

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (Toulouse INP)

Discipline ou spécialité :

Surfaces Interfaces Continentales Hydrologie

Présentée et soutenue par :

Mme AMINA MAMI

le dimanche 15 novembre 2020

Titre :

Impact des changements climatiques sur la disponibilité et la gestion des ressources en eau: cas du bassin versant de la Tafna

---

Ecole doctorale :

Sciences de l'Univers de l'Environnement et de l'Espace (SDU2E)

Unité de recherche :

Laboratoire Ecologie Fonctionnelle et Environnement (ECOLAB)

Directeur(s) de Thèse :

M. JOSE-MIGUEL SANCHEZ-PEREZ

M. DJILALI YEBDRI

Rapporteurs :

M. JOSE MARIA BODOQUE DEL POZO, UNIVERSITE CASTILLA LA MANCHA ALBACETE

M. MOHAMED MEDDI, ENS HYDRAULIQUE DE BLIDA

Membre(s) du jury :

M. BARI ABELLATIF TIDJANI, UNIV SCIENCES ET TECHNOLOGIE D'ORAN, Président

M. DJILALI YEBDRI, UNIV SCIENCES ET TECHNOLOGIE D'ORAN, Membre

M. GIL MAHE, UNIVERSITE DE MONTPELLIER, Membre

M. JOSE-MIGUEL SANCHEZ-PEREZ, CNRS TOULOUSE, Membre

Mme SABINE SAUVAGE, CNRS TOULOUSE, Invité

Remerciement

Avant de présenter ce travail tout d'abord, je tiens à rendre grâce à Dieu Le Tout Puissant pour m'avoir accordé la foi en lui, d'avoir éclairé ma route et de m'avoir guidé dans le bon chemin.

Mes chers parents merci de m'avoir soutenu, encouragé et surtout d'avoir mis à ma disposition tout ce qui me rendait le chemin plus aisé pour cette tâche que ce soit en Algérie ou à l'étranger.

Sabine Sauvage et José Miguel Sanchez Perez, merci d'avoir accepté de diriger ma thèse en cotutelle. Vous m'avez dirigé, conseillé, soutenu et encouragé depuis le premier jour que j'ai atterri à Toulouse.

Djilali Yebdri, merci de m'avoir donné l'opportunité de travailler sur ce thème de recherche, de m'avoir orienté, conseillé, encouragé et accompagné depuis une large partie de mon cursus universitaire et ceci représente énormément pour moi.

Je tiens à remercier les membres de jury, Mr. Bodoque Del Pozo José Maria, Mr. Meddi Mohamed, Mr. Tidjani Abdelatif El-bari et Mr. Mahé Gil, d'avoir évalué ma thèse.

Un spécial remerciement à Mélanie Raimonet qui m'a encouragé et surtout largement aidé lors de l'application de mon projet de thèse ainsi qu'à la rédaction de mes articles.

Zettam Amine, merci de m'avoir aidé à accéder dans le monde de SWAT et de la modélisation.

Roxelane Cakir, Youen Grusson, Jérémy Guilhen, avec vous j'ai appris beaucoup de choses que ce soit dans la vie professionnelle ou dans la vie courante, plus particulièrement Roxelane, je vous en remercie.

Merci à mes collègues et amis de Toulouse Wei Xi, Liliana Dorticos, Clément Fabre, Huguette Massan, Juan Louis Lechuga. Ainsi mes collègues de Usto-MB, Hadj Djelloul Mohamed, Benyerrou Djamila, Kara Omar.

Je tiens à remercier respectueusement tous mes professeurs sans exception pour m'avoir transmis avec générosité le savoir sans lequel ce modeste travail n'aurait pas eu lieu.

Ma famille, merci à vous, mes sœurs Hafsa et Nadjet et mon frère Riadh, vous m'avez toujours soutenu pendant ce chemin que j'ai parcouru de cette thèse, mes amies Amina Benhalouche, Atika Meharrar et particulièrement Asmahan Taleb Ahmed qui m'encourageait tout le temps.

Je remercie aussi Sabrina Taibi de m'avoir aidé à franchir une étape de mon projet de thèse

A la fin je remercie tous ceux qui m'ont de prés ou de loin aidé à réaliser ce modeste travail.

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Changements relatives en precipitation (en %) pour la période 2090-2099. 19
Figure 2. Panneau de gauche : les lignes continuessont des moyennes de multi-modèle globaux de la surface de réchauffement (relative à 1980-1999) pour SRES scénarios A2, A1B et B1, présentées comme des continuités de simulations pour le 20ème siècle. 19
Figure 3 . Changements relatifs à grande échelle du ruissellement annuel (variabilité de l'eau, en pourcentage) pour la période 2020-2099, par rapport à 1980-1999. 20
Figure 4. Changement de la température de l'air (moyenne de l'ensemble CMIP5 par rapport à la période 1986 - 2005) 21
Figure 5. Écarts de la précipitation saisonnière (moyenne de l'ensemble CMIP5 par rapport à la période 1986 - 2005) pour les périodes estivales (avril – septembre) et hivernales (octobre - mars) pour chacun des 4 scénarios RCP. 22
Figure 6. Ptest results of progressive decrease of precipitation (a): Beni Bahdel station; (b) Lalla-Setti station (Tlemcen)..... 22
Figure 7. L'indice d'aridité à l'échelle du continent de l'Afrique pour la période 1975-1995. 23
Figure 8. Répartition géographique de la proportion (%) des cumuls des précipitations moyennes saisonnières au total moyen annuel sur la zone méditerranéenne, de 1950 à 1999 (Xoplaki, 2002)..... 24
Figure 9. Schématisation du module hydrologie de SWAT (adapté de Neitsch et al., 2005) 27
Figure 10. Concept de réduction d'échelle spatiale. (Source: David Viner, Climate Research Unit, University of East Anglia, R.U: "http://www.cru.uea.ac.uk/") 30
Figure 11. Représentation de la régression dynamique et statistique (adapté pour le bassin de la Tafna). 31
Figure 12. Les éléments du système d'eau et leurs interactions avec l'homme. 33
Figure 13. La situation géographique des bassins hydrographiques du Nord de l'Algérie (Hamlet, 2014).35
Figure 14. Taux d'envasements des barrages du territoire Algérien en 2014 (Remini, 2018)..... 36
Figure 15. Résumé de la procédure de l'étude des changements climatiques du bassin versant de la Tafna. 40
Figure 16. Localisation du basin versant de la Tafna, avec station météorologique et hydrométriques. .. 42
Figure 17. Code et noms des bassins versants de l'Algérie. 1-Cheliff ; 2-Côtiers Algérois ; 3-Côtiers Constantinois ; 4-Côtiers Oranais ; 5-Chott el Hodna ; 6-Chott Melrhir ; 7-Hauts plateaux constantinois ; 8-Chott Chergui ; 9-Isser ; 10-Kebir Rhumel ; 11-Macta ; 12-Medjerda; 13-Sahara ; 14-Syebousse ; 15-Soummam ; 16-Tafna ; 17-Zahrez. (Yebdri, 2006)..... 43
Figure 18. Réseau hydrologique du bassin de la Tafna. 44
Figure 19. Carte d'occupation des sols du bassin versant de la Tafna. 45
Figure 20. Carte sols du bassin versant de la Tafna. 45
Figure 21. Hydro-climatologie du bassin de la Tafna pour la période passée 1981-2010. 46
Figure 22. Définition de l'unité de réponse hydrologique (HRU) par SWAT 49
Figure 23. Processus hydrologiques modélisés par SWAT (adaptée de Neitsch et al., 2005). 51
Figure 24. Délimitation du bassin versant en sous-bassins versant par SWAT. 61
Figure 25. Classes de pentes établis par SWAT 62

Figure 26. Bilan hydrologique interannuel (en mm) du bassin versant de la Tafna (1981-2010) établi avec le programme SWAT Check et comparé aux données de l'ANRH (valeurs encadrées en rouge). 63
Figure 27. Calibration et validation du modèle SWAT en comparaison avec les observations de stations hydrométriques utilisées dans le bassin versant de la Tafna. 65
Figure 28. Comparaison des débits mensuels des cours d'eau obtenue à partir de simulations SWAT forcé des séries de données météorologiques observées (Ref), avec des sorties de RCM non-corrigées (décharge brute), et avec 9 combinaisons de précipitations et de la température corrigés du biais des dix sorties des RCMs, pour Janvier et Juillet au cours de la période de référence (1981-200) 74
Figure 29. Comparaison des débits fluviaux interannuels moyens (pour une période de 20 ans) des sorties du modèle NCC-NorESM1-M -RCA4 non corrigées et corrigées par la combinaison de méthodes DM-DM sur la période (2000-2100) 75
Figure 31. Distribution statistique du SPI-12 mois pour les deux mois Janvier (à gauche) et Juillet (à droite) pour la période future (per1 : 2020-2039 ; per2 : 2040-2059 ; per3 : 2060-2079 et per4 : 2080-2099) 121
Figure 32. Distribution statistique du SPEI-12 mois pour les deux mois Janvier (à gauche) et Juillet (à droite) pour la période future (per1 : 2020-2039 ; per2 : 2040-2059 ; per3 : 2060-2079 et per4 : 2080-2099) pour les RCP 4.5 (jaune) et RCP 8.5 (orange), comparées à celles de la période de référence (ref) 1981-2000, au niveau des stations climatiques (1 à 5 de haut en bas) du bassin de la Tafna. 124
Figure 33. Distribution statistique du SRI-12 mois pour les deux mois Janvier (à gauche) et Juillet (à droite) pour la période future (per1 : 2020-2039 ; per2 : 2040-2059 ; per3 : 2060-2079 et per4 : 2080-2099) pour les RCP 4.5 (vert claire) et RCP 8.5 (vert foncé), comparées à celles de la période de référence (ref) 1981-2000, ... 125
Figure 30. Précipitations mensuelles totales pendant la période de référence (1981-2000) et variations absolues pour les périodes (2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 et 2080-2099) sous RCP 4.5 et 8.5, pour janvier (gauche) et juillet (droite) 131

TABLE DES MATIÈRES

I. LISTE DES FIGURES 2
II. TABLE DES MATIERES 4
production scientifique 7
INTRODUCTION GENERALE 11
I. CHAPITRE I. CONTEXTES ET OBJECTIFS 16
I. 1. Historique et généralité sur le climat et la modélisation hydrologique 17
I. 2. Changement climatique global 17
I. 3. Changement climatique dans le bassin Méditerranéen 23
I. 3. a. L'impact du climat dans le passé 23
I. 3. b. Le climat du Nord de l'Algérie 24
I. 4. Approches en modélisation hydrologique 24
I. 5. Le modèle SWAT et les changements climatiques 26
I. 6. Les modèles climatiques 27
I. 7. La gestion de l'eau en Algérie 31
I. 7. a. La situation de l'eau en Algérie 34
I. 7. b. Les bassins hydrographiques de l'Algérie 34
I. 7. c. Les ressources en eau superficielles 35
I. 7. d. Barrages 36
I. 7. e. Les ressources en eau souterraines 36
I. 8. Objectifs 37
METHODOLOGIE 39
II. CHAPITRE II. LE BASSIN VERSANT DE LA TAFNA 41
II. 1. Description de la zone d'étude 42
II. 1. a. Localisation 42
II. 1. b. Occupation des sols de la Tafna 44
II. 1. c. Les sols de la Tafna 45
II. 2. Hydro-climatologie de la Tafna 46
II. 3. Critique de la série de données 46
III. CHAPITRE III. CONCEPTUALISATION DU MODELE SWAT 48
III. 1. Description du modèle SWAT 49
III. 1. a. Module hydrologique 50
- L'interception 51

- Le ruissellement 52
- La teneur en eau du sol 52
- Ecoulement latéral 53
- Evapotranspiration potentielle et réelle 54

Evapotranspiration potentielle 54

La méthode de Penman-Monteith 54

La méthode de Priestley- Taylor 54

La méthode de Hargreaves 55

Evapotranspiration réelle 55

III. 1. b. Evaluation statistique des résultats 57

- Evaluation de la performance hydrologique du modèle 57

Nash-Sutcliffe 57

Coefficient de détermination 57

Kling-Gupta Efficiency 57

III. 1. c. Analyse de la variation temporelle 58

- Test de Mann-Kendall 58

IV. CHAPITRE IV. MODELISATION HYDROLOGIQUE 60

IV. 1. Application du modèle SWAT sur le bassin de la Tafna 61

IV. 1. a. Données disponibles 61

- Délimitation en sous bassins versant par SWAT 61
- Les classes de pentes 62

IV. 1. b. Calibration du modèle 62

- Les stations hydrologiques calibrées et validées 63
- Analyse de sensibilité et calibration 66

RESULTAT 67

V. CHAPITRE V: FUTURE CLIMATIC AND HYDROLOGIC CHANGES ESTIMATED BY BIAS-ADJUSTED REGIONAL CLIMATE MODEL OUTPUTS OF THE CORDEX-AFRICA PROJECT: CASE OF THE TAFNA BASIN (NORTH-WESTERN AFRICA) 69

V. 1. résumé de l'article en français 70

V. 1. a. contexte et objectif 70

V. 1. b. Principaux résultats 73

V. 2. Discussion de l'article en français 76

V. 3. Conclusion de l'article en français 80

V. 3. a. Publication 80

VI. CHAPITRE VI : L'EVALUATION DES CARACTERISTIQUES DE SECHERESSE A L'AIDE D'INDICES STANDARDISES 114
VI. 1. Application des indices de sécheresse 115
VI. 1. a. Standardized precipitation index (SPI) 115
VI. 1. b. Standardized precipitation and evapotranspiration index (SPEI) 116
VI. 1. c. Standardized runoff index (SRI) 117
VI. 1. d. Catégories de sécheresse et d'humidité définies par SPI, SPEI, et SRI. 117
VI. 2. Application des indicateurs de sécheresse sur le bassin versant de la Tafna 118
VI. 3. Résultats et discussion. 118
VI. 4. Conclusion 123
VII. CHAPITRE VII: SPATIO-TEMPORAL EVALUATION OF TRENDS OF HYDROLOGICAL WATER COMPONENTS: CASE OF TAFNA BASIN (NORTH-WESTERN AFRICA) 127
VII. 1. Résumé de l'article en français 128
VII. 1. a. Contexte et objectif 128
VII. 1. b. Principaux résultats 131
VII. 1. c. Discussion des résultats de l'article 132
VII. 2. Conclusion de l'article en français 136
VII. 2. a. Publication 136
VIII. CHAPITRE VIII : DISCUSSION GENERALE 185
IX. CHAPITRE IX : CONCLUSION GENERALE 198
X. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 202
XI. ANNEXE 217

PRODUCTION SCIENTIFIQUE

Articles scientifiques :

- Mami, A., Raimonet, M., Yebdri, D., Sauvage, S., Zettam, A., Sanchez-Perez, J.-M., in press. Future climatic and hydrologic changes estimated by bias-adjusted regional climate model outputs of the Cordex-Africa project: case of the Tafna basin (North-Western Africa). Int. J. Glob. Warm. in press.
- Mami, A., Yebdri, D., Sauvage, S., Raimonet, M., Sanchez-Perez, J.M., in revision. Spatio-temporal trends of hydrological components: case of the Tafna basin (Northwestern Africa). J. Water Clim. Change.

Colloques Internationaux :

- Mami, A., Yebdri, D. : La disponibilité en eau superficielle dans le bassin versant de l'oued Mouillah (Nord-Ouest de l'Algérie). *la 3ème Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER-2015),* 21-23 Décembre 2015, Sousse, Tunisie.
- Mami, A., Yebdri, D. : Les ressources en eau superficielles et La vulnérabilité face aux changements climatiques dans le bassin de l'oued Mouillah., *29ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, 6 – 9 Juillet 2016, Besançon, France.
- Mami, A., YEBDRI, D., SAUVAGE, S., and SANCHEZ-PEREZ, J.M. Poster: Assessing the impact of regional climate models on the hydrology of a semi-arid watershed using the swat model: The case of the wadi Tafna (Algeria). *International SWAT Conference*, 26-30 juin 2017; Varsovie, Pologne.
- Mami, A., YEBDRI, D., SAUVAGE, S., and SANCHEZ-PEREZ, J.M. poster: Assessing surface water resources in a wed hydrosystem by using regional climate model output data in swat hydrological model: Case of the tafna river (algeria), *Conférence des 10 ans d'ECOLAB* , juillet 2017 :, 09-12 juillet 2017, Toulouse, France

- Mami, A., SAUVAGE, S., YEBDRI, D., and SANCHEZ-PEREZ, J.M. Poster: Evaluating the impact of regional climate models on hydroloy of a semi-arid watershed using SWAT model: the case of the Wadi Tafna (Algeria). *Conférence internationale sur l'hydrologie des grands bassins africains,* 6 – 9 Mai 2018 à Alger, Algérie

الملخص

شمال غرب الجزائر هي واحدة من اكثر المناطق حساسية لتقلبات المناخ و تغييرهٍ حيث لوحظ انخفاض هطول الأمطار على طول شمال أفريقا. يتم تنفيذ النموذج المفاهمي " س.و.ا.ت" شبه الموزع بالمعايرة والتحقق من الصحة على مدى فترة زمنية طويلة على مستوى مستجمعات المياه تافنة. كان استخدام وتقييم الأداء لطرق تصحيح التحيز لنماذج المناخ الإقليمية لمشروع كوردكس-أفريقيا ، وتأثيرها على الهيدرولوجيا خلال الفترة المرجعية موضوع فصل كامل من أجل دراسة التغيرات المناخية وتأثيراتها على الدورة الهيدرولوجية خلال الفترة المستقبلية 2020-2099 على مستوى المنطقة المدروسة. تم تحديد أهم الاتجاهات لانخفاض هطول الأمطار طوال القرن الحادي والعشرين. أثرت هذه الانخفاضات على جميع مكونات الدورة الهيدرولوجية من تدفق الأنهار إلى التبخر. سمح لنا نموذج " س.و.ا.ت" بتمثيل توزيع المكونات الهيدرولوجية المختلفة ، وتدفق الدورات، والجريان السطحي في أي نقطة من الأحواض الفرعية ، والمطر ، وتدفق المياه في الماء ، ومحتوى التربة على نطاق زمني ومكاني. ، والتبخر خلال فترة خط الأساس واتجاهات التغيرات خلال الفترات المستقبلية التي تمت دراستها في هذا العمل. سمحت لنا هذه النتائج بتعريف تأثير انخفاض هطول الأمطار على هذه المكونات الهيدرولوجية خلال الشهرين المغطاة في هذه الدراسة ، يناير ويوليو ، بالإضافة إلى معرفة توزيع واتجاهات وتفاعلات كل الشهور بكاملها. عام. تتأثر المكونات الهيدرولوجية (الجريان السطحي ، التبخر ... إلخ) بانخفاض معدل هطول الأمطار خلال الفترة المستقبلية بحوالي -35٪ ، ويمكن رؤية هذا التأثير خلال الأشهر الرطبة مع انخفاض تدفق مجاري المياه وتراوح المحتوى المائي في التربة نحو -40٪ والتدفق الجانبي والتبخر النتح بحوالي -30٪. ومع ذلك ، فإن المبالغة في تقدير آليات التنسيق الإقليمية خلال فترة الصيف عكس الاتجاه نحو زيادة هطول الأمطار وكذلك المكونات الهيدرولوجية. بعد كل شيء. سمحت لنا هذه المؤشرات المستخدمة بتعيين فئات الجفاف والرطوبة لنتائج الإسقاط التي تم الحصول عليها في هذه الدراسة.

Le Nord-Ouest Algérien figure parmi les zones les plus sensibles aux variabilités et changements climatiques, dont la baisse de précipitations a été marquée le long du Nord de l'Afrique. Une mise en place du modèle conceptuel semi-distribué SWAT avec une calibration et une validation sur une période de vingt neuf ans (1981-1995 pour la calibration et 1996-2010 pour la validation) est effectuée au niveau du bassin versant de la Tafna. L'utilisation et l'évaluation de la performance des méthodes de correction du biais des modèles climatiques régionaux du projet Cordex-Africa, et leur impact sur l'hydrologie pendant la période de référence a fait l'objet de tout un chapitre afin d'étudier les changements climatiques et leurs impacts sur le cycle hydrologique pendant la période future 2020-2099 au niveau la région étudiée. Les tendances les plus significatives ont été marquées pour les baisses de précipitations tout au long du 21ème siècle. Ces baisses ont influencé toutes les composantes du cycle hydrologique du débit des cours d'eau jusqu'à l'évapotranspiration. Le modèle SWAT nous a permis de représenter à l'échelle temporelle ainsi que spatiale la distribution des différentes composantes hydrologiques, débits des cours d'eau, ruissellement en tout point des sous-bassins versants, les précipitations, l'écoulement latéral, la teneur en eau dans le sol, et l'évapotranspiration pendant la période de référence et les tendances de changements pendant les périodes futures étudiées dans ce travail. Ces résultats nous ont permis de définir l'impact des diminutions des pluies sur ces composantes hydrologiques durant les deux mois traités dans cette étude Janvier et Juillet, ainsi que de constater la distribution, les tendances et les interactions de l'ensemble des mois de l'année. Les composantes hydrologiques (ruissellement, évapotranspiration…etc.) sont impactés par la baisse des pluies durant la période future d'environs -35%, cet impact est visible, pendant les mois humides avec une baisse du débit des cours d'eau et de la teneur en eau dans le sol variant autours de -40% et l'écoulement latéral ainsi que l'évapotranspiration d'environ -30%. Toutefois, la surestimation des pluies sur les projections des RCMs pendant la période estivale a inversé la tendance vers une augmentation des pluies ainsi que les composantes hydrologiques. Afin d'avoir une vue générale sur les résultats des tendances obtenues dans cette étude, nous avons évalué le degré de sécheresse à l'aide d'indices de sécheresse standardisés, en utilisant certaines composantes telles que la pluie, l'évapotranspiration et le ruissellement. Ces indices utilisés nous ont permis d'attribuer une estimation de sécheresse comprise entre *modérée* à *forte* à moyen et long terme, pour le bassin versant de la Tafna.

North West Algeria is one of the areas most sensitive to climate variability and change, where the decrease in rainfall has been marked along the North of Africa. The SWAT semi-distributed conceptual model is implemented with calibration and validation over a considerable period of time at the level of the Tafna watershed. The use and performance evaluation of the bias correction methods of the regional climate models of Cordex-Africa project, and their impact on hydrology during the reference period has been the subject of a whole chapter in order to study climate changes and their impacts on the hydrological cycle during the future period 2020-2099 at the scale of the studied region. The most significant trends were marked for decreases in precipitation throughout the 21st century. These decreases affected all components of the hydrological cycle from the river discharge to evapotranspiration. The SWAT model allowed us to represent on a temporal as well as spatial scale the distribution of the various hydrological components, river discharge, surface runoff at any point of the sub-watersheds, precipitation, lateral flow, soil water content, and evapotranspiration during the reference period and trends changes during future periods studied in this work. These results allowed us to define the impact of rainfall reduction on these hydrological components during the two months covered in this study, January and July, as well as to see the distribution, trends and interactions of all the months of the year. The hydrological components (runoff, evapotranspiration, etc.) are impacted by the decrease in rainfall during the future period of around -35%, this impact is visible, during the wet months with a decline in the river discharge and the soil water content varying towards -40%, and the lateral flow as well as the evapotranspiration of around -30%. However, the overestimation of RCMs during the summer period reversed the trend towards increased rainfall as well as hydrological components. In order to have a general view of the trend results obtained in this study, we evaluated the degree of drought using standardized drought indices, using certain components such as precipitation, evapotranspiration and runoff. These indices used allowed us to assign an estimation of drought comprise between *moderate* and *severe* on the Tafna basin.

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est une ressource qui a fait l'objet de nombreuses études étant donné que c'est un élément fondamental à la vie parmi les ressources renouvelables. Cette ressource qui a fait naitre des civilisations depuis la nuit des temps, et qui continue à contribuer au développement de l'industrie, l'agriculture et les villes. Pour préserver cette ressource, il est primordial d'avoir une meilleure connaissance à l'échelle quantitative et qualitative, disposer des ouvrages adéquats de stockage et transfert, et proposer une bonne gestion de cette ressource. Les ressources d'eau douce constituent 3% du total et seulement 1% est mobilisables par rapport aux eaux salées distribuées dans les océans et les mers qui sont à l'ordre de 97% couvrant la terre, et qui est aussi distribuée sous différente formes, liquide et solide (glace) donc on peut estimer une quantité réduite disponible pour l'usage humain (moins de 1%). La distribution spatiale de cette quantité réduite d'eau est très variable et peut engendrer des problèmes à niveau local : Dans certaines régions cette ressource est trop rare, ce qui entraine des situations de pénuries, de désertification et d'exode de la population. D'autre part, trop abondante, elle peut causer des inondations catastrophiques (Yebdri, 2006). La gestion des ressources en eau nécessite une connaissance approfondie sur la région en question à fin d'aboutir à un équilibre sur le ratio de la disponibilité et la demande en eau.

Les circulations atmosphériques ainsi que les émissions des gaz à effet de serre causés par les activités anthropiques ont engendré des changements des variations climatiques. Les récentes décennies ont connu un accroissement continu de température dans la plus part des régions du monde et les changements des régimes pluviométriques ont augmenté les fréquences des événements climatiques extrêmes tels que la sécheresse et les inondations (Li and Urban, 2016). Ces changements ont un impact sur le cycle hydrologique. De ce fait certaines régions, qui sont déjà vulnérables aux variabilités climatiques, ont connu et connaitrons un stress hydrique. Un groupe de chercheurs scientifiques se sont concentrés sur

les études de ces changements climatiques et leurs impact sur différents domaines à cours, moyen et long termes (AR4, 2007; IPCC Working Group I et al., 2013).

Afin d'étudier les projections futures des variabilités et changements climatiques, des modèles climatiques globaux (GCM) ont été crées et développés à l'échelle du globe. Ils ont fait l'objet d'une multitude de projet de recherche. Par ailleurs, les chercheurs scientifiques qui s'intéressent aux études régionales, ont effectué une réduction d'échelle de ces GCMs. De ce fait, différents instituts de recherches scientifiques ont produit des modèles climatiques à des échelles régionales. Les modèles climatiques régionaux (RCM) sont obtenus par une réduction d'échelle à partir des modèles climatiques globaux, que l'on appelle « dynamical downscaling », ces RCMs servent à étudier l'impact des changements climatiques sur le cycle hydrologique des périodes passées et ainsi que les tendances futures à l'échelle régionale. Il existe différents projet de downscaling dont Cordex qui est disponible pour 14 domaines (Afrique, Europe, Asie, Moyen-Orient-Nord-Afrique…etc.) qui comprend 4 scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5) dont celui du RCP 4.5 et 8.5 ont été utilisés dans notre travail.

SWAT est un modèle conceptuel à base physique semi-distribué. Le modèle SWAT est un outil d'aide à la gestion des ressources en eau, utilisé pour des bassins de quelques centaines de kilomètres carrés à des grands bassins de plusieurs milliers de kilomètres carrés. Le modèle SWAT est répandu dans le domaine de la recherche scientifique pour les domaines de l'hydrologie (Yebdri, 2006; Youssef Brouziyne et al., 2017), qualité des ressources en eau (Zettam et al., 2017 ; Hallouz et al., 2019), et les changements climatiques (Grusson, 2016) ainsi que par des simulations de changements de pratiques agricoles.

La région Méditerranéenne a été le centre d'intérêt de différentes études pour évaluer les variabilités et projections climatiques en utilisant les modèles climatiques régionaux (Filippo Giorgi et al., 2009; Taibi et al., 2017; Tramblay et al., 2013; Zanis et al., 2009; Zeroual et al., 2018). Le Nord-Ouest Algérien figure parmi les zones les plus sensibles aux variabilités et changements climatiques dont la baisse de précipitations a été marqués le long du Nord de l'Afrique (Meddi et al., 2010; Taibi, 2016; Xoplaki et al., 2004).

Plusieurs études menées dans les différentes régions du pourtour Méditerranéen se sont intéressées à l'analyse des simulations issues des sorties de ces modèles climatiques régionaux pour évaluer d'une part leur performance mais aussi pour anticiper sur l'évolution future à

l'horizon 2050 jusqu'à 2100 des précipitations moyennes et extrêmes et leu impact sur l'hydrologie.

On trouve dans les travaux précédents les études sur la variabilité et/ou les changements climatiques sur le Nord-Ouest de l'Algérie pour la période passée (Amel Bakreti et al., 2013; Bakreti et al., 2013; Meddi and Meddi, 2009; Meddi et al., 2010; Meddi and Hubert, 2003) et celle du future (Taibi, 2016; Zeroual et al., 2018), traitant la variable pluie où son influence sur les débits des cours d'eau. Ceci nous mène à nous intéresser au cycle hydrologique et son influence par les changements climatiques en analysant ses différents compartiments, tel que l'évapotranspiration, la teneur en eau dans le sol le ruissellement…etc., à long terme par la modélisation hydrologique et l'utilisation des projections des modèles climatiques régionaux à l'échelle annuelle et mensuelles.

Notre travail repose sur sept chapitres afin d'atteindre l'objectif de l'étude de l'impact des changements climatiques sur les composantes du cycle hydrologique, à l'échelle du bassin versant de la Tafna situé dans le Nord-Ouest de l'Algérie.

Le premier chapitre rapporte les études bibliographiques évoquant l'aspect climatique et hydrologique dans sa partie modélisation, dans le but d'y apporter les compléments nécessaires à l'élaboration d'une méthodologie correspondante aux objectifs à atteindre.

Le second chapitre fait référence à la présentation du site d'étude, suivi par le troisième qui définit la description du modèle hydrologique. Le quatrième développe son application sur le site d'étude par l'implantation du modèle SWAT, sa calibration et sa validation sur le bassin de la Tafna ;

Le cinquième chapitre est présenté sous forme d'un article traitant, l'utilisation des modèles climatiques régionaux (RCM), la correction statistique du biais existant entre ces RCM et les observations du site d'étude, l'impact de cette correction sur l'hydrologie, ainsi que l'évolution des trois composantes hydro-climatiques -précipitation, température et débit- dans le futur. Cet article a été accepté pour publication dans le journal « International Journal of Global Warming » ;

Le sixième chapitre comprend la classification des sécheresses aux résultats de tendances obtenus à l'aide des indices standardisés de sécheresse.

Le septième et dernier chapitre est présenté sous forme d'un second article. Cette partie concerne la représentation et l'analyse spatio-temporelle des composantes du cycle hydrologique -Pluie, ruissellement, teneur en eau des sols et évapotranspiration…etc.- vis-à-vis du changement climatique futur sous deux scénarios de forçage d'émission de gaz à effet de serre, le RCP 4.5 et le RCP 8.5. Cet article est soumis au journal « Journal of Water and Climate Change ».

En clôture de la présente, une discussion générale synthétisant les résultats obtenus met la dernière main avec une conclusion générale ainsi qu'une suggestion d'un certain nombre de perspectives à même d'apporter un plus à cette modeste thèse.

CHAPITRE I. CONTEXTES ET OBJECTIFS

Ce chapitre développe l'historique et les généralités du climat et les changements climatiques dans la région Méditerranéenne et plus particulièrement le Nord de l'Afrique. Ainsi que les approches de la modélisation hydrologique et le contexte de la gestion de l'eau en Algérie, et résume à sa fin les objectifs de cette étude.

I. 1. Historique et généralité sur le climat et la modélisation hydrologique

Le climat et les changements climatiques sont des sujets qui intéressent un nombre important de chercheurs scientifiques, et cela depuis des siècles, Stehr (2000) par exemple s'intéressait au sur l'impact des variations climatiques 19ème siècle. Par contre, Paloque (1949) a étudié la sécheresse dans le Sud-Ouest de la France (Toulouse) dans le 20ème siècle.

La fin du 20ème siècle et début de celui du 21ème ont été imprégnées par un intérêt remarquable sur les études des variabilités climatiques. Ces variabilités causées par un forçage externe naturel comme le volcanisme et la variabilité solaire (Boé, 2007). Le forçage externe anthropique qui est le forçage radiatif a été, A la fin du 20ème siècle, la cause des changements climatiques traduits par l'augmentation de la température et les diminutions des précipitations. Entre 1970 et 2004 les émissions de GES imputables aux activités humaines représentent 70% des émissions (AR4, 2007). Les facteurs principaux de l'augmentation des émissions du CO_2 liées à la consommation d'énergie sont la croissance démographiques mondiale et l'intensité énergétique globale. Dans le 4ème rapport du GIEC (AR4, 2007) le taux de rejet de Dioxyde de Carbone, le principal gaz à effet de serre anthropique, a été estimé à 80% entre 1970 et 2004, soit de 21 à 38 Gt (Gigatonnes).

La modélisation pluie-débit a débuté à partir des années 1850 (Todini, 1988) pour résoudre les problèmes d'ingénierie qui consiste à la conception des systèmes de régulation des flux urbains et ruraux. Les méthodes de modélisation hydrologique ont évolué au fil du temps de la plus simple (basée sur le temps de concentration) à la plus sophistiquée (modèles distribués) (Grusson, 2016; Todini, 2007). Ainsi c'est avec le développement des ordinateurs et leurs puissances de calculs, que les méthodes de conception introduites pour les modélisations hydrologiques deviennent de plus en plus complexes.

I. 2. Changement climatique global

La météorologie dans un endroit défini représente la variabilité atmosphérique pour une période brève. Le climat est cependant caractérisé par les conditions atmosphériques durant une longue période de temps (Xoplaki, 2002). Parmi les éléments climatiques on cite : les précipitations ; la température ; l'humidité ; la vitesse du vent…etc.

Le changement climatique est défini par le GIEC (groupe d'expert intergouvernemental sur l'évaluation du climat) par le changement de l'état du climat qui est identifié par les changements dans la moyenne et/ou la variabilité des ses propriétés, et sa persistance pour une période considérable, typiquement des décennies ou plus. Il se réfère à tout changement climatique au fils du temps, causé par des variabilités naturelles ou anthropiques. Cette définition diffère de celle d'UNFCCC (convention cadre des nations unies sur le changement climatique) d'où la cause définie pour le changement climatique est due à l'attribution directe ou indirecte de l'activité anthropique, qui altère la composition globale de l'atmosphère et qui est additionnelle à la variabilité naturelle du climat observé sur des périodes comparables (AR4, 2007, p. 4).

Un réchauffement global a été la conséquence des changements climatiques causés par la pollution atmosphérique et l'augmentation progressive du gaz à effet de serre, ce réchauffement a été suivi par : la fonte des neiges et des glaces; l'élévation du niveau des mers et le changement des régimes météorologiques (Khomsi, 2014). Arnell (1999) a mentionné aussi que ce réchauffement climatique aura des effets significatifs sur le cycle hydrologique avec l'intensification de l'évapotranspiration et les précipitations, mais ces dernières seront inégalement réparties dans le monde pouvant provoquer des réductions importantes ou des modifications majeures des saisons humides et sèches.

Le GIEC (Groupe d'expert Intergouvernemental sur l'Evaluation du Climat) a rédigé cinq rapports dont le cinquième est daté de 2013 et le sixième sera définitivement publié en 2022. Chaque rapport confirme ou rajoute un plus à son précédent, traitant les causes des changements climatiques ainsi que leurs conséquences et impacts sur différents secteurs (ex. L'économie, la santé, les ressources en eau…etc.), étudiant l'effet anthropique sur les changements climatiques ainsi que différents effets, et traitant l'augmentation de la température et le changement du régime pluviométrique global particulièrement sur les régions vulnérables.

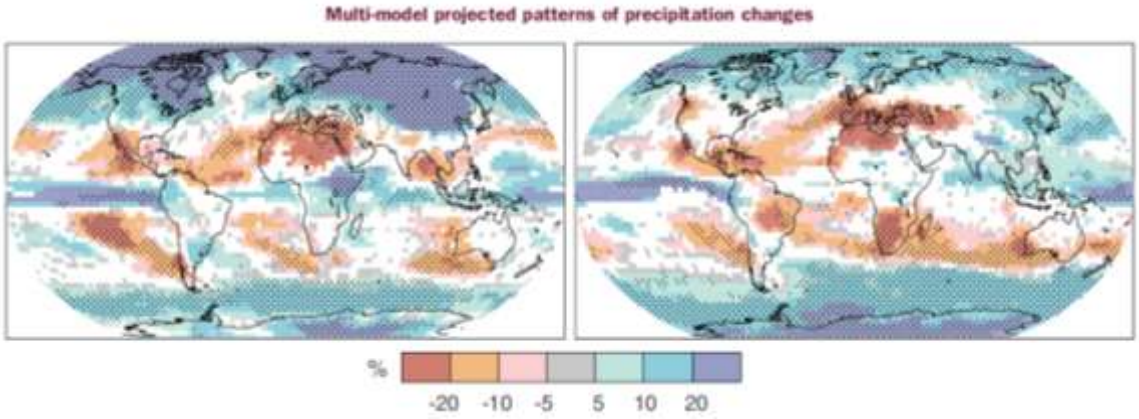


Figure 1. Changements relatives en precipitation (en %) pour la période 2090-2099. Les valeurs sont les moyennes multi-modèles basées sur SRES A1B pour les mois Décembre jusqu'à Février (à gauche) et Juin àAoût (à droite). Les zones de couleur blanche sont pour moins de 66% des modèles d'accord sur le changements et les zones pointillées sont celle de plus de 90% des modèles d'accord sur le signe de changement. (AR4, 2007, p. 4).

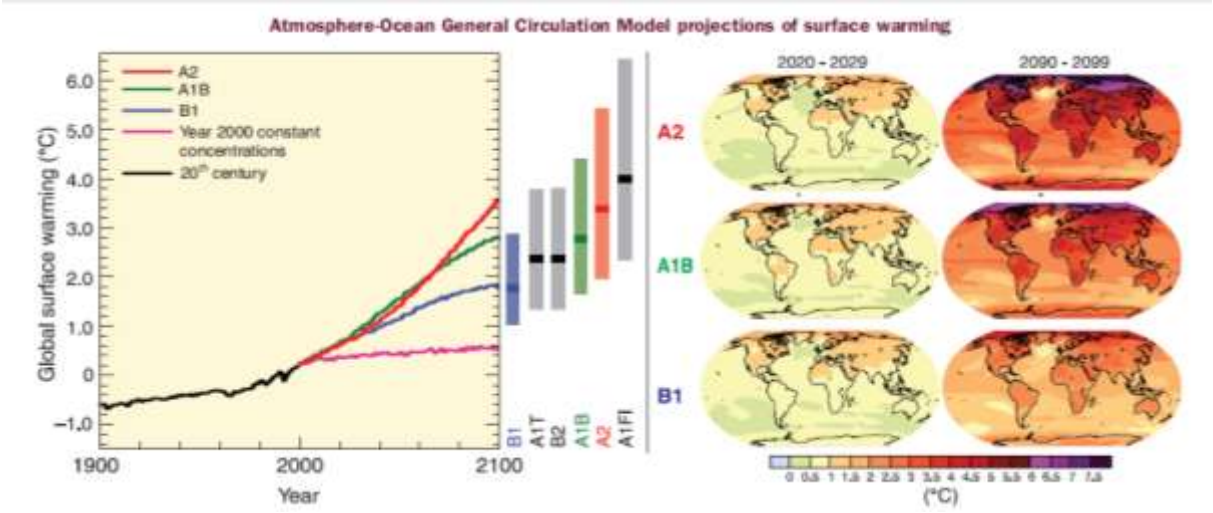


Figure 2. Panneau de gauche : les lignes continuessont des moyennes de multi-modèle globaux de la surface de réchauffement (relative à 1980-1999) pour SRES scénarios A2, A1B et B1, présentées comme des continuités de simulations pour le 20ème siècle. La ligne orange correspond à l'expérience où les concentrations ont été maintenues constantes aux valeurs de l'an 2000. Les barres au milieu de la figure indiquent la meilleur estimation et la plage probable évaluée pour les six scénarios de SRES à 2090-2099 par rapport à 1980-1999. Le panneau de droite : changements projetés pour la température de surface pour 20202029 (gauche) et 2090-2099 (droite) pour les scénarios de SRES A2 (du haut), A1B (du mileu) et B1(du bas). (AR4, 2007, p. 4)

Comme on le constate dans les figures 1 et 2 la diminution des précipitations ainsi que l'augmentation des températures ont causé un impact sur les ressources en eau (figure 3).

Le changement du ruissellement et de la disponibilité des ressources en eau, dû au changement des précipitations et de la température, connaîtront une diminution de 10 à 30% dans les régions méditerranéenne, l'Ouest des états Unis, le sud de l'Afrique, et le Nord-Est du Brésil. L'impact de cette sécheresse peut toucher différents secteurs tel que l'agriculture,

l'alimentation en eau, la production de l'énergie et la santé d'après le 4° rapport du GIEC (groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat) (AR4, 2007, p. 4).

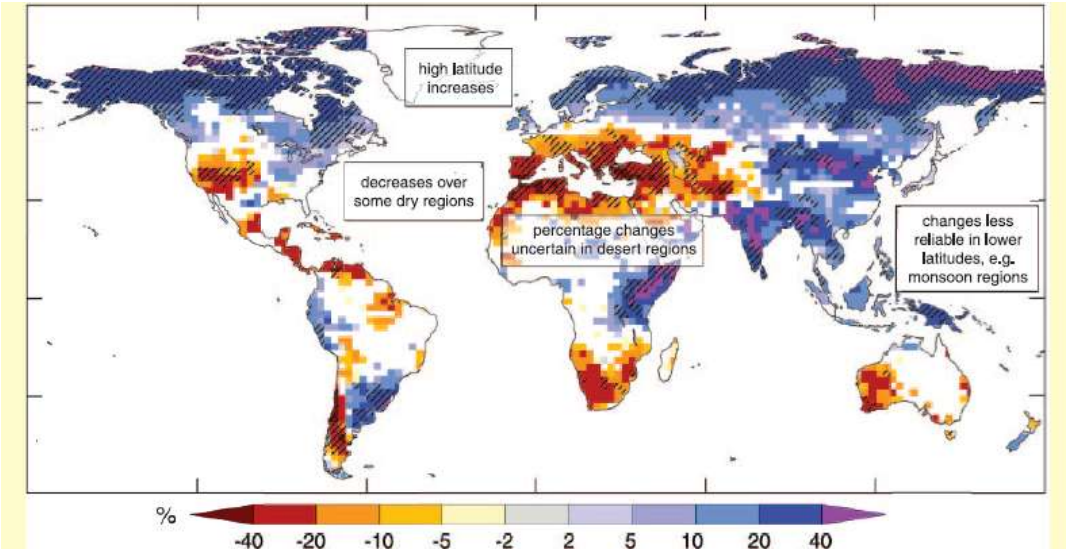


Figure 3 . Changements relatifs à grande échelle du ruissellement annuel (variabilité de l'eau, en pourcentage) pour la période 2020-2099, par rapport à 1980-1999. Les zones de couleur blanche sont pour moins de 66% des modèles d'accord sur le changements et les zones hachurées sont celle de plus de 90% des modèles d'accord sur le signe de changement. .(AR4, 2007, p. 4)

La figure 4 présente les variations des températures moyennes projetées sur le Nord de l'Afrique/ la méditerranée (IPCC Working Group I et al., 2013). À partir du RCP4.5 on remarque une augmentation entre [1 et 1.5] °C à l'horizon 2016-2035 et atteignant les 3°C à l'horizon 2081-2100 sur le Nord Ouest de l'Afrique. Notant que durant la période estivale, l'augmentation de la température est plus prononcée que celle de la période hivernale. Alors que dans son précédent rapport (AR4, 2007, p. 4), la dernière décennie du 21ème siècle (2090-2099) l'augmentation de la température simulée à partir du scenario A1B atteignait les 4°C (figure 2). Philandras et al. (2011) a estimé la diminution des précipitations pour le Nord de l'Afrique à -30 à -45% pour la période 2071-2100.

