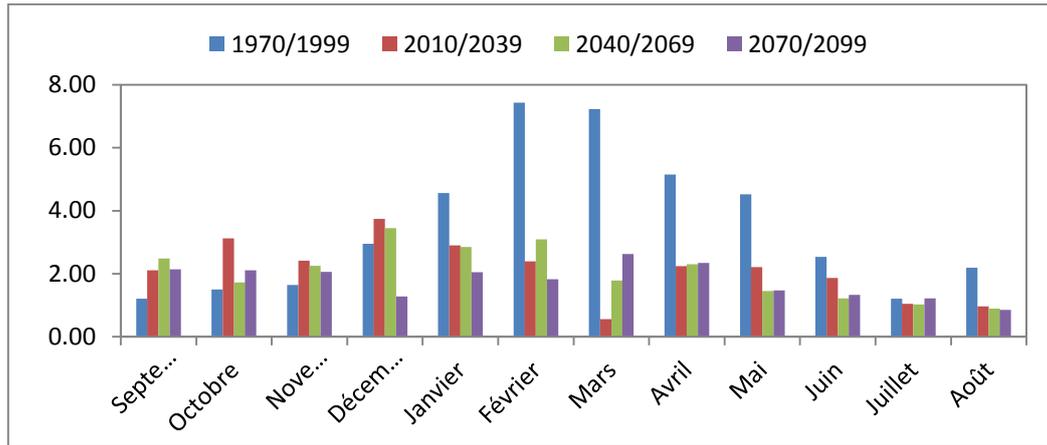


Figure V.61 : Evaluation des débits moyennes inter-mensuelles simulés par le modèle GR2M, en utilisant les sorties de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin d'Ouled Ben A.E.K.

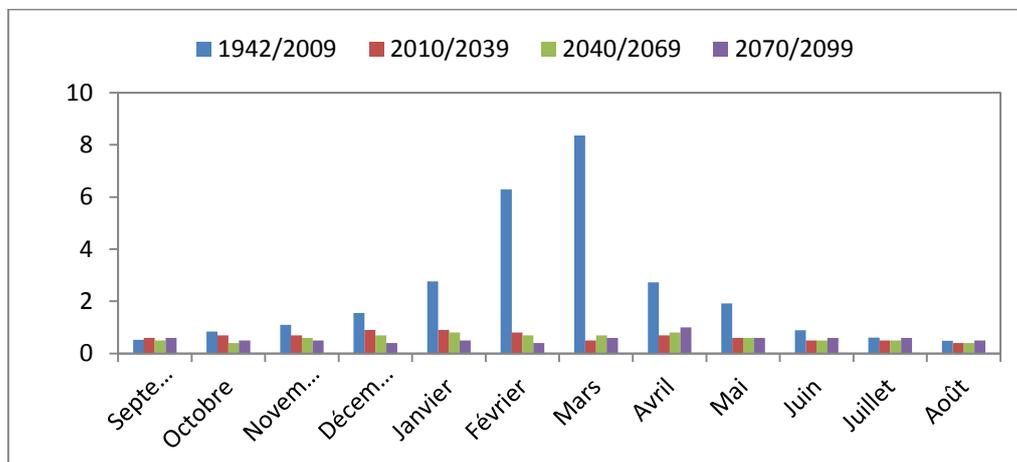


Figure V.62 : Evaluation des débits moyennes inter-mensuelles simulés par le modèle GR2M, en utilisant les sorties de la projection CNRM-CM5, scénario 8.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Chouly.