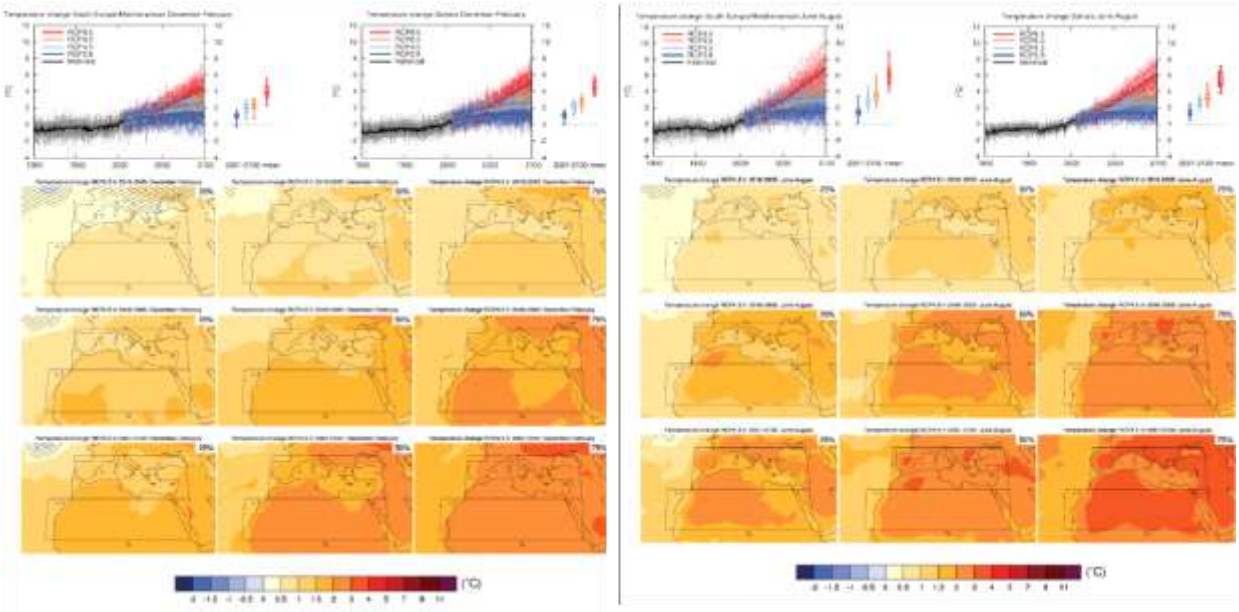


Figure 4. Changement de la température de l'air (moyenne de l'ensemble CMIP5 par rapport à la période 1986 - 2005) pour les périodes estivales (juin - août) et hivernales (décembre – février) pour chacun des 4 scénarios RCP. ("AR5 Climate Change 2013: The Physical Science Basis — IPCC," 2013) (Adaptée d'AR5-WGI-annexe1 IPCC (2013))

La figure 5 montre l'écart des précipitations saisonnières, pour les quatre scénarios futurs (RCP: 2. 6 ; 4.5 ; 6.0 et 8.5). Pendant la saison pluvieuse (Octobre – Mars), la diminution des précipitations enregistrées pour les trois périodes futures (2016-2035 ; 2046-2065 et 2081-2100) varie entre -10% et -30%. Cette diminution est en évolution avec le temps. Alors que pour la saison chaude (Avril – Septembre), la diminution des pluies est estimée à -20% ; -30% et -40% respectivement pour les trois périodes futures.

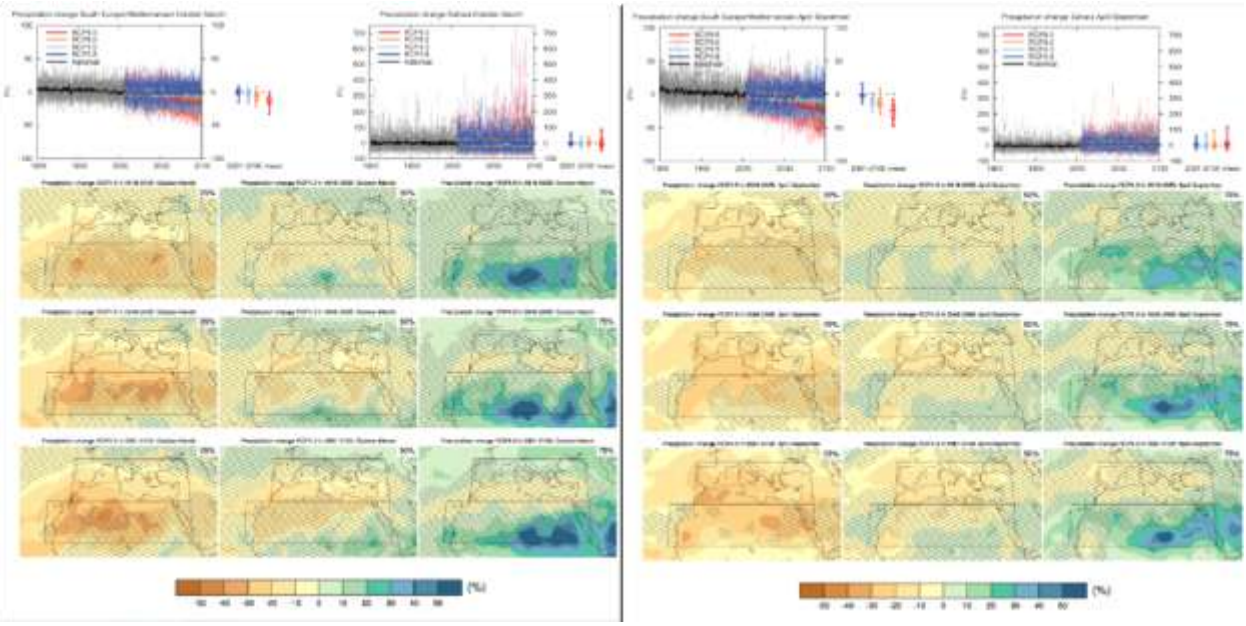


Figure 5. Écarts de la précipitation saisonnière (moyenne de l'ensemble CMIP5 par rapport à la période 1986 - 2005) pour les périodes estivales (avril – septembre) et hivernales (octobre - mars) pour chacun des 4 scénarios RCP. (Adaptée d'AR5-WGI-annexe1 IPCC (2013)). ("AR5 Climate Change 2013: The Physical Science Basis — IPCC," 2013)

Les études effectuées sur le Nord-Ouest de l'Algérie soulignent la diminution des précipitations en 1975, (figure 6), la tendance à la diminution des précipitations sur la période 1960-2001 montrée par Meddi et al. (2010).

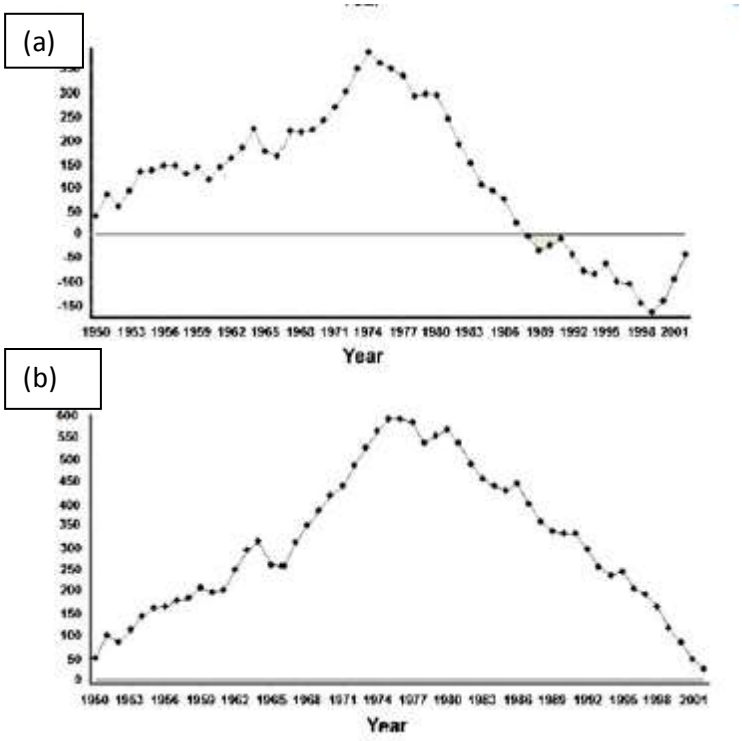


Figure 6. Ptest results of progressive decrease of precipitation (a): Beni Bahdel station; (b) Lalla-Setti station (Tlemcen)

L'indice d'aridité de l'UNESCO montre que dans la partie sud Méditerranéenne le climat est de type semi-aride tout au long du Nord de l'Afrique entre 1975 et 1995 (Faramarzi et al., 2013).

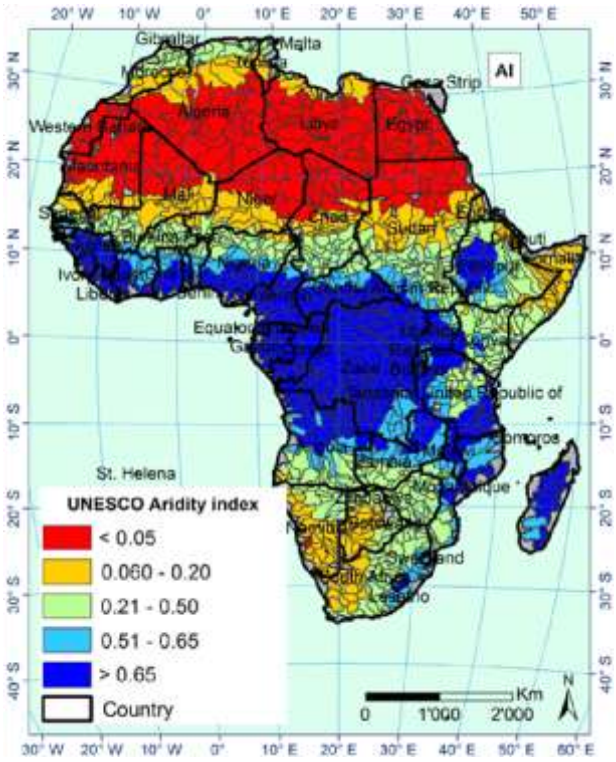


Figure 7. L'indice d'aridité à l'échelle du continent de l'Afrique pour la période 1975-1995. Le degré d'aridité est définit pas 5 classes à savoir : AI < 0.05: hyper-aride, 0.06 < AI < 0.2: aride, 0.2 < AI < 0.5: semi-aride, 0.5 < AI < 0.65: semi-humide, AI > 0.65: humide (Faramarzi et al., 2013).

I. 3. Changement climatique dans le bassin Méditerranéen

I. 3. a. L'impact du climat dans le passé

Le changement climatique a impacté différents secteurs tels que les ressources en eau, l'économie, l'industrie et l'agriculture. Arnell (1999) avait souligné que dans le futur proche, la montée démographique ainsi que l'utilisation de l'eau aura une pression d'une envergure importante et croissante sur les ressources en eau dans la région de l'Afrique.

Xoplaki et al. (2000) ont mentionné une tendance à la baisse des précipitations après 1960 autour du bassin Méditerranéen non significative par rapport à la Grèce qui en a connu une, significative. Des résultats similaires ont été obtenus par Norrant et Douguédroit en 2003 (Norrant and Douguédroit, 2003) et Philandras en 2011 (Philandras et al., 2011).

Dans les régions méditerranéennes la plupart des précipitations annuelles se produisent en hiver représente 30 et 50% au Nord du total (Figure 8); au centre et à l'Ouest (Khomsi, 2014) alors qu'en été cette proportion est réduite jusqu'à 10%.

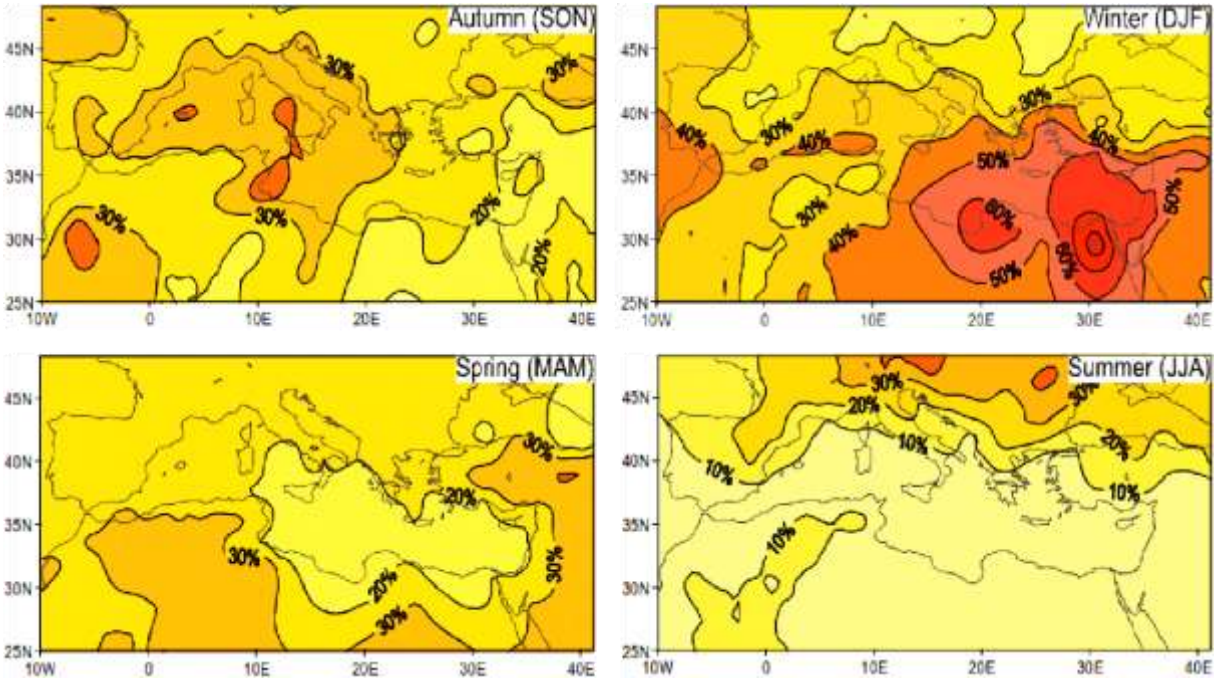


Figure 8. Répartition géographique de la proportion (%) des cumuls des précipitations moyennes saisonnières au total moyen annuel sur la zone méditerranéenne, de 1950 à 1999 (Xoplaki, 2002).

I. 3. b. Le climat du Nord de l'Algérie

Démontré par différentes études, la région Nord-Ouest de l'Algérie a connu une sécheresse durant la décennie 70 plus précisément en 1975 suite à une réduction des précipitations.

Dans la thèse de Taibi (2016), on trouve une évaluation des pluies avant et après 1975, qui est considérée comme l'année de rupture des pluies. La région Ouest a enregistré les baisses les plus importantes par rapport au Nord de l'Algérie. Ces baisses varient entre -20 et -30%.

I. 4. Approches en modélisation hydrologique

La diversité du champ d'application de la modélisation hydrologique est plus au moins large, elle compte, la diversité du processus, la complexité du système étudié (bassin versant), la présence de multiples échelles (spatiales et temporelles) et la difficulté de procéder à des mesures extensives dans des conditions variées (Villeneuve et al., 1998).

Cette diversité impose de multiples modèles hydrologiques pour répondre aux objectifs des différentes études et de systèmes complexes.

Il existe un grand nombre de modèles hydrologiques développés. Ces modèles sont classés en trois catégories qui leur spécifient selon leur approche, comme suit :

L'approche **empirique**, tient compte uniquement des relations mathématiques qui lient entre les entrées et les sorties des modèles. Cette approche n'inclut pas les paramètres physiques de l'hydrosphère. Ces modèles sont appelés aussi « boite noire ». Comme exemple, on trouve les modèle ANN (Artificial Neural Network), mais aussi le modèle GR4J (Perrin et al., 2003). Ces modèles sont souvent assez peu transposables temporellement ou dans des contextes hydro-climatiques différents.

L'approche **physique** (appelée aussi mécanistique) est basée sur les lois de la mécanique des fluides ou la physique des écoulements d'eau dans le sol. Ces modèles sont conçus pour une représentation des caractéristiques physiques du bassin versant en tout point de l'espace et du temps. Cependant, l'application de ce modèle se limite sur de petites échelles, à cause des paramètres nécessaires pour le faire fonctionner, et nécessite des grandes ressources de calcul (Grusson, 2016). On peut citer quelques modèles à base physique comme MIKE-SHE ; TOPKAPI et MOHID (Bessière, 2008; Grusson, 2016).

L'approche **conceptuelle** consiste à représenter le système par un processus utilisant de simples relations mathématiques qui définissent les éléments du stockage du système hydrologique. Les paramètres sont déterminés par une calibration du modèle. Les modèles conceptuels sont aptes pour les modélisations à grandes échelles spatiales et/ou temporelles (Grusson, 2016). La représentation spatiale de ces modèles est regroupée en trois types : le modèle global ; le modèle distribué et le modèle semi-distribué, dont le premier considère le bassin comme une entité unique homogène, en ce qui concerne les représentations empiriques des processus ; le second concerne la représentation physique de l'hydro-système, et produit la spatialisation la plus précise de la variabilité du bassin versant. Le troisième type qui est le semi-distribué, regroupe les deux fonctionnalités des deux types des modèles précédents, en représentant le système le plus précisément possible mais uniquement entre des entités considérées comme homogènes. Parmi les modèles semi-distribués, on cite le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold et al., 1993). Il faut noter que pour les trois approches

citées, la représentation temporelle, à petite échelle nécessite un modèle physique pour une représentation des épisodes comme les crues éclairs, alors les modèles empiriques et conceptuels fonctionnent pour de grandes échelles temporelles des décennies ou pour décrire des conditions moyennes.

Le modèle hydrologique conceptuel de type semi-distribué correspond le mieux aux objectifs de l'étude présentée dans ce travail. Du fait de la compréhension du système hydrologique, des données disponibles et de ses composantes physiques. Ce type de modèles permet d'étudier les effets changements climatiques qui nécessitent une série de données temporelles à grande échelle.

I. 5. Le modèle SWAT et les changements climatiques

Le modèle SWAT (soil and water assessment tool) est un modèle agro-hydrologique conceptuel semi-distribué, développé par Arnold et al. (1993) pour le département Américain de l'Agriculture, Agricultural Research Service (USDA -ARS).

Il permet de simuler les processus hydrologiques d'un bassin versant de façon continue, au pas de temps journalier voire horaire (Grusson, 2016), pour des bassins de superficie de quelques centaines de kilomètres carrés jusqu'à des milliers de kilomètres carrés. Les détails de ce modèle seront présentés dans le chapitre III.

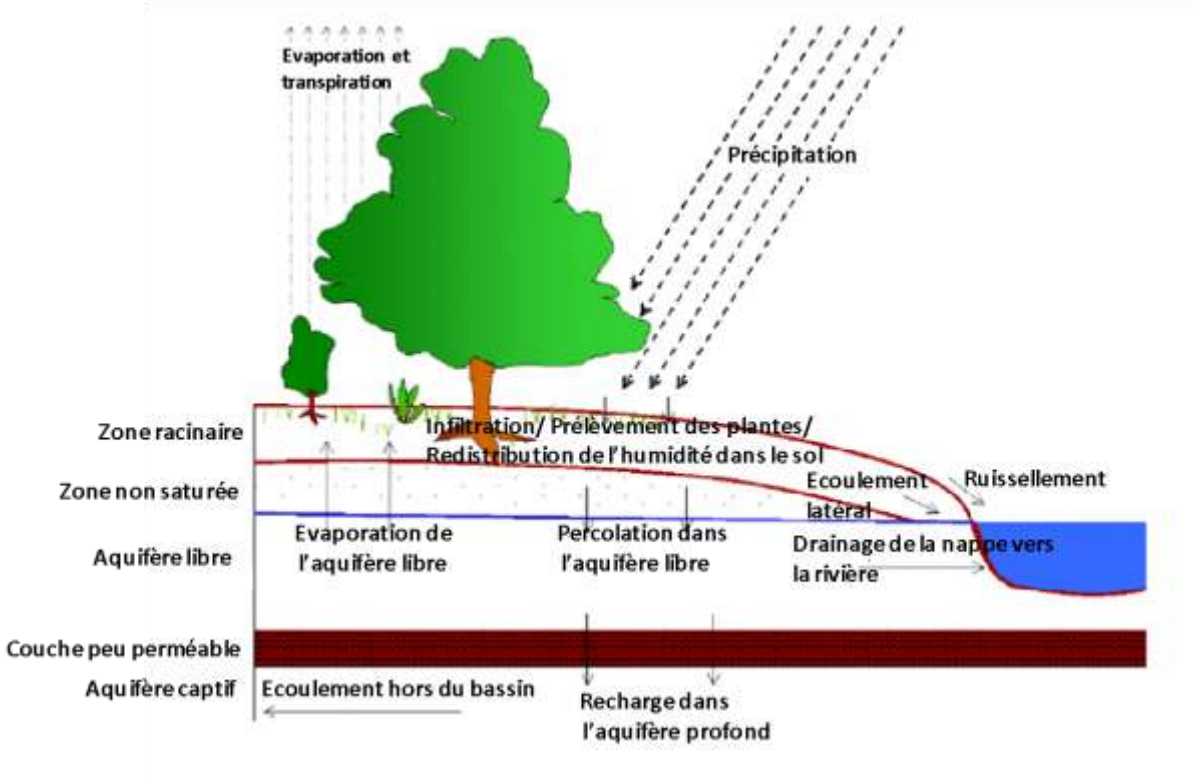


Figure 9. Schématisation du module hydrologie de SWAT (adapté de Neitsch et al., 2005)

I. 6. Les modèles climatiques

GCM Modèles Climatiques Globaux représentent une grille de calcul à l'échelle du globe. L'IPCC (Intergouvernemental Panel on Climate Change) a développé des GCM pour étudier la variabilité et les prévisions climatiques. Ce sont des modèles physiques ayant des composantes atmosphériques et océaniques qui permettent d'étudier le système climatique à l'échelle de la planète entière. La modélisation se base sur l'introduction du paramètre de l'anthropisation, qui veut dire la concentration de gaz à effet de serre (GES) émise par l'homme. Ce paramètre anthropique est estimé par un forçage radiatif exprimé en W/m², qui représente le changement du bilan radiatif (rayonnement descendant moins rayonnement ascendant) au niveau de la tropopause (le sommet de la troposphère). Le gaz à effet de serre résulte de plusieurs paramètres socio-économique et environnementaux, plus il est élevé plus le bilan radiatif est élevé. Pour l'étude des changements climatiques, une construction de différents scénarios de forçage radiatif était nécessaire pour la communauté de l'IPCC. Dans le (AR5) 5ème rapport de l'IPCC, quatre scénarios ont été définis, appelés RCP (Representative Concentration Pathway) à l'horizon 2100. Ces RCP ont succédé aux SRES (Special Report on Emission Scenario) ("Emissions Scenarios — IPCC," n.d.) qui étaient de l'ordre de six (A1, A2, B1, A1B, B2… etc), alors que pour

le prochain rapport AR6 qui sera publié à partir de 2021, un cinquième scénario serait rajouté aux RCP avec de nouvelles marges de concentration de forçage radiatif.

Representative Concentration Pathway :

Chacun des quatre scénarios RCP est identifié par le forçage radiatif approximatif de l'année 2100 par rapport à l'année 1850 :

Le scénario RCP 8.5 décrit une augmentation constante jusqu'en 2100 du forçage radiatif pour atteindre 8.5 $W.m^{-2}$ (~1370 ppm CO_2 eq) sans atteindre de maximum. Les émissions en GES augmentent, elles aussi, sur toute la période.

Le scénario RCP 6.0 représente un forçage radiatif de 6.0 $W.m^{-2}$ en 2100 (~850 ppm CO_2 eq) sans atteindre de maximum. Les émissions de GES atteignent leur maximum autour de 2060 (70 Gt CO_2 eq/an) puis diminuent pour se stabiliser en 2010 aux alentours de 50 Gt CO_2 eq/an.

Le scénario RCP 4.5 simule un forçage radiatif de 4.5 $W.m^{-2}$ en 2100 (~650 ppm CO_2 eq) atteignant un maximum autour de 2100 avant de se stabiliser. Les émissions de GES atteignent leur maximum vers 2040 (50 Gt CO_2 eq/an) pour décliner ensuite et se stabiliser en 2080 aux alentours de 30 Gt CO_2 eq/an.

Le scénario RCP 2.6 décrit une augmentation du forçage radiatif de 2.6 $W.m^{-2}$ (~400 ppm CO2 eq) en 2100 après avoir connu un maximum de 3 W.m-2 (~490 ppm CO2 eq) vers 2040. Les émissions de GES augmentent alors jusqu'en 2020 (50 Gt CO_2 eq/an) puis diminuent à 2,5 Gt CO_2 eq/an en 2100.

Chaque scénario est construit avec des données spatiales de l'évolution de l'occupation des territoires, d'émissions de polluant et de concentration de gaz à effet de serre jusqu'en 2100 avec une résolution spatiale de 0,5 x 0,5 degré (Grusson, 2016; van Vuuren et al., 2011).

Comme cités ci-dessus, les GCMs concernent les modélisations sur de très grandes échelles. En revanche, dans ce travail, les modèles climatiques régionaux RCMs vont être utilisés. Les RCMs comme leur nom l'indique sont utilisés pour des échelles régionales, plus fines à quelques kilomètres seulement pour certaines études.

Dans le rapport AR5, les simulations climatiques globales ont été réalisées dans le cadre du projet international CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project, phase 5) qui inclut 33 GCMs développés par différents laboratoires et agences météorologiques (Taylor et al., 2011).

La cinquième phase du projet international CMIP5 succède la CMIP3 pour le rapport AR4 (Meehl et al., 2007). Cette phase regroupe plusieurs types de données, les plus fréquentes ; celles de données historiques pour une période entre 1850 et 2005 et les deux des projections à partir de 2006 jusqu'à 2100 pour les RCPs (Representative Concentration Pathway) voire 2300 pour les ECPs (Extended Concentration Pathway), ainsi que d'autres types de données citées dans l'article de Taylor et al. (2011).

Dans notre étude, nous avons utilisé les paramètres climatiques de projections futures du projet Cordex (COordinated Regional climate Downscaling EXperiment ("CORDEX Data Search | CORDEX | ESGF-CoG," n.d.) développé par le WCRP (the World Climate Research Program ("CORDEX Data Search | CORDEX | ESGF-CoG," n.d.)) qui permet aux RCMs de fournir suffisamment de détails en information, à l'échelle locale et régionale, concernant l'évaluation des impacts des changements climatiques qui sont vitaux pour les régions vulnérables (http://www.cordex.org/about/what-is-regional-downscaling/).

Différents projets ont été développés au fil du temps pour la réduction d'échelle des GCMs. Le dernier projet développé Cordex (2011- jusqu'à présent) regroupe 14 domaines (Afrique, Europe, Asie, Méditerranée… etc.) qui permettent une modélisation du climat avec une résolution spatiale de 12 et 50 Km, celui de l'Afrique et a été notre choix d'utilisation avec la résolution spatiale de 50 Km.

Les projets qui ont précédé celui de Cordex sont à titre d'information ; Ensemble (2004 – 2009) et Prudence (2001 – 2004) pour le programme de CMIP3.

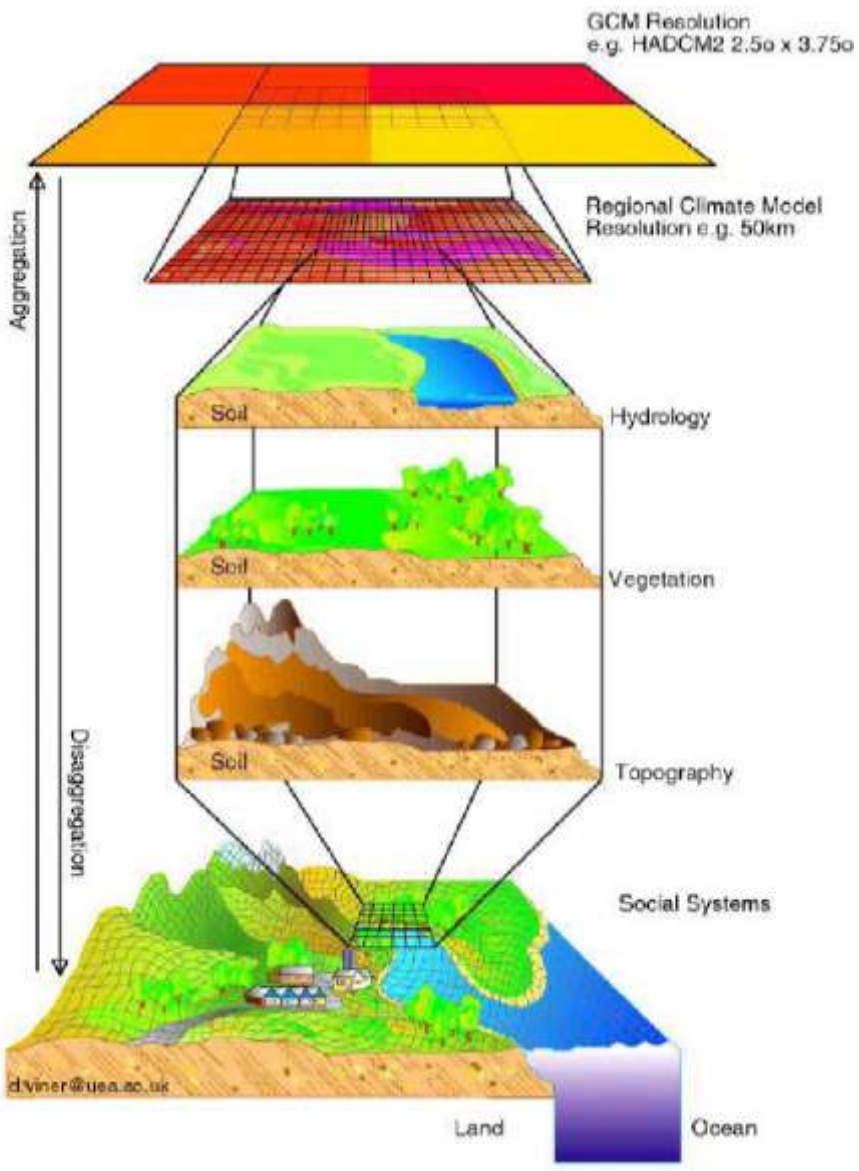


Figure 10. Concept de réduction d'échelle spatiale. (Source: David Viner, Climate Research Unit, University of East Anglia, R.U: "**http://www.cru.uea.ac.uk/**")

La régression statistique, dite, la correction statistique du biais qui consiste à extraire à partir des modèles climatiques régionaux, la valeur du paramètre pluie par exemple, du point de maille le plus proche de la station observée pour obtenir la pluie simulée par le RCM (figure 11). Dans ce travail nous allons comparer les pluies moyennes et journalières observées et simulées par les 10 modèles à une résolution spatiale de 50 x 50 km.

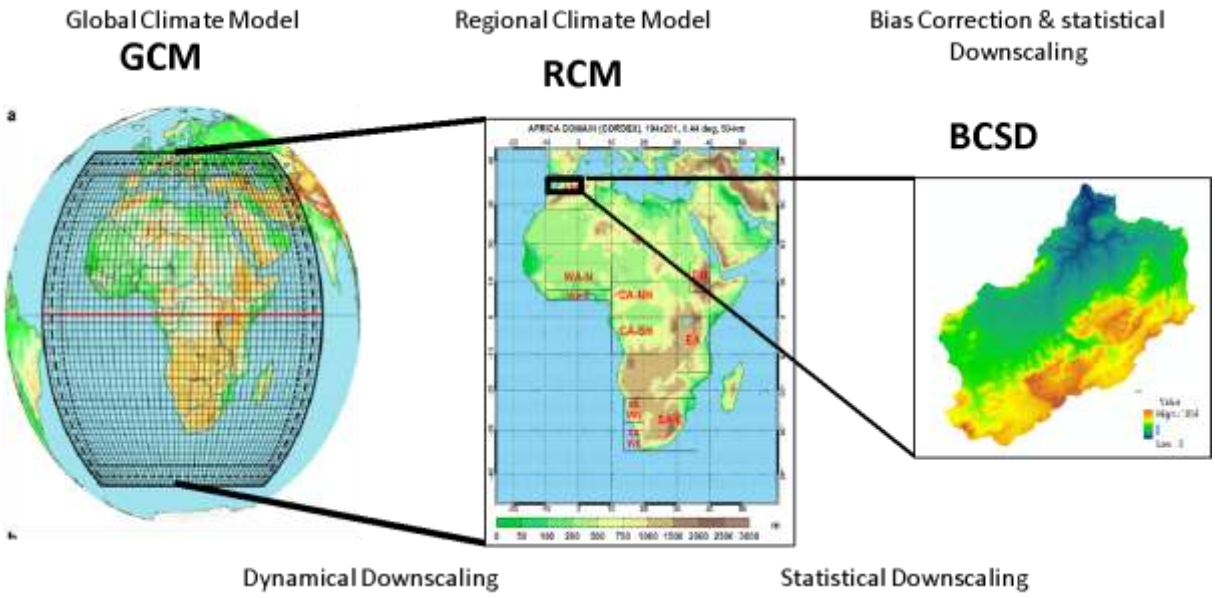


Figure 11. Représentation de la régression dynamique et statistique (adapté pour le bassin de la Tafna).

I. 7. La gestion de l'eau en Algérie

Les activités qui nécessitent l'utilisation d'eau (figure 12) sont indispensables à l'existence humaine et son développement (Yebdri, 2006). Pour pouvoir soutenir toutes les utilisations, une politique de gestion des ressources en eau est à développer afin d'attribuer la priorité à l'utilisation de l'eau suivant des critères bien établis.

Les objectifs, les moyens et les horizons d'une politique de l'eau et de l'environnement forment les critères essentiels pour l'élaboration d'une base décisionnelle laquelle est étroitement liée à un certain nombre d'élément dont les activités de production et de consommation générale. De ce fait on peut caractériser le besoin en eau des milieux physiques et humains et tenir compte de la disponibilité des ressources en eau en matière quantitative et qualitative. A partir de ces éléments il est possible de dégager des conditions susceptibles d'assurer la cohérence des futurs choix possibles en matière d'eau (Yebdri, 2006):

- La gestion de l'eau doit intégrer les grandes tendances de l'évaluation du système socio-économique ;
- Les objectifs de réduction globale de la pollution on doit substituer dans le futur des objectifs qualitatifs tenant compte :
    1. Des effets à court et à long terme liés à chaque polluant ;

2. Du coût de leur élimination ;

3. De leur localisation et leur dispersion potentielle.

- Les modes d'intervention du public sont des éléments importants quant à l'opportunité des décisions futures. Ils concernent :

1. L'impact des recherches scientifiques sur la sensibilisation du public ;

2. L'organisation du mouvement de participation ;

3. L'importance des conflits de valeur entre centres d'intérêt diversement préoccupées par l'eau et l'environnement ;

4. L'évolution des attitudes face aux risques.

- L'orientation et l'efficacité des actions publiques jouent un rôle central dans la problématique de l'eau. L'état et les organismes publics sont appelés à intervenir pour :

1. Organiser la recherche et définir la nature des besoins ainsi que les stratégies à les satisfaire ;

2. Assurer l'exécution de la politique de l'eau au niveau de la production, de la distribution et de l'épuration.

- Les conditions de réactions du système socio-économique sont des facteurs importants sur l'effet des décisions futures. L'existence d'informations, claires dans le domaine de l'eau est un facteur décisif dans la rapidité et la pertinence des décisions, notamment pour faciliter les négociations entre parties prenantes et permettre un arbitrage entre systèmes de valeurs opposées ;

- Le temps joue un rôle majeur dans la gestion de l'eau : l'effet d'une décision en matière d'eau ne peut le plus souvent se faire sentir qu'à long terme chaque fois qu'elle suppose des transformations lentes de technologie ou de comportement.

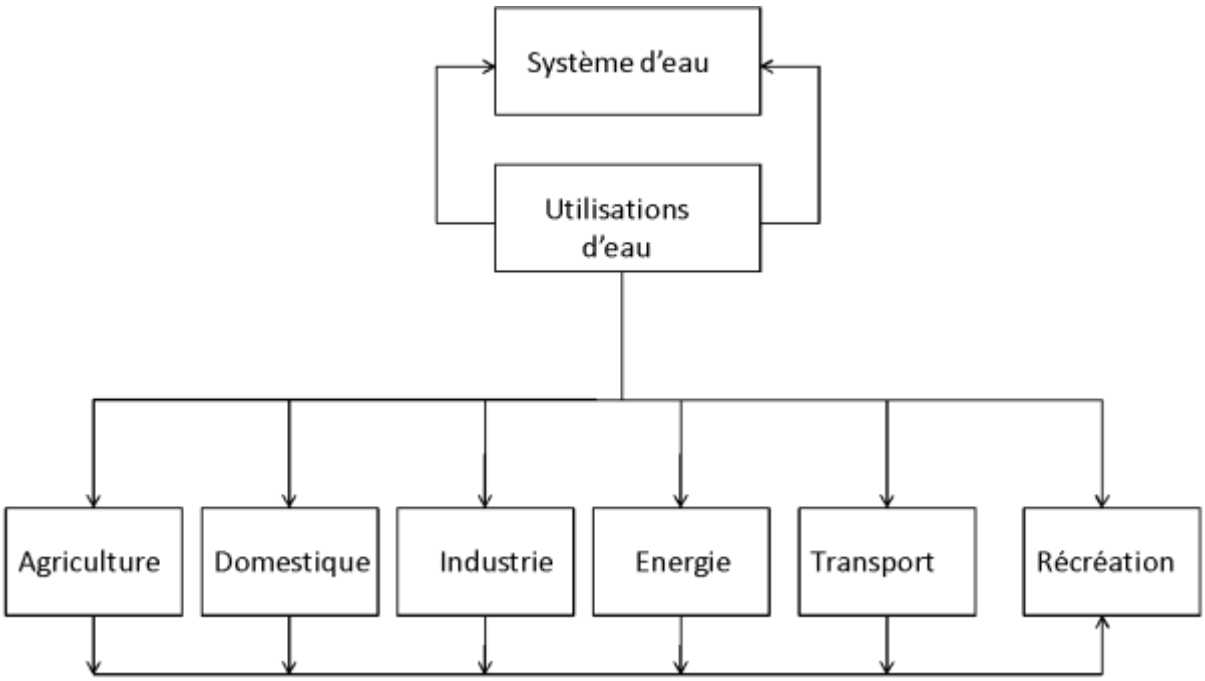


Figure 12. Les éléments du système d'eau et leurs interactions avec l'homme.

Les institutions impliquées dans la gestion des ressources en eau sont :

- **MRE** le ministère des ressources en eau est chargé de l'orientation de la politique de l'eau, de la planification, de la réglementation et de la supervision des activités. D'autres entités ;

- L'**ANRH** l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques est un établissement public à caractère administratif, à vocation scientifique et technique ;

- L'**ABH** l'Agence des bassins hydrographiques créée en 1996, sont de l'ordre de cinq ("AGIRE," n.d.) ;

- L'**AGIRE** l'Agence national de la gestion intégrée des ressources en eau, créée en 2011 et fut installée en 2014 ("AGIRE," n.d.) ;

- L'**ADE** Algérienne des eaux et l'ONA Office national de l'assainissement créés en 2001 ("L'algérienne des eaux - Présentation," n.d.; "ONA : Office National de l'Assainissement," n.d.).

I. 7. a. La situation de l'eau en Algérie

La superficie de l'Algérie est de 2.4 millions de Km², dont sa majore partie est un désert où les pluies sont quasi nulles. Le potentiel des ressources en eau est localisé au Nord du pays qui regroupe les bassins tributaires de la Méditerranée et les bassins fermés des hauts plateaux (Hamlet, 2014). Le climat de territoire Algérien est très varié, du Nord vers Sud, caractérisé par un semi-aridité des régions hautes plaines vers une aridité dans la région Saharienne (Hamlet, 2014; Taibi, 2016).

L'estimation de la pluviométrie moyenne annuelle de l'Algérie du Nord pourrait atteindre les 100 milliard de m^3, avec une évapotranspiration de 80 milliards de m^3, 3 milliards de m^3 d'eau ruisselée et environs 12.5 milliards de m^3 d'écoulement dans les cours d'eau (Hamlet, 2014) dont 32% de ces eau de surface sont mobilisées déclaré par le Ministre des ressources en eau « Arezki Berraki » ("Voici les réserves en eau dont dispose l'Algérie en 2020," 2020).

La quantité des ressources en eau est résumée dans le tableau 1, qui relève la potentialité en eau de l'Algérie de l'ordre de 16.8 Milliards de m^3. 80% des ces potentialités en eau sont superficielles et situé au Nord du pays.

Tableau 1. La répartition des ressources hydrauliques (Hamlet, 2014)

	Ressources			
	Superficielles	Souterraines	Total	
	Milliard de m^3		Milliard de m^3	%
Nord	12	19	13.9	82
Sud	1.5	1.4	2.9	18
Total	13.5	20.4	16.8	100
%	80	20	100	100

I. 7. b. Les bassins hydrographiques de l'Algérie

Le territoire algérien comprend cinq régions (figure 13) gérés par les agences nationales des bassins hydrographiques, à savoir :

- Oranie-Chott-Chergui, d'une superficie totale de 77 169 Km² ;
- Chellif-Zahrez, d'une superficie totale de 56 227 Km² ;
- Algérois-Soummam-Hodna, d'une superficie totale de 47 431 Km²;

- Constantinois-Seybouss-Méllègue, d'une superficie totale de 44 348 Km² ;
- Et Sahara (sud), d'une superficie totale de 2 018 054 Km².

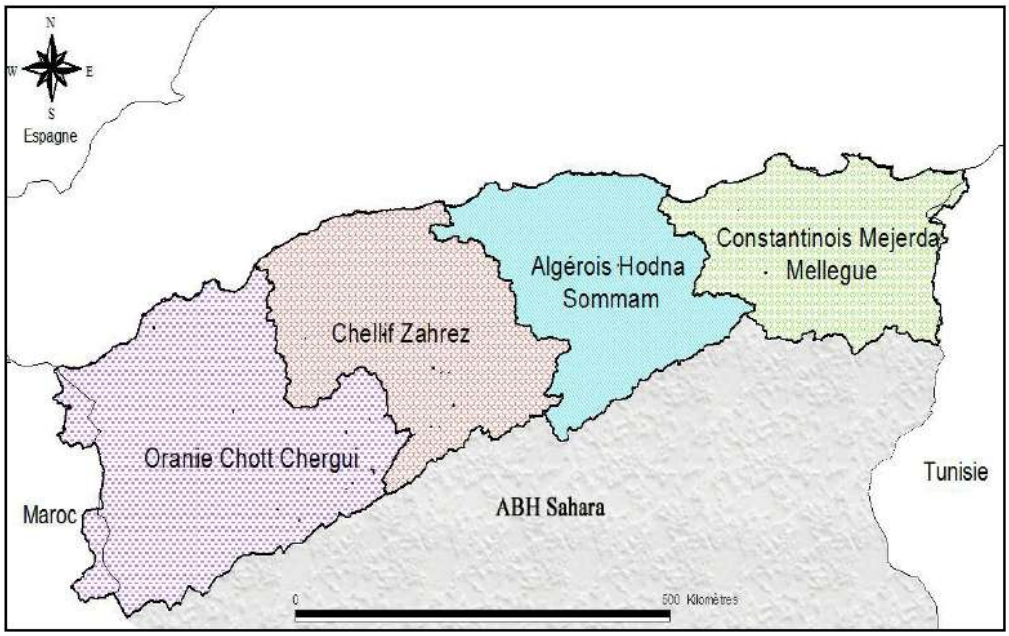


Figure 13. La situation géographique des bassins hydrographiques du Nord de l'Algérie (Hamlet, 2014).

I. 7. c. Les ressources en eau superficielles

La répartition des écoulements superficiels est hétérogène à travers le pays, avec un pourcentage de plus de 80% cumulé au Nord (figure 13), dont le Nord-Est (Constantinois-Seybouss-Méllègue) reçoit près de 40% des ressources superficielles alors que le Nord-Ouest (Oranie-Chott-Chergui) reçoit un taux ne dépassant pas les 10% (Tableau 2), avec une évaluation des potentialités superficielles de bassin de la Tafna est estimée à 335 Hm^3 sur les 1025 Hm^3 de l'ensemble du bassin Oranie-Chott-Chergui (Yebdri, 2006).

Tableau 2. Répartition spatiale des eaux de surfaces du territoire Algérien (Hamlet, 2014)

Bassins hydrographiques	Oranie- Chott Chergui	Chellif Zahrez	Algérois Soummam Hodna	Constantinois Seybouss Méllègue	Sud	Total
Ressources potentielles (Hm^3 / an)	1025	1840	4380	4500	600	12345
%	8.7	15.7	37.3	38.3	0.48	100

I. 7. d.Barrages

Le nombre de barrages en Algérie était de 51 à l'an 2000 ayant une capacité mobilisée de 5 milliards de m^3 (*L'Algérie en quelques chiffres*, 2003; *L'eau en Algérie: le grand défi de demain*, 2001), puis de 74 barrages ayant une capacité de mobilisation approximative à 8,5 milliards de m^3 en 2014 (Remini, 2018), tout en considérant le taux d'envasement de 1.7 milliard de m^3 qui réduit la capacité de mobilisation à 6,8 milliards de m^3 (figure 14). Le nombre des barrages est resté en évolution pour une estimation de 80 barrages avec une capacité de mobilisation de 8,4 milliards de m^3, a été déclaré en 2016 ("Ressources en eaux conventionnelles," n.d.).

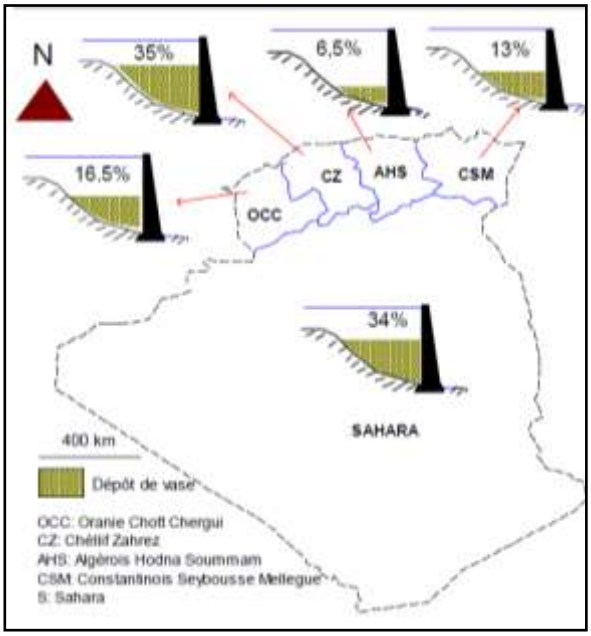


Figure 14. Taux d'envasements des barrages du territoire Algérien en 2014 (Remini, 2018).

Les barrages sont destinés à l'approvisionnement en eau potable, industrielle et d'irrigation, en plus des retenues collinaires qui sont de l'ordre de 667 ayant une capacité de stockage avoisinante à 90 millions de m^3 (Hamlet, 2014).

I. 7. e. Les ressources en eau souterraines

La potentialité en eau des principaux aquifères situés au Nord du territoire Algérien (figure 3) est approximative à 2 milliards de m^3, avec un taux dépassant les 70% pour les régions du Nord-Est et moins de 20% pour les régions Nord-Ouest.

Tableau 3. Potentialités en eau des principaux aquifères situés dans les quatre régions hydrographiques du Nord de l'Algérie (Taibi, 2016).

Régions hydrographiques	Potentialités (Hm^3/an)	%
Oranie-Chott Chergui	271	15,25
Cheliff-Zahrez	200	11,25
Algérois Soummam Hodna	570	32.10
Constantinois Seybouss Méllègue	735	41,40
Total	1776	100

I. 8. Objectifs

La gestion des ressources en eau réside aussi dans la prise des décisions qui affectent l'état des ressources en eau dans le futur (Yebdri, 2006). Les ressources en eau sont en liaisons directe avec la variabilité et les changements climatiques. La gestion des ressources en eau consiste à trouver un équilibre entre la ressource et l'usage. Et pour ce faire, la gestion des ressources en eau nécessite d'avoir une évaluation sur l'hydro-système et son évolution dans le futur. Le bassin de la Tafna se situe dans le Nord de l'Afrique qui est une région sujette à un stress hydrique évolutif (Milano et al., 2013; Taabni and Jihad, 2012; Zettam, 2018). Cette zone vulnérable aux variabilités et changements climatiques nous mène à fixer nos objectifs autour des changements climatiques pour poursuivre l'évaluation du climat de cette région évoquée ces dernière décennies (Meddi and Hubert, 2003; Meddi et al., 2010, 2009; Taibi, 2016; Xoplaki, 2002; Xoplaki et al., 2004; Zeroual et al., 2018, 2017; Zittis et al., 2019) et d'autres.

La hausse de la température et les baisses des précipitations sont les premiers éléments résultant des changements climatiques. Ces deux paramètres impactent directement l'hydro-système, le réchauffement climatique, la sécheresse, le stress hydrique, et l'irrégularité de la distribution spatiale des pluies.

La modélisation hydrologique repose sur l'usage du modèle SWAT pour notre site d'étude. Ce choix de logiciel nous permet de combiner l'étude des changements climatiques et des tendances des composantes du cycle hydrologique. Le modèle SWAT est adapté pour cette combinaison de modélisation hydrologique et d'étude des changements climatiques pour des bassins de quelques centaines de kilomètres carrés jusqu'à des milliers de kilomètres carrés.

L'objectif principal de cette thèse est d'effectuer une analyse spatio-temporelle sur les tendances des composantes du cycle hydrologique face aux changements climatiques au sein du bassin versant de la Tafna.

De ce fait, nous avons fixé notre objectif sur l'évaluation spatio-temporelle des projections climatiques et leurs impacts sur l'hydrologie du bassin versant.

Le processus de cette évaluation se décompose en quatre étapes; la première, qui regroupe les chapitres II, III et IV, se résume à la mise en place du modèle sur le bassin versant de la Tafna, sa calibration et sa validation. Dans la seconde (chapitre V) étape la préparation et le traitement statistique des données climatiques futures comparée à une période passée choisie comme une période de référence pour l'évaluation des projections climatiques. La troisième étape (chapitre VI) consiste à attribuer des classes de sécheresse à l'aide des indices climatiques standardisés, pour les tendances des paramètres. Et en dernier (chapitre VII), évalués combiner entre les deux précédentes étapes pour évaluer les projections climatiques et leurs impacts sur les composantes du cycle hydrologique à l'aide du modèle SWAT et les modèles climatiques régionaux sur le bassin de la Tafna.

METHODOLOGIE

La méthodologie s'est déroulée comme suit :

- La modélisation hydrologique :

la mise en place du projet avec le modèle SWAT, en utilisant les données disponibles décrites dans les chapitres II et III, sa calibration et validation durant la période passée 1981-2010 qui est présentées dans le chapitre IV.

- La modélisation hydro-climatique :

Le chapitre V sous forme d'un article scientifique -accepté pour publication dans le journal « International journal of global warming »-, présente la correction du biais des modèles climatiques régionaux par différentes méthodes et étudie leur impact sur l'hydrologie et les tendances futures des paramètres climatiques et hydrologiques.

Dans le chapitre VI on évalue le degré de sécheresse climatique et hydrologique durant la période future étudiée.

Le chapitre VII sous forme d'un article scientifique -soumis pour publication au « Journal of Water and Climate Change »-. Cet article présente la spatialisation des tendances du cycle hydrologique durant la période future 2020-2099.

Cette méthodologie est représentée sous forme d'organigramme dans la figure 13.

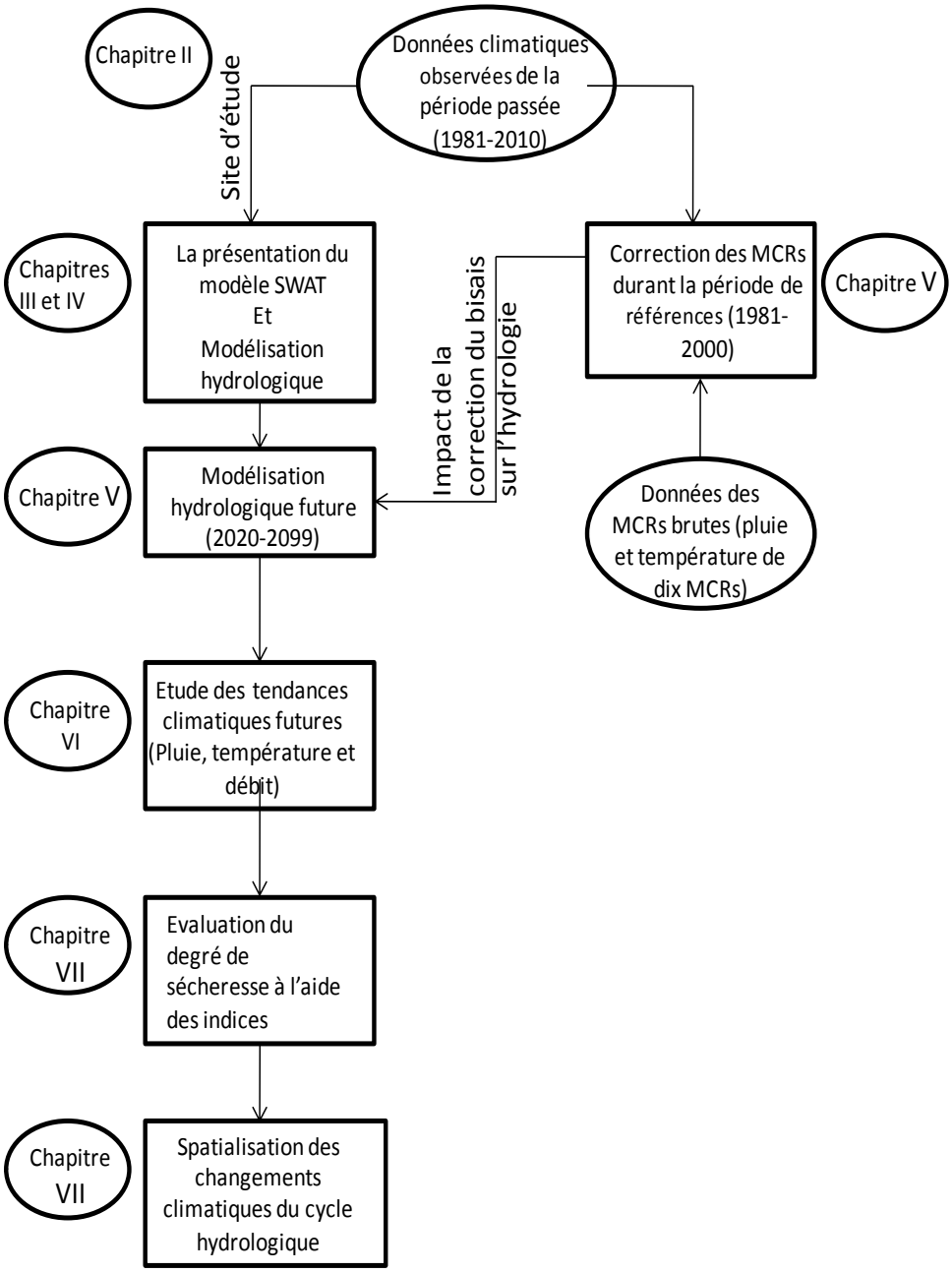


Figure 15. Résumé de la procédure de l'étude des changements climatiques du bassin versant de la Tafna.

CHAPITRE II. LE BASSIN VERSANT DE LA TAFNA

II. 1. Description de la zone d'étude

II. 1. a. Localisation

La situation géographique du bassin de la Tafna se trouve dans le Nord-Ouest de l'Algérie, avec une superficie de 7245 km² ("Agence de Bassin Hydrographique - Oranie - Chott - Chergui," n.d.; Hamlet, 2014; Yebdri, 2006), dont un tiers de ce dernier (bassin) s'étend sur le territoire marocain (Bakreti, 2014; Yebdri, 2006) (Figure 14). Selon la classification des bassins hydrographiques de l'Algérie, établie par l'Agence nationale des ressources hydrique (ANRH), le bassin de la Tafna possède le code N°16 (Figure 15).

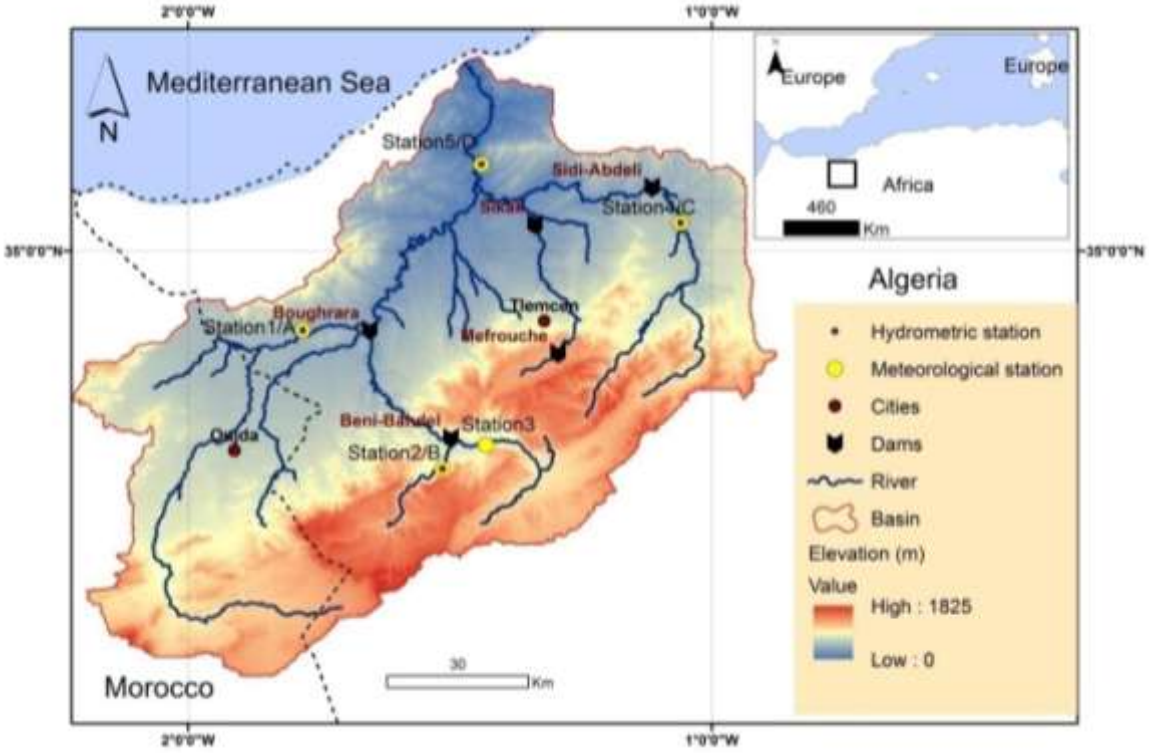


Figure 16. Localisation du basin versant de la Tafna, avec station météorologique et hydrométriques.

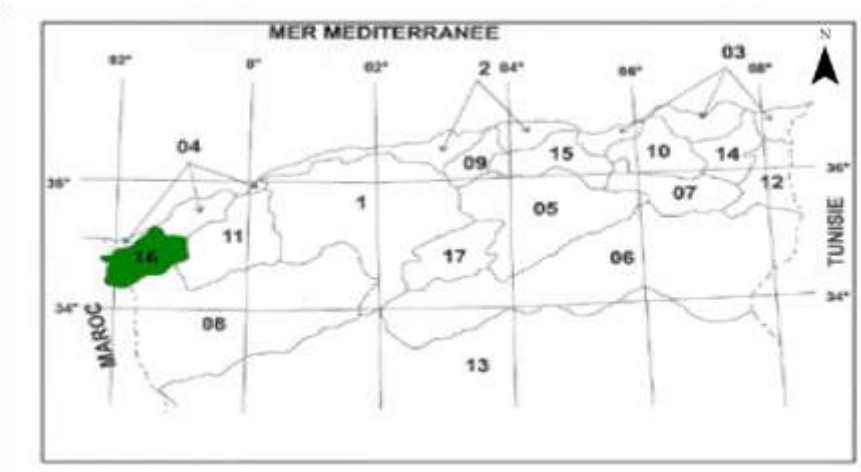


Figure 17. Code et noms des bassins versants de l'Algérie. 1-Cheliff ; 2-Côtiers Algérois ; 3-Côtiers Constantinois ; 4-Côtiers Oranais ; 5-Chott el Hodna ; 6-Chott Melrhir ; 7-Hauts plateaux constantinois ; 8-Chott Chergui ; 9-Isser ; 10-Kebir Rhumel ; 11-Macta ; 12-Medjerda; 13-Sahara ; 14-Syebousse ; 15-Soummam ; 16-Tafna ; 17-Zahrez. (Yebdri, 2006).

Dans un contexte hydrographique, l'oued Tafna est le principal cours d'eau du bassin versant de la Tafna, avec une longueur de 117km, prenant sa source dans les monts de Tlemcen, soutenu par différents oueds tels que l'oued Sebdou et oued Khemis formant une confluence au niveau du barrage de Beni-Bahdel (figure 14) mis en service en 1945, dont sa capacité est de 63Hm^3. Dans la partie gauche du bassin, un important affluent de Mouilah, dont sa grande partie se trouve dans le territoire Marocain sous le nom de l'oued Ouardefou, se confronte ensuite avec l'oued Tafna à l'amont du barrage de Hammam Boughrara (année de mise en service 1999), ayant une capacité de 177 Hm^3. Dans la région orientale du bassin, l'Oued Isser alimenté par l'affluent chouly, est déversé dans le barrage de Sidi Abdelli (1988, 110 Hm^3), pour ensuite se confronter avec l'oued Sikkak à l'amont du barrage Sikkak mis en eau en 2004 avec une capacité de 27 Hm^3. Il faut noter ainsi qu'à la naissance de l'Oued Sikkak, le barrage Mefrouche est implanté et mis en service en en 1963 pour une capacité de 15 Hm^3 (Figure 16).



Figure 18. Réseau hydrologique du bassin de la Tafna.

II. 1. b. Occupation des sols de la Tafna

Le calibrage et l'ajustement des bilans hydriques nécessitent de prendre en considération l'occupation des sols de la zone étudiée qui définit différentes variables environnementales.

La végétation naturelle représentée par des forêts (figure 17) et maquis recouvre environ 40% de la surface totale du bassin versant (Zettam, 2018). Dans la zone montagneuse Sud, au-dessus de 1200 m d'altitude, la majeure partie des terrains est occupée par une forêt de Chêne vert et de Pin d'Alep. Le Chêne liège se rencontre sur des terrains riches en silice qui caractérisent la forêt d'Ahfir. Au-dessous de 1200 m, nous avons une association de Oxycèdre, quelques vestiges de Chêne vert, de Palmier nain et de Tuya. Les terrasses et le fond des vallées de l'oued Tafna sont occupés par des terrains cultivés et les pentes sont couvertes de garrigues (Zettam, 2018). Dans la zone Nord, sur sol argilo marneux, généralement profond, la végétation ligneuse est remplacée par les cultures céréalières, fruitières et surtout maraîchères. La végétation naturelle subsistante, comprenant le Tamarix et le Laurier, n'est représentée que par des surfaces peu étendues (Zettam, 2018).

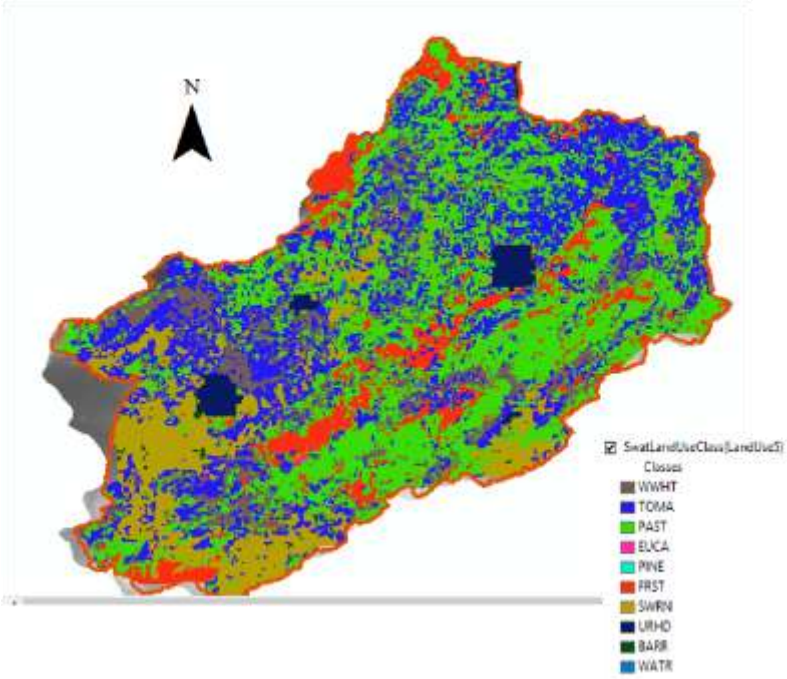


Figure 19. Carte d'occupation des sols du bassin versant de la Tafna.

II. 1. c. Les sols de la Tafna

Les sols du bassin versant de la Tafna sont dominés par le sol calcaire. Le lit majeur de l'oued est de type de sol alluvial et est présenté dans la figure 18.

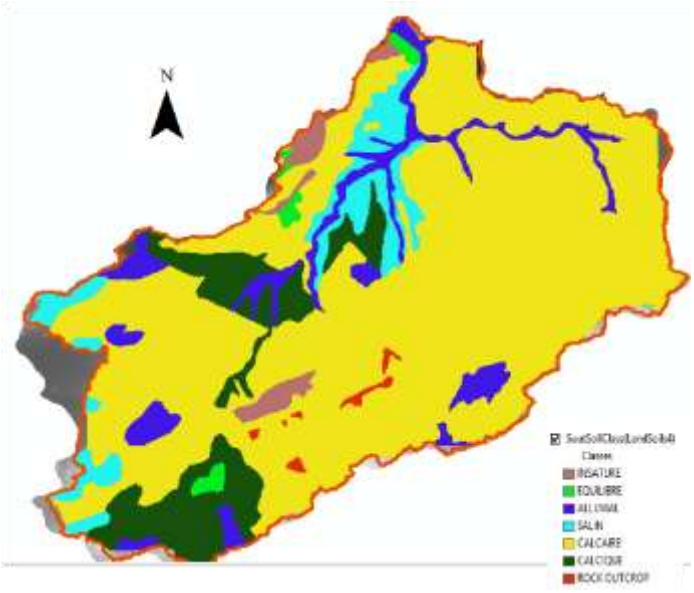


Figure 20. Carte sols du bassin versant de la Tafna.

II. 2. Hydro-climatologie de la Tafna

Le climat du bassin de la Tafna est de type semi-aride, caractérisé par deux saisons humides avec des pluies irrégulières d'Octobre à Mai variant entre 20 et 60 mm et par deux saisons sèches avec des pluies très faibles de Juin à Septembre ne dépassant pas les 10 mm pour la période 1981-2010 (figure 19). Les températures maximales sont considérablement élevées en été (Juillet et Aout) atteignant les 33°C durant la période passée (1981-2010) alors que les températures minimales diminuent jusqu'à 2°c en hiver (Novembre à Mars).

Les débits mesurés pendant la période passée (1981-2010) sont compris entre 0 et 10 m^3/s avec de très faibles débits en été (Juin à Août). Ces valeurs de débits sont plus élevées dans la station 5/D (figure 19) à l'exutoire par rapport aux stations situées en amont du bassin.

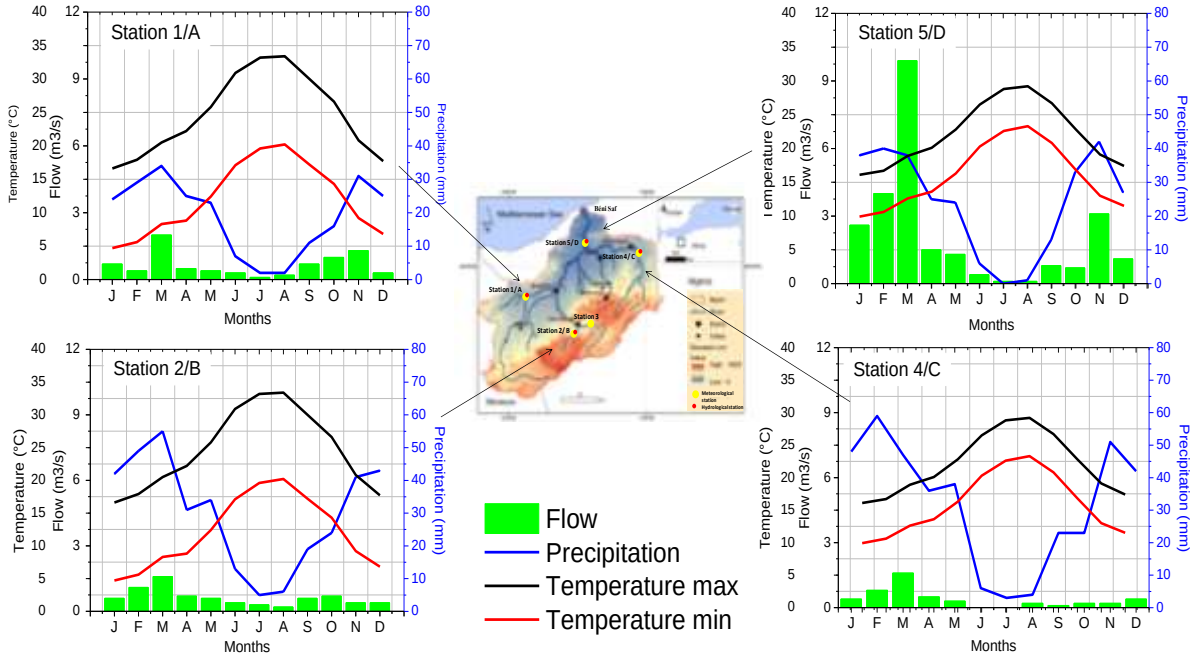


Figure 21. Hydro-climatologie du bassin de la Tafna pour la période passée 1981-2010.

II. 3. Critique de la série de données

Les séries de données utilisées dans ce travail proviennent de l'agence Nationale des ressources hydrique (ANRH) et l'office Nationale de la Météorologie . Nous avons utilisé les données climatiques précipitation et température minimale et maximale à l'échelle journalière pour le modèle SWAT. La période utilisée des données observées est de 1981 à 2010, nous avons sélectionné la série de données et les stations climatiques, qui sont de l'ordre de cinq (tableau 4), ayant le moins de lacunes possible pour la période étudiée.

Tableau 4. Récapitulatif des stations climatiques utilisées pour l modèle SWAT

Station	Nom	Code	Latitude	Longitude	Période
1	Béni Ouassine	160303	34.84	-1.77	1981-2010
2	Béni Bahdel	160403	34.70	-1.49	1981-2010
3	Sebou	160401	34.61	-1.40	1981-2010
4	Sidi Abdely	160613	35.09	-1.14	1981-2010
5	Pierre Du Chat	160802	35.10	-1.42	1981-2010

Le modèle hydrologique Soil and water assessment tool (SWAT) possède la faculté du comblement des lacunes dans les séries climatiques par le générateur de précipitation, température, la vitesse du vent l'humidité relative ainsi que la radiation solaire, développé par (Nicks, 1974) en insérant le code « -99 ». ce qui permet de générer les données manquantes et combler les lacunes des séries de données, ce générateur fonctionne en utilisant le processus d'une chaine de Markov ("Docs | SWAT | Soil & Water Assessment Tool," n.d.).

CHAPITRE III. CONCEPTUALISATION DU MODELE SWAT

III. 1. Description du modèle SWAT

Le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) est un modèle agro-hydrologique, créé par le département Américain de l'Agriculture, Agricultural Research Service (USDA -ARS) comme déjà cité dans le premier chapitre. SWAT est un modèle semi-distribué, c.à.d. qu'il définit l'information sous forme d'entités spatiales. A partir du modèle numérique de terrain (MNT) et du réseau hydrographique, le bassin versant est divisé en sous bassins versants, positionnant chaque exutoire de sous bassin versant au niveau de chaque affluent avant confluence. Ce découpage de sous bassins versants se fait de manière automatique comme manuellement pour le modèle SWAT si on souhaite rajouter des points exutoires de sous bassins.

En suite, la formation d'unités de réponse hydrologique (HRUs) se fait par la superposition des couches d'occupation des sols, de types des sols et des classes de pentes comme montrée dans la figure suivante (figure 20).

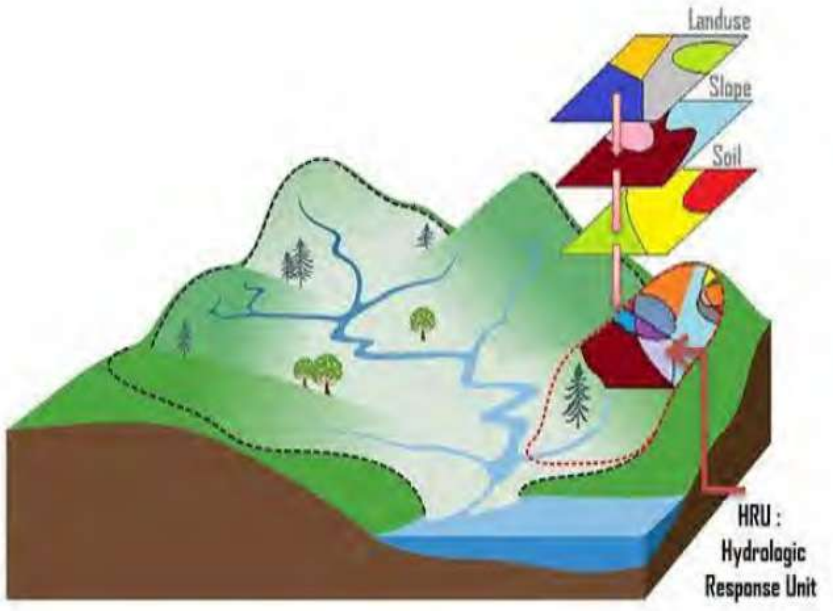


Figure 22. Définition de l'unité de réponse hydrologique (HRU) par SWAT

III. 1. a. Module hydrologique

Le bilan hydrologique est modélisé, à pas de temps journalier, selon l'équation suivante :

$$\boldsymbol{SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^{t}(R_{jour} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})i} \quad \text{……Équation 1}$$

Avec :

SW_t est la teneur en eau finale du sol (mm d'eau) ;

SW_0 est la teneur en eau initiale du sol (mm d'eau) ;

R_{jour} est la hauteur de précipitation (mm d'eau) ;

Q_{surf} est le ruissellement de surface (mm d'eau) ;

E_a est l'évapotranspiration (mm d'eau) ;

W_{seep} est la quantité d'eau entrant dans la zone vadose (mm d'eau) ;

Q_{gw} est le flux d'eau souterraine (mm d'eau) et t est le pas de temps (jour).

Ces différentes composantes du bilan hydrologique de SWAT sont représentées ainsi dans la figure 21 ci-dessous, laquelle regroupe l'interception, dont l'eau est stockée dans le premier réservoir du sol et qui permet l'évapotranspiration, l'infiltration, le ruissellement, l'écoulement de sub-surface, la redistribution de l'humidité dans le sol, l'emmagasinement et la restitution de la nappe de surface vers le cours d'eau ainsi que l'emmagasinement dans la nappe profonde et les prélèvements et enfin les restitutions de la nappe de surface et de la nappe profonde (Pezet, 2014; Zettam, 2018). Ces composantes sont détaillées dans la partie suivante de ce chapitre.

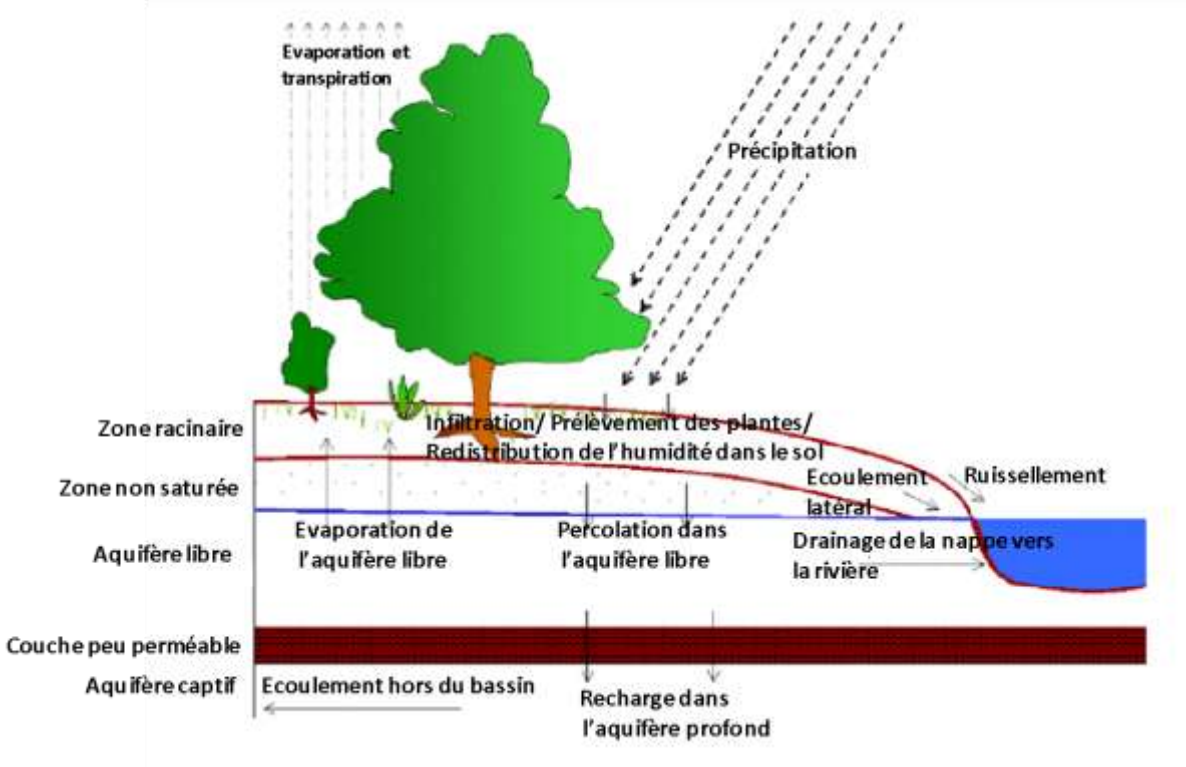


Figure 23. Processus hydrologiques modélisés par SWAT (adaptée de Neitsch et al., 2005).

- **L'interception**

La canopée est le premier réservoir qui reçoit les précipitations par interception. Cette partie, après avoir reçue les précipitations, qui dépend de la capacité de rétention par les plantes (indice foliaire), permet le processus d'évaporation. La quantité d'interception de la canopée est calculée par la formule suivante :

$$Can_{jour} = Can_{max} \times \frac{LAI}{LAI_{max}} \quad \text{..... Équation 2}$$

Où

Can_{jour} est la quantité d'eau maximale qui peut être piégée dans la canopée pour un jour donné (mm H_2O) ;

Can_{max} est la quantité d'eau maximale qui peut être piégée dans la canopée lorsque cette dernière est complètement développée (mm H_2O) ;

LAI est l'indice de surface foliaire pour un jour donné ;

LAI_{max} est l'indice maximal de la surface foliaire de la plante.

- **Le ruissellement**

Le calcul du ruissellement dans le modèle SWAT s'effectue à partir de l'équation du curve number (CV) (USDA, 1972), une méthode empirique qui permet de déterminer la quantité d'eau ruisselée en fonction de la teneur en eau des sols comme suit :

$$\boldsymbol{Q_{surf} = \frac{(R_{jour} - I_a)^2}{(R_{jour} - I_a + S)}} \quad \textbf{..... Équation 3}$$

D'où

Q_{surf} est la quantité d'eau ruisselée (mm H_2O) ;

R_{jour} est la précipitation de ce jour (mm H_2O) ;

I_a est l'abstraction initiale qui comprend le stockage en surface, l'interception et l'infiltration avant le ruissellement (mm H_2O)

S est un paramètre de rétention défini comme suit :

$$\boldsymbol{S = 25.4\ (\frac{1000}{CN} - 10)} \quad \textbf{.....Équation 4}$$

Pour un CN journalier, S devient :

$$\boldsymbol{I_a = 0.2\ S} \quad \textbf{.....Équation 5}$$

Donc Q_{surf} devient :

$$\boldsymbol{Q_{surf} = \frac{(R_{jour} - 0.2\ S)^2}{(R_{jour} + 0.8\ S)}} \quad \textbf{.....Équation 6}$$

- **La teneur en eau du sol**

Dans SWAT, le sol est discrétisé en plusieurs horizons (maximum 10), dont le nombre et les caractéristiques dépendent de chaque type de sol et sont renseignés par l'utilisateur. La teneur en eau des sols peut varier entre 0 et une valeur maximum $\emptyset_{soil}$ lorsque il est saturé. $\emptyset_{soil}$ représente donc la porosité (Grusson, 2016). Il est exprimé comme une fraction du volume total de sol par :

$$\emptyset_{soil} = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad \text{.....Équation 7}$$

Où

ρ_b est la masse volumique apparente ($Mg.m^{-3}$)

ρ_s est la masse volumique de la fraction solide ($Mg.m^{-3}$).

Le modèle simule les interactions avec les plantes et les écoulements à partir de deux valeurs de teneur en eau des sols caractéristiques qui sont la capacité au champ (*FC*) et le point de flétrissement permanent (*WP*). Le premier correspond à la quantité d'eau retenue dans un sol saturé après 48h d'égouttage et le second est le point audeçà duquel la végétation n'est plus capable de prélever de l'eau dans les sols. Ces deux paramètres dépendent intimement des caractéristiques physiques et de la composition des sols. Entre ces deux points est définie la réserve utile du sol (*AWC*) (Grusson, 2016).

- **Ecoulement latéral**

L'écoulement latéral s'effectue dans le cas où la profondeur est inférieure à deux mètres, par cette condition l'eau en excès peut être calculée comme suit :

c ……..Équation 8

Où

$SW_{ly,excess}$ est la quantité d'eau disponible d'un horizon à un jour donné (mm H_2O) ;

SW_{ly} est la quantité d'eau d'un horizon à un jour donné (mm H_2O) ;

FC_{ly} est la capacité au champ de l'horizon pédologique.

Le mouvement d'eau ne peut donc avoir lieu que si :

$$\boldsymbol{SW_{ly} > FC_{ly}} \quad \textbf{……Équation 9}$$

Les écoulements latéraux de subsurface sont calculés alors par :

$$\boldsymbol{Q_{lat} = 0.024 \left(\frac{2 \times SW_{ly,excess} \times K_{sat} \times slp}{\emptyset_d \times L_{hill}}\right)} \quad \textbf{……..Équation 10}$$

Où

Q_{lat} est le flux d'eau de sub-surface (mm H_2O) ;

$SW_{ly,excess}$ est la quantité d'eau disponible d'un horizon à un jour donné (mm H_2O) ;

K_{sat} est la conductivité hydraulique à saturation de l'horizon pédologique (mm H_2O) ;

Slp est la pente (m.m-1) et Lhill la longueur de la pente ;

$\emptyset_d$ est la porosité de drainage de l'horizon pédologique (mm.mm^{-1}).

- **Evapotranspiration potentielle et réelle**

SWAT calcul d'abord l'évapotranspiration potentielle pour ensuite calculer l'évapotranspiration réelle. Pour la première, nous trouvons trois méthodes de calculs et qui sont démontrées dans la partie qui suit.

Evapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle est calculée par trois méthodes dans le modèle SWAT comme suit :

La méthode de Penman-Monteith

$$L_h E_t = \frac{\Delta \times (H_{net} - G) + \rho_{air} \times C_p \times \frac{[e_z^0 - e_z]}{r_a}}{\Delta \times \gamma \times (1 + \frac{r_c}{r_a})}$$ **.....Équation 11**

D'où :

L_h est la chaleur latente de vaporisation (MJ.kg^{-1});

E_t est l'évapotranspiration potentielle (mm.j^{-1}) ;

Δ est la pente de la courbe de la tension de vapeur à la température de l'air donnée (kPa.°C^{-1}); H_{net} est le rayonnement net (MJ.m-2.j^{-1}) ;

G est le flux de chaleur transmis au sol (MJ.m-2.j^{-1});

ρ_{air} est la densité de l'air (kg.m^{-3});

C_p est la capacité thermique massique de l'air (MJ.kg-1.°C^{-1});

e_z^0 est la pression de vapeur de saturation de l'air à la hauteur Z ;

e_z est la pression de vapeur d'eau à la hauteur Z ;

γ est la constante psychométrique (kPa / C°) ;

r_c est la résistance de la canopée de la plante (s.m^{-1}) ;

r_a est la résistance à la diffusion de la couche d'air (aérodynamique) (s.m^{-1}).