V.14 Les changements projetés pour les débits futur par le scénario RCP 8.5

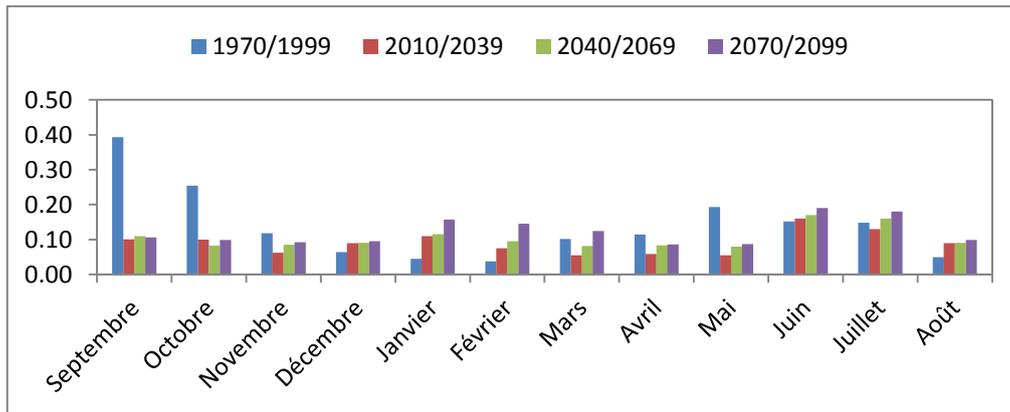


Figure V.63 : Evaluation des débits moyennes inter-mensuelles simulés par le modèle GR2M, en utilisant les sorties de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Haciaibia.

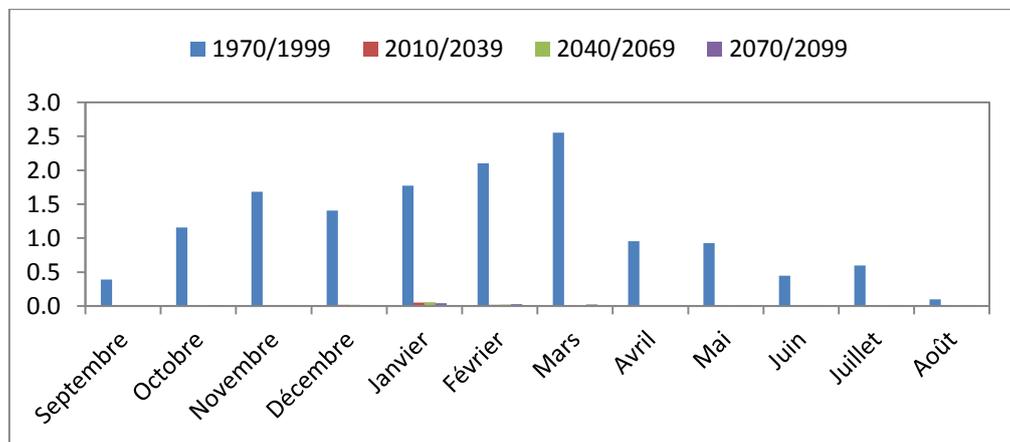


Figure V.64 : Evaluation des débits moyennes inter-mensuelles simulés par le modèle GR2M, en utilisant les sorties de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Sidi Djillali.

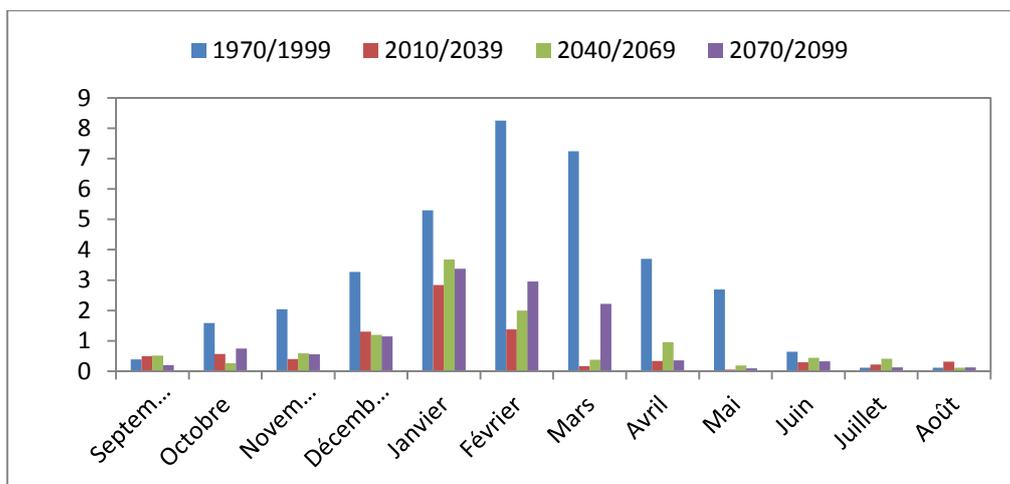


Figure V.65 : Evaluation des débits moyennes inter-mensuelles simulés par le modèle GR2M, en utilisant les sorties de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin d'Ammi Moussa.