La méthode de Priestley- Taylor

$$L_h E_0 = \alpha_{pet} \times \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \times (H_{net} - G)$$ **.....Équation 12**

Avec α_{pet} est un coefficient et est égale à 1.28 pour les zones humides.

La méthode de Hargreaves

$$E_0 = \frac{0.0023 \times H_0 \times (T_{max} - T_{min})^{0.5} \times (T_{av} + 17.8)}{L_h}$$ **.....Équation 13**

Avec :

E_0 est l'évapotranspiration potentielle (mm.j-1) ;

H_0 est le rayonnement extraterrestre (MJ.m-².j-1);

T_{max} et T_{min} sont respectivement la température maximale et minimale de l'air pour un jour donné (C°);

T_{av} est la température moyenne de l'air pour un jour donné(C°);

L_h est la chaleur latente de vaporisation de l'eau (MJ.Kg-1).

Evapotranspiration réelle

L'ETP correspond donc à une demande évapotranspiration maximale du système. Une fois celle-ci calculée, il est possible de calculer l'ETR en considérant l'eau disponible pour combler cette demande. SWAT calcule séparément l'évaporation et la transpiration comme décrites par Ritchie (1972). SWAT évapore en premier lieu l'eau interceptée par les plantes puis calcule le volume maximum de transpiration et d'évaporation du sol (Grusson, 2016).

L'eau interceptée est la première à être soumise à l'évaporation :

Si $E_0 < R_{int(i)}$ $E_{can} = E_0$ **et** $R_{int(f)} = R_{int(i)} - E_0$ **.....Équation 14**

Si $E_0 > R_{int(i)}$ $E_{can} = R_{int(i)}$ **et** $R_{int(f)} = 0$ **.....Équation 15**

Où

E_0 est l'évapotranspiration potentielle (mm H2O) ;

$R_{int\,(i)}$ et $R_{int\,(f)}$ sont les quantités d'eau interceptées initiales et finales disponibles (mm H_2O)

E_{can} est la quantité d'eau interceptée réellement évaporée (mm H_2O).

On a alors $E_0^{'}$ évaporation potentielle corrigée du terme de l'eau interceptée :

$$E_0^{'} = E_0 - E_{can}$$ **.....Équation 16**

SWAT calcule ensuite le volume maximum de transpiration. Si la formule de Penman-Monteith est utilisée, alors :

$$E_t = \frac{1}{L_h} \times \frac{(H_{net} \times G) + \gamma \times k \times \left(0.622 \times L_h \times \frac{\rho_{air}}{P}\right) \times \frac{e}{r_a}}{\Delta + \gamma \times (1 + \frac{r_c}{r_a})}$$ **……Équation 17**

Où

E_t est la transpiration maximale (mm H_2O) ;

Δ est la pente de la courbe de la tension de vapeur à la température de l'air donnée (kPa.°C^{-1});

H_{net} est le rayonnement net (MJ.m^{-2}.j^{-1}) ;

G est le flux de chaleur transmis au sol (MJ.m^{-2}.j^{-1});

ρ_{air} est la densité de l'air (kg.m^{-3});

e est la pression de vapeur de saturation de l'air ou humidité spécifique ;

γ est la constante psychrométrique (kPa.°C^{-1}) ;

r_c est la résistance de la canopée de la plante (s.m^{-1}) ;

r_a est la résistance à la diffusion de la couche d'air (aérodynamique) (s.m^{-1}) ;

K est un coefficient adimentionnel et P est la pression atmosphérique (kPa).

Si la formule de Hargreaves est utilisée, alors :

$$E_t = \frac{E_0' \times LAI}{3}$$ **Pour** $0 < LAI \leq 3.0$ **……Équation 18**

$$E_t = E_0'$$ **Pour** $LAI > 3.0$ **……Équation 19**

Où

E_t est la transpiration maximale d'un jour donnée (mm H_2O) ;

E_0' est l'évapotranspiration potentielle ajustée pour l'évaporation de l'eau libre dans la canopée (mm H_2O) ;

LAI est l'indice de la surface foliaire. Plus de détails sont montrés dans le document de (Neitsch et al., 2005).

Cette équation est valable aussi pour la méthode de Priestley-Taylor.

Notons que parmi les méthodes de calcul de l'évapotranspiration potentielle et réelle citées ci-dessus, celle de Hargreaves est retenue pour l'application de cette étude dans le modèle SWAT, déjà utilisée par (Yebdri et al., 2007; Yebdri, 2006) pour l'étude de la gestion des

ressources en eau du bassin de la Tafna, ainsi optée par (Zettam et al., 2017; Zettam, 2018) pour l'étude des transferts des nitrates du bassin versant de la Tafna.

III. 1. b. Evaluation statistique des résultats

- **Evaluation de la performance hydrologique du modèle**

L'évaluation des résultats du modèle est établie par l'utilisation de trois outils statistiques très fréquents dans le domaine de l'hydrologie, dont le critère de Nash-Sutcliffe (Nse) (Nash and Sutcliffe, 1970), le coefficient de détermination (R^2), et le Kling-Gupta Efficiency (KGE) (Knoben et al., 2019).

L'évaluation consiste à la comparaison des débits résultants des simulations issues de SWAT avec les données observées pour une échelle de temps considérée. Les trois critères de performance donnent des résultats compris dans une marge de 0 à 1. Le résultat est déterminé satisfaisant à très bon à partir de 0.5 jusqu'à 1.

Nash-Sutcliffe

$$Nse = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \underline{O})^2} \quad \text{.....Équation 20}$$

Avec O_i et S_i qui sont respectivement les valeurs des débits observés et simulés au pas de temps considéré.

Coefficient de détermination

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \underline{O})(S_i - \underline{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \underline{O})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(S_i - \underline{S})^2}} \quad \text{.....Équation 21}$$

Avec O_i et S_i sont respectivement les valeurs des débits observés et simulés au pas de temps considéré.

Kling-Gupta Efficiency

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad \text{.....Équation 22}$$

Où

''r'' est la corrélation linéaire entre les observations et les simulations ;

α est la mesure de l'erreur de la variabilité du débit, et β est le biais. Autrement dit :

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1)^2 + (\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1)^2} \quad \text{.....Équation 23}$$

D'où σ_{obs} est la standard déviation des observations, σ_{sim} est la standard déviation des simulations, μ_{obs} est la moyenne des observations, et μ_{sim} est la moyenne des simulations.

III. 1. c. Analyse de la variation temporelle

Pour l'analyse des séries temporelles et leurs tendances, le test de Mann-Kendall a été choisi pour ce travail de recherche.

- **Test de Mann-Kendall**

Le test Mann-Kendall est un test non paramétrique qui permet de détecter des tendances monotones d'une série chronologique (Kendall, M.G., 1975; Mann, 1945).

$$S = \sum_{j=i+1}^{n} \sum_{i=1}^{n-1} Sgn(x_j - x_i) \quad \text{.....Équation 24}$$

Où x_i et x_j sont les valeurs de rang i et j et que $j > i$ et

$$Sgn(x_j - x_i) = \{1 \ si \ x_j - x_i > 0 \ 0 \ si \ x_j - x_i = 0 \ -1 \ si \ x_j - x_i < 0 \quad \text{.....Équation 25}$$

Si l'échantillon de la série dépasse le nombre de dix, ce qui est le cas dans ce travail de recherche, alors une approximation normale de S est calculée comme suit :

$$Z = \{\frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} \ si \ S > 0 \ 0 \ si \ S = 0 \ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} \ si \ S < 0 \quad \text{.....Équation 26}$$

Avec

$$E(S) = 0 \quad \text{.....Équation 27}$$

Et

$$Var\ (S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad \text{.....Équation 28}$$

Avec Z qui correspond à la pente de tendance : si $Z > 0$ c'est une tendance croissante alors que si $Z < 0$ c'est une tendance décroissante.

La significativité statistique de la tendance est évaluée par l'étude de la valeur Z. Z a donc une distribution normale et la région critique du test statistique de Mann-Kendall et est donnée par $S < Z_{\propto/2}\sqrt{Var(S)}$ et $S < Z_{1+\propto/2}\sqrt{Var(S)}$.

D'où $Z_{\propto/2}$ et $Z_{1+\propto/2}$ sont respectivement le $\frac{\propto}{2}$ et $\frac{1+\propto}{2}$ quantile de la distribution normale et Var(S) la variance du test statistique S.

L'hypothèse H_0 est acceptée si $|Z| \leq Z_{\propto/2}$ où α est le seuil de significativité choisi.

Les seuils significatifs acceptables fréquemment sont $\infty = 5\%$ ou $\infty = 1\%$. Le seuil $\infty = 0.05$ $(\infty = 5\%)$ est choisi pour l'étude de ce travail, avec une présentation des résultats de façon à montrer le signe de tendance (positif ou négatif) et la P-value pour la significativité.

CHAPITRE IV. MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

IV. 1. Application du modèle SWAT sur le bassin de la Tafna

IV. 1. a. Données disponibles

La création du projet nécessite une série de données pour procéder à la modélisation. Ces données sont, le modèle numérique du terrain (figure 14), la carte des sols (figure 18) et la carte d'occupation des sols (figure 17) lesquels sont contenus dans le chapitre II.

- **Délimitation en sous bassins versant par SWAT**

A partir du modèle numérique de terrain (figure 14), le bassin a été découpé en sous bassins versants à partir de la définition de son réseau hydrographique qui est basé sur la topographie.

La création du sous-bassin est établie entre chaque confluence de deux cours d'eau. Comme déjà cité plus haut, la délimitation en sous bassins peut se faire automatiquement par SWAT ou manuellement en rajoutant des sorties de sous bassins d'intérêt, ce qui est le cas de cette étude pour un nombre de 33 sous bassins (figure 22).

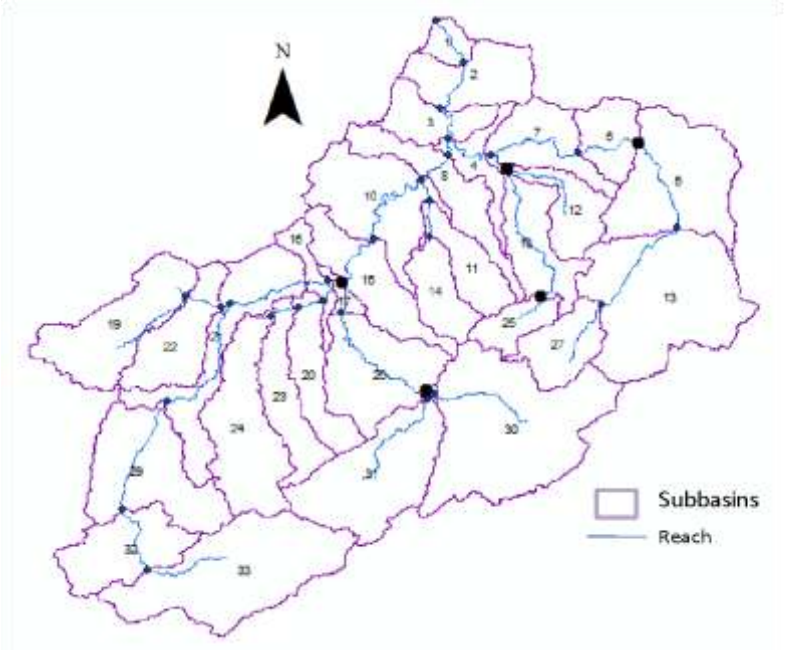


Figure 24. Délimitation du bassin versant en sous-bassins versant par SWAT.

- **Les classes de pentes**

Les classes de pentes ont été définies par le modèle SWAT, sous quatre classes (0 à 5)% ; (5 à 15)% ; (15 à 30)% et au-delà de 30% comme mentionnées dans la (figure 23), dont 93% de la superficie du bassin est comprise entre 0 et 30%. Cette définition des classes de pentes est effectuée à partir du modèle numérique de terrain (MNT).

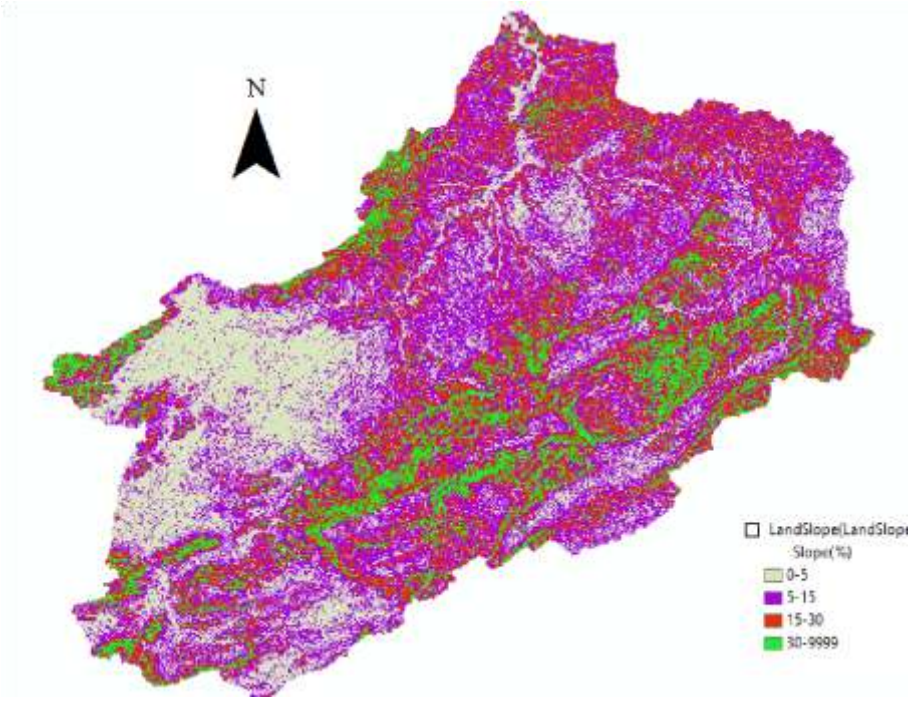


Figure 25. Classes de pentes établis par SWAT

IV. 1. b. Calibration du modèle

La performance de la calibration et validation des modèles SWAT et SWAT-CUP (SWAT calibration and uncertainty procedures) consiste à une comparaison entre les débits simulés et les mesurés. L'analyse de sensibilité et la calibration se font à l'aide de l'outil SWAT-CUP (Abbaspour, 2013; Yebdri et al., 2007; Zettam et al., 2017) en utilisant l'algorithme SUFI-2 (sequential Uncertainty Fitting 2). L'algorithme SUFI-2 est connu par son identification des paramètres appropriés pour un nombre d'itérations limité (Grusson et al., 2017; Yang et al., 2008). Plus de détails sur cet algorithme sont trouvés dans la documentation de SWAT-CUP (Abbaspour et al., 2004). Selon la recommandation de Yang et al. (2008), le nombre d'itérations effectuées par l'outil SUFI-2 est de 1500 itérations pour la calibration hydrologique, ce qui est le cas dans notre projet.

La calibration a été validée par rapport au bilan hydrologique résultant de l'outil SWAT à l'aide du programme SWAT-Check (figure 24) qui donne des résultats du bilan hydrologique proches des données de l'ANRH (valeurs encadrées en rouge dans la figure 24).

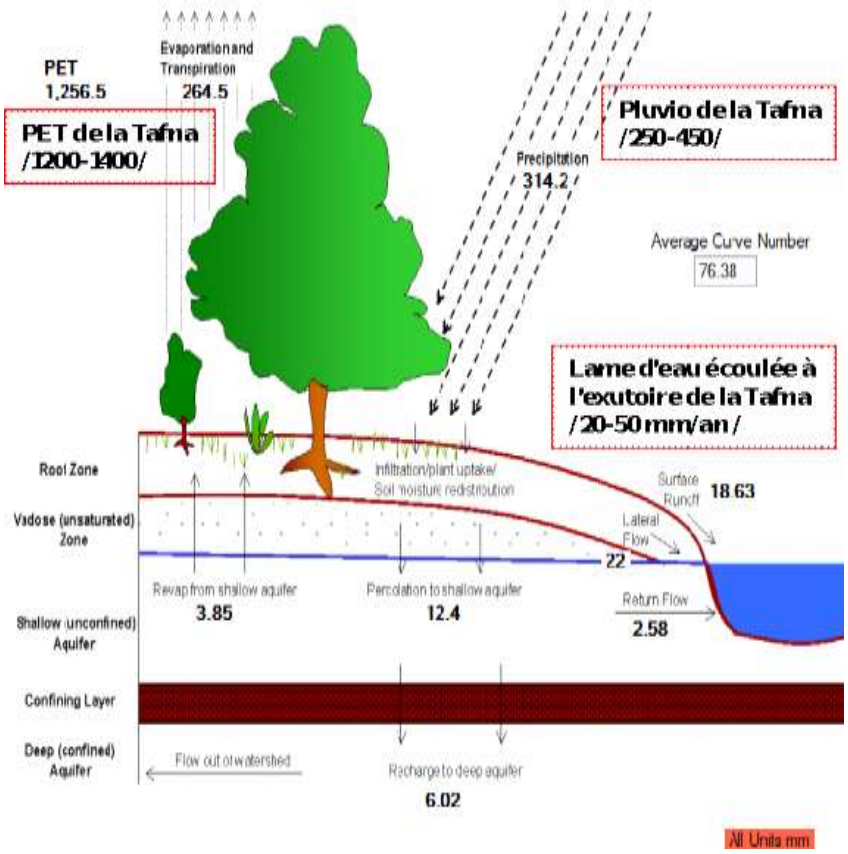


Figure 26. Bilan hydrologique interannuel (en mm) du bassin versant de la Tafna (1981-2010) établi avec le programme SWAT Check et comparé aux données de l'ANRH (valeurs encadrées en rouge).

- **Les stations hydrologiques calibrées et validées**

Comme le montre la figure 25 et le tableau 1, la calibration et la validation ont été réalisées par la comparaison des débits simulés aux mesurés à une échelle mensuelle. Cette comparaison montre une similitude entre les deux types de débits pour la majorité des stations hydrométriques à l'exception de la station A. Cette station A, dont le débit simulé est sous-estimé par rapport au débit mesuré à cause des flux d'eau résiduaires domestiques et industrielles des villes avoisinantes qui n'ont pas été pris en compte dans le modèle. Cette sous-estimation est exprimée par un indice de Nash insuffisant pour la station en question (tableau 1).

Tableau 1. Calibration/validation (with performance rating of the NSE (Nash and Sutcliffe, 1970)).

stations	Calibration (1981-1995)				Validation (1996-2010)			
	NSE	**R^2**	**KGE**	**Performance rating**	**NSE**	**R^2**	**KGE**	**Performance rating**
A	0.61	0.65	0.58	Satisfactory	-0.30	0.21	0.16	Unsatisfactory
B	0.62	0.69	0.65	Good	0.65	0.71	0.57	Good
C	0.52	0.54	0.4	Satisfactory	0.54	0.58	0.43	Satisfactory
D	0.83	0.84	0.72	Very good	0.66	0.70	0.56	Good

Le projet de Tafna a été calibré et validé par SWAT, à l'échelle mensuelle, pour les périodes 1981-1995 et 1996-2010 respectivement, en incluant les trois années d'initialisation pour la calibration (voir tableau 1). La corrélation entre les débits observés et simulés est de satisfaisante (station C avec un Nash = 0.52, R^2 = 0.54 et KGE = 0.4) à très bonne (station D avec un Nash = 0.83, R^2 = 0.84 et KGE = 0.72) (voir tableau 1). D'autre part, pendant la validation une station (station A ;) a présenté une corrélation non-satisfaisante avec un Nash de -0.30 durant la période de validation.

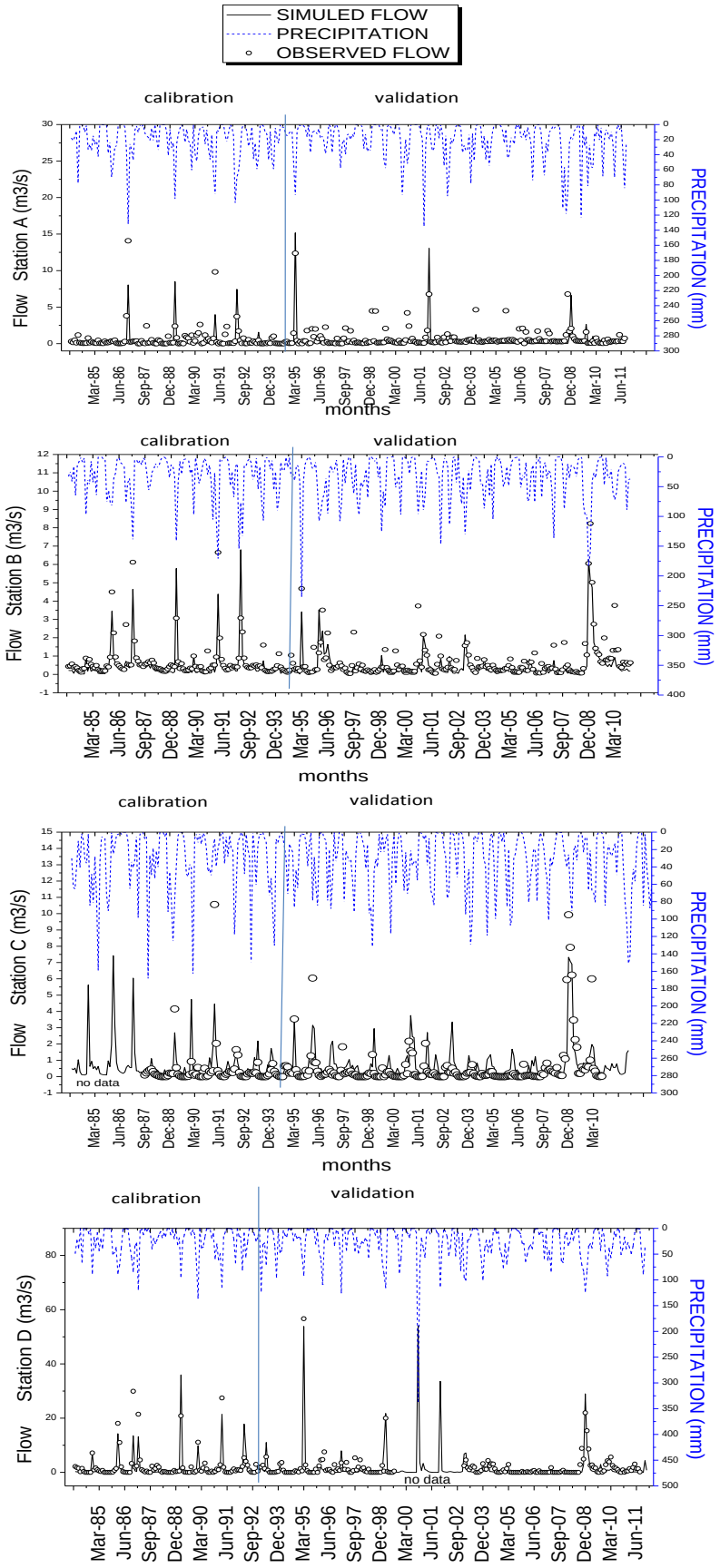


Figure 27. Calibration et validation du modèle SWAT en comparaison avec les observations de stations hydrométriques utilisées dans le bassin versant de la Tafna.

- **Analyse de sensibilité et calibration**

L'analyse de sensibilité effectuée par SWAT-CUP a montré que les paramètres les plus sensibles sont ceux qui contrôlent le ruissellement et la teneur en en eau dans le sol. Cette étude de sensibilité est présentée dans la section suivante qui expose l'article publié dans le journal : International Journal of Global Warming.

RESULTAT

CHAPITRE V: FUTURE CLIMATIC AND HYDROLOGIC CHANGES ESTIMATED BY BIAS-ADJUSTED REGIONAL CLIMATE MODEL OUTPUTS OF THE CORDEX-AFRICA PROJECT: CASE OF THE TAFNA BASIN (NORTH-WESTERN AFRICA)

Article accepté pour publication dans le journal «International Journal of Global Warming » :

Mami, A., Raimonet, M., Yebdri, D., Sauvage, S., Zettam, A., Sanchez-Perez, J.-M., in press. Future climatic and hydrologic changes estimated by bias-adjusted regional climate model outputs of the Cordex-Africa project: case of the Tafna basin (North-Western Africa). Int. J. Glob. Warm. in press.

V. 1. résumé de l'article en français

V. 1. a. contexte et objectif

Ce chapitre est présenté sous forme d'un article scientifique « Future climatic and hydrologic changes estimated by bias-adjusted regional climate model outputs of the Cordex-Africa project: case of the Tafna basin (North-Western Africa) accepté pour publication dans le Journal « international journal of global warming », qui élabore l'investigation des changements climatiques et hydrologiques de l'un des bassins les plus vulnérables de l'Algérie, le bassin versant de la Tafna, par l'utilisation de dix sorties de précipitations et de températures minimales/maximales composées d'une combinaison de deux RCM (modèles climatiques régionaux) et huit GCM (modèles climatiques globaux) du projet Cordex domaine de l'Afrique. L'utilisation des RCMs brutes est déconseillée pour les modélisations hydrologiques et les projections futures au risque de fausser les résultats.

Cet article est composé de différentes sections, à savoir une introduction, en suite matériels et méthodes, dont on présente le site d'étude qui est le bassin versant de la Tafna et ses caractéristiques climatiques, les différents modèles climatiques régionaux utilisés, une description des méthodes statistiques de correction du biais des RCMs, et une description générale de l'utilisation du modèle SWAT pour le bassin de la Tafna pour une étude hydro-climatique. La section suivante décrit les résultats obtenus pour cette étude. Cette section rassemble en premier lieu les résultats statistiques obtenus pour l'évaluation de l'utilisation des méthodes de correction du bisais. En second lieu, une partie hydrologique est présentée pour l'évaluation de l'impact de l'utilisation des méthodes de correction du biais sur l'hydrologie du bassin de la Tafna, ainsi que les tendances climatiques et hydrologiques pour la période 2000-

2100. Cette dernière section est suivit par une autre présentant une discussion des résultats obtenus de cette étude. Cet article est clôturé par une conclusion.

Les impacts des changements climatiques sur les ressources en eau peuvent etre exacerbés dans les régions présantants déjà un faible niveau des ressources en eau, des sécheresses fréquentes, et ainsi sont sujets à un deséquilibre entre la demande et l'offre des ressources en eau disponibles, tel est le cas du Nord de l'Afrique (Estrela et al., 2012). En Algérie, le bassin de la Tafna fait partie des ces vulnérables régions, notamment en ce qui concerne l'approvisionnement de l'eau potable. Certaines études mentionnent déjà une diminution des flux des cours d'eau jusqu'à -60% dans la décennie 70 estimée sur une période étalée entre 1930 et 1998 (Meddi and Hubert, 2003; Meddi et al., 2009).

Afin d'évaluer l'impact hydrologique des changements climatiques pour soutenir les décisions de gestion de l'eau dans les bassins hydrographiques locaux, il est possible d'appliquer les modèles climatiques régionaux (RCM) forcés par un modèle hydrologique pour étudier les projections climatiques suivants différents scénarios. L'utilisation de la version brute des données des RCMs, dans certaines régions, peut diminuer l'efficacité de l'évaluation des tendances hydrologiques, (Senent-Aparicio et al., 2017). Plusieurs études recommandes la correction du biais des données des RCMs avant utilisation outputs (Lenderink et al., 2007; Wilby et al., 2000; Brouziyne et al., 2018) pour diminuer l'erreur entre les variables observées et simulées, lorsque l'objectif est d'évaluer les impacts hydrlogiques (Muerth et al., 2013).

Certaines études contestent l'application de la correction du biais sur les RCMs ou les GCMs (modèles climatiques globaux) aux les projections futures en fonction du biais déterminé pour la période passée. Certaines méthodes de correction sont critiquées pour réduire l'avantage des projections de modèles climatiques si le biais est dû à une erreur de calcul accidentelle, alors le paramètre corrigé peut changer la tendance (Muerth et al., 2013; Ehret et al., 2012; Hagemann et al. ., 2004; Teutschbein et Seibert, 2013).

Cependant, comme l'absence de correction du biais pour les projections futures pourrait conduire à des erreurs pour les études d'impact hydrologique (Muerth et al., 2013) et comme le biais des précipitations est particulièrement élevé dans la région méditerranéenne (Kotlarski et al., 2014), la correction du biais peut etre requis dans cette région.

Le project Cordex est sponsorisé par le Programme mondial de recherche sur le climat (PMRC) (CORDEX, n.d.) pour développer des projections régionales améliorées du changement climatique pour toutes les régions terrestres du monde. Cordex-Afrique est l'un des quatorze domaines de l'initiative internationale Cordex et couvre le continent africain. Cependant, les études de correction des biais des résultats des MCR utilisant Cordex-Africa sont concentrées en Afrique centrale-occidentale et australe, par exemple, Hernández-Díaz et al. (2013) et Mascaro et al. (2015), mais seulement quelques-uns sur l'Afrique du Nord, par exemple, Ruti et al. (2016), Zeroual et al. (2018) et Brouziyne et al. (2018).

Le principe de base est que les biais entre les séries chronologiques simulées et les observations sont quantifiés, puis utilisés pour corriger les exécutions de contrôle et de scénario (Teutschbein et Seibert, 2010). Certaines méthodes de correction de biais utilisées par les modélisateurs d'impact sont Linear scaling (LS), Local intensity scaling (LOCI), Dstibution mapping (DM), le delta-change et le quantile-quantile (Senent-Aparicio et al., 2017; Lenderink et al., 2007; Teutschbein and Seibert, 2013, 2012; Amengual et al., 2012; Ahmed et al., 2015; Chen et al., 2013; Fang et al., 2015; Schmidli et al., 2006; Luo et al., 2018; Leander and Buishand, 2007; Shin et al., 2018).

Kotlarski et al. (2014) mentionnent que les biais de précipitations sont généralement de l'ordre de -40% et + 80% dans le bassin méditerranéen dans le cadre du projet Cordex, et que les biais de température moyenne régionale sont généralement inférieurs à 1,5 ° C, ce qui suggère qu'une correction de biais serait nécessaire avant une étude hydrologique.

Les résultats des modèles de prévision hydrologique peuvent avoir un impact direct sur les décisions concernant la gestion des ressources en eau (Zettam et al., 2017). Parmi ces modèles, le modèle de l'outil d'évaluation des sols et de l'eau (SWAT) (Arnold et al., 2012) est l'un des modèles les plus utilisés au monde (Yebdri et al., 2007, Senent-Aparicio et al., 2017; Zettam et al., 2017; Grusson et al., 2017; Brouziyne et al., 2017; Adnan et al., 2019; Bouraoui et al., 2005; Srinivasan et al., 2010; Osei et al., 2019; Blanco-Gómez et al., 2019) pour simuler l'hydrologie des bassins versants. Le modèle SWAT a déjà été appliqué sur le bassin du Tafna avec la version 1999 pour la gestion des ressources en eau (Yebdri et al., 2007) (une ancienne version sans interface SIG), et avec la version 2012 pour la modélisation du transport

sédimentaire (Zettam et al., 2006). Notre étude va plus loin et étudie les changements climatiques et hydrologiques sur le bassin du Tafna jusqu'à la fin du 21e siècle.

L'objectif de cette étude est d'évaluer les changements climatiques et hydrologiques dans le bassin du Tafna en utilisant les résultats de la MRC corrigée des biais du projet Cordex-Africa. Premièrement, le modèle hydrologique SWAT est appliqué au bassin du Tafna pour la période de référence (1981–2010). Ensuite, nous testerons et évaluons trois méthodes de correction de biais sur les sorties les précipitations et de température de dix RCMs du projet Cordex-Afrique pour la période de référence 1981-2000. Enfin, nous évaluerons à la fois l'impact des précipitations et de la correction des biais de température sur les résultats hydrologiques et l'évolution future des variables climatiques et hydrologiques mensuelles entre 2000 et 2100 suivant deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

V. 1. b. Principaux résultats

Une interprétation détaillée de la correction de biais pour chaque RCM est représentée sur la figure 26. Le débit des cours d'eau est obtenu à partir des 9 combinaisons de méthodes de correction de biais pour les précipitations et la température. Le biais entre le débit des cours d'eau calculé avec les sorties des RCMs et le débit de référence est généralement réduit après correction pour les dix RCMs (Figure 26). Les débits mensuels moyens résultant des 9 combinaisons varient entre 0 et 1,0 $m^{3}{\cdot}s^{-1}$ tandis que le débit de référence mensuel montre des valeurs moyennes de 0,3, 0,45 et 0,69 $m^{3}{\cdot}s^{-1}$ aux stations A, B et C, respectivement. La station D a des valeurs comprises entre 0,2 et 3 $m^{3}{\cdot}s^{-1}$ similaires au débit moyen de référence de 1,6$m^{3}{\cdot}s^{-1}$. Pour le débit mensuel moyen, les trois combinaisons utilisant la correction DM pour les précipitations ont la réponse hydrologique la plus appropriée pour les RCMs (4 et 9), (3 et 5-10), (4 et 6 et 9), (9) au stations A, B, C et D, respectivement. La même réponse est donnée pour les combinaisons utilisant la correction LOCI et LS pour les précipitations à la station C.

Le 95^{e} percentile du débit mensuel des 9 combinaisons varie entre 0,3 et 2,7 $m^{3}{\cdot}s^{-1}$ aux stations A, B et C, et entre 1 et 12 $m^{3}{\cdot}s^{-1}$ à la station D par rapport au 95^{e} percentile du débit mensuel de 8,5 $m^{3}{\cdot}s^{-1}$ de la période de référence.

Les combinaisons les plus appropriées pour modéliser le débit moyen de référence sont DM et LOCI pour les précipitations et VS pour la température. Dans le cas du 95^{e} percentile, les combinaisons les plus appropriées sont (LOCI; LS pour RCM: 1-10); (DM: 5 à 10); (DM: 2-4 et 6-10); (DM: 3, 7, 9) aux stations A, B, C et D, respectivement.

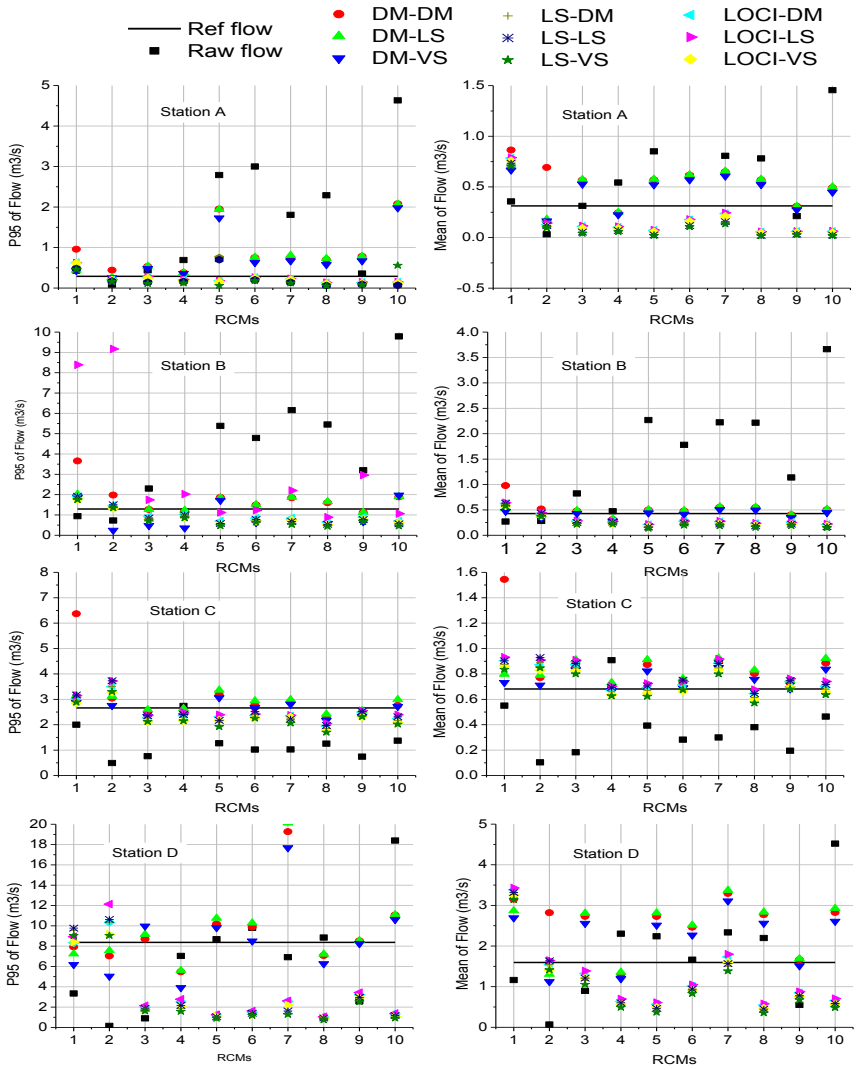


Figure 28. Comparaison des débits mensuels des cours d'eau obtenue à partir de simulations SWAT forcé des séries de données météorologiques observées (Ref), avec des sorties de RCM non-corrigées (décharge brute), et avec 9 combinaisons de précipitations et de la température corrigés du biais des dix sorties des RCMs, pour Janvier et Juillet au cours de la période de référence (1981-200) [exemple. DM-DM: méthode DM pour la précipitation; Méthode DM pour la température]. Les nombres [de 1 à 10] sont respectivement les modèles: [EC-EARTH-CCLM4-8-17; IPSL-CM5A-MR-RCA4; CCCma-CanESM2 -RCA4; CNRM-CM5 -CCLM4-8-17; CNRM-CM5 -RCA4; EC-EARTH -RCA4; MIROC5 -RCA4; MPI-ESM-LR -RCA4; NCC-NorESM1-M -RCA4 et NOAA / GFDL-ESM2M-RCA4].

La figure 27 présente la comparaison entre le débit moyen interannuel en utilisant les sorties du modèle NCC-NorESM1-M -RCA4 non corrigé et DM-DM corrigé (avec la combinaison DM-DM) sur la période (2000-2100) sous les deux RCP 4.5 et 8.5. Les périodes 2020-2040 et

2040-2060 montrent une augmentation du débit fluvial, et une diminution à partir de 2060, avec RCP 4.5. La diminution du débit apparaît plus tôt et démarre en 2040 avec RCP 8.5. Une dynamique temporelle similaire de la diminution et de l'augmentation du débit est observée avec les versions non corrigées et corrigées du biais des RCM, mais avec une grande différence d'intensité de débit entre les sorties RCM non corrigées et corrigées. L'évolution des trois variables environnementales [précipitations, température minimale / maximale et débit] pour les dix MRC est illustrée à la figure qui suit, sur la période 1981 - 2100 avec un intervalle de vingt ans. L'augmentation de la température minimale / maximale est indiquée pour les dix RCM jusqu'en 2100, et la diminution des précipitations et des débits apparaît à partir de 2040. La diminution des précipitations et des débits est plus importante avec le RCP 8.5 qu'avec le RCP 4.5.

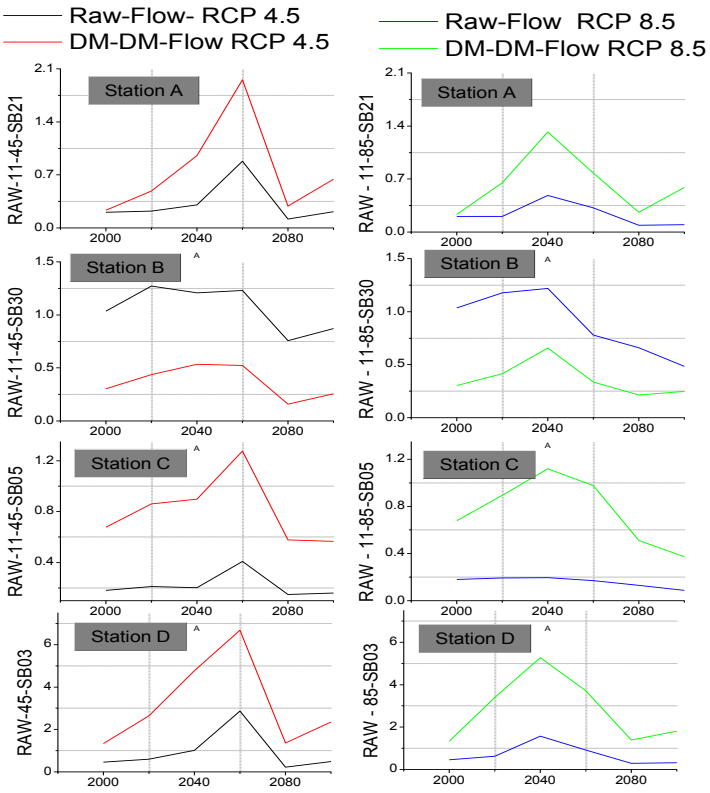


Figure 29. Comparaison des débits fluviaux interannuels moyens (pour une période de 20 ans) des sorties du modèle NCC-NorESM1-M -RCA4 non corrigées et corrigées par la combinaison de méthodes DM-DM sur la période (2000-2100) (avec 2000) = période de 1981 à 2000; 2020 = de 2000 à 2020;… 2100 = 2080 à 2100).

V. 2. Discussion de l'article en français

Les sorties de précipitation de certaines MRC sont fortement biaisées dans la région méditerranéenne comme CLMcom et SMHI, avec des biais généralement compris entre -40% et + 80% par rapport aux observations (Kotlarski et al., 2014; Panthou et al., 2016; Vautard et al., 2013). Certaines méthodes de correction de biais sont proposées pour ajuster les sorties de la RCM pour analyser le changement climatique, de la méthode LS simple à la méthode non linéaire sophistiquée DM. Le logiciel CMhyd est utilisé car il est conçu sur mesure pour extraire les résultats des RCMs, corriger le biais et préparer des variables climatiques simulées pour des études d'impact sur le changement climatique avec le modèle SWAT (Senent-Aparicio et al., 2017; Brouziyne et al., 2018; Xiang et al., 2018). Cependant, certaines études utilisant le logiciel CMhyd ont directement appliqué la méthode DM (Senent-Aparicio et al., 2017; Xiang et al., 2018) ou la méthode LS (Brouziyne et al., 2018) pour ajuster les précipitations, sans évaluer la performance de la méthode.

Dans cette étude, trois méthodes de correction du biais pour les précipitations (LS, DM, LOCI) et trois pour la température (LS, DM, VS) sont testées pour ajuster les RCMs de Cordex-Afrique pour la période de référence (1981-2000). Ces méthodes linéaires (LS et LOCI) (Schmidli et al., 2006; Leander et Buishand, 2007) et méthodes DM non linéaires (Ahmed et al., 2015; Fang et al., 2015; Luo et al., 2018; Teutschbein et Seibert, 2012; Kim et al., 2016; M'Po et al., 2017; Vithlani et Rank, 2016) donnent une réduction acceptable du biais pour tous les MRC Cordex-Africa utilisés dans cette étude.

Cependant, pour les précipitations, la méthode DM non linéaire conduit au biais le plus faible dans la plupart des stations, comme observé dans d'autres études dans différentes régions et différents climats (Senent-Aparicio et al., 2017; Luo et al., 2018; Teutschbein et Seibert , 2012). Pour la température minimum / maximum, la méthode DM et la méthode VS, extension de la méthode LS, réduisent mieux le biais que la méthode LS. Ces résultats sont en ligne avec de nombreuses études (Luo et al., 2018; Teutschbein et Seibert, 2012 ; Szabó-Takács et al., 2019).

En combinant les méthodes de correction du biais de précipitations et de température, nos résultats montrent que la méthode choisie pour corriger le biais de température n'influence que légèrement le calcul du débit des cours d'eau. Le choix de la méthode appropriée de correction du biais pour corriger les ensembles de données sur les précipitations est le plus important pour obtenir un débit conforme aux observations.

Avant d'explorer l'impact hydrologique de l'utilisation de la correction de biais sur les résultats des MRC, il est important d'évaluer la calibration et validation du modèle SWAT sur le bassin du Tafna. Les critères statistiques NSE pour la calibration et validation du modèle sont satisfaisants voire bons à très bons à la sortie du bassin. Le NSE n'est insatisfaisant qu'à la station A (NSE = –0,30), ce qui a déjà été observé dans l'étude de Zettam et al. (2017) en raison de l'influence des eaux usées anthropiques fournies par les villes de Tlemcen et Maghnia en Algérie et Oujda au Maroc. Hormis cette station, les critères statistiques de calibration et de validation sont proches de ceux obtenus dans différentes régions semi-arides: dans le même bassin (Tafna) avec des valeurs de Nash-Sutcliffe comprises entre 0,42 et 0,75 (Zettam et al., 2017) , dans le bassin Hamadan-Bahar en Iran (Nerantzaki et al., 2015) avec des valeurs de 0,33 à 0,77, et dans le bassin de la Medjerda avec des valeurs de 0,31 à 0,65 (Bouraoui et al., 2005).

Certaines études utilisant le logiciel CMhyd ont appliqué directement une méthode DM (Senent-Aparicio et al., 2017; Xiang et al., 2018) ou une méthode LS (Brouziyne et al., 2018) pour ajuster les précipitations, sans évaluer la performance du méthode.

Pour évaluer les méthodes de correction de biais et leur impact sur l'hydrologie, nous comparons les sorties hydrologiques obtenues en utilisant les sorties des RCMs comme forçage au modèle SWAT, sous les deux versions, les séries de données non corrigés et corrigés du biais pour la période de référence (figures 9 et 10).

Les débits des cours d'eau interannuels dans le bassin de Tafna obtenus à partir des séries de données brutes sur les précipitations et la température sont surestimés (sauf à la station C), mais les débits des cours d'eau obtenus avec les sorties des RCMs corrigées du biais sont beaucoup plus proches du débit des cours d'eau observé. Le forçage du modèle

hydrologique par les sorties des RCMs corrigées du biais conduit à améliorer la modélisation du débit des cours d'eau pendant la période de référence.

La correction du biais des précipitations est essentielle, car notre objectif est d'étudier les impacts hydrologiques à l'avenir. Muerth et coll. (2013) souligne que les RCMs corrigées du biais, avant de les utiliser dans des modèles hydrologiques, fournissent une représentation plus proche aux observations. La dynamique du débit des cours d'eau est similaire aux séries de données des précipitations non corrigées et corrigées du biais, mais le biais est significativement diminué après correction du biais, ce qui confirme la nécessité de corriger le biais de précipitation pour les applications hydrologiques.

Même si certaines études conseillent l'utilisation directe des résultats de la RCM car la correction du biais pourrait conduire à des résultats trompeurs (Luo et al., 2018; Maraun et al., 2010; Kjellström et al., 2011; Thomas et al., 2012), la correction du biais est généralement recommandée pour réduire le biais entre les variables climatiques observées et simulées (Lenderink et al., 2007; Wilby et al., 2000; Brouziyne et al., 2018), notamment pour étudier les impacts hydrologiques (Bernstein et al., 2007) . La réduction du biais des sorties d'origine du RCM conduit à une meilleure représentation du débit fluvial à la sortie du bassin de Tafna, indiquant que la correction du biais des précipitations est essentielle pour étudier les impacts hydrologiques au cours de la période de référence. Nos résultats confirment que la correction de biais des MRC, avant de les utiliser dans des modèles hydrologiques, fournit une représentation plus proche des débits observés (Bernstein et al., 2007).

L'augmentation de la température minimale / maximale est déjà observée depuis des décennies, et ce réchauffement est estimé à + 0,2 ° C par décennie (Bernstein et al., 2007). Nos résultats montrent une augmentation d'environ + 0,3 ° C tous les 20 ans sous RCP 4,5 et + 0,5 ° C sous RCP 8,5 (Figure 12) ce qui confirme les résultats du GIEC (Bernstein et al., 2007). Ces tendances sont également proches de celles observées en Afrique du Nord sous Cordex dans la région MENA (Moyen-Orient et Afrique du Nord) et en Europe (Zeroual et al., 2018; Ahmadalipour et Moradkhani, 2018; Dosio et Panitz, 2016; Jacob et al., 2014). Cette augmentation de la température minimale / maximale conduit au réchauffement de la région et la diminution des précipitations associées conduit à l'intensification des sécheresses.

Dans la région méditerranéenne, la diminution des précipitations est estimée à –20% et –30% sous les RCP 4.5 et 8.5, respectivement (GIEC Working Group I et al., 2013; Brouziyne et al., 2018; Schilling et al., 2012 ; Philandras et al., 2011; Solomon et Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2007). Les dix MRC évaluées dans cette étude montrent une diminution importante des précipitations pour la quasi-totalité de la période future, avec une intensité plus significative sous RCP 8,5 (–34%) par rapport au RCP 4,5 (–25%). Cela confirme les résultats de Zeroual et al. (2018) dans le nord de l'Algérie en utilisant Cordex-Africa qui mentionne que l'aridification semble être plus importante pendant la période 2045-2098. Cette diminution affecte directement le débit du bassin. Cela pourrait réduire la période de remplissage des barrages, entraînant un déséquilibre entre la demande et l'offre en eau.

Le 4e rapport du GIEC (AR4, 2007) mentionne que le débit des cours d'eau pourrait diminuer jusqu'à –30% à l'avenir pour la région méditerranéenne. Brouziyne et coll. (2018) et Tramblay et al. (2013) obtiennent des résultats similaires dans la région du Maroc. Ces résultats sont complémentaires de notre étude, présentant une diminution du débit en utilisant dix combinaisons différentes de modèles GCM / RCM. La diminution du débit à partir de 2060 avec RCP 4.5 et en 2040 avec RCP 8.5 influence la disponibilité des ressources en eau superficielles et souterraines. Cela pourrait conduire à des sécheresses associées à des vagues de chaleur, ce qui pourrait ultérieurement entraîner une diminution voire une disparition de la faune et de la flore. Cela peut créer un déséquilibre dans la demande et l'approvisionnement en eau, ce qui implique un effet négatif sur la demande d'eau potable qui représente la majeure partie de la demande en eau par rapport à l'irrigation des terres agricoles et au captage industriel de l'eau. La diminution du débit fluvial pourrait également conduire à une diminution de la réserve utile stockée et augmenter le stress hydrique de cette région vulnérable à la sécheresse.

La diminution du débit est plus importante sous RCP 8.5, indiquant que continuer à émettre du CO2 sans stabilisation pourrait conduire à des impacts plus graves dans le nord de l'Afrique. Cela met en évidence la nécessité de stabiliser la concentration de CO2 pour éviter les conséquences socio-économiques dans ces régions semi-arides du monde.

Cette étude fournit des informations supplémentaires sur les impacts du changement climatique dans la région méditerranéenne (Ruti et al., 2016; Zittis et al., 2019; Gan et al., 2016). La majorité des MRC Cordex suggèrent une augmentation significative de la température (Zittis et al., 2019), tout au long de la période future. Zittis et al. (2019) avise que cette augmentation de température régionale projetée est plus prononcée que l'évolution globale. Alors que la plupart des études utilisent les résultats des RCMs du projet Med-Cordex, cette étude fournit une évaluation des séries de données sur les précipitations et la température de Cordex-Africa. Nos résultats confirment (Ruti et al., 2016; Zittis et al., 2019; Gan et al., 2016) l'augmentation de la température et la diminution des précipitations dans le futur dans le bassin du Tafna qui fait partie de la région méditerranéenne.

V. 3. Conclusion de l'article en français

Cette étude de l'évaluation des changements climatiques et hydrologiques sur le bassin du Tafna contribue à améliorer les connaissances sur l'augmentation de la température minimale / maximale et la diminution des précipitations qui affectent la ressource en eau de la région, et mène la sécheresse.

Le bassin du Tafna, un bassin fluvial à fort stress hydrique, est utilisé pour présenter une méthodologie pour analyser et appliquer les résultats des modèles climatiques régionaux pour des applications hydrologiques dans des bassins fluviaux caractérisés par des caractéristiques et des problèmes similaires.

Les résultats de la correction de biais des sorties de RCM obtenus dans cette étude sont en accordance avec les études précédentes dans la région méditerranéenne. Nous pouvons considérer ces résultats comme représentatifs des régions semi-arides d'Afrique du Nord et d'autres régions ayant des caractéristiques similaires au bassin du Tafna. L'évolution climatique peut être représentative de la région méditerranéenne, en particulier l'Afrique du Nord.

V. 3. a. Publication

L'article original est inséré dans les pages qui suivent.

Int. J. Global Warming, Vol. X, No. Y, xxxx 1

Future climatic and hydrologic changes estimated by bias-adjusted regional climate model outputs of the Cordex-Africa project: case of the Tafna basin (North-Western Africa)

Amina Mami*

Laboratoire de recherche de gestion et traitement des eaux (LGTE),
Faculté d'Architecture et de Génie Civil,
Université des Sciences et de la Technologie d'Oran,
Mohamed Boudiaf, 31000 Oran, Algeria
Email: amina.mami@univ-usto.dz
and
Laboratoire Ecologie Fonctionnelle et Environnement,
INP-Toulouse, 31326 Toulouse, France
Email: mami.amina89@yahoo.fr
*Corresponding author

Mélanie Raimonet

Laboratoire Ecologie Fonctionnelle et Environnement,
CNRS, INP-Toulouse, UPS,
Université de Toulouse,
31326 Toulouse, France
Email: melanie.raimonet@gmail.com

Djilali Yebdri

Laboratoire de recherche de gestion et traitement des eaux (LGTE),
Faculté d'Architecture et de Génie Civil,
Université des Sciences et de la Technologie d'Oran,
Mohamed Boudiaf, 31000 Oran, Algeria
Email: dyebdri@yahoo.fr

Sabine Sauvage

Laboratoire Ecologie Fonctionnelle et Environnement,
CNRS, INP-Toulouse, UPS,
Université de Toulouse,
31326 Toulouse, France
Email: sabine.sauvage@univ-tlse3.fr

Copyright © 20XX Inderscience Enterprises Ltd.

Amin Zettam

Laboratory of Ecology and Natural
Ecosystems Management (LECGEN),
Faculty of Natural and Life Sciences and
Earth and Universe Sciences (SNVSTU),
Tlemcen University,
13000 Tlemcen, Algeria
Email: zettam.amine@gmail.com

José Miguel Sanchez Perez

Laboratoire Ecologie Fonctionnelle et Environnement,
CNRS, INP-Toulouse, UPS,
Université de Toulouse,
31326 Toulouse, France
Email: jose-miguel.sanchez-perez@univ-tlse3.fr

Abstract: This study investigates climatic and hydrologic changes of the Tafna basin, by using ten outputs of precipitation and temperature from RCMs of the Cordex-Africa project. Different methods of bias-correction (LS, LOCI, DM and VS) are compared to correct the bias of precipitation and temperature datasets to observations. The suitable method, DM, reduces the bias to 1.27 mm for precipitation and 0.06 and 0.7°C for minimum/maximum temperature, respectively. The bias-corrected precipitation and temperature datasets are introduced into the SWAT model, calibrated and validated on the Tafna basin with good Nash criteria (NSEoutlet = 0.83). The discharge is over or under-estimated without bias-correction of RCM outputs, which highlights the necessity of applying bias-correction before using RCM outputs from Cordex-Africa for hydrological applications. The results show that the precipitation and discharge decreases, and temperature increases are more important with RCP 8.5 than with RCP 4.5, especially in the last decades of the 21st century.

Keywords: Tafna basin; precipitation; Cordex-Africa; bias-correction; climate change; discharge.

Reference to this paper should be made as follows: Mami, A., Raimonet, M., Yebdri, D., Sauvage, S., Zettam, A. and Sanchez Perez, J.M. (xxxx) 'Future climatic and hydrologic changes estimated by bias-adjusted regional climate model outputs of the Cordex-Africa project: case of the Tafna basin (North-Western Africa)', *Int. J. Global Warming*, Vol. X, No. Y, pp.xxx–xxx.

Biographical notes: Amina Mami is a PhD student at Université des Sciences et de la Technologie d'Oran 'Mohamed BOUDIAF', and Institut National Polytechnique de Toulouse. She received her Master's degree from Université des Sciences et de la Technologie d'Oran 'Mohamed BOUDIAF'. Her research interests include water resource management, and impact of climate change on water resources in the Mediterranean region.

Mélanie Raimonet holds a PhD in Marine Biology. She currently works at EcoLab – Laboratoire d'écologie fonctionnelle. She does research in hydro-biogeochemistry and ecology. Her current project is 'AGUAMOD'.

Djilali Yebdri is a Professor at Université des Sciences et de la Technologie d'Oran 'Mohamed BOUDIAF', He holds a PhD in Hydraulic (2006) from Université des Sciences et de la Technologie d'Oran 'Mohamed BOUDIAF'. His research is focused on the water resource management and development of reservoir management in the Nord-Western Africa.

Sabine Sauvage is a Research Engineer class assigned to Laboratory (CNRS – Université Paul Sabatier – INP Toulouse). He obtained his PhD obtained on November 1999 from INP Toulouse, France. He holds a Habilitation for Managing Research (2010) in University of Toulouse, France. His research has been focused on the development of models that describe the bio-physical interactions between the flows, biology and chemistry of the biogenic elements and contaminants in rivers by integrating interface zones and buffer zones between the surface water and the river beds from the scale of the processes to the scale of the watershed.

Amin Zettam is an Algerian Scientist assigned to Laboratory of Ecology and Natural Ecosystems Management (LECGEN), Faculty of Natural and Life Sciences and Earth and Universe Sciences (SNVSTU), Tlemcen University Algeria. PhD (2018) in Hydrology, hydrochemistry, soil, Environnement from the NATIONAL POLYTECHNIC INSTITUTE OF TOULOUSE (France); – PhD (2018) in Aquatic Ecosystem: Biodiversity, Functioning and Anthropisation from Tlemcen (Algeria). He studies pollutant transport in hydrologic systems, using modeling.

José Miguel Sanchez Perez is a Research Director assigned to Laboratory (CNRS – Université Paul Sabatier – INP Toulouse). He earned his PhD (1992) in Hydrogeochemistry from the University of Strasbourg (France), MS (1985) in Geoloy from University of the Basque Country (Spain). His is focus in biogeochemical functioning of buffers zones. He studies pollutant transport in hydrosystems, using extensive field data and modelling. He specialises in the functioning of wetlands, riparian zones, and groundwater systems, with particular interests in the modelling of catchment-scale pollutant transport, to predict how ecosystem functions will change under various climate change scenarios.

1 Introduction

The Mediterranean region is considered particularly vulnerable to climate variability and change because of its sensitivity to changes in the water cycle (Rosenzweig et al., 2007; UNEP/MAP-Plan Bleu, 2009). In the Mediterranean region, several studies mentioned decreases in rainfall ranging between –10% and –40% in the North-Eastern Morocco and North-Western Algeria using the ECHAM4/OPYC3 model, and between –10% and –20% in Greece (Zanis et al., 2009) and in the Gàllego basin in Spain (Majone et al., 2012) using the Prudence project. Ruti et al. (2016) mention that areas surrounding the Mediterranean basin have quite a unique character with similar climatic conditions and

morphologic characteristics. Currently, the Southern and Eastern rims are experiencing high to severe water stress. By the 2050 horizon, this stress could increase over the whole Mediterranean basin, notably because of a 30%–50% decline in freshwater resources as a result of climate change (Milano et al., 2013).

At the start of the 1970s, the impacts of climate change began to appear in Northern Africa, with an increase in temperature and a decrease in rainfall (Knippertz et al., 2003; Taibi et al., 2017). The North-Western region of Algeria is characterised by a rainfall decrease of –25% in the 1970s evaluated by studies done throughout 1950 to 2004 (Taibi et al., 2017; Meddi et al., 2010), and an increase of temperature +1 to +1.25°C since 1901 to 2010 (Zeroual et al., 2018; IPCC Working Group I et al., 2013). A warming trend is even expected to continue at a rate of +0.2°C per decade for the next 20 years (Bernstein et al., 2007). These variations associated with climate change are expected to increase the vulnerability of semi-arid regions regarding water scarcity.

Impacts of climate change on water resources can be exacerbated in regions already presenting low water resources levels and frequent droughts, and subject to imbalances between water demand and available water resources, like in Northern Africa (Estrela et al., 2012). In Algeria, the Tafna basin belongs to these vulnerable regions, especially concerning drinking water supply. Some studies already mention that the discharge decreases until –60% in the decade of 1970 evaluated by studies done from 1930 to 1998 (Meddi and Hubert, 2003; Meddi et al., 2009).

In order to evaluate hydrological impacts of climate change to support water management decisions in local drainage basins, one possibility is the application of regional climate models (RCMs) to force a hydrological model to study future projections under different scenarios. The use of raw RCM outputs, in some regions, may decrease the efficiency of the hydrological trend evaluation, and cannot be used directly (Senent-Aparicio et al., 2017). Different studies recommend the use of bias-correction of RCM outputs (Lenderink et al., 2007; Wilby et al., 2000; Brouziyne et al., 2018) to minimise errors between observed and simulated climate variables, when the aim is to investigate hydrological impacts (Muerth et al., 2013).

Some studies controvert the application of bias correction on RCMs or global climate models (GCMs) to future periods based on bias determined for the past period. Some correction methods are criticised to reduce the advantage of climate model projections if the bias is due to an accidental calculation error, then the parameter corrected can change the tendency (Muerth et al., 2013; Ehret et al., 2012; Hagemann et al., 2004; Teutschbein and Seibert, 2013). However, as the absence of bias-correction for future projections could lead to errors for hydrological impact studies (Muerth et al., 2013) and as the precipitation bias is particularly high in the Mediterranean region (Kotlarski et al., 2014), bias-correction could be expected in this region.

To evaluate the impact of the use of bias-corrected RCM outputs on hydrology in the future, the regional downscaling of GCM to RCM is developed by different institutes and homogenised through the Cordex project (ESGF-LIU, n.d.). This project is sponsored by the World Climate Research Program (WCRP) (CORDEX, n.d.) to develop an improved regional climate change projections for all land regions worldwide. Africa-Cordex is one of the fourteen domains of the international Cordex initiative and covers the African continent. However, the bias-correction of RCM outputs studies using Cordex-Africa are concentrated in Central-Western and Southern Africa, e.g., Hernández-Díaz et al. (2013) and Mascaro et al. (2015), but only a few on the Northern Africa, e.g., Ruti et al. (2016), Zeroual et al. (2018) and Brouziyne et al. (2018).

The basic principle is that biases between simulated climate time series and observations are quantified and then used to correct both control and scenario runs (Teutschbein and Seibert, 2010). Some methods of bias correction used by impact modellers are linear scaling (LS), local intensity scaling (LOCI), distribution mapping (DM), empirical quantile mapping, delta change and quantile-quantile corrections (Senent-Aparicio et al., 2017; Lenderink et al., 2007; Teutschbein and Seibert, 2013, 2012; Amengual et al., 2012; Ahmed et al., 2015; Chen et al., 2013; Fang et al., 2015; Schmidli et al., 2006; Luo et al., 2018; Leander and Buishand, 2007; Shin et al., 2018). Kotlarski et al. (2014) mention that precipitation biases are generally in the range –40% and +80% in the Mediterranean basin under the Cordex project, and regionally averaged temperature biases are mostly less than 1.5°C, suggesting that bias correction would be needed before hydrological applications.

The outputs from hydrological prediction models can have a direct impact on decisions with regard to water resources management (Zettam et al., 2017). Among these models, the soil and water assessment tool (SWAT) model (Arnold et al., 2012) is one of the most widely used model in the world (Senent-Aparicio et al., 2017; Zettam et al., 2017; Grusson et al., 2017; Brouziyne et al., 2017; Adnan et al., 2019; Bouraoui et al., 2005; Srinivasan et al., 2010; Osei et al., 2019; Blanco-Gómez et al., 2019) to simulate watershed hydrology. The SWAT model has already been applied on the Tafna basin with the 1999 version for water resource management (Hagemann et al., 2004) (an old version without GIS interface), and with the 2012 version for modelling of sediment transport (Meddi and Hubert, 2003). This study goes further and investigates climatic and hydrologic changes on the Tafna basin until the end of the 21st century.

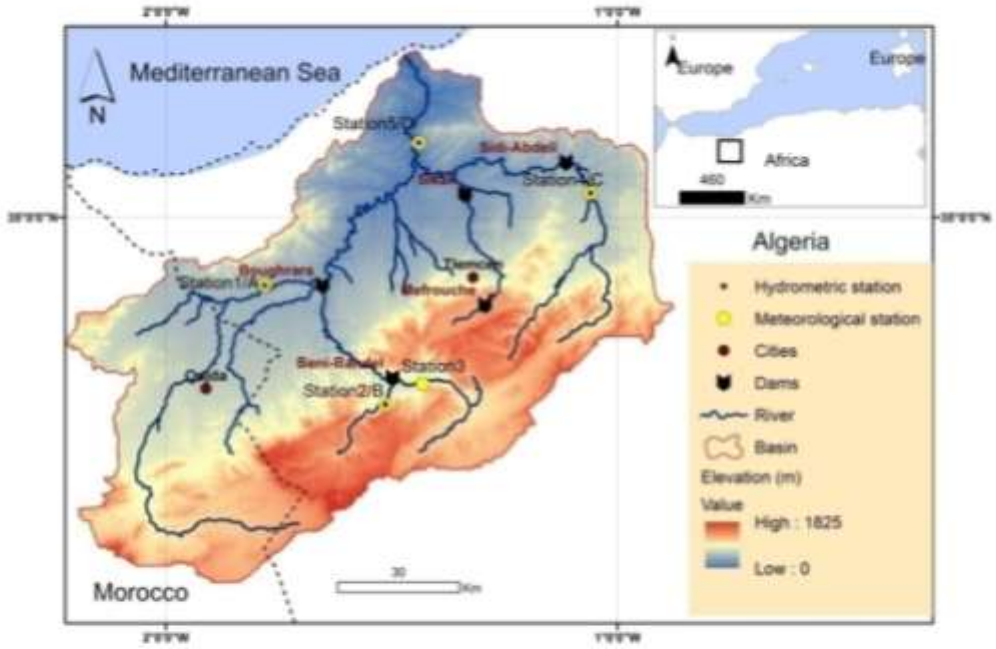
The aim of this study is to evaluate climatic and hydrologic changes in the Tafna basin using bias-corrected RCM outputs of the Cordex-Africa project. First, the SWAT hydrological model is applied to the Tafna basin for the reference period (1981–2010). Then, we test and evaluate three bias-correction methods on precipitation and temperature outputs from ten RCMs of the Cordex-Africa project for the reference period. Finally, we assess both the impact of precipitation and temperature bias-correction on hydrological outputs and the future evolution of monthly climatic and hydrologic variables between 2000 and 2100 under two emission scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5.

2 Materials and methods

2.1 Study area and observed data

The Tafna basin is located in the North-West of Algeria. It is a transboundary watershed, with about 30% of its surface area in Morocco (Yebdri et al., 2007). The Tafna basin is one of the biggest five basins of North-Western Algeria according to the classification of the Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH: National Water Resources Agency, 1981). The Tafna catchment covers approximately 7,245 km^2 and discharges into the Mediterranean Sea near Beni-saf City (Figure 1).

Figure 1 Location of the Tafna catchment (see online version for colours)



Note: Each station is associated with a number for meteorological station and/or a letter for hydrometric station.

2.2 *Meteorological and hydrological datasets*

Meteorological and hydrological datasets are used in this study (Table 1). The stations 1 to 5 record meteorological parameters (precipitation and temperature) collected by the National Agency of the Meteorology of Algeria, and the stations A to D record the hydrometric parameter (river discharge) measured by ANRH (Figure 1).

Table 1 Observations parameters category's

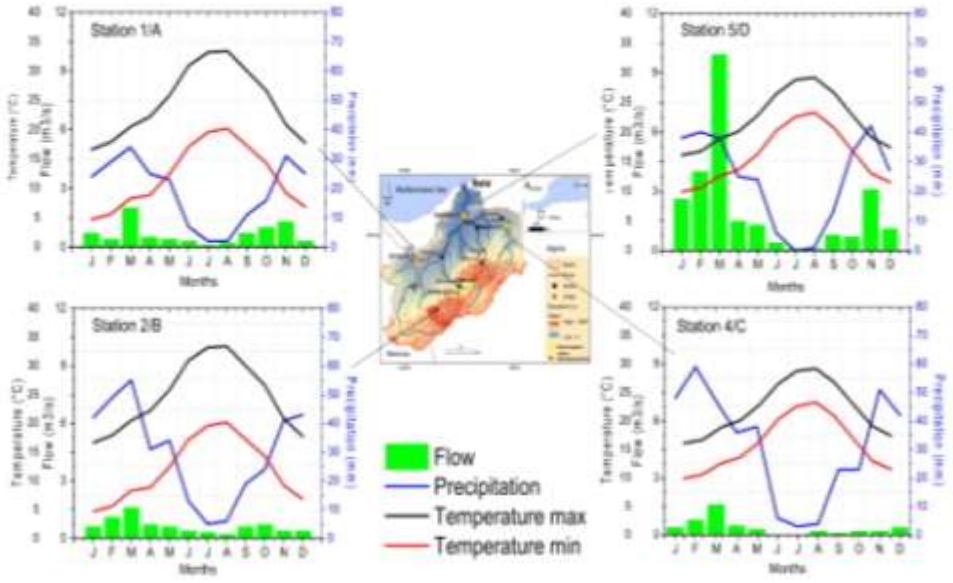
Stations	*Category of stations*	*Parameters studied*	*Period studied*
From 1 to 5	Meteorological	Precipitations, minimum/maximum temperature	1981–2011
From A to D	Hydrometric	Discharge	1981–2011

Daily meteorological datasets include precipitation and maximum/minimum temperature for five stations for the period 1981–2000 (Figure 1). The climate of the Tafna basin is semi-arid (Yebdri et al., 2007), and characterised by wet winters (from November to March) and hot and dry summers between June and October (Zettam et al., 2017). Annual mean temperature varies between 11°C in winter (December to February) and 28°C in summer (June to August), and annual precipitations range from 220 to

673 mm/yr during 1981–2000 (ANRH, 1981). It is an intermediate zone between the Mediterranean Sea and the Sahara Desert. There are five dams in the Tafna basin: Beni Bahdel (built in 1952, with capacity of 63 mm^3), Mefrouche (1963, 15 mm^3), Sidi Abdely (1988, 110 mm^3), Boughrara (1998, 177 mm^3) and Sikak (2005, 27 mm^3).

In terms of periodic average and for the period studied 1981–2000, monthly precipitations, and minimum/maximum temperature in Tafna basin are specified in Figure 2. Generally, in summer (from June to September) the precipitations are almost negligible, not exceeding 10 mm, and in winter (from November to March) vary between 20 and 60 mm. While the monthly maximum temperature is considerably pronounced in summer (July and August) and reach 33°C, and the minimum temperature in winter (from November to March) can decrease on average until 2°C. The discharge recorded during the studied period (1981–2000) ranges on average between 0 and 10 $m^3.s^{-1}$.

Figure 2 Observed mean monthly discharge, mean monthly precipitation and mean monthly maximum/minimum temperature of the period 1981–2000 (see online version for colours)



2.3 *RCM outputs*

Ten RCM outputs from the Cordex-Africa project (CORDEX Data Search, n.d.) are used in this work (Table 2). Two RCMs are used and forced with eight different global climate models (GCM): the regional climate model CCLM4-8-17 is forced by EC-EARTH and CNRM-CM5; and RCA4 is forced by EC-EARTH, CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR, CCCma-CanESM2, MIROC5, MPI-ESM-LR, NCC-NorESM1 and NOAA/GFDL-ESM2M. The grid spacing of RCMs used in this study is 0.44 degrees (50 km of resolution). The reference period is adjusted to the period of available observations (1981–2000).

Table 2 List of RCM outputs used in this study

Regional climate model (RCM)	*Institute*	*Global climate model (GCM)*
CCLM4-8-17	Climate Limited-Area Modeling Community (CLMcom)	EC-EARTH
		CNRM-CM5
RCA4	Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SHMI)	EC-EARTH
		CNRM-CM5
		IPSL-CM5A-MR
		CCCma-CanESM2
		MIROC5
		MPI-ESM-LR
		NCC-NorESM1
		NOAA/GFDL-ESM2M

Note: The domain used is Africa with 50 km of resolution).

Source: GCM and RCM models can be found on the CORDEX website (CORDEX Data Search, n.d.)

2.4 Bias correction methods

Several bias correction methods are used to correct precipitation and temperature datasets (Table 3). Three bias correction methods are compared for precipitation (LS, DM and LOCI) and three methods for temperature [LS, DM and variance scaling (VS)]. The raw RCM outputs are obtained from the Cordex-Africa project (CORDEX Data Search, n.d.) in the form of NetCDF files. The extraction and bias-correction of the RCMs outputs (precipitation and minimum/maximum temperature) are performed with the CMhyd© software (Rathjens et al., 2016), which has been successfully used in various studies in Spain (Senent-Aparicio et al., 2017), Morocco (Brouziyne et al., 2018) and Maryland (Xiang et al., 2018).

A dynamical downscaling has already been applied on GCMs to provide the RCMs of different domains [Africa (AFR), Europe (EURO), Middle East North Africa (MENA), etc.] (CORDEX, n.d.). However, the bias-correction consists to proceed with an additional and statistical downscaling on the studied region. The statistical downscaling or a bias-correction consists in reducing the bias between the RCMs outputs and observations. The procedure of bias-correction of RCMs outputs is carried out according to the equations shown in Table 3, by the linear methods (LS, LOCI and VS) and nonlinear method (DM). More information about these methods is found in Teutschbein and Seibert (2012) and Fang et al. (2015).

Table 3 Description of bias-correction methods used in this study

Name	*Used for*	*Equation*	*Remark*	*References*
Linear scaling (LS)	Precipitation, temperature	$P_{corr,m,d} = P_{raw,m,d} \times \frac{P_{obs,m}}{P_{raw,m}}$ $T_{corr,m,d} = T_{raw,m,d} + \mu(T_{obs,m}) - \mu(T_{raw,m})$	A mean monthly correction factor is applied to the RCM-simulated daily precipitation in a month. It is the simplest bias correction method.	Teutschbein and Seibert (2013, 2012), Chen et al. (2013), Fang et al. (2015)
Distribution mapping (DM)	Precipitation, temperature	$f(x \mid \alpha, \beta) = x^{\alpha-1} \times \frac{1}{\beta \times \Gamma(\alpha)} \times e^{\frac{-x}{\beta}}$ $x \geq 0$ $\alpha, \beta > 0$	The idea of distribution mapping is to correct the distribution function of RCM-simulated climate values to agree with the observed distribution function. This can be done by creating a transfer function to shift the occurrence distributions of precipitation and temperature.	Teutschbein and Seibert (2013, 2012), Fang et al. (2015), Block et al. (2009), Chen et al. (2011)
Local intensity scaling (LOCI)	Precipitation	$P_{corr,m,d} = \begin{cases} 0, & \text{if } P_{raw,m,d} < P_{thres,m} \\ P_{raw,m,d} \times s_m & \text{otherwise} \end{cases}$	The wet-day frequency is corrected. A mean monthly correction factor is applied to the RCM-simulated daily precipitation in a month.	Amengual et al. (2012), Ahmed et al. (2015), Schmidli et al. (2006), Luo et al. (2018)
Variance scaling (VS)	Temperature	$T_{corr,m,d} = [T_{raw,m,d} - a(T_{raw,m})] \times \frac{\sigma(T_{obs,m})}{\sigma(T_{raw,m})} + \mu(T_{obs,m})$	Corrects mean and standard deviation (variance). Variability of corrected data is more consistent with original RCM data. all events are adjusted with the same addends and correction factor.	Teutschbein and Seibert (2013, 2012); Chen et al. (2011), Terink et al. (2010)

Note: With P: precipitation, T: temperature, cor: corrected, raw: uncorrected data, obs: observed data, m: monthly, d: day, α;β: shape parameter of gamma distribution, σ: standard deviation (scale parameter of Gaussian distribution), x: independent (random) variable and μ: mean value of observed precipitation at given month.

2.5 Hydrological modelling

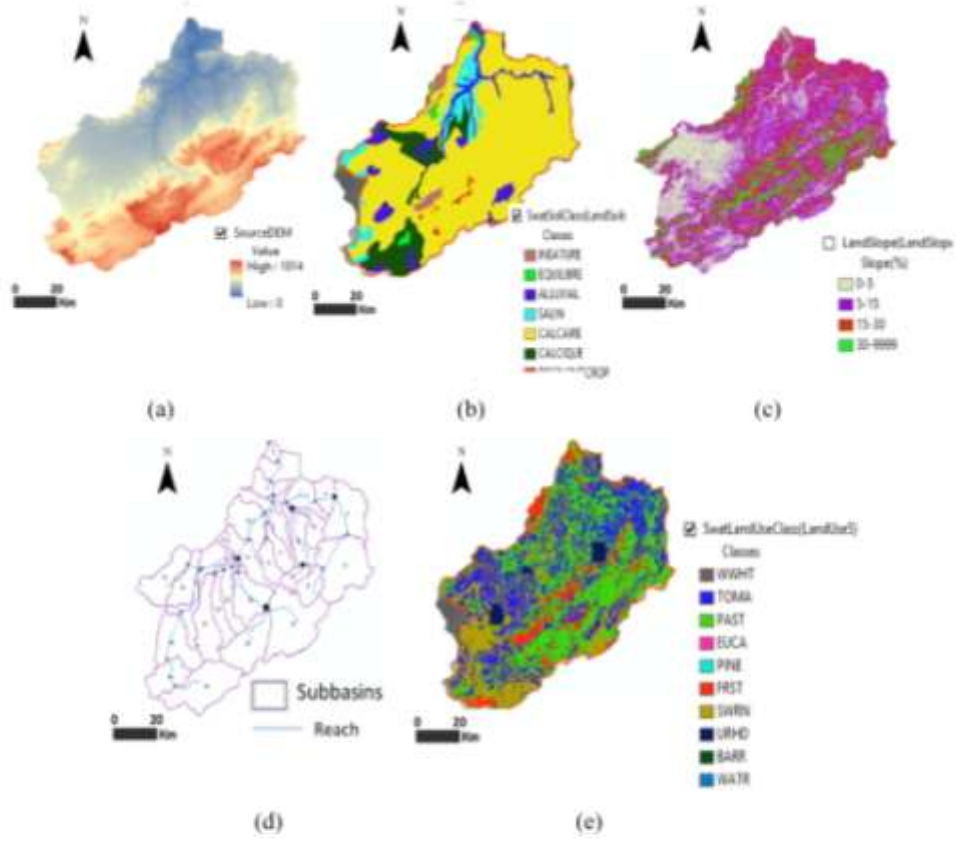
The SWAT model is designed for application in catchments ranging from a few hundred to several thousand square kilometres (Zettam et al., 2017), which is the case of the Tafna basin covering a surface of 7,245 km^2. The application is divided into three steps:

1 the bias-correction of RCMs precipitation and temperature by different methods (see Section 2.4)

2 the creation, calibration, and validation of the SWAT model for the Tafna basin

3 the run of the model forced with a set of bias-corrected RCMs outputs to study the future climatic and hydrologic change (2000–2100).

Figure 3 Maps, (a) 30 m DEM (b) soils (c) land slope classes (d) sub-basins delineated by SWAT (e) mains land uses (see online version for colours)



The SWAT model is created with the 2012 version with an ArcGIS interface (version 10.2). Different datasets are used to create the model. The digital elevation model (DEM) with a resolution of 30 × 30 m [Figure 3(a)] (ASTER Global Digital Elevation Map, n.d.) is used to define the watershed and delineate the sub-watersheds (in this study: 33 sub-watershed and area of 7,245 km^2) and the river channel network [Figures 3(d)]. The daily precipitation and minimum/maximum temperature datasets from

five weather stations are used for 30 years (1981–2010) to run the SWAT model. The maps soil (FAO, n.d.) [Figure 3(b)] and land use (The European Space Agency, n.d.) [Figure 3(e)] are introduced to specify a quantity of water on each hydrological response unit (HRU), and the DEM to derive slopes which are then divided into four classes (5%, 15%, 30% and upper of 30%) [Figure 3(c)]. For the calibration and validation of the model, measured discharge from four hydrometric stations, provided by the National Agency of Water Resources (ANRH) are used at monthly scale for the period (1981 to 2010).

2.6 Performance calibration and validation of SWAT model

Calibration and validation of the SWAT and soil and water assessment tool calibration and uncertainty procedures (SWAT-CUP) models are performed by comparing simulated and measured river discharge. Sensitivity analysis and calibration are realised within SWAT-CUP© (Zettam et al., 2017; Yebdri et al., 2007; Abbaspour, 2014) using the sequential uncertainty fitting 2 (SUFI-2) algorithm (Abbaspour et al., 2004). SUFI-2 is known to identify an appropriate parameter set in a limited number of iteration (Grusson et al., 2017; Yang et al., 2008). Detailed documentation of the SUFI-2 algorithm can be found in Abbaspour et al. (2004). As recommended by Yang et al. (2008), 1,500 iterations of calibration are performed by SWAT-CUP for all hydrological stations in this study. The model is evaluated at a monthly scale and the Nash-Sutcliffe-efficiency (NSE) and R^2 are chosen as the objective functions. The sensitivity analysis is produced via a one-at-a-time procedure (Abbaspour, 2014) for 15 parameters as shown in Table 4. The parameters CN2.mgt (curve number), ALPHA_BF.gw (base flow alpha factor) and GW_DELAY.gw (groundwater delay) are the most sensitive parameters, which imply that the soil conservation service (SCS) streamflow curve number and groundwater delay days control significantly the streamflow.

The hydrological modelling is proceeded by the application of the SWAT hydrological model. The Tafna project is calibrated and validated by the SWAT hydrological model, at the monthly scale, for the period (1981–1995, 1996–2010) respectively, including the three years of warm-up period for calibration period (Table 5). The correlation between observed and simulated discharge is from satisfactory (station C with NSE = 0.54) to very good (station D with NSE = 0.84). On the other hand, during the validation, the correlation at station A is unsatisfactory (NSE = 0.21). Similar results are found at this station by Zettam et al. (2017) who noted the influence of domestic and industrial wastewater from the major cities of Tlemcen and Maghnia in Algeria and Oujda in Morocco (Zettam et al., 2017).

For the calibration of the model, the annual hydrological balance is determined as 314 mm for precipitation, 1,256 mm for potential evapotranspiration, and 18.6 mm for surface runoff, which values are close to the reference values provided by ANRH (ANRH, 2003a, 2003b, 2003c).

Table 4 Calibrated parameter values with a ranking of the most sensitive parameters (rank 1 = most sensitive)

Parameter_name	*Units*	*Definitions*	*Calibrated range*	*Rank*
R_CN2.mgt		SCS runoff curve number for moisture condition II	[−0.2, 0.2]	1
V_SOL_Z(..).sol	(mm)	Depth from soil surface to bottom of layer	300	14
V_SOL_AWC(..).sol	(mmH2O/mm soil	Soil available water storage capacity	[0.08, 0.18]	13
V_SOL_K(..).sol	(mm.h−1)	Soil conductivity	[3.1, 57]	12
V_ALPHA_BF.gw	(Days)	Base flow alpha factor characterises the groundwater recession curve	[0.01, 0.6]	2
V_GW_DELAY.gw	(Days)	Groundwater delay: time required for water leaving the bottom of the root zone to reach the shallow aquifer	[31, 32]	3
V_GW_REVAP.gw		Groundwater 'revap' coefficient: controls the amount of water which evaporates from the shallow aquifer	[0.15, 0.2]	5
V_GWQMN.gw	(mm)	Threshold depth of water in the shallow aquifer for return flow to occur	[500, 600]	4
V_REVAPMN.gw	(mm)	Threshold depth of water in the shallow aquifer for 'revap' to occur	[390, 400]	6
V_RCHRG_DP.gw		Deep aquifer percolation fraction	[0.39, 0.4]	7
V_ESCO.bsn		Soil evaporation compensation coefficient	[0.5, 0.8]	15
V_CH_N2.rte		Manning's 'n' value for the main channel	[0.01, 0.02]	9
V_CH_K2.rte	(mm.h−1)	Effective hydraulic conductivity of main channel	[19, 20]	8
V_TRNSRCH.bsn		Fraction of transmission losses from main channel that enter deep aquifer	[0.4, 0.6]	11
V_SURLAG.bsn		Surface runoff lag coefficient	[3, 4]	10

Note: R_: indicates relative changes to existing parameter value and V_: indicates existing parameter value to be replaced by a given values.

Table 5 Calibration and validation statistical values of NSE and R^2 with performance rating of the NSE

Stations	*Calibration (1981–1995)*			*Validation (1996–2010)*		
	NSE	R^2	*Performance rating*	*NSE*	R^2	*Performance rating*
A	0.61	0.65	Satisfactory	–0.30	0.21	Unsatisfactory
B	0.62	0.69	Good	0.65	0.71	Good
C	0.52	0.54	Satisfactory	0.54	0.58	Satisfactory
D	0.83	0.84	Very good	0.66	0.70	Good

Source: Nash and Sutcliffe (1970)

2.7 Performance of bias correction methods

A reference period (1981–2000) is selected from the past period of the climatic and hydrologic datasets to apply the bias-correction methods.

The performance of bias-correction methods is carried out in two ways. The first one is to compare, at a monthly scale (January for winter and July for summer), the bias-correction methods (LS, LOCI, DM for precipitation and LS, VS, DM for temperature) of the ten RCM outputs ensemble with the observations and the uncorrected version of RCMs outputs using the boxplots (Figures 4 and 6). The second way is to compare, at a daily scale, the 95th percentile, the standard deviation (SD) and the mean values of the ten RCMs outputs bias-corrected by all of the methods with observations and uncorrected version of the ten RCMs (Figures 5, 7 and 8).

For river discharge, and to validate the bias-correction methods, nine combinations of bias-correction methods (precipitation-temperature: LS-LS, LS-VS, LS-DM, LOCI-LS, LOCI-VS, LOCI-DM, DM-LS, DM-VS and DM-DM) of precipitations and minimum/maximum temperature are introduced into the SWAT model to provide nine combinations of discharge. The discharges calculated with the nine combinations of bias-corrections methods are presented by boxplots and compared to the observations and uncorrected version of the RCM outputs (Figure 9). The second way is to compare, at monthly scale, the 95th percentile and the mean discharge, for the ten RCMs with observations and uncorrected version of the ten RCMs (Figure 10).

3 Results

3.1 The bias-correction for RCM outputs of Cordex-Africa in North-Western Algeria

The three methods of bias-correction used in this study (LS, DM: DM, LOCI) are able to reduce the bias of the ten raw RCM outputs of precipitation and temperature during summer and winter at five stations during the reference period (1981–2000) (Figure 4). Uncorrected RCM outputs (raw) strongly over-estimate precipitation during summer (July), which implies that the bias is significantly high during the dry season when the level of precipitation is very low for both observed and corrected datasets. The performance of the three bias-correction methods is suitable at all the stations, except at station 5, where the precipitation is over-estimated for the three bias-correction methods

in winter (January). Maximum precipitation values at this station reaches 60 mm for observations but 110, 120, and 115 mm after correction with LS, DM and LOCI methods, respectively, because the bias between the maximum of the observations and uncorrected version is already lower than at the other stations. The estimation of the third quantile and minimum values (station 5) is however good compared to observations.

Figure 4 Comparison of precipitation datasets between observations (obs), the uncorrected version of the ten models (raw), and the corrected versions using four different bias-correction methods (LS, DM, LOCI) at each station (a) during winter (January) and (b) during summer (July) (see online version for colours)

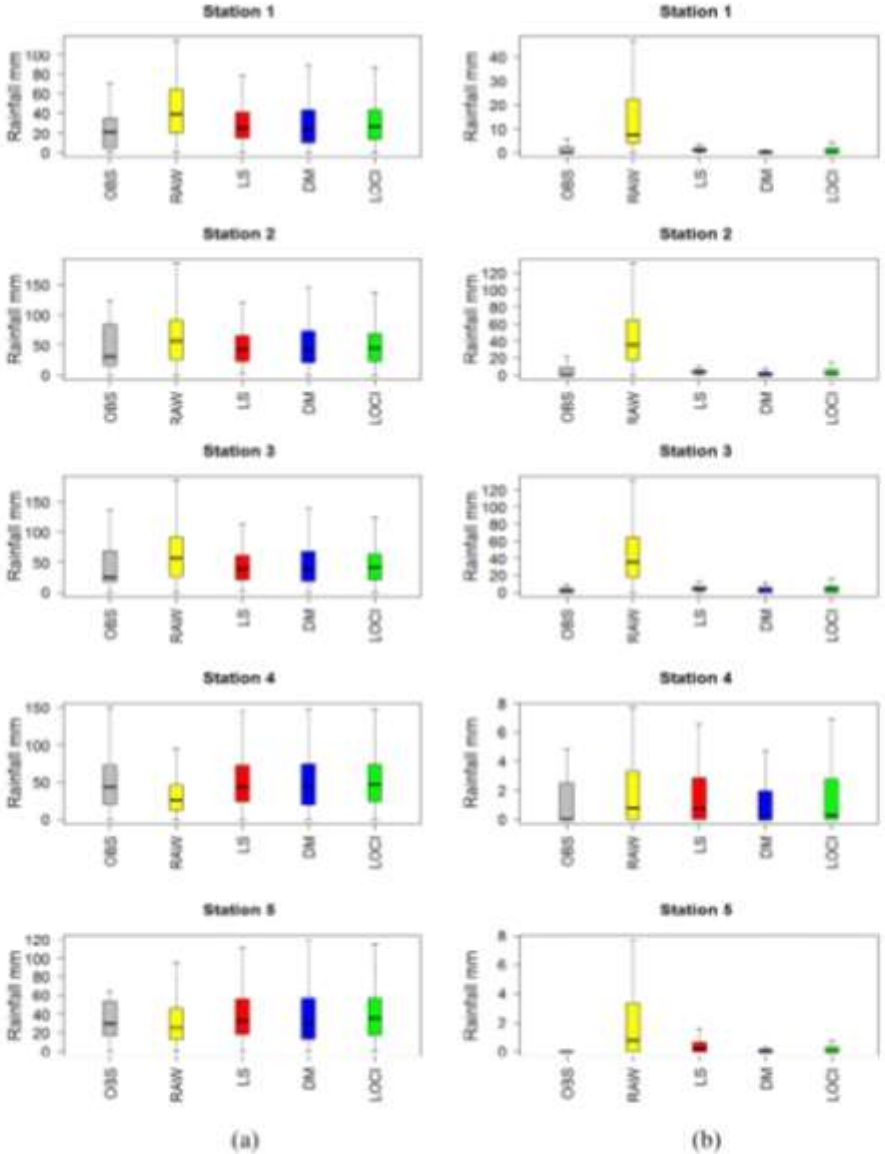
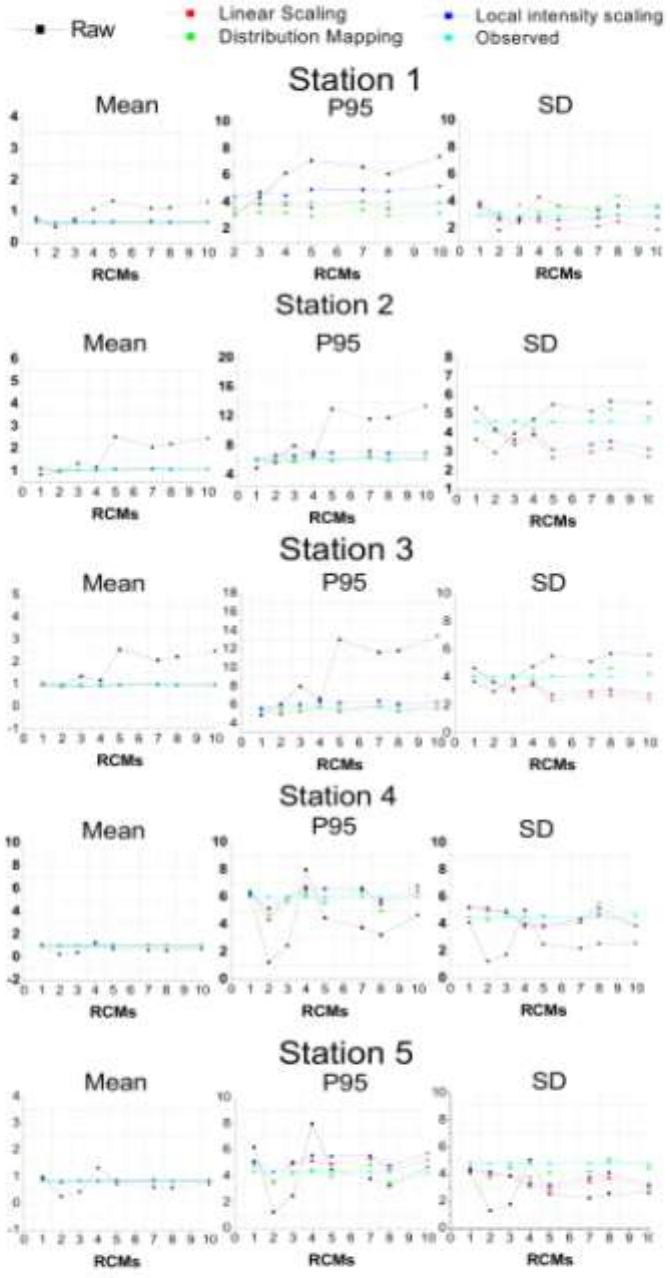


Figure 5 Daily mean, P95 and SD of precipitation for bias-corrected RCMs, raw (uncorrected) RCMs and observed data for the reference period (1981–2000) (see online version for colours)



Note: The numbers [1 to 10] indicate the models: [EC-EARTH-CCLM4-8-17, IPSL-CM5A-MR-RCA4, CCCma-CanESM2-RCA4, CNRM-CM5-CCLM4-8-17, CNRM-CM5-RCA4, EC-EARTH-RCA4, MIROC5-RCA4, MPI-ESM-LR-RCA4, NCC-NorESM1-M-RCA4 and NOAA/GFDL-ESM2M-RCA4], respectively.

Figure 6 Comparison of minimum and maximum temperature datasets for observations (obs), uncorrected version of the ten RCM models (raw), and the bias-corrected RCM outputs using three different methods (LS, DM: DM, VS) (a) during winter (January) and (b) during summer (July) (see online version for colours)

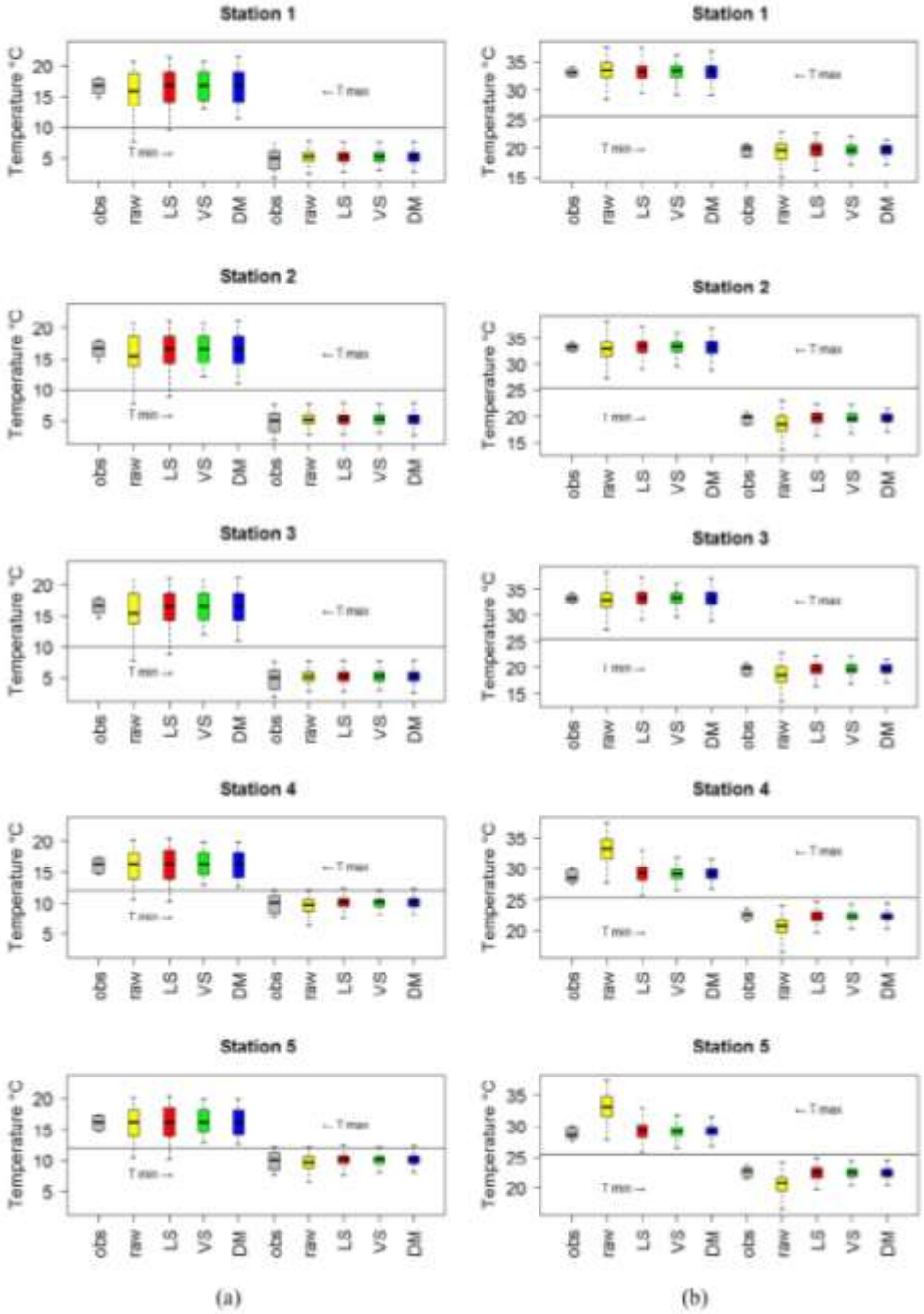
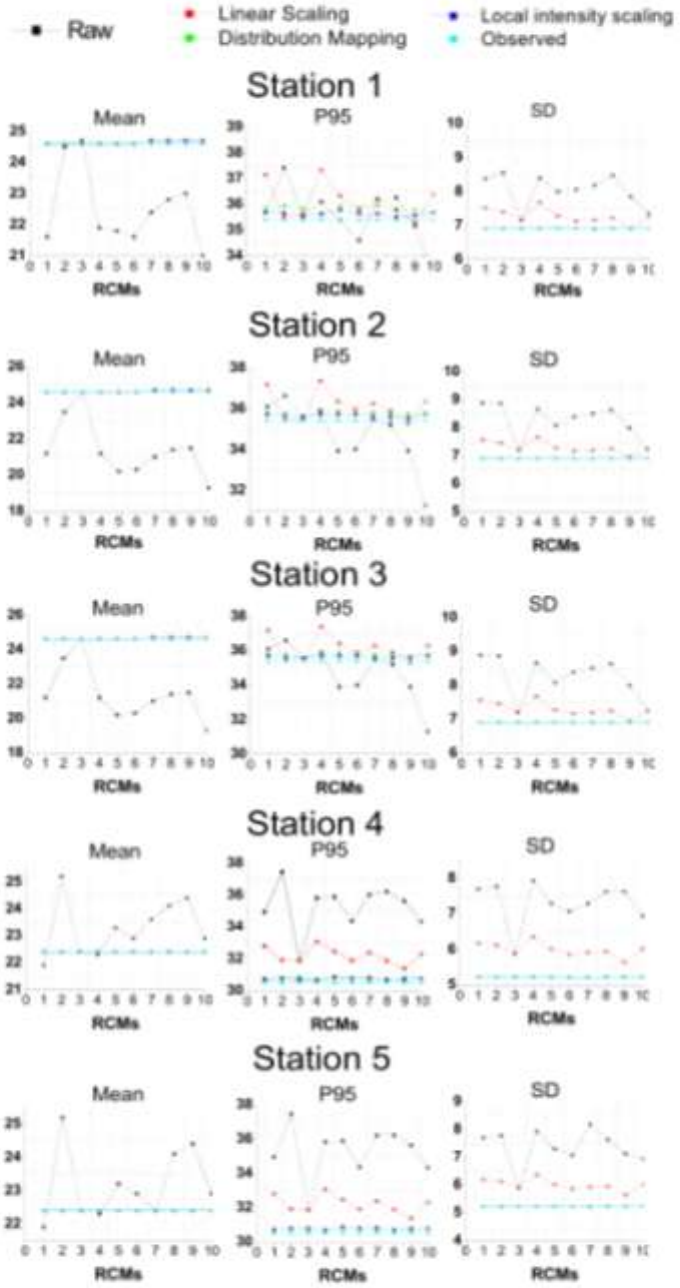
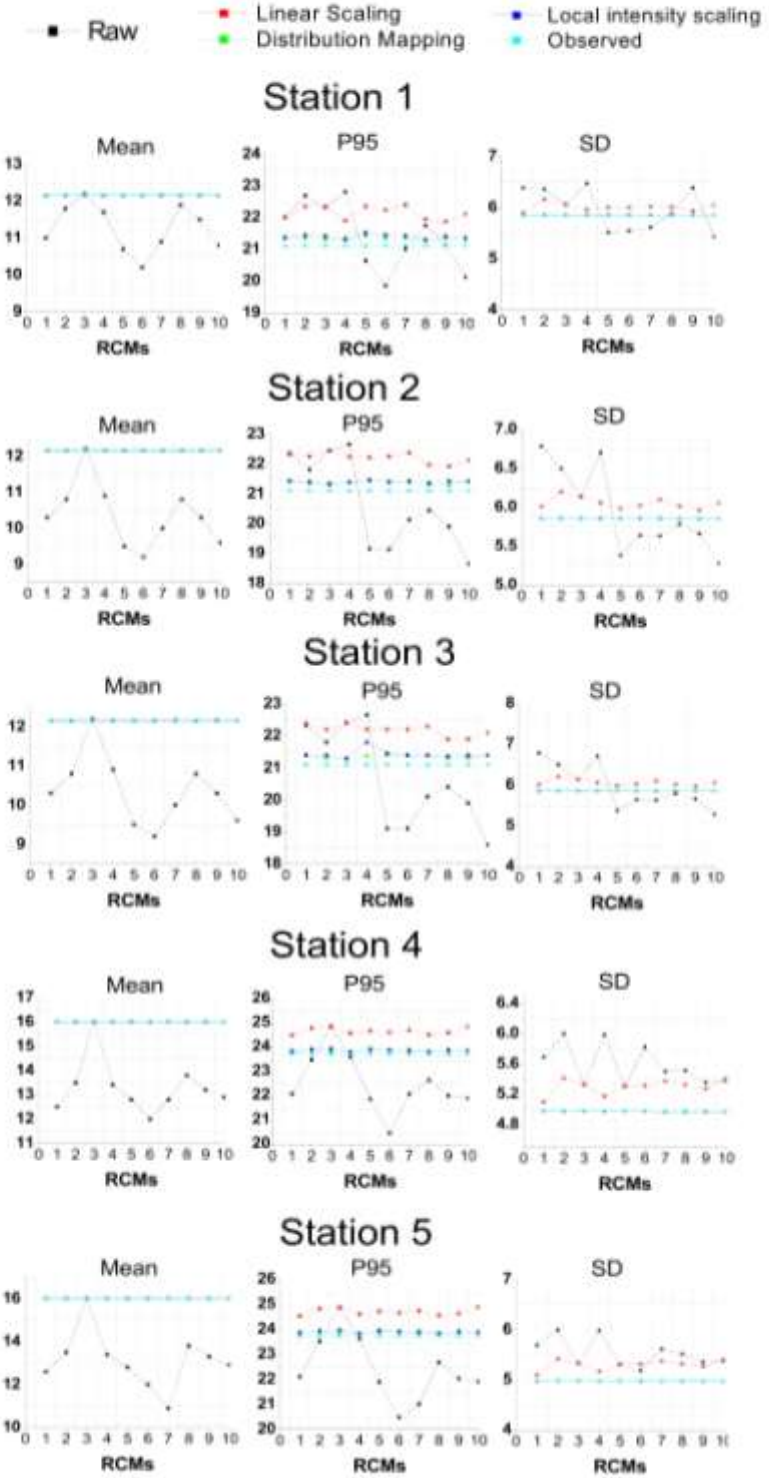


Figure 7 Daily mean, P95 and SD of maximum temperature for bias-corrected RCMs, raw (uncorrected) RCMs and observed data for the reference period (1981–2000) (see online version for colours)



Note: The numbers [1 to 10] indicate the models: [EC-EARTH-CCLM4-8-17, IPSL-CM5A-MR-RCA4, CCCma-CanESM2-RCA4, CNRM-CM5-CCLM4-8-17, CNRM-CM5-RCA4, EC-EARTH-RCA4, MIROC5-RCA4, MPI-ESM-LR-RCA4, NCC-NorESM1-M-RCA4 and NOAA/GFDL-ESM2M-RCA4], respectively.

Figure 8 As Figure 7 for the minimum temperature (see online version for colours)



We then explore in more details the daily mean precipitation, 95th percentile (P95) and SD of each precipitation datasets between observations (obs), uncorrected version of the ten models (raw), and corrected ones using the three methods (LS, DM, LOCI) for the reference period (1981–2000) (Figure 5). Daily mean precipitations show that the three bias-correction methods correct well the bias of the RCMs outputs. The mean values of the three methods (LS, DM and LOCI) are similar to the observed mean precipitation, contrary to the uncorrected RCM outputs. We take into consideration the slight bias between uncorrected and observed datasets of these RCMs:

1 EC-EARTH-CCLM4-8-17

2 IPSL-CM5A-MR-RCA4

3 CCCma-CanESM2-RCA4

4 CNRM-CM5-CCLM4-8-17.

On the other hand, the 95th percentile and the SD show a difference between the methods of bias-correction, with a bias ranging between 0.01 and 1.66 mm for the RCM corrected with the three methods of bias-correction, but between 0.14 and 10.46 mm for uncorrected RCMs datasets. Among these methods, the DM method is the most performant with a bias of [0.02–1.27] mm with observations at all the stations, except station 1. At station 1, the LS method is the most efficient method with a bias of [0.04–0.48] mm.

Figure 6 shows the comparison of minimum/maximum temperature datasets between observations (obs), uncorrected version of RCMs (raw), and the corrected versions using three different methods (LS, DM: DM and VS) during winter (January) and summer (July) at each station. The results show a good accordance between model datasets and observations. The temperature median using the three methods of bias-correction is close to the observed data in January with [15–16]°C and [5–10]°C for the maximum and minimum temperature, respectively, and in July with [28–33]°C and [20–23]°C for the maximum and minimum temperature, respectively.

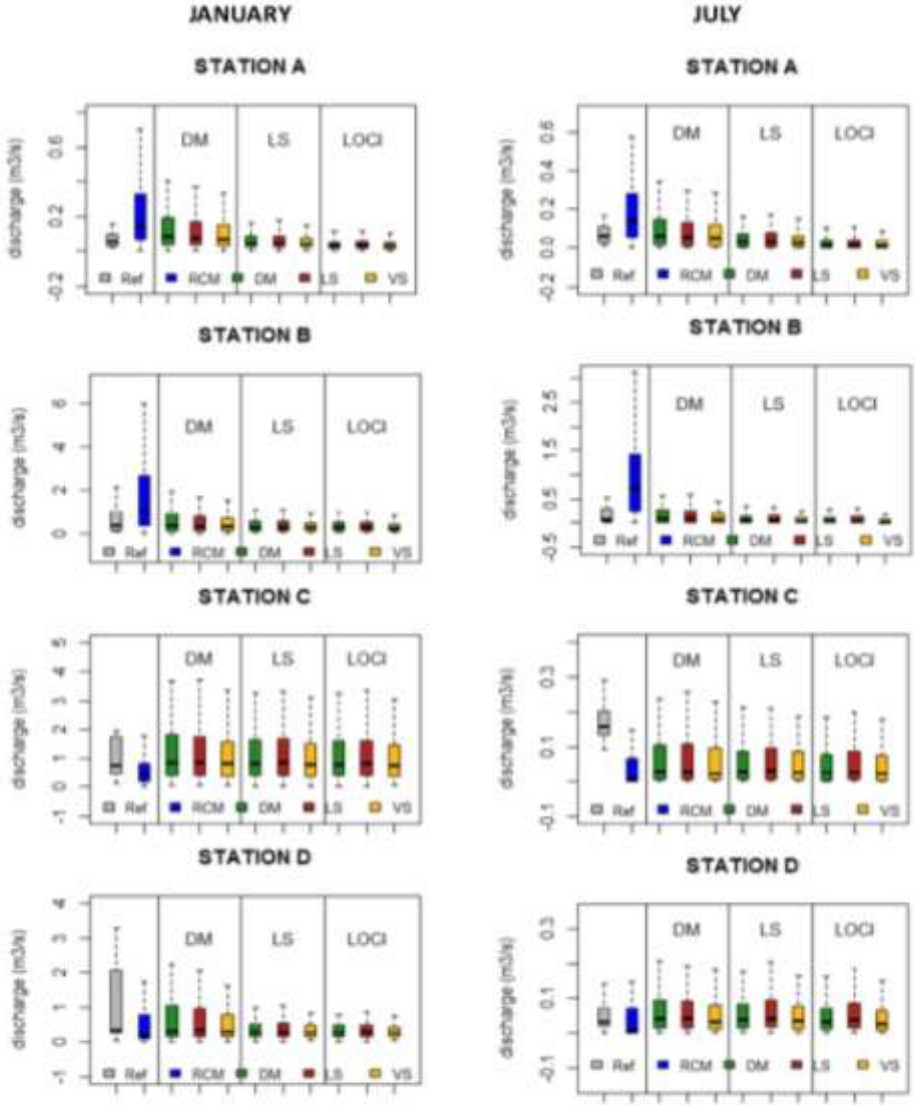
Figures 7 and 8 show statistical values to evaluate the bias-correction of the ten daily minimum/maximum temperatures of RCM datasets for the reference period (1981–2000). The 95th percentile and SD show a small difference between the methods of bias-correction, compared to the observed datasets. The difference varies between [0.06–0.7]°C and [0.17–0.54]°C for DM and LOCI methods for daily minimum and maximum temperature, respectively; between [0.77–1.35]°C and [0.88–2.57]°C for LS method; and between [1.14–3.25]°C and [1.2–6.96]°C for uncorrected RCMs datasets. The DM and LOCI methods are the most efficient to reduce the bias.

3.2 Hydrological results

We apply the precipitation and minimum/maximum temperature datasets corrected for bias with the three methods to force the SWAT hydrological model of the Tafna basin. The outputs of the SWAT model are obtained from nine combinations of bias-correction methods [DM-DM: DM (for precipitation)-DM (for temperature), DM-LS, DM-VS, LS-DM, LS-LS, LS-VS, LOCI-DM, LOCI-LS and LOCI-VS]. The results are presented at a monthly scale (Figure 9). In this part, we refer to the hydrometric stations (A, B to D)

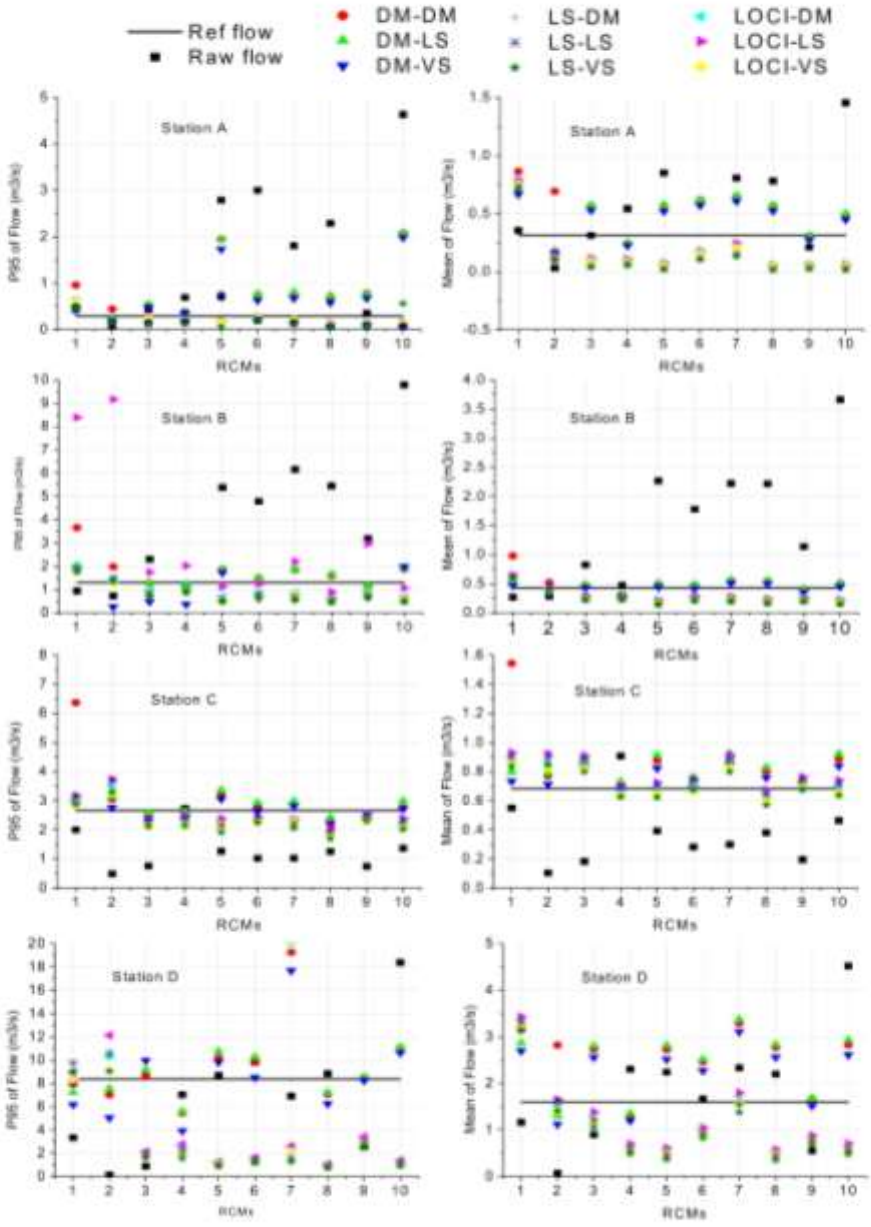
to evaluate the river discharge calculated by SWAT model from nine combinations of bias-corrected precipitation and temperature datasets.

Figure 9 Comparison of monthly river discharge outputs obtained from SWAT simulations forced with observed meteorological datasets (Ref), with uncorrected RCMs outputs (RCM), and with nine combinations of bias correction methods for precipitation and temperature of the ten RCM datasets, for January and July (see online version for colours)



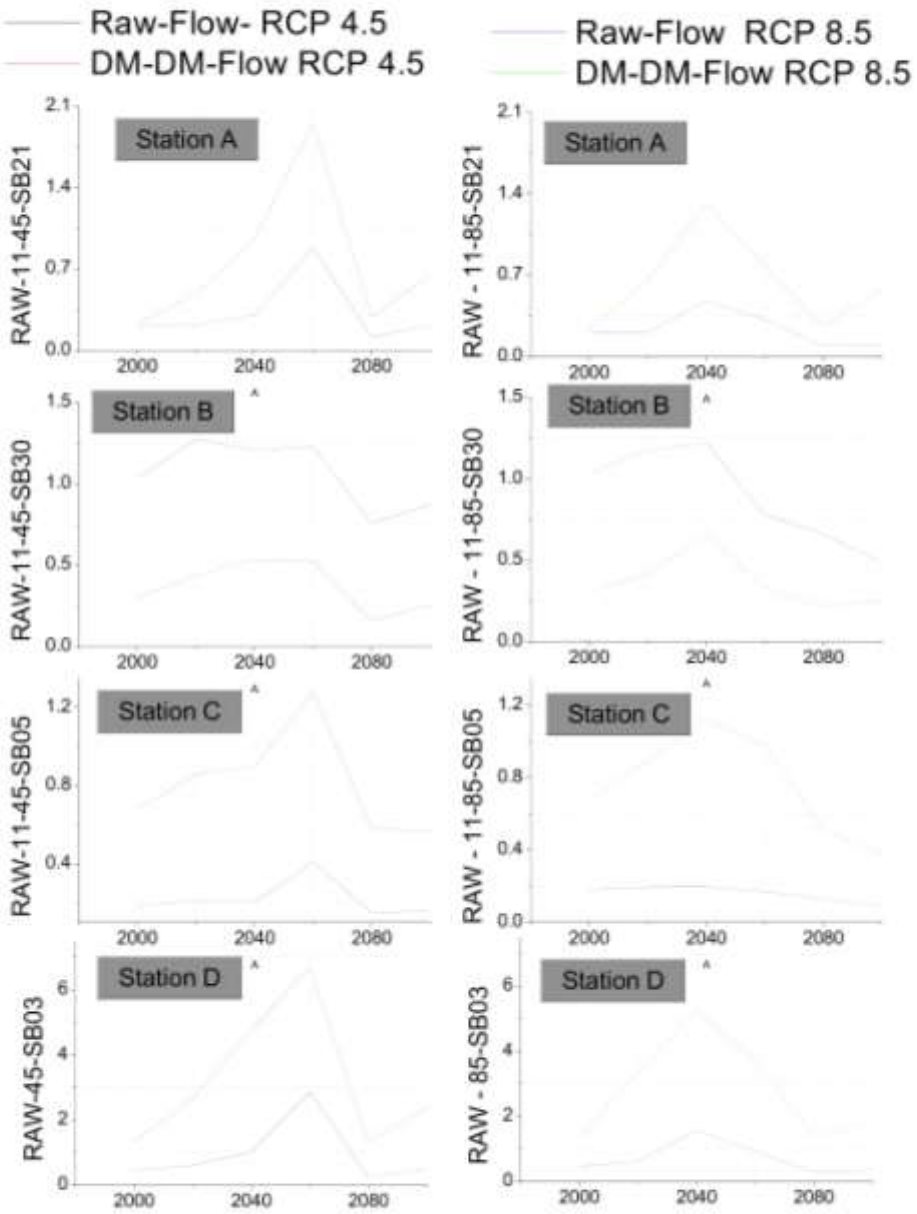
Note: The coloured boxes (green: DM, brown: LS and yellow: VS) illustrate the bias correction method for temperature for each correction method for precipitation (DM, LS and LOCI).

Figure 10 Comparison of monthly river discharge obtained from SWAT simulations forced with observed meteorological datasets (ref flow), with uncorrected RCMs outputs (raw flow), and with nine combinations of bias-corrected precipitation and temperature of the ten RCM outputs, for January and July during the reference period (1981–2000) (example. DM-DM: DM method for precipitation; DM method for temperature) (see online version for colours)



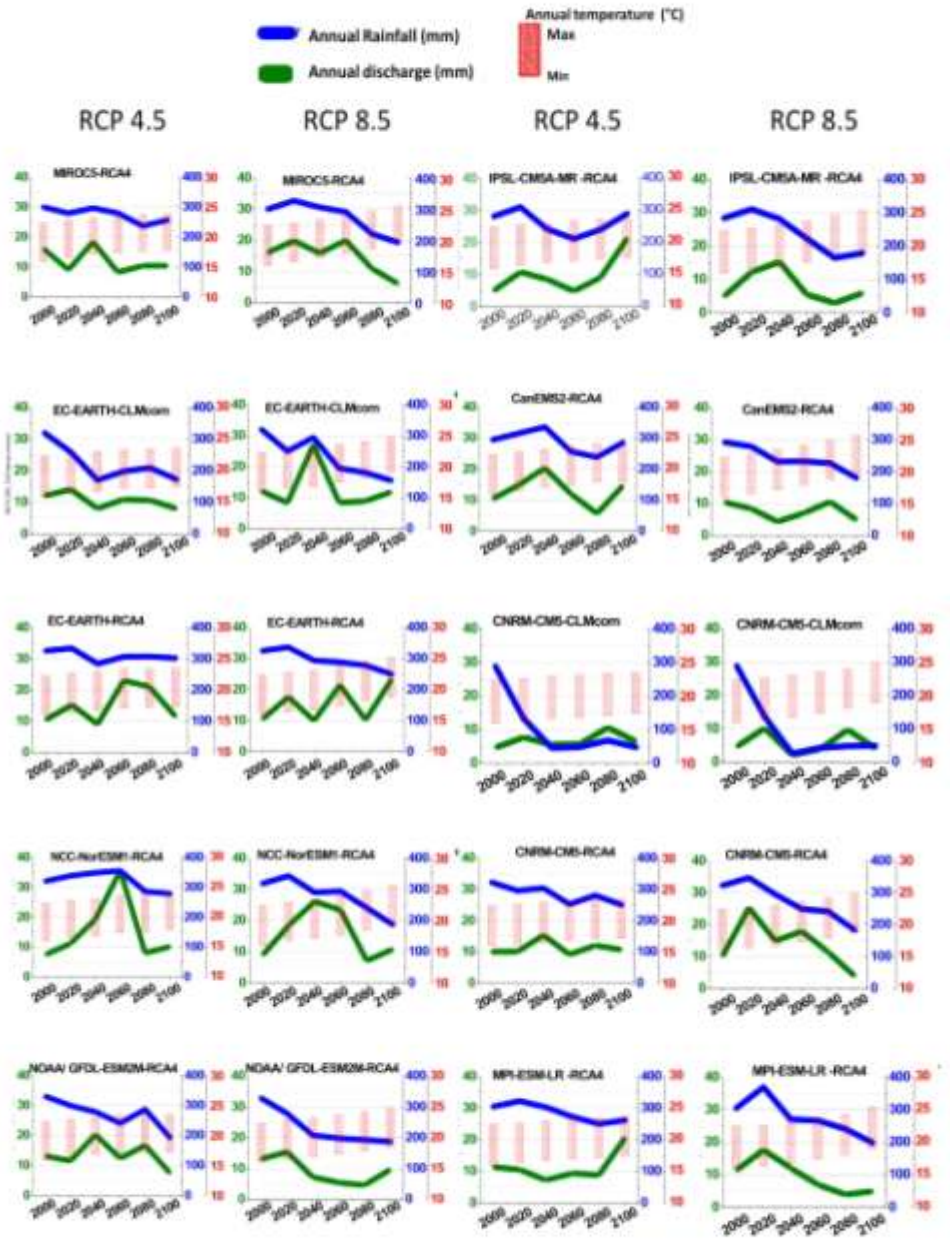
Note: The numbers [from 1 to 10] are respectively the models: [EC-EARTH-CCLM4-8-17, IPSL-CM5A-MR-RCA4, CCCma-CanESM2-RCA4, CNRM-CM5-CCLM4-8-17, CNRM-CM5-RCA4, EC-EARTH-RCA4, MIROC5-RCA4, MPI-ESM-LR-RCA4, NCC-NorESM1-M-RCA4 and NOAA/GFDL-ESM2M-RCA4].

Figure 11 Comparison of the mean inter-annual river discharge (for a period of 20 years) of the NCC-NorESM1-M-RCA4 model outputs uncorrected and corrected by the combination of DM-DM methods over the period (2000–2100) (see online version for colours)



Note: With 2000 = period from 1981 to 2000, 2020 = from 2000 to 2020, …, 2100 = 2080 to 2100.

Figure 12 Future evolution of annual precipitation, discharge and minimum/maximum temperature based on the ten bias corrected RCMs under RCPs 4.5 and 8.5 at the outlet station (station 5/D), from the historical period (2000 = from 1981 to 2000) to 2100 with an interval of 20 years (see online version for colours)



The monthly river discharges resulting from the nine combinations of bias-corrected precipitation and temperature of the ten RCM datasets (Figure 9) show that the performance of bias-correction methods is suitable contrary to applications using the

uncorrected RCM outputs. The minimum, the median, and the 25th quantile of river discharge are very close to the reference discharge, at all stations, except station C in July. LS and DM methods for precipitation perform well at stations A, and B and D, respectively. At station C, all the methods perform poorly. We notice that the bias-correction for temperature has a lower effect than of precipitation correction on river discharge simulation.

A detailed interpretation of bias-correction for each RCM is represented in Figure 10. The river discharge is obtained from the nine combinations of bias-correction methods for precipitation and temperature. The bias between river discharge calculated with RCMs outputs and the reference discharge is generally reduced after correction for the ten RCMs (Figure 10). The mean monthly discharges resulting from the nine combinations range between 0 and 1.0 $m^3.s^{-1}$ while the monthly reference discharge shows mean values of 0.3, 0.45 and 0.69 $m^3.s^{-1}$ at stations A, B and C, respectively. The station D has values ranging between 0.2 and 3 $m^3.s^{-1}$ similar to the reference mean discharge of 1.6 $m^3.s^{-1}$. For the mean monthly discharge, the three combinations using DM correction for precipitation have the most suitable hydrological response for the RCMs (4 and 9), (3 and 5–10), (4, 6 and 9), (9) at the stations A, B, C and D, respectively. The same response is given for the combinations using LOCI and LS correction for precipitation at station C.

The 95th percentile of the monthly discharge of the nine combinations ranges between 0.3 and 2.7 $m^3.s^{-1}$ at stations A, B and C, and between 1 and 12 $m^3.s^{-1}$ at station D compared to the 95th percentile of the reference monthly discharge of 8.5 $m^3.s^{-1}$.

The most suitable combinations to model the mean reference river discharge are DM and LOCI for precipitation and VS for temperature. In the case of 95th percentile, the most appropriate combinations are (LOCI, LS for RCMs: 1–10), (DM: 5–10), (DM: 2–4 and 6–10), (DM: 3, 7, 9) at stations A, B, C and D, respectively.

The NCC-NorESM1-M-RCA4 model outputs corrected for the bias with the combination DM-DM are chosen among the ten RCMs and the nine correction combinations to study hydrological impacts, as it results in the lowest precipitation and temperature bias at the four hydrological stations.

Figure 11 presents the comparison between the mean inter-annual discharge using the uncorrected and DM-DM corrected (with the DM-DM combination) NCC-NorESM1-M-RCA4 model outputs over the period (2000–2100) under the two RCPs 4.5 and 8.5. The periods 2020–2040 and 2040–2060 show an increase in river discharge, and a decrease starting from 2060, with RCP 4.5. The decrease of discharge appears earlier and starts in 2040 with RCP 8.5. A similar temporal dynamic of the discharge decrease and increase is observed with the uncorrected and bias-corrected versions of RCMs, but with a large difference in discharge intensity between the uncorrected and corrected RCM outputs. The evolution of the three environmental variables (precipitation, minimum/maximum temperature and discharge) for the ten RCMs is shown in Figure 12 over the period 1981–2100 with an interval of 20 years. The increase of minimum/maximum temperature is shown for the ten RCMs until 2100, and the decrease in precipitation and discharge appears from 2040. The decrease in precipitation and discharge is more important with RCP 8.5 than with RCP 4.5.

4 Discussion

4.1 The use of bias correction methods on RCM outputs of Cordex-Africa to study climate change impacts in Northern Africa

Precipitation outputs from some RCMs are highly biased in the Mediterranean region such as CLMcom and SMHI, with biases generally ranging between –40% and +80% compared to observations (Kotlarski et al., 2014; Panthou et al., 2016; Vautard et al., 2013). Some methods of bias-correction are proposed to adjust RCM outputs to analyse climate change, from the simple LS method to the sophisticate nonlinear one DM.

The CMhyd software is used because it is tailor-made to extract bias-correct RCMs outputs and prepare simulated climate variables for climate change impact studies with the SWAT model (Senent-Aparicio et al., 2017; Brouziyne et al., 2018; Xiang et al., 2018). However, some studies using CMhyd software have directly applied a DM method (Senent-Aparicio et al., 2017; Xiang et al., 2018) or a LS method (Brouziyne et al., 2018) for adjusting precipitation, without evaluating the performance of the method.

In this study, three methods of bias-correction for precipitation (LS, DM, LOCI), and three for temperature (LS, DM, VS), are tested for adjusting Cordex-Africa RCMs for the reference period (1981–2000). These linear methods (LS and LOCI) (Schmidli et al., 2006; Leander and Buishand, 2007) and nonlinear DM methods (Ahmed et al., 2015; Fang et al., 2015; Luo et al., 2018; Teutschbein and Seibert, 2012; Kim et al., 2016; M'Po et al., 2017; Vithlani and Rank, 2016) give acceptable reduction of bias for all the Cordex-Africa RCMs used in this study.

However, for precipitation, the nonlinear DM method leads to the lowest bias at most of the stations, as observed in other studies in different regions and climates (Senent-Aparicio et al., 2017; Luo et al., 2018; Teutschbein and Seibert, 2012). For the minimum/maximum temperature, the DM method and the VS method, an extension of the LS method, reduce the bias better than the LS method, confirming the results of numerous studies (Luo et al., 2018; Teutschbein and Seibert, 2012; Szabó-Takács et al., 2019).

When combining the bias-correction methods of precipitation and temperature, our results shows that the method chosen to correct temperature bias only slightly influences the calculation of river discharge. The selection of the appropriate bias-correction method to correct precipitation datasets is the most important to obtain river discharge consistent with observations.

4.2 Hydrological impact of the use of bias correction of RCM outputs in the reference period

Before exploring the hydrological impact of the use of bias-correction on RCM outputs, it is important to evaluate the calibration and validation of the SWAT model on the Tafna basin. The NSE statistical criteria for model calibration and validation are satisfactory or even good to very good at the outlet of the basin. The NSE is only unsatisfactory at station A (NSE = –0.30), which was already observed in the study of Zettam et al. (2017) due to the influence of the anthropogenic wastewater provided by domestic and industrial of the cities Tlemcen and Maghnia in Algeria and Oujda in Morocco. Except this station, the statistical criteria of the calibration and validation are close to those obtained in different semi-arid regions: in the same basin (Tafna) with values of Nash-Sutcliffe

ranging between 0.42 and 0.75 (Zettam et al., 2017), in the Hamadan-Bahar basin in Iran (Nerantzaki et al., 2015) with values from 0.33 to 0.77, and in the Medjerda basin with values from 0.31 to 0.65 (Bouraoui et al., 2005).

Some studies using CMhyd software have applied directly a DM method (Senent-Aparicio et al., 2017; Xiang et al., 2018) or a LS method (Brouziyne et al., 2018) for adjusting precipitation, without evaluating the performance of the method. To evaluate bias-correction methods and their impact on hydrology, we compare hydrological outputs obtained using the RCMs outputs as forcing to the SWAT model, under the two versions, the uncorrected and the bias-corrected datasets for the reference period (Figures 9 and 10).

The inter-annual river discharges in the Tafna basin obtained using the raw precipitation and temperature datasets are over-estimated (except at station C), but the river discharges obtained with bias-corrected RCMs outputs are much closer to the observed river discharge. The forcing of the hydrological model by the bias-corrected RCMs outputs leads to improve the modelling of the river discharge during the reference period.

The correction of precipitation bias is essential, as our aim is to investigate hydrological impacts in the future. Muerth et al. (2013) highlights that bias-corrected RCMs, before using them in hydrological models, provide closer representation of hydrograph to observations. The dynamic of the river discharge is similar with the uncorrected and the bias-corrected precipitation datasets, but the bias is significantly decreased after bias correction (Figure 11), which confirms the need of correcting precipitation bias for hydrological applications.

Even if some studies advise the direct use of RCM outputs because bias correction might lead to misleading results (Luo et al., 2018; Maraun et al., 2010; Kjellström et al., 2011; Thomas et al., 2012), bias-correction is generally recommended to reduce bias between observed and simulated climate variables (Lenderink et al., 2007; Wilby et al., 2000; Brouziyne et al., 2018), especially to study hydrological impacts (Bernstein et al., 2007). Reducing the bias of the original RCM outputs leads to a better representation of river discharge at the outlet of the Tafna basin, indicating that the correction of precipitation bias is essential to investigate hydrological impacts in the reference period. Our results confirm that the bias-correction of RCMs, before using them in hydrological models, provide a closer representation to the observed hydrograph (Bernstein et al., 2007).

4.3 Future projections of climatic and hydrological variables

The increase of minimum/maximum temperature has already been observed for decades, and this warming is estimated at +0.2°C per decade (Bernstein et al., 2007). Our results show an increase of approximately +0.3°C per 20 years under RCP 4.5 and +0.5°C under RCP 8.5 (Figure 12) which confirms the results of the IPCC (Bernstein et al., 2007). These trends are also close to those found in Northern Africa under Cordex in 'MENA' (the Middle East and North Africa) and in Europe (Zeroual et al., 2018; Ahmadalipour and Moradkhani, 2018; Dosio and Panitz, 2016; Jacob et al., 2014). This increase of minimum/maximum temperature leads to the warming of the region, and the associated decrease in precipitation leads to the intensification of droughts.

In the Mediterranean region, the decrease in rainfall is estimated at –20% and –30% under RCPs 4.5 and 8.5, respectively (IPCC Working Group I et al., 2013;

Brouziyne et al., 2018; Schilling et al., 2012; Philandras et al., 2011; Solomon and Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007). The ten RCMs evaluated in this study show an important decrease in precipitation for the quasi totality of the future period, with a more significant intensity under RCP 8.5 (–34%) compared to the RCP 4.5 (–25%). This confirms the results of Zeroual et al. (2018) in the North of Algeria using Cordex-Africa who mentions that aridification seems to be more important during the period 2045–2098. This decrease directly affects the discharge of the basin. This could reduce the period of filling dams, leading to an imbalance between water demand and supply, as shown in Figure 12.

The 4th IPCC Report (AR4, 2007) mentions that the river discharge might decrease until –30% in the future for the Mediterranean region. Brouziyne et al. (2018) and Tramblay et al. (2013) obtain similar results in the region of Morocco. These results are complementary to our study, presenting a decrease of discharge using ten different combinations of GCM/RCM models. The decrease of river discharge starting in 2060 using RCP 4.5 and in 2040 with RCP 8.5 influences the availability of superficial and underground water resources. That could lead to droughts associated with heatwaves, which may later imply a decrease and even disappearance of fauna and flora. This may create an imbalance in water demand and supply, implying a negative effect on drinking water demand which represents the major part of water demand compared to irrigation of agricultural lands and industrial water abstraction. The river discharge decrease could also lead to a decrease in the stored useful reserve, and increase the water stress of this vulnerable region to drought.

The discharge decrease is more important under RCP 8.5, indicating that continuing emitting CO_2 without stabilisation might lead to more severe impacts in the North of Africa. This highlights the need to stabilise CO_2 concentration to avoid social-economic consequences in these semi-arid regions of the world.

This study gives additional information on climate change impacts in the Mediterranean region (Ruti et al., 2016; Zittis et al., 2019; Gan et al., 2016). The majority of Cordex RCMs suggest a significant increase in temperature (Zittis et al., 2019), throughout the future period. Zittis et al. (2019) notices that this projected regional arise of temperature is more pronounced than the global evolution. While most of the studies use RCMs outputs from the Med-Cordex project, this study provides an evaluation of the Cordex-Africa precipitation and temperature datasets. Our results confirm (Ruti et al., 2016; Zittis et al., 2019; Gan et al., 2016) the increase of temperature and decrease of precipitation in the future in the Tafna basin which is part of the Mediterranean region.

5 Conclusions

This work presented the evaluation of regional climatic model outputs of the Cordex-Africa project in the North-Western region of Algeria, the semi-arid Tafna watershed, which is known for its drought since the 1970s (Taibi et al., 2017; Meddi et al., 2010; Senent-Aparicio et al., 2017; Schilling et al., 2012). The purpose is to assess the future hydrological evolution of the region by using the ten RCM outputs of Cordex-Africa. These RCMs outputs are bias-corrected, by different methods on the reference period (1981–2000) at five stations, and the most adapted bias-correction method is selected. The more suitable bias-correction methods are DM and LOCI for precipitation, and DM and VS for temperature. The bias-correction of precipitation (more

than temperature) has a considerable impact on inter-annual river discharge, without changing the behaviour of hydrological trend.

This study of the evaluation of climatic and hydrologic change on the Tafna basin contributes to improve knowledge about the increase of minimum/maximum temperature and the decrease of rainfall which affect the water resource of the region, and drive the drought.

The Tafna basin, a river basin with high water stress, is used to present a methodology to analyse and apply regional climatic model outputs for hydrological applications in river basins characterised by similar characteristics and problems.

The results of bias-correction of RCM outputs obtained in this study are in tune with previous studies in the Mediterranean region. We can consider these results as representative of semi-arid regions in North Africa and other regions having similar characteristics to the Tafna basin. The climatic evolution can be representative for the Mediterranean region, particularly the Northern Africa.

Acknowledgements

The authors wish to thank Algerian institutions (ANRH, Office National de Météorologie) for providing data series, Amina Mami's stay in France was made possible thanks to a scholarship from 'National Exceptional Program' (PNE-2017) awarded by the Ministry of Higher Education and Scientific Research of Algeria, The Laboratoire Ecologie fonctionnelle et Environnement is gratefully acknowledged for its support of this research project, Eleni Katragkou from the Cordex project group is thankfully acknowledged for her help for data collection. Thanks to Sabrina TAIBI and the AguaMod group.

Amina Mami, Djilali Yebdri, Sabine Sauvage and José Miguel Sánchez-Pérez conceived and designed the experiments, Amina Mami performed the experiments, Amina Mami, Mélanie Raimonet, Djilali Yebdri, Sabine Sauvage and José Miguel Sánchez-Pérez analysed the results, Amina Mami, Mélanie Raimonet, Djilali Yebdri, Sabine Sauvage and José Miguel Sánchez-Pérez wrote the paper, and Amin Zettam helped for preparing the SWAT model and the datasets collection.

References

Abbaspour, K.C. (2014) *SWAT-CUP 2012: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – A User Manual*, Swiss Federal Institute Science and Technology, Eawag.

Abbaspour, K.C., Johnson, C.A. and van Genuchten, M.T. (2004) 'Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure', *Vadose Zone J.*, Vol. 3, pp.1340–1352 [online] https://doi.org/10.2136/vzj2004.1340.

Adnan, M., Kang, S., Zhang, G., Saifullah, M., Anjum, M.N. and Ali, A.F. (2019) 'Simulation and analysis of the water balance of the Nam Co Lake using SWAT model', *Water*, Vol. 11, p.1383 [online] https://doi.org/10.3390/w11071383.

Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) (1981) *Daily Data Flow in the North of Algeria*.

Ahmadalipour, A. and Moradkhani, H. (2018) 'Escalating heat-stress mortality risk due to global warming in the Middle East and North Africa (MENA)', *Environ. Int.*, Vol. 117, pp.215–225 [online] https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.05.014.

Ahmed, K., Shahid, S., Harun, S. and Nawaz, N. (2015) 'Performance assessment of different bias correction methods in statistical downscaling of precipitation', *Malays J. Civ. Eng.*, Vol. 27 [online] https://doi.org/10.11113/mjce.v27n0.416.

Amengual, A., Homar, V., Romero, R., Alonso, S. and Ramis, C. (2012) 'A statistical adjustment of regional climate model outputs to local scales: application to Platja de Palma, Spain', *J. Clim.*, Vol. 25 [online] https://doi.org/10.1175/JCLI-D-10-05024.1.

AR4 (2007) *AR4 Climate Change 2007: Synthesis Report* [online] https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/ (accessed 6 January 2020).

Arnold, J.G., Srinivasan, R., Gassman, P.W., White, M.J., Abbaspour, K.C., Santhi, C. et al. (2012) 'SWAT: model use, calibration, and validation', *Am. Soc. Agric. Biol. Eng.*, Vol. 55 No. 5, pp.1491–1508.

ASTER Global Digital Elevation Map (n.d.) [online] https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp (accessed 11 May 2020).

Bernstein, L. et al. (2007) *IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change* [online] http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_climate_change_2007_the_ar4_synthesis_report_french.htm (accessed 30 October 2018).

Blanco-Gómez, P., Jimeno-Sáez, P., Senent-Aparicio, J. and Pérez-Sánchez, J. (2019) 'Impact of climate change on water balance components and droughts in the Guajoyo River Basin (El Salvador)', *Water*, Vol. 11, p.2360 [online] https://doi.org/10.3390/w11112360.

Block, P.J., Filho, F.A.S., Sun, L. and Kwon, H-H. (2009) 'A streamflow forecasting framework using multiple climate and hydrological models', *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.*, Vol. 45, pp.828–843 [online] https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2009.00327.x.

Bouraoui, F., Benabdallah, S., Jrad, A. and Bidoglio, G. (2005) 'Application of the SWAT model on the Medjerda river basin (Tunisia)', *Phys. Chem. Earth Parts ABC*, Vol. 30, pp.497–507 [online] https://doi.org/10.1016/j.pce.2005.07.004.

Brouziyne, Y., Abouabdillah, A., Bouabid, R. and Benaabidate, L. (2017) 'SWAT streamflow modeling for hydrological components' understanding within an agro-sylvo-pastoral watershed in Morocco', *J. Mater. Environ. Sci.*, Vol. 9, pp.128–138 [online] https://doi.org/10.26872/jmes.2018.9.1.16.

Brouziyne, Y., Abouabdillah, A., Hirich, A., Bouabid, R., Zaaboul, R. and Benaabidate, L. (2018) *Modeling Sustainable Adaptation Strategies Toward a Climate-smart Agriculture in a Mediterranean Watershed Under Projected Climate Change Scenarios*, Vol. 9, No. 1, pp.154–163 [online] https://doi.org/10.26872/jmes.2018.9.1.16.

Chen, J., Brissette, F.P. and Leconte, R. (2011) 'Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology', *J. Hydrol.*, Vol. 401, pp.190–202 [online] https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.02.020.

Chen, J., Brissette, F.P., Chaumont, D. and Braun, M. (2013) 'Finding appropriate bias correction methods in downscaling precipitation for hydrologic impact studies over North America', *Water Resour. Res.*, Vol. 49, pp.4187–4205 [online] https://doi.org/10.1002/wrcr.20331.

CORDEX (n.d.) *Regional Climate Model Evaluation System* [online] https://rcmes.jpl.nasa.gov/content/cordex (accessed 19 December 2018).

CORDEX Data Search (n.d.) *CORDEX | ESGF-CoG* [online] https://esg-dn1.nsc.liu.se/search/cordex/ (accessed 30 October 2018).

Dosio, A. and Panitz, H-J. (2016) 'Climate change projections for CORDEX-Africa with COSMO-CLM regional climate model and differences with the driving global climate models', *Clim. Dyn.*, Vol. 46, pp.1599–1625 [online] https://doi.org/10.1007/s00382-015-2664-4.

Ehret, U., Zehe, E., Wulfmeyer, V., Warrach-Sagi, K. and Liebert, J. (2012) 'HESS opinions "should we apply bias correction to global and regional climate model data?"', *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol. 16, pp.3391–3404 [online] https://doi.org/10.5194/hess-16-3391-2012.

ESGF-LIU (n.d.) *Home | ESGF-CoG* [online] https://esg-dn1.nsc.liu.se/projects/esgf-liu/ (accessed 16 December 2018).

Estrela, T., Pérez-Martin, M.A. and Vargas, E. (2012) 'Impacts of climate change on water resources in Spain', *Hydrol. Sci. J.*, Vol. 57, pp.1154–1167 [online] https://doi.org/10.1080/02626667.2012.702213.

Fang, G.H., Yang, J., Chen, Y.N. and Zammit, C. (2015) 'Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in China', *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol. 19, pp.2547–2559 [online] https://doi.org/10.5194/hess-19-2547-2015.

FAO (n.d.) *Harmonized World Soil Database*.

Gan, T.Y., Ito, M., Huelsmann, S., Qin, X., Lu, X.X., Liong, S.Y. et al. (2016) 'Possible climate change/variability and human impacts, vulnerability of drought-prone regions, water resources and capacity building for Africa', *Hydrol. Sci. J.*, Vol. 61, pp.1209–1226 [online] https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1057143.

Grusson, Y., Anctil, F., Sauvage, S. and Perez, J.M.S. (2017) 'Testing the SWAT model with gridded weather data of different spatial resolutions', *Water*, Vol. 9, p.54 [online] https://doi.org/10.3390/w9010054.

Hagemann, S., Machenhauer, B., Jones, R., Christensen, O.B., Déqué, M., Jacob, D. et al. (2004) 'Evaluation of water and energy budgets in regional climate models applied over Europe', *Clim. Dyn.*, Vol. 23, pp.547–567 [online] https://doi.org/10.1007/s00382-004-0444-7.

Hernández-Díaz, L., Laprise, R., Sushama, L., Martynov, A., Winger, K. and Dugas, B. (2013) 'Climate simulation over CORDEX Africa domain using the fifth-generation Canadian regional climate model (CRCM5)', *Clim. Dyn.*, Vol. 40, pp.1415–1433 [online] https://doi.org/10.1007/s00382-012-1387-z.

IPCC Working Group I, Stocker, T.F., Qin, D. et al. (2013) 'The physical science basis', in Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. and Midgley, P.M. (Eds.): *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK; New York, NY, USA, 1535pp.

Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O.B., Bouwer, L.M. et al. (2014) 'EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research', *Reg. Environ. Change*, Vol. 14, pp.563–578 [online] https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2.

Kim, S., Noh, H., Jung, J., Jun, H. and Kim, H.S. (2016) 'Assessment of the impacts of global climate change and regional water projects on streamflow characteristics in the Geum River Basin in Korea', *Water*, Vol. 8, p.91, MDPI. [online] https://doi.org/10.3390/w8030091.

Kjellström, E., Nikulin, G., Hansson, U., Strandberg, G. and Ullerstig, A. (2011) '21st century changes in the European climate: uncertainties derived from an ensemble of regional climate model simulations', *Tellus Dyn. Meteorol. Oceanogr.*, Vol. 2011, No. 63, pp.24–40 [online] https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2010.00475.x.

Knippertz, P., Christoph, M. and Speth, P. (2003) 'Long-term precipitation variability in Morocco and the link to the large-scale circulation in recent and future climates', *Meteorol. Atmospheric Phys.*, Vol. 83, pp.67–88 [online] https://doi.org/10.1007/s00703-002-0561-y.

Kotlarski, S., Keuler, K., Christensen, O.B., Colette, A., Déqué, M., Gobiet, A. et al. (2014) 'Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the Euro-CORDEX RCM ensemble', *Geosci. Model Dev.*, Vol. 7, pp.1297–1333 [online] https://doi.org/10.5194/gmd-7-1297-2014.

Leander, R. and Buishand, T.A. (2007) 'Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows', *J. Hydrol.*, Vol. 332, pp.487–496 [online] https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.08.006.

Lenderink, G., Buishand, A. and van Deursen, W. (2007) 'Estimates of future discharges of the River Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach', *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol. 11, pp.1145–1159 [online] https://doi.org/10.5194/hess-11-1145-2007.

Luo, M., Liu, T., Meng, F., Duan, Y., Frankl, A., Bao, A. et al. (2018) 'Comparing bias correction methods used in downscaling precipitation and temperature from regional climate models: a

case study from the Kaidu River Basin in Western China', *Water*, Vol. 10, p.1046 [online] https://doi.org/10.3390/w10081046.

M'Po, Y.N., Lawin, A.E., Oyerinde, G.T., Yao, B.K. and Afouda, A.A. (2017) 'Comparison of daily precipitation bias correction methods based on four regional climate model outputs in Ouémé Basin, Benin', *Hydrology*, Vol. 4, p.58 [online] https://doi.org/10.11648/j.hyd.20160406.11.

Majone, B., Bovolo, C.I., Bellin, A., Blenkinsop, S. and Fowler, H.J. (2012) 'Modeling the impacts of future climate change on water resources for the Gállego river basin (Spain)', *Water Resour. Res.*, Vol. 48 [online] https://doi.org/10.1029/2011WR010985.

Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A.M., Chandler, R.E. et al. (2010) 'Precipitation downscaling under climate change: recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user', *Rev. Geophys.*, Vol. 48 [online] https://doi.org/10.1029/2009RG000314.

Mascaro, G., White, D.D., Westerhoff, P. and Bliss, N. (2015) 'Performance of the CORDEX-Africa regional climate simulations in representing the hydrological cycle of the Niger River basin', *J. Geophys. Res. Atmospheres*, Vol. 120, pp.12425–12444 [online] https://doi.org/10.1002/2015JD023905.

Meddi, M. and Hubert, P. (2003) 'Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du nord-ouest de l'Algérie', *Hydrol. Mediterr. Semiarid Reg.*, Vol. 278, pp.229–335.

Meddi, M., Talia, A. and 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 Phys. Environ.*, pp.61–84 [online] https://doi.org/10.4000/physio-geo.686.

Meddi, M.M., Assani, A.A. and Meddi, H. (2010) 'Temporal variability of annual rainfall in the Macta and Tafna catchments, Northwestern Algeria', *Water Resour. Manag.*, Vol. 24, pp.3817–33 [online] https://doi.org/10.1007/s11269-010-9635-7.

Milano, M., Ruelland, D., Fernandez, S., Dezetter, A., Fabre, J., Servat, E. et al. (2013) 'Current state of Mediterranean water resources and future trends under climatic and anthropogenic changes', *Hydrol. Sci. J.*, Vol. 58, pp.498–518 [online] https://doi.org/10.1080/02626667.2013.774458.

Muerth, M.J., St-Denis, B.G., Ricard, S., Velázquez, J.A., Schmid, J., Minville, M. et al. (2013) 'On the need for bias correction in regional climate scenarios to assess climate change impacts on river runoff', *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol. 17, pp.1189–1204 [online] https://doi.org/10.5194/hess-17-1189-2013.

Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970) 'River flow forecasting through conceptual models part I – a discussion of principles', *J. Hydrol.*, Vol. 10, pp.282–290 [online] https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6.

National Agency of Hydrologic Resources (ANRH) (2003a) *Map of Potential Evapotranspiration in the North of Algeria.*

National Agency of Hydrologic Resources (ANRH) (2003b) *Map of Average Annual Runoff in the North of Algeria.*

National Agency of Hydrologic Resources (ANRH) (2003c) *Map of Annual Rainfall in the North of Algeria.*

Nerantzaki, S.D., Giannakis, G.V., Efstathiou, D., Nikolaidis, N.P., Sibetheros, I.A., Karatzas, G.P. et al. (2015) 'Modeling suspended sediment transport and assessing the impacts of climate change in a karstic Mediterranean watershed', *Sci. Total Environ.*, Vol. 538, pp.288–297 [online] https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.092.

Osei, M.A., Amekudzi, L.K., Wemegah, D.D., Preko, K., Gyawu, E.S. and Obiri-Danso, K. (2019) 'The impact of climate and land-use changes on the hydrological processes of Owabi catchment from SWAT analysis', *J. Hydrol. Reg. Stud.*, Vol. 25, p.100620 [online] https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100620.

Panthou, G., Vrac, M., Drobinski, P., Bastin, S. and Li, L. (2016) 'Impact of model resolution and Mediterranean sea coupling on hydrometeorological extremes in RCMs in the frame of HyMeX and MED-CORDEX', *Clim. Dyn.*, Vol. 51, pp.915–932 [online] https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-016-3374-2.

Philandras, C.M., Nastos, P.T., Kapsomenakis, J., Douvis, K.C., Tselioudis, G. and Zerefos, C.S. (2011) 'Long term precipitation trends and variability within the Mediterranean region', *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, Vol. 11, pp.3235–3250 [online] https://doi.org/10.5194/nhess-11-3235-2011.

Rathjens, H., Bieger, K., Srinivasan, R., Chaubey, I. and Arnold, J.G. (2016) *CMhyd User Manual. Doc. Prep. Simulated Clim. Change Data Hydrol. Impact Study*, Texas [online] http://swat.tamu.edu/software/cmhyd/.

Rosenzweig, C., Casassa, G., Karoly, D.J., Imeson, A., Liu, C., Menze, A. et al. (2007) *AR4 Climate Change 2007: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, IPCC.

Ruti, P.M., Somot, S., Giorgi, F., Dubois, C., Flaounas, E., Obermann, A. et al. (2016) 'Med-CORDEX initiative for Mediterranean climate studies', *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, Vol. 97, pp.1187–1208 [online] https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00176.1.

Schilling, J., Freier, K.P., Hertig, E. and Scheffran, J. (2012) 'Climate change, vulnerability and adaptation in North Africa with focus on Morocco', *Agric. Ecosyst. Environ.*, Vol. 156, pp.12–26 [online] http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2012.04.021.

Schmidli, J., Frei, C. and Vidale, P.L. (2006) 'Downscaling from GCM precipitation: a benchmark for dynamical and statistical downscaling methods', *R. Meteorol. Soc.*, Vol. 26, pp.679–689 [online] https://doi.org/10.1002/joc.1287.

Senent-Aparicio, J., Pérez-Sánchez, J., Carrillo-García, J. and Soto, J. (2017) 'Using SWAT and fuzzy TOPSIS to assess the impact of climate change in the headwaters of the Segura River Basin (SE Spain)', *Water*, Vol. 9, p.149 [online] https://doi.org/10.3390/w9020149.

Shin, J-Y., Lee, T., Park, T. and Kim, S. (2018) 'Bias correction of RCM outputs using mixture distributions under multiple extreme weather influences', *Theor. Appl. Climatol.* [online] https://doi.org/10.1007/s00704-018-2585-3.

Solomon, S. and Intergovernmental Panel on Climate Change (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, New York.

Srinivasan, R., Zhang, X. and Arnold, J. (2010) 'SWAT ungauged: hydrological budget and crop yield predictions in the Upper Mississippi River Basin', *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, Vol. 53, No. 5, pp.1533–1546.

Szabó-Takács, B., Farda, A., Skalák, P. and Meitner, J. (2019) 'Influence of bias correction methods on simulated Köppen-Geiger climate zones in Europe', *Climate*, Vol. 7, p.18 [online] https://doi.org/10.3390/cli7020018.

Taibi, S., Meddi, M., Mahe, G. and Assani, A. (2017) 'Relationships between atmospheric circulation indices and rainfall in Northern Algeria and comparison of observed and RCM-generated rainfall', *Theor. Appl. Climatol.*, Vol. 127, pp.241–257 [online] https://doi.org/10.1007/s00704-015-1626-4.

Terink, W., Hurkmans, R., Torfs, P.J.J.F. and Uijlenhoet, R. (2010) 'Evaluation of a bias correction method applied to downscaled precipitation and temperature reanalysis data for the Rhine basin', *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol. 14, p.17 [online] https://doi.org/10.5194/hess-14-687-2010.

Teutschbein, C. and Seibert, J. (2010) 'Regional climate models for hydrological impact studies at the catchment scale: a review of recent modeling strategies', *Geogr. Compass*, Vol. 4, pp.834–860 [online] https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2010.00357.x.

Teutschbein, C. and Seibert, J. (2012) 'Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: review and evaluation of different methods', *J. Hydrol.*, Vols. 456–457, pp.12–29 [online] https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052.

Teutschbein, C. and Seibert, J. (2013) 'Is bias correction of regional climate model (RCM) simulations possible for non-stationary conditions?', *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol. 17, pp.5061–5077 [online] https://doi.org/10.5194/hess-17-5061-2013.

The European Space Agency (n.d.) *Land-Use Map* [online] http://due.esrin.esa.int/page_globcover.php (accessed 17 May 2017).

Thomas, L., Simon, D., Gwen, B. and Christel, P. (2012) 'Bias correction of daily precipitation simulated by a regional climate model: a comparison of methods', *Int. J. Climatol.*, Vol. 33, pp.1367–1381 [online] https://doi.org/10.1002/joc.3518.

Tramblay, Y., Ruelland, D., Somot, S., Bouaicha, R. and Servat, E. (2013) 'High-resolution Med-CORDEX regional climate model simulations for hydrological impact studies: a first evaluation of the ALADIN-climate model in Morocco', *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol. 17, pp.3721–3739 [online] https://doi.org/10.5194/hess-17-3721-2013.

UNEP/MAP-Plan Bleu (2009) *State of the Environment and Development in the Mediterranean*, Athens.

Vautard, R., Gobiet, A., Jacob, D. et al. (2013) 'The simulation of European heat waves from an ensemble of regional climate models within the EURO-CORDEX project', *Clim. Dyn.*, Vol. 41, pp.2555–2575 [online] https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-013-1714-z.

Vithlani, N.S. and Rank, H.D. (2016) 'Climate change impact assessment for Aji Basin using statistical downscaling and bias correction of climate model outputs', *Curr. World Environ.*, Vol. 11, pp.670–678 [online] http://dx.doi.org/10.12944/CWE.11.2.40.

Wilby, R.L., Hay, L.E., Gutowski Jr., W.J., Arritt, R.W., Takle, E.S., Pan, Z. et al. (2000) 'Hydrological responses to dynamically and statistically downscaled climate model output', *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 27, pp.1199–1202 [online] https://doi.org/10.1029/1999GL006078.

Xiang, Z., Montas, H.J., Shirmohammadi, A., Leisnham, P.T. and Brubaker, K. (2018) *Impact of Climate Change on Critical Source Areas in a Chesapeake Bay Watershed*', Vol. 1801831, ASABE, Detroit, Michigan [online] https://doi.org/10.13031/aim.201801831.

Yang, J., Reichert, P., Abbaspour, K.C., Xia, J. and Yang, H. (2008) 'Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China', *J. Hydrol.*, Vols. 1–2, pp.1–23 [online] https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.05.012.

Yebdri, D., Errih, M., Hamlet, A. and El-Bari, T.A. (2007) 'The water resources management study of the Wadi Tafna basin (Algeria) using the SWAT model', *Afr. Water J.*, Vol. 1, No. 1, pp.33–47.

Zanis, P., Kapsomenakis, I., Philandras, C., Douvis, K., Nikolakis, D., Kanellopoulou, E. et al. (2009) 'Analysis of an ensemble of present day and future regional climate simulations for Greece', *Int. J. Climatol.*, Vol. 29, pp.1614–1633 [online] https://doi.org/10.1002/joc.1809.

Zeroual, A., Assani, A.A., Meddi, M. and Alkama, R. (2018) 'Assessment of climate change in Algeria from 1951 to 2098 using the Köppen-Geiger climate classification scheme', *Clim. Dyn.* [online] https://doi.org/10.1007/s00382-018-4128-0.

Zettam, A., Taleb, A., Sauvage, S., Boithias, L., Belaidi, N. and Sánchez-Pérez, J.M. (2017) 'Modelling hydrology and sediment transport in a semi-arid and anthropized catchment using the SWAT model: the case of the Tafna River (Northwest Algeria)', *Water*, Vol. 9, p.216 [online] https://doi.org/10.3390/w9030216.

Zittis, G., Hadjinicolaou, P., Klangidou, M., Proestos, Y. and Lelieveld, J. (2019) 'A multi-model, multi-scenario, and multi-domain analysis of regional climate projections for the Mediterranean', *Reg. Environ. Change*, Vol. 19, pp.2621–2635 [online] https://doi.org/10.1007/s10113-019-01565-w.

CHAPITRE VI : L'EVALUATION DES CARACTERISTIQUES DE SECHERESSE A L'AIDE D'INDICES STANDARDISES

CHAPITRE VI : L'EVALUATION DES CARACTERISTIQUES DE SECHERESSE A L'AIDE D'INDICES STANDARDISES

VI. 1. Application des indices de sécheresse

Cette partie de ce travail est un complément aux travaux précédents qui vise à attribuer des catégories spécifiques de sévérité de sécheresse aux tendances des changements climatiques obtenues tout au long de la période future étudiée sur le bassin versant de la Tafna. Cette attribution est basée sur l'estimation de la sécheresse à l'aide d'indicateurs de sécheresse standardisés, à savoir : SPI (standardized precipitation index), SPEI (standardized precipitation and evapotranspiration index) et SRI (standardized runoff index).

L'utilisation des indicateurs standardisés figurent parmi les moyens de suivi de l'intensité et la fréquence de la sécheresse. L'utilisation des indices normalisés de suivi de sécheresse sont beaucoup utilisés : parmi les plus utilisé le SPI (standardized precipitation index) (Mckee et al., 1993), le SPEI (standardized precipitation and evapotranspiration index) (Shukla and Wood, 2008) et le SRI (standardized runoff index) (Shukla and Wood, 2008) qui sont les plus utilisés (Ghenim and Megnounif, 2014; Jehanzaib et al., 2020; Yang et al., 2019).

Le calcul des indices de sécheresse est effectué à l'échelle mensuelle pour les périodes étudiées 1981-2000 à 2080-2099, et les résultats sont représentés de manière statistique en montrant la distribution statistique par des Violin-plot sur les quatre périodes futures étudiées dans ce travail (2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 et 2080-2099) pour les mois de Janvier et de Juillet. La présentation des résultats se trouve dans l'annexe.

VI. 1. a. Standardized precipitation index (SPI)

Le SPI (Mckee et al., 1993) est un indice très répandu et utilisé pour identifier la sécheresse météorologique mensuelle (Jehanzaib et al., 2020). Le calcul du SPI est basé sur un seul paramètre, la pluie, et une fonction gamma de distribution comme présenté dans la formule suivante :

$$f(x,\propto,\beta) = \frac{1}{\beta^{\alpha}\int_0^{\infty} x^{\propto-1}e^{-x}\,dx}\, x^{\propto-1}e^{\frac{x}{\beta}}\ ,\ pour\ x > 0$$ **.....Équation 29**

Avec

x est la pluie mensuelle,

$\propto$ et β sont les paramètres de forme et d'échelle de la probabilité de distribution, respectivement.

Les détails de démonstration du calcul de SPI sont présentés dans différent articles (Achour et al., 2020; Asadi Zarch et al., 2015; Kalisa et al., 2020; Yang et al., 2019; Zhim et al., 2019).

VI. 1. b. Standardized precipitation and evapotranspiration index (SPEI)

Le SPEI (Vicente-Serrano et al., 2010, Beguería et al., 2014)) suit la même méthode de calcul que celle de SPI, mais remplace les précipitations mensuelles par le déficit hydrique mensuel. Ce dernier est défini par la différence entre les précipitations mensuelles et l'évapotranspiration potentielle mensuelle.

$$D_h = P_i - PET_i$$ **.....Équation 30**

Avec

D_h est le déficit hydrique mensuel ;

P_i est la pluie mensuelle ;

PET_i est l'évapotranspiration mensuelle calculée par la méthode de Hargreaves

Dans les chapitres précédents, nous avons opté pour la méthode de calcul de l'évapotranspiration potentielle de *Hargreaves*. Suivant le même principe nous avons utilisé l'évapotranspiration potentielle calculée par la méthode *de Hargreaves* pour calculer le SPEI. Le déficit hydrique est ajusté par la loi de distribution log-logistique (Jehanzaib et al., 2020; Vicente-Serrano et al., 2010) comme le montre la formule suivante :

$$f(x,\propto,\beta,\gamma) = \frac{(1+\frac{\gamma(x-\alpha)}{\beta})^{-(\frac{1}{\gamma}+1)}}{\beta\,[\,1+(1+\frac{\gamma(x-\alpha)}{\beta})^{-\frac{1}{\gamma}}\,]^2}$$ **.....Équation 31**

Avec

D_h est le déficit hydrique

x et $\propto$, $\boldsymbol{\beta}$et $\boldsymbol{\gamma}$ sont respectivement, les paramètres de localisation, de forme, et d'échelle de la probabilité de distribution.

Ces probabilités seront ensuite transformés en distribution normal standard.

VI. 1. c. Standardized runoff index (SRI)

Le SRI est proposé par (Shukla and Wood, 2008) pour catégoriser la sécheresse hydrologique. Le calcul du SRI est similaire à celui du SPI, en remplaçant les précipitations par les débits. Les débits sont ajustés par la distribution log-normale comme est présenté dans la formule suivante :

$$\boldsymbol{f(x,\mu,\sigma) = \frac{1}{x} . \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} exp\ exp\ (-\frac{(lnln\ x-\mu)^2}{2\sigma^2})} \quad , \quad \boldsymbol{pour\ x} > 0 \quad \textbf{.....Équation 32}$$

Où

x pour le débit,

$\boldsymbol{\mu}$ et $\boldsymbol{\sigma}$ sont respectivement, les paramètres de forme et d'échelle de la probabilité de distribution.

Les probabilités sont transformées à des distributions normales standards.

VI. 1. d. Catégories de sécheresse et d'humidité définies par SPI, SPEI, et SRI.

La classification des sécheresses pour les périodes données suit les intervalles indiqués dans le tableau 2. Les valeurs positives renseignent les classes d'humidité, de modérée à extrême ([1 – 1.5] à ≥ 2.0), alors que les valeurs négatives indiquent la sécheresse, de modérée à extrême (([-1 – -1.5] à ≤ -2.0). Les trois indices utilisés dans ce chapitre sont comparés par les mêmes seuils de catégorisation de la sécheresse et l'humidité (Tableau 2) (Asadi Zarch et al., 2015; Svoboda et al., 2016).

Tableau 2. Catégorisation des sécheresses et humidité à partir des indices SPI, SPEI, et SRI.

Valeur du SPI, SPEI, et SRI	Catégorie
≥ 2.0	Humidité extrême
1.5 - 2.0	Humidité forte
1.0 - 1.5	Humidité modérée
-0.99 - 0.99	Normale
-1.5 - -1.0	Sécheresse modérée
-2.0 - -1.5	Sécheresse forte
≤ -2.0	Sécheresse extrême

VI. 2. Application des indicateurs de sécheresse sur le bassin versant de la Tafna

Les indices utilisés dans cette étude sont calculés à l'échelle de 12 mois. Le calcul des indicateurs à court terme 1 à 3 mois est utilisé en général pour estimer l'humidité et la sécheresse du sol ainsi que pour l'agriculture. Les indicateurs à moyen terme 6 et 9 mois et long terme 12 mois et plus sont liés beaucoup plus aux écoulements des cours d'eau et remplissage des réservoirs (Ghenim and Megnounif, 2014). Le SPEI est appliqué pour renforcer les résultats, obtenus par le SPI, en tenant compte de la pluie et la température. Alors que le SRI est utilisé pour estimer la sécheresse hydrologique à court et à long terme.

En suivant le déroulement de la présentation des résultats dans les chapitres précédents, les résultats obtenus par les indicateurs de sécheresse présentent la distribution statistique des indices de sécheresse pour les mois étudiés dans cette thèse -Janvier et Juillet- durant la période future étudiée (2020-2099) en les comparants à ceux de la période de référence (1981-2000).

VI. 3. Résultats et discussion.

L'applicabilité de l'utilisation des indices de sécheresse dans le Nord de l'Afrique a été approuvée par différentes études antérieures (Ghenim and Megnounif, 2013) et (Ghenim and Megnounif, 2014) dans le bassin versant de la Tafna pour la période passée (1946-2007), (Habibi et al., 2018) dans le bassin de Chellif- Zahrez (Nord Ouest de l'Algérie), (Lazri et al., 2015) le

Nord de l'Algérie, (Djerbouai and Souag-Gamane, 2016) dans le bassin versant Algérois, (Merabti et al., 2018) dans le Nord Est de l'Algérie, et (Zhim et al., 2019) dans le bassin versant d'Oum er-Rbia (Nord du Maroc).

Ces études citées dans le paragraphe précédent, utilisent les indices de sécheresse pour des période passé tout au long du Nord de l'Afrique, ce qui nous permet de les comparer et valider les résultats de notre étude pour la période de référence, et exprimer les classifications de sécheresse pour les tendances futures, ça permet de rapporter un plus dans le domaine de l'utilisation des indices standardisés qui est très peu utilisé dans le Nord de l'Afrique, pour les tendances futures.

Notre application d'indices standardisés a centré les deux mois étudiés dans cette thèse, Janvier et Juillet pour les stations climatiques avec le SPI et SPEI et les stations hydrométriques avec le SRI. Le choix de l'échelle de calcul des indices de sécheresse a été porté sur le long terme (12 mois). Les résultats obtenus tout au long de cette thèse on été présentés à une échelle inter-périodique de la période future par rapport à la période de référence, pour différentes variables mensuelles à savoir : les précipitations, les débits des cours d'eau, l'évapotranspiration, l'écoulement latéral et la teneur en eau dans le sol au niveau du bassin versant de la Tafna.

Les diminutions des précipitations et augmentation de la température enregistrées dans la période future ne sont pas sans répercussions au niveau du cycle hydrologique, et impactent toutes les composantes citées ci-dessus.

Le tableau 3 regroupe les résultats de la valeur minimale des indices SPI-12, SPEI-12 et SRI-12 mois pour les périodes étudiées dans cette étude (1981-2000, 2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 et 2080-2099). Le choix de la représentation de ces résultats est porté sur le scénario de forçage le plus pessimiste le RCP 8.5.

Tableau 3. Représentation des résultats des minimum de SPI-12, SPEI-12, et SRI-12 périodiques pour les stations climatiques et hydrométriques du bassin versant de la Tafna. (Les valeurs en gras indique une sécheresse)

	1981-2000	2020-2039	2040-2059	2060-2079	2080-2099
Stations climatiques					
	min SPI-12				
STATION 1	-0.1	**-1.1**	**-1.1**	**-2.2**	**-2.1**
STATION 2	0.1	-0.9	**-1.1**	**-1.6**	**-2.1**
STATION 3	0.0	-0.9	**-1.2**	**-1.6**	**-2.3**
STATION 4	-0.7	-0.6	-0.9	**-1.5**	**-2.3**
STATION 5	-0.5	-0.6	**-1.0**	**-1.5**	**-2.3**
	min SPEI-12				
STATION 1	0.1	-0.2	-0.9	**-1.5**	**-1.9**
STATION 2	0.1	-0.2	-0.8	**-1.4**	**-1.9**
STATION 3	0.1	-0.2	-0.8	**-1.4**	**-1.9**
STATION 4	-0.6	-0.5	**-1.0**	**-1.4**	**-2.0**
STATION 5	-0.4	-0.5	-0.9	**-1.4**	**-2.1**
Stations hydrométriques					
	min SRI-12				
STATION A	**-1.0**	**-1.4**	**-1.5**	**-1.8**	**-1.6**
STATION B	**-1.4**	-0.8	**-1.5**	**-2.4**	**-2.6**
STATION C	**-1.5**	**-1.0**	**-1.6**	**-1.9**	**-2.6**
STATION D	**-1.6**	-0.8	**-1.8**	**-2.0**	**-2.5**

Les résultats obtenus à partir de l'indice de précipitation standardisé SPI, présentés dans la figure 26, montrent que dans l'ensemble, la tendance vers l'humidité est minimale dans la période future, par rapport à la période de référence (1981-2000). Les résultats obtenus du SPI 12 mois, par les sorties de RCMs traitées, pour la période de référence (1981-2000) s'avoisinent à ceux de (Ghenim and Megnounif, 2014) pour la période 1986 – 1997 qui varient entre -1 et 1 et de (Zhim et al., 2019) pour la période 1980-2000 variant entre -1.2 et 2 et qui enregistrent un *état normal* à une *humidité extrême* au niveau des bassins versants de la Tafna et le Oum er-Rbia (Maroc) respectivement.

La première période future 2020-2039 ne marque pas de sécheresse ou d'humidité. Contrairement celle de la période de référence, la sécheresse est répartie tout au long du reste de la période future de l'état normal passant par une sécheresse modérée durant la période 2040-2059 à une sécheresse forte pour la période 2060-2079 et extrême pour la période 2080-2099.

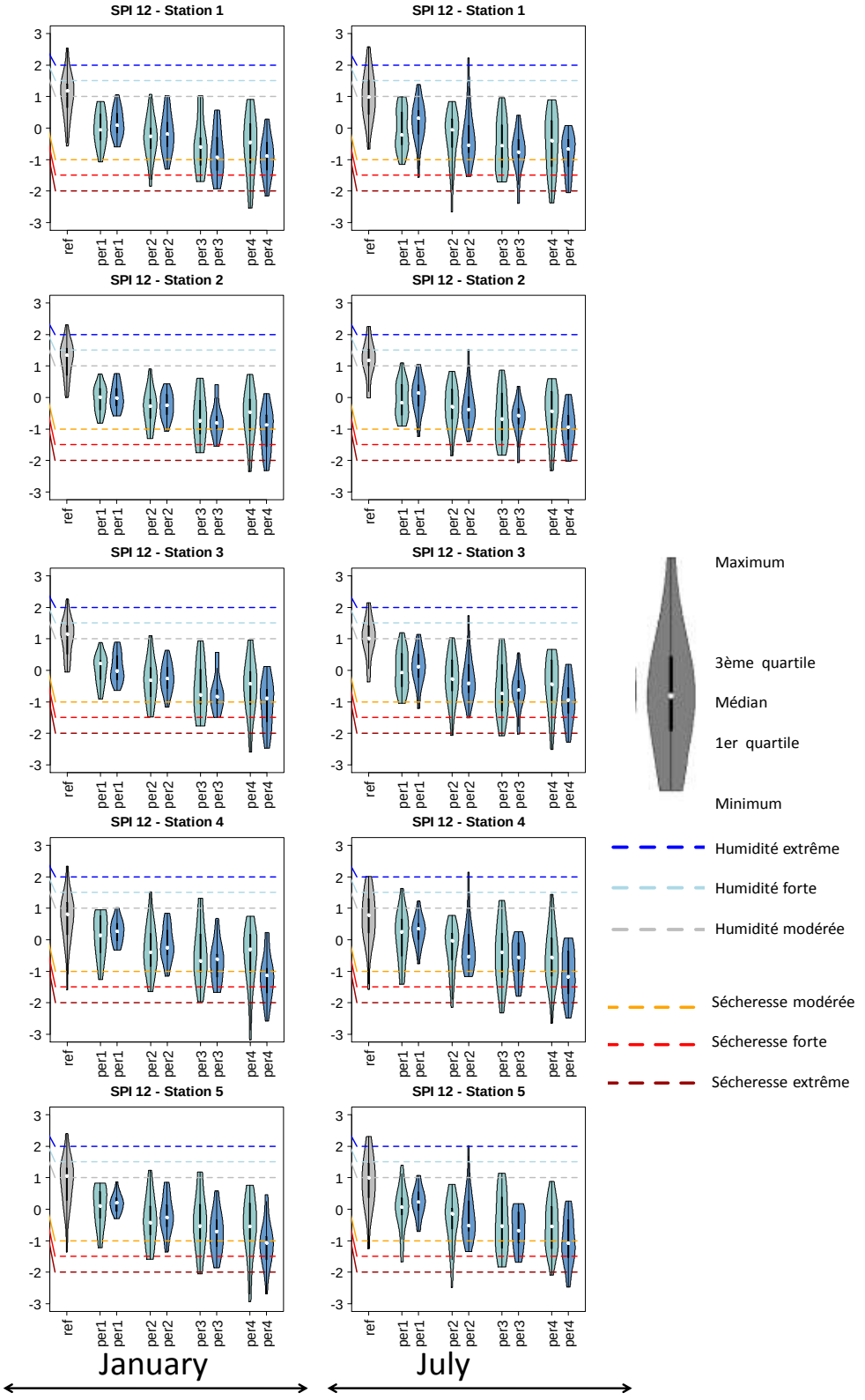


Figure 30. Distribution statistique du SPI-12 mois pour les deux mois Janvier (à gauche) et Juillet (à droite) pour la période future (per1 : 2020-2039 ; per2 : 2040-2059 ; per3 : 2060-2079 et per4 : 2080-2099) pour les RCP 4.5 (bleu clair) et RCP 8.5 (bleu foncé), comparées à celles de la période de référence (ref) 1981-2000, au niveau des stations climatiques (1 à 5 de haut en bas) du bassin de la Tafna.

CHAPITRE VI : L'EVALUATION DES CARACTERISTIQUES DE SECHERESSE A L'AIDE D'INDICES STANDARDISES

L'indicateur SPEI montre dans la figure 27 que la considération de la température donne une distribution similaire à celle du SPI durant la période de référence en regardant une humidité. Cependant la distribution est plus concentrée vers la sécheresse pendant la période future, par rapport à l'indicateur SPI. Durant la période 2020-2039, l'indice est distribué dans l'intervalle de la normale, la sécheresse modérée apparaît durant celle de 2040-2059 alors que les périodes 2060-2079 et 2080-2099 tendent vers une sécheresse plutôt forte. Le rétrécissement des violin-plots des SPEI et la tendance vers la sécheresse par rapport aux SPI montrent l'influence de l'augmentation de la température, durant la période future (Mami et al., in press), dans l'estimation de la sécheresse.

Le standardized runoff index SRI montre dans la figure 28 une distribution plus large que celle des indicateurs précédents, pour les deux premières périodes futures 2020-2039 et 2040-2059. Les deux périodes qui suivent 2060-2079 et 2080-2099 sont moins touchées par l'humidité et s'approchent beaucoup plus la distribution de la sécheresse.

Les résultats obtenus du SRI 12 mois, par les sorties du modèle SWAT, pour la période de référence (1981-2000) s'avoisinent à ceux du SSFI (standardized stream flow index) de 12 mois utilisé par Ghenim (2014) pour la période 1986 – 1997 qui varient entre -2 et 1 qui enregistrent une sécheresse extrême au niveau du bassin versant de la Tafna, sachant que dans ce dernier les débits estimés sont respectivement, faibles à très faibles en hiver et en été (chapitre VI) et les diminutions des précipitations ainsi que l'augmentation des températures (Mami et al., in press) durant la période future se traduisent par la sécheresse estimée dans la région en question.

Les figures 26 et 27 montrent que la sécheresse détectée avec le scénario RCP 8.5 est plus accentuée que celui du RCP 4.5 pour les indices SPEI et SPI. Cette accentuation est due à la forte diminution des précipitations suivant le scénario RCP 8.5 montré dans les chapitres précédents V et VI pour les périodes 2060-2079 et 2080-2099. Cette accentuation est aussi montrée dans le travail de (Zeroual et al., 2018) dans l'ensemble du territoire Algérien.

CHAPITRE VI : L'EVALUATION DES CARACTERISTIQUES DE SECHERESSE A L'AIDE D'INDICES STANDARDISES

Pour une vision générale de la distribution de la sécheresse de l'ensemble des mois restants nous avons présenté en Annexe les résultats obtenus à partir du calcul des trois indicateurs de sécheresse pour les périodes de référence (1981-2000) et futures (2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 et 2080-2099) avec les deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre RCP 4.5 et RCP 8.5. Une similitude de réponse des indices de sécheresse entre les mois restants est marquée dans les figures présentées dans l'Annexe pour l'ensemble des stations étudiées dans cette thèse.

L'utilisation des indices standardisés de sécheresse nous a permis de détecter l'intensité de sécheresse des périodes étudiées pour le bassin de la Tafna. L'indice SPEI donne des résultats mieux développés par rapport à celui du SPI particulièrement pour l'évaluation de la disponibilité des ressources en eau, tant qu'il tient compte du défit hydrique pour le calcul. L'estimation des débits mensuels futurs via le modèle SWAT a favorisé l'utilisation de l'estimation de la sécheresse hydrologique par l'usage de l'indice SRI. Comme est cité dans ce travail que cette région de la Tafna vulnérable aux changements climatiques particulièrement à la sécheresse, et que les résultats nous le confirment ; il serait raisonnable de recommander l'utilisation des indices de sécheresse pour les régions ayant des caractéristiques climatiques à celle de la Tafna, dans la région Méditerranéenne.

VI. 4. Conclusion

L'utilisation des indicateurs standardisés figurent parmi les moyens de suivi de l'intensité et la fréquence de la sécheresse. Les résultats obtenus de l'utilisation des indices standardisés de sécheresse sont en concordance avec différentes études de la région pour la période de référence 1981-2000. Les diminutions des précipitations et débits, ainsi que l'augmentation de la température, remarquées pendant l'évolution climatique future, est définit par une sécheresse qui varient dans un intervalle de modéré à extrême. L'indice SPEI rétrécit la distribution de la variation de sécheresse par l'effet de la température prise en considération.

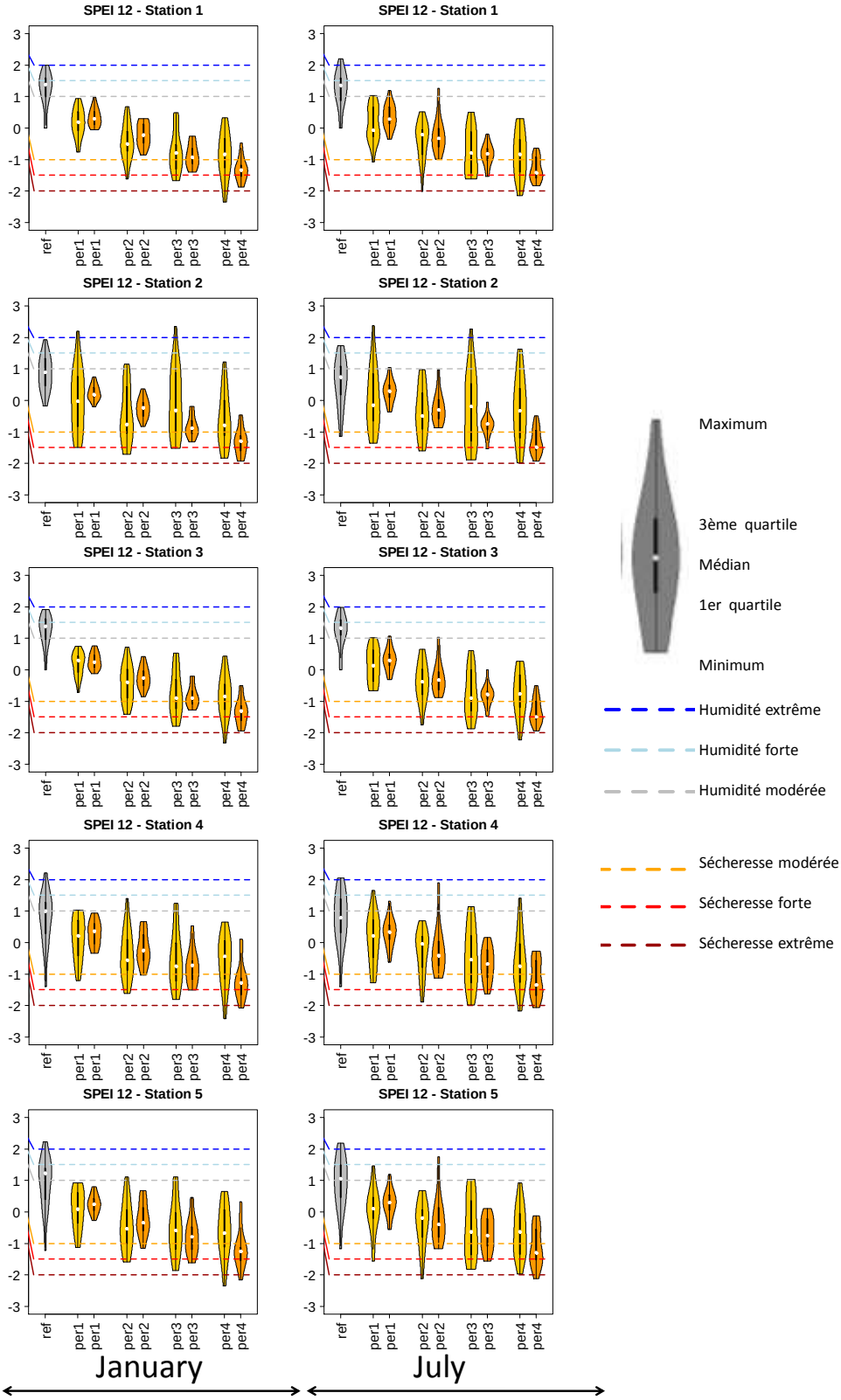


Figure 31. Distribution statistique du SPEI-12 mois pour les deux mois Janvier (à gauche) et Juillet (à droite) pour la période future (per1 : 2020-2039 ; per2 : 2040-2059 ; per3 : 2060-2079 et per4 : 2080-2099) pour les RCP 4.5 (jaune) et RCP 8.5 (orange), comparées à celles de la période de référence (ref) 1981-2000, au niveau des stations climatiques (1 à 5 de haut en bas) du bassin de la Tafna.

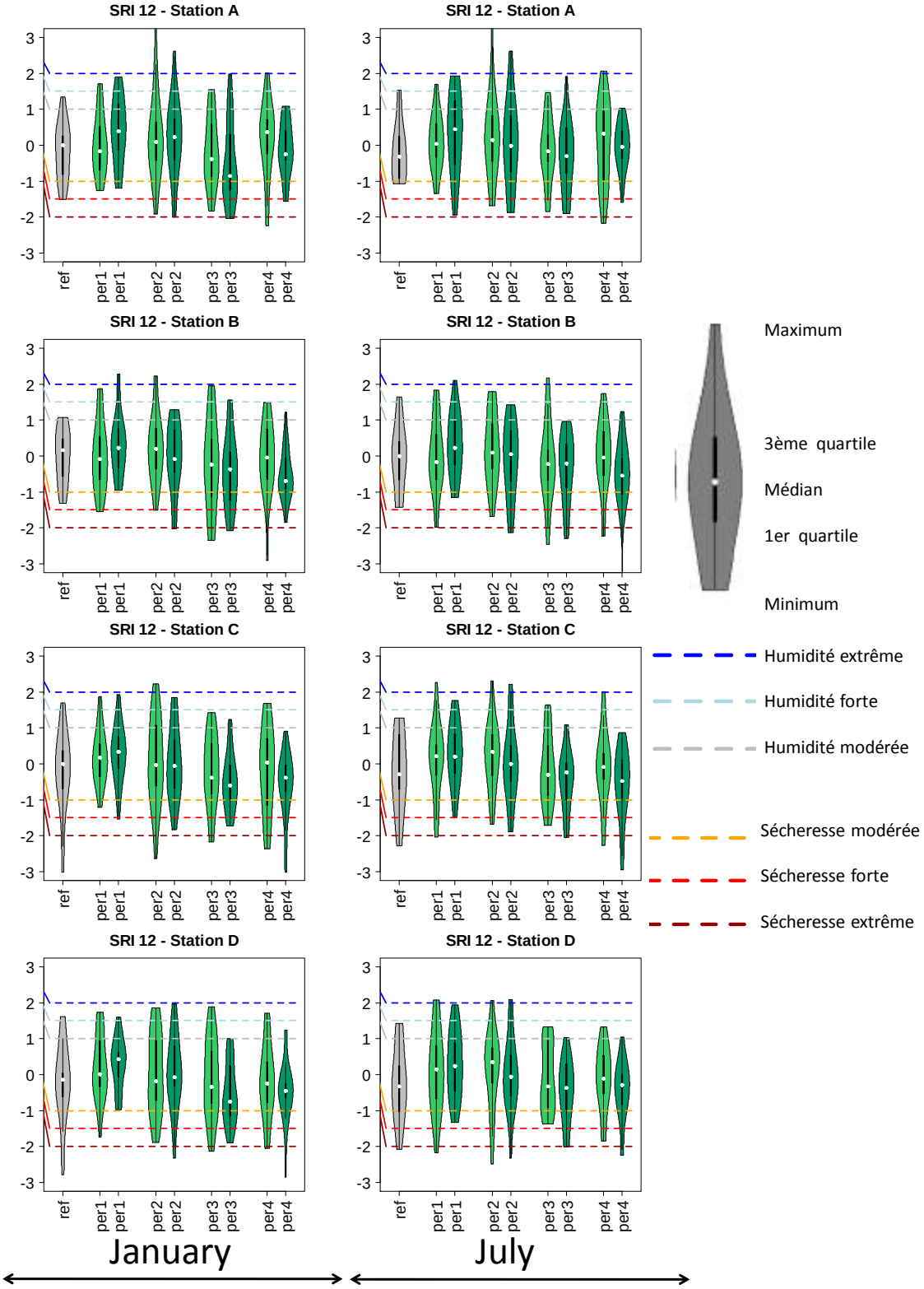


Figure 32. Distribution statistique du SRI-12 mois pour les deux mois Janvier (à gauche) et Juillet (à droite) pour la période future (per1 : 2020-2039 ; per2 : 2040-2059 ; per3 : 2060-2079 et per4 : 2080-2099) pour les RCP 4.5 (vert claire) et RCP 8.5 (vert foncé), comparées à celles de la période de référence (ref) 1981-2000, au niveau des stations hydrométriques (A à D de haut en bas) du bassin de la Tafna.

CHAPITRE VI : L'EVALUATION DES CARACTERISTIQUES DE SECHERESSE A L'AIDE D'INDICES STANDARDISES

CHAPITRE VII: SPATIO-TEMPORAL EVALUATION OF TRENDS OF HYDROLOGICAL WATER COMPONENTS: CASE OF TAFNA BASIN (NORTH-WESTERN AFRICA)

Article en révision pour publication dans le « Journal of Water and Climate Change) :

Mami, A., Yebdri, D., Sauvage, S., Raimonet, M., Sanchez-Perez, J.M., in revision. Spatio-temporal trends of hydrological components: case of the Tafna basin (Northwestern Africa). J. Water Clim. Change. In revision

CHAPITRE VII: SPATIO-TEMPORAL EVALUATION OF TRENDS OF HYDROLOGICAL WATER COMPONENTS: CASE OF TAFNA BASIN (NORTH-WESTERN AFRICA)

VII. 1. Résumé de l'article en français

VII. 1. a. Contexte et objectif

Ce chapitre est présenté sous forme d'un draft d'article scientifique « Spatio-temporal trends of hydrological components : case of the Tafna basin (North-Western Africa) en révision pour publication dans le journal « Journal of water and climate change », qui expose la présentation de l'évolution climatique spatiale et temporelle au niveau du bassin versant de la Tafna pour la période 2020-2099 par rapport à la période de référence 1981-2000. Cette présentation spatiale est effectuée à l'aide de l'outil hydrologique semi-distribué SWAT.

L'article est composé de différente parties, commençant par l'introduction, suivit par la partie 'matériels et méthodes' qui définit la zone d'étude et ses paramètres climatiques et hydrologiques, en suite une description des modèles climatiques régionaux (RCM) utilisés, pour en suite, une description de la modélisation hydrologiques à l'aide de SWAT et sa performance. La partie suivante regroupe les résultats obtenus de cette étude sur l'évaluation spatiale et temporelle de l'impact des tendances climatiques au niveau du bassin versant de la Tafna, suivit par une discussion des résultats et clôturées par une conclusion. La période d'étude cernée est de 2020 à 2099 pour les mois Janvier et Juillet, qui sont ainsi complétés par des résultats annexes représentants l'évolution pendant tout les mois restants sur la période étudiée 2020-2099.

Les impacts du changement climatique intéressent les scientifiques d'Afrique du Nord dans les dernières décennies du 20e siècle, la baisse des précipitations et l'augmentation de la température sont remarquées (Arnell NW et al., 2003; Zettam et al., 2017), La diminution des

précipitations détectées dans le nord-ouest de l'Algérie est estimée à -25% en 1970 par rapport à la période du dernier demi-siècle (Arnell, 1999; Knippertz et al., 2003), où l'on prévoit l'augmentation de la vulnérabilité de ce semi- région aride au regard du stress hydrique. Certaines études mentionnaient déjà que le débit avait diminué jusqu'à 60% dans la décennie de 1970 évalué par des études réalisées de 1930 à 1998 (Meddi et al., 2010; Taibi et al., 2017).

La diminution des précipitations affecte le débit des cours d'eau, le ruissellement, la disponibilité en eau du sol et l'évapotranspiration. Comme dans la partie sud de la région méditerranéenne, la diminution du ruissellement, des débits et des précipitations est soulignée principalement en hiver (Arnell, 1999; Burek et al., 2019; Naumann et al., 2018; Youen Grusson et al., 2018; Youssef Brouziyne et al., 2018; Zeroual et al., 2018). Les eaux souterraines sont également affectées, mais il est difficile de séparer le rôle du changement climatique et les interférences anthropiques locales (Green, 2016; Kundzewicz et Doll, 2009; Taylor et al., 2011; Youen Grusson et al., 2018). Tous ces composants sont connectés et le changement de l'un d'entre eux pourrait interférer avec l'autre (Youen Grusson et al., 2018), car l'évapotranspiration et la teneur en eau du sol sont étroitement liées (Calanca et al., 2006; Jung et al. , 2010; Manabe et al., 2004; Verrot et Destouni, 2016; Youen Grusson et al., 2018).

La région du nord-ouest de l'Afrique est caractérisée par un hiver humide et un été sec (Djilali Yebdri et al., 2007; Gevaert et al., 2018; Zettam et al., 2017). A partir de cet avis, les auteurs rappellent l'objet de cette étude, traiter l'évolution du bilan hydrologique de l'eau et l'impact des changements climatiques à l'échelle mensuelle pour la période future (2020-2099) pendant deux mois ayant des caractéristiques climatiques différentes, janvier un mois froid et humide et Juillet sec et chaud, et en tenant compte de l'évolution du changement climatique pendant le reste des mois. Dans la période future, Brouzyine (Youssef Brouziyne et al., 2018) a mentionné que les mois les plus touchés par le changement climatique sont janvier pour les précipitations et juillet pour la température dans le bassin versant du R'dom (Maroc), près du bassin du Tafna et ayant un caractéristiques climatiques.

Comme remarqué par Zettam et al. (2017) et Todini et al. (2007), les modèles hydrologiques sont utiles pour divers objectifs tels que les décisions: de la gestion des ressources en eau, des urbanistes et des administrations (Noori et Kalin, 2016). Différents

modèles distribués à base physique sont capables de simuler les variations temporelles et spatiales des processus hydrologiques et de comprendre l'influence des impacts sur l'utilisation des terres (Lin et al., 2015). Parmi ces modèles, il y a VIC (Liang et al., 1994); IHDM (Beven et al., 1987); WATFLOOD (N. Kouwen et al., 1993); SHE (Abbott et al., 1986), etc.

D'autre part, l'Outil d'évaluation des sols et de l'eau (SWAT) (JG Arnold et al., 1998) est utilisé pour une fonctionnalité supplémentaire d'évaluation: les pratiques de gestion agricole (Moriasi et al., 2011), l'hydrologie et le transfert de sédiments (Gassman et al., 2014; JG Arnold, et al., 1998) et en évaluant les impacts du changement climatique (Singh et Gosain, 2011). De nombreuses études ont utilisé SWAT dans les bassins versants semi-arides, comme en Australie méridionale (Shrestha et al., 2016), en Espagne (Molina-Navarro et al., 2014), au Brésil (Santos et al., 2019) et en Afrique du Nord (Bouraoui et al., 2005; Djilali Yebdri et al., 2007; Sellami et al., 2016; Zettam et al., 2017) et d'autres pour évaluer le changement climatique (Jin et al., 2016; Nerantzaki et al., 2015; Saddique et al., 2019; Yanjie et al., 2015; Youen Grusson et al., 2018; Youssef Brouziyne et al., 2018; Zhe Yuan et al, sd).

Différentes études récentes utilisent des modèles climatiques régionaux pour étudier le changement climatique en Afrique du Nord, comme dans la partie occidentale, en utilisant les MRC des domaines CNRM-CM5, IPSL-IPSL-CM5A-MR, ICHEC-EC-EARTH_DMI… etc. des projets Cordex et Ensemble des domaines Europe et Afrique par Taibi et al. (Taibi et al., 2017) Zeroual et al. pour la partie algérienne (Zeroual et al., 2018) Bouziyne et al. (Youssef Brouziyne et al., 2018), Seifennasr et al. (Seif-Ennasr et al., 2016) pour la partie marocaine. La diminution des précipitations indiquée dans ces études est d'environ -10 à -40% sous les RCP 4.5 et 8.5, dont les pourcentages les plus prononcés sont indiqués sous le RCP 8.5. La température est également affectée par le changement climatique, avec une augmentation de 1 à 3 °C à l'échelle mensuelle (Youssef Brouziyne et al., 2018). Aussi, le débit n'est pas épargné par le changement climatique qui évoque une diminution de -30% du débit dans la région méditerranéenne dans le futur (AR4, 2007).

Cette étude vise à détecter les changements climatiques sur la période future (2020-2099) sur les composantes hydrologiques du bassin du Tafna par modélisation hydrologique et utilisation de modèles climatiques régionaux. L’approche développée dans cet article est

considérée pour le climat futur pour la période comprise entre 2020 et 2099. Cette dernière est divisée en quatre périodes 2020-2039; 2040-2059, 2060-2079 et 2080-2099 pour les comparer à la période de référence 1981-2000. Cette application utilise le modèle SWAT pour analyser l'évolution spatiale et temporelle du bilan hydrologique de l'eau sur le bassin du Tafna, pour les composantes hydrologiques SWAT (précipitations, débit de cours d'eau, ruissellement de surface, écoulement souterrain, teneur en eau du sol, évapotranspiration ... etc.). Les tendances sont présentées dans cette étude sous deux scénarios RCP (4,5 et 8,5) à une échelle mensuelle.

VII. 1. b. Principaux résultats

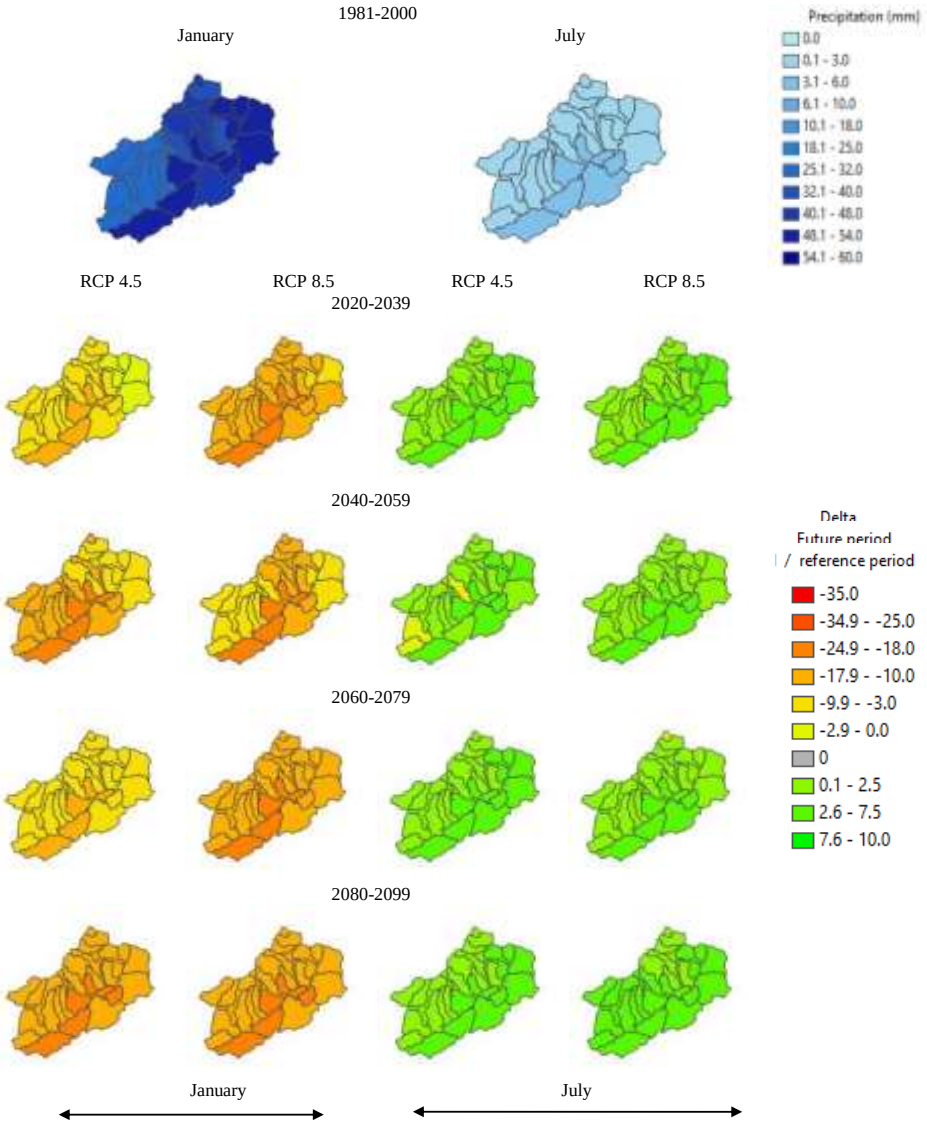


Figure 33. Précipitations mensuelles totales pendant la période de référence (1981-2000) et variations absolues pour les périodes (2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 et 2080-2099) sous RCP 4.5 et 8.5, pour janvier (gauche) et juillet (droite).

La présentation géographique donne plus d'informations sur la tendance des précipitations de l'ensemble des modèles sur le bassin du Tafna. Au mois de janvier, les précipitations dans la période de référence atteignent 60 mm dans la partie sud et est du bassin, dans la période future la diminution apparaît toute la période, et semble plus importante dans les zones montagneuses. Cependant, au mois de juillet, une augmentation, comprise entre 0,1 et 7,5 mm, est répartie sur le bassin par rapport à la période de référence.

VII. 1. c. Discussion des résultats de l'article

L'évaluation de l'évolution des composantes du bilan hydrique hydrologique est précédée par l'implantation d'un ensemble de modèles climatiques régionaux dans SWAT, pour représenter géographiquement le delta des tendances pour chaque composante SWAT. Ces modèles climatiques régionaux sont traités et non biaisés (Mami et al., Sous presse) par la méthode de cartographie de la distribution (Block et al., 2009; Chen et al., 2011; Fang et al., 2015; Teutschbein et Seibert, 2013 , 2012). L'étape de validation des modèles climatiques régionaux est produite par leur comparaison avec la série de données observées pour la période de référence (1981-2000). Les composantes SWAT issues des dix RCM utilisées dans cette étude donnent une représentation acceptable par rapport à celles résultant des ensembles de données observés. Ces résultats confirment la validation des RCM utilisées pour étudier la tendance de la composante SWAT sur le bassin du Tafna pour les deux mois de janvier et juillet. Cette validation nous permet d'utiliser l'ensemble des dix RCM pour étudier les tendances climatiques et hydrologiques dans le bassin du Tafna.

La région du Nord-Ouest de l'Afrique est caractérisée par un hiver humide et un été sec (Djilali Yebdri et al., 2007; Gevaert et al., 2018; Mami et al., Sous presse; Zettam et al., 2017), dans le étude de Xoplaxi (Xoplaki, 2002) le taux de précipitation équivaut à 40% en hiver de cette région et 10% en été dans la période passée. En plus de ces caractéristiques, Brouzyine et al. (Youssef Brouziyne et al., 2018) ont mentionné que les mois les plus affectés par le changement climatique dans le futur sont janvier par réduction des précipitations jusqu'à -49% et augmentation jusqu'à + 40% en juillet sous RCP 8.5 et l'augmentation significative de la la température est en janvier dans le bassin versant du R'dom (Maroc) près du bassin du Tafna, ce qui pourrait être des résultats comparables aux résultats obtenus dans cette étude. Par cela, les auteurs concentrent l'évaluation du changement climatique dans le futur sur les mois de janvier

et juillet, en tenant compte de la tendance du reste des mois et de leur influence sur ces deux mois.

L'évolution des précipitations a marqué une diminution au mois de janvier sur la période future avec un delta compris entre 1 et 24 mm (-2 à -40%), d'autres études peuvent confirmer cette diminution comme Zeroual et al. (2018) utilisant les RCM du projet Cordex-Africa, qui a mentionné que l'effet d'aridification sur l'hydrologie. D'autres études mentionnent également une diminution annuelle des précipitations, atteignant -30%, et plus significative selon le scénario RCP 8.5 (GIEC Working Group I et al., 2013; Jacob et al., 2014; Janpeter Schilling et al., 2012; Solomon S et al., 2007). Mais l'augmentation constatée en Juillet est de l'ordre de + 30% du delta, cette surestimation est également évoquée par Taibi et al. (2017) pour le Nord de l'Algérie par les RCMs du projet Ensemble. Le test de Mann-Kendall indique des tendances peu claires pour les RCMs. Brouzyine et al. (2018) ont obtenu des résultats quasi similaires (-40% pour janvier et + 30% pour juillet) pour le bassin R'dom situé à proximité du Tafna. Pour la deuxième période future 2040-2059, les résultats corroborent l'étude de Tramblay et al. (2013) par la réduction mensuelle des précipitations dans les mois de Janvier et Juillet de la période 2041-2062.

L'évolution du mois de janvier est représentative par rapport aux mois pluvieux de Novembre à Mars (voir les chiffres présentés dans le supplément), dont la diminution de ces mois suit la même tendance. Cependant, la surestimation des précipitations indiquée en été (les chiffres présentés dans le supplément) indique une augmentation des mois de Juillet, Août et Septembre et qui affecte toutes les composantes au cours des mêmes mois.

Dans la période future, la diminution des précipitations a un impact sur les composantes hydrologiques. Les tendances à la baisse des précipitations conduisent directement à une diminution du ruissellement de surface sur les sous-bassins du bassin versant du Tafna et du débit des cours d'eau et (-20 à -45%), possédant le même comportement d'évolution sous le scénario RCP 4.5 que celui de 8.5. Cependant, au mois de Juillet, la tendance est négligeable dans la période future, et elle est due à l'interception des précipitations dans le stockage de la canopée (Neitsch et al., 2005), par conséquent, cette eau est retenue dans le sol et disponible pour l'évapotranspiration. Dans les deux scénarios d'émission RCP 4.5 et 8.5, l'augmentation du

débit des cours d'eau commence à apparaître en août et septembre (chiffres du supplément) tandis que l'augmentation des précipitations commence en Juillet, ce qui implique que ces deux mois (Août et Septembre) sont compensé par le mois de juillet. La tendance évoquée en Janvier et à la hausse en Juillet dans le bassin du Tafna est également rapportée par Tramblay et al. (2013) dans la région marocaine (bassin du R'dom) près du bassin du Tafna.

En revanche, le flux latéral est également impacté par la baisse des précipitations et présente une baisse considérable au mois de Janvier autour de -35%, et une diminution moins importante au mois de Juillet. Cependant, la diminution est plus importante dans les mois de Février à Avril; le comportement de l'impact de la diminution des précipitations sur le débit latéral à l'échelle saisonnière est pour l'hiver considéré comme similaire à celui du mois de Janvier. Une augmentation est apparue après le mois de Juillet, précisément dans les mois d'Août, Septembre et octobre (chiffres présentés dans le supplément), cette augmentation est due à l'hypothèse d'un excès d'eau dans le sol soumis à des mouvements latéraux (Grusson, 2016) , qui sont compensés par le mois de Juillet.

Pour le mois de janvier, une diminution significative de l'eau du sol disponible affecte sur le bassin versant, au cours de la période future (jusqu'à -44%). La diminution de la disponibilité en eau du sol implique une diminution de l'évapotranspiration. Cette diminution impacte l'évapotranspiration, qui dépend de l'augmentation de la température et principalement de la disponibilité en eau du sol, ce qui confirme la baisse de l'évapotranspiration en Janvier. En revanche, l'augmentation de la teneur en eau du sol en Juillet est due à l'augmentation des précipitations estimée le même mois. Bien que l'évapotranspiration soit discutée par différentes études, elle augmente avec l'augmentation de la température (Blanco-Gómez et al., 2019; Dakhlaoui et al., 2020; Saddique et al., 2019), mais le facteur de précipitation est primordial. Nous pouvons confirmer la diminution de l'évapotranspiration influencée par la diminution des précipitations (en Janvier) et donc la diminution de l'eau du sol disponible. Bucak et al. (2017), Grusson et al. (2018) et Ertürk et al. (2014) expliquent également la diminution de l'évapotranspiration due au faible niveau de disponibilité en eau du sol causé par la diminution des précipitations et l'augmentation de la température. Concernant l'étude de Zittis et al. (2019), la légère augmentation des précipitations obtenue en Juillet pour la période future, affecte l'évapotranspiration par une légère augmentation le même mois.

La dépendance de l'évapotranspiration à la disponibilité en eau du sol est confirmée dans les chiffres présentés dans le supplément, dans les mois chauds de Juillet, août où l'augmentation de l'évapotranspiration apparaît en Août alors que l'eau du sol disponible semble plutôt un mois (Juillet). Cependant, pendant les mois chauds, l'eau disponible dans le sol commence à diminuer à partir de janvier et se propage jusqu'en juin, tandis que celle-ci est plus prononcée dans les mois de Mars, Avril et Mai en raison du taux élevé d'évapotranspiration pendant la période de référence pour ces mois, donc la baisse de l'évapotranspiration semble plus importante, ce taux élevé d'évapotranspiration est dû aux précipitations importantes marquées et la température maximale varie autour de 20 °C ce qui favorise l'évapotranspiration dans ces mois. Le mois de Janvier n'est pas significativement affecté par la température mais il est affecté par l'élément principal étudié dans ce travail; les précipitations pour évaluer l'impact du changement climatique.

Les études sur l'évaluation de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau sont moins nombreuses en Afrique du Nord-Ouest et en particulier au Nord-Ouest de l'Algérie, une zone considérée comme vulnérable au changement climatique dans les dernières décennies du XXe siècle (Meddi et al., 2010; Taibi et al., 2017). Il n'est pas simple de signaler ces composantes hydrologiques, cependant, cela a permis de présenter les évolutions attendues dans les mois subissant les changements les plus drastiques des précipitations. Cette étude est basée sur les volumes mensuels des composantes du bilan hydrique, et ne développant que les mois qui sont extrêmement différents en termes de précipitations et l'impact de l'évolution du climat est plus visible.

La distribution spatiale des effets du cycle hydrologique est liée aux zones environnantes. Elle se manifeste dans les principales composantes de l'eau (ruissellement de surface, débit des cours d'eau, précipitations, évapotranspiration et la teneur en dans le sol), les effets du changement climatique sont plus prononcés dans la partie sud du bassin, près du Sahara où la température est plus élevée et les précipitations sont plus faibles. La distribution de l'écoulement latéral dépend de la distribution spatiale des classes de pente dans le bassin, ce qui implique la relation proportionnelle avec l'écoulement latéral et les classes de pente.

Dans la période future, les composantes du cycle hydrlogique, les précipitations, le ruissellement, l'écoulement latéral et l'évapotranspiration, ne sont pas autant affectées par la diminution en Juillet, car pendant la période de référence, leurs valeurs sont déjà assez faibles et les RCMs surestiment la pluie en été notamment en Juillet et Août.

En terme périodique, les deux dernières périodes 2060-2079 et 2080-2099 sont plus impactées que les deux premières 2020-2069 et 2040-2059. En phase avec l'étude de Zittis et al. (2019), les précipitations dans la partie sud de la région méditerranéenne devraient diminuer pendant toutes les saisons. La diminution détectée dans cette étude, et qui sont en phase avec les différentes études citées ci-dessus, pourrait être similaire sur l'Afrique du Nord telle qu'elle est présentée dans l'étude de Bates et al. (2008) pour les précipitations, la teneur en eau du sol, le ruissellement et l'évapotranspiration. Alors que, dans le cinquième rapport du GIEC («AR5 Climate Change 2013: The Physical Science Basis - IPCC», 2013), les précipitations saisonnières sont plus importantes temporellement en hiver (DJF) avec une diminution de -30% qu'en été (JJA) avec une diminution comprise entre (-10 à -15)%, et spatialement en Afrique du Nord-Ouest selon le scénario SRES A1B à partir du CMIP3 (un scénario proche de celui du RCP 4.5 à partir du CMIP5 en terme de forçage radiatif). Mais à l'échelle annuelle, comme cela est présenté dans le cinquième rapport du GIEC, la teneur en eau du sol, le ruissellement et l'évaporation ont la même diminution dans tout le nord de l'Afrique.

VII. 2. Conclusion de l'article en français

Nous concluons à partir de cette étude que la diminution des pluies impacte le bilan hydrologique, du ruissellement à l'évapotranspiration, passant par l'écoulement latéral et la teneur en eau dans le sol du bassin versant de la Tafna. La diminution marquée dans cette étude est plus visible pendant le mois humide (Janvier) par rapport au mois sec (Juillet).

Concernant les scenarios RCP 4.5 et RCP 8.5 interprétés dans ce travail, nous pouvons donc affirmer que les tendances suivant le RCP 8.5 apparaissaient plus accentuées que celle du RCP 4.5, à partir de 2060 jusqu'à 2099.

VII. 2. a. Publication

L'article original est inséré dans les pages qui suivent.

Journal of Water and Climate Change

Spatio-temporal trends of hydrological components: case of the Tafna basin (North-western Africa)

--Manuscript Draft--

Manuscript Number:	
Article Type:	Research Paper
Section/Category:	Special Issue: Impact of Climate Change on the Hydrological Cycle
Corresponding Author:	Amina Mami, Ph.D student Universite des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf Oran, Oran ALGERIA
First Author:	Amina Mami, Ph.D student
Order of Authors:	Amina Mami, Ph.D student
	Djilali YEBDRI
	Sabine SAUVAGE
	Mélanie RAIMONET
	José Miguel SANCHEZ PEREZ
Abstract:	The drought stress is expected to increase in the future in the Mediterranean region including Algeria. The decrease of discharge and rainfall are mostly underlined in January. The Tafna basin is one of the most important catchment ensuring the water-self efficiency in North-western Algeria. The objective of this study is to evaluate the trends of hydrological components of the Tafna basin, throughout 2020-2099. The SWAT model is applied to analyse the spatial and temporal evolution of hydrological components, over the period 2020–2099, compared to the reference period (1981-2000), using ten RCMs of Cordex Africa project. The results show that the decrease of rainfall in January reaches -40% over the future period (2020-2099). This diminution affects all water components and fluxes of a watershed namely in descending order of impact: the soil water available causing a decrease reaching -44%, the river discharge -41%, the lateral flow -34%, and the evapotranspiration -33%.
Full Title:	Spatio-temporal trends of hydrological components: case of the Tafna basin (North-western Africa)
Additional Information:	
Question	**Response**
Please explain why this paper is of interest to readers of *Journal of Water and Climate Change*.	The paper should be of interest to readers of Journal of Wtaer and Climate Change and especially those in the areas of Northern Africa and Mediterranean and also basin with semi-arid character. This paper treat an ensemble of items such as impact of climate change, investigation of trends using RCMs, modelling hydrological cycle with a conceptual tool: the SWAT model.
HIGHLIGHTS: Please list up to 5 numbered points that briefly describe the significance (in terms of innovation and contribution to the knowledge base) of this research. Note that the highlights should help increase the discoverability of your article. Ensure the highlights are concise, easy to	- Impact of climat change in Northern Africa; -Modeling a semi-arid watershed using SWAT model; -Evaluation of the influence of decline rainfall on the hydrological cycle; -The use of RCMs of Cordex project, domain Africa; -Investigation of climatic trends at monthly scale.

Powered by Editorial Manager® and ProduXion Manager® from Aries Systems Corporation

Manuscript

Click here to access/download;Manuscript;Article Amina MAMI- Jo of WCC-IWA without fig and tab.docx

Spatio-temporal trends of hydrological components: case of the Tafna basin (North-western Africa)

Amina MAMI [1,2,*], Djilali YEBDRI [1], Sabine SAUVAGE [2], Mélanie RAIMONET[2] and José Miguel SANCHEZ PEREZ[2,*]

[1] LGTE, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran « Mohamed Boudiaf », Oran, Algérie

2 Laboratoire Ecologie fonctionnelle et Environnement, UMR 5245, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse, France

* mami.amina89@yahoo.fr; amina.mami@univ-usto.dz; jose-miguel.sanchez-perez