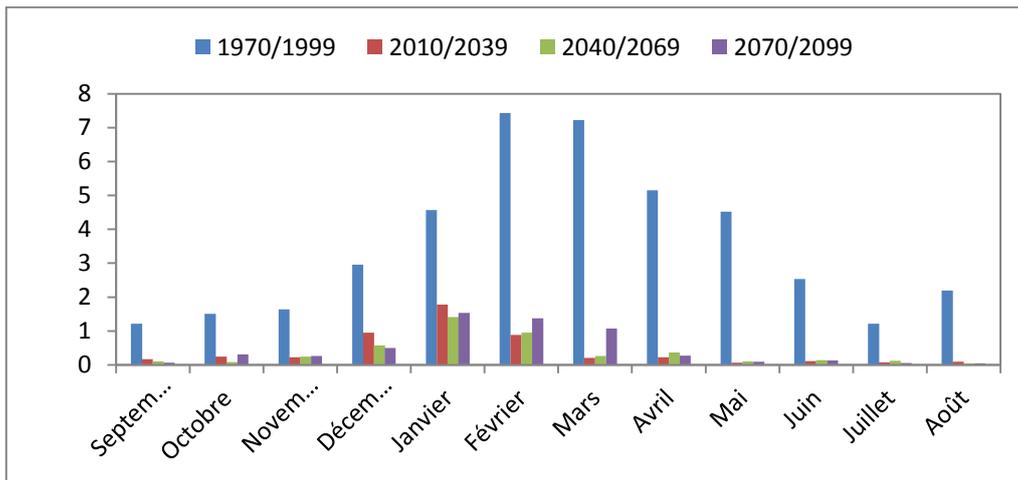


Figure V.66 : Evaluation des débits moyennes inter-mensuelles simulés par le modèle GR2M, en utilisant les sorties de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin d'Ouled Ben A.E.K.

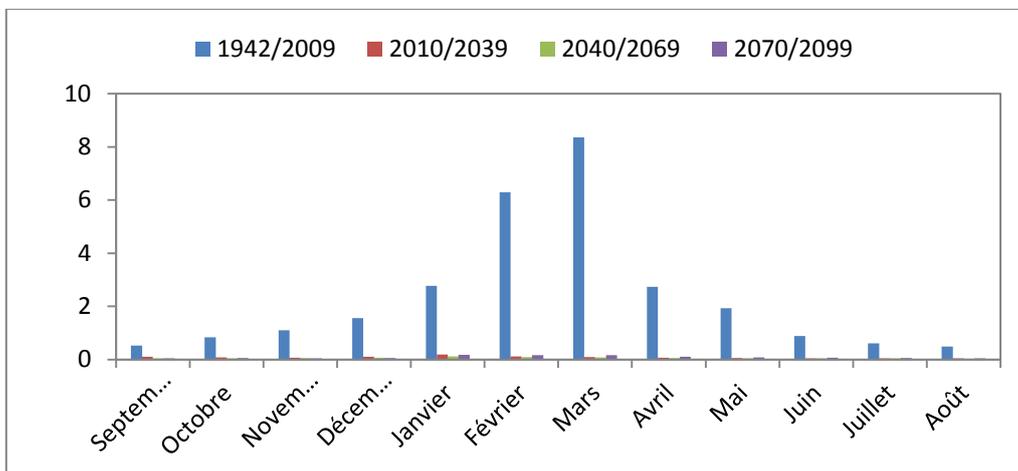


Figure V.67 : Evaluation des débits moyennes inter-mensuelles simulés par le modèle GR2M, en utilisant les sorties de la projection CNRM-CM5, scénario 4.5 avec celle de la période de référence (1970-2009) sur le bassin de Chouly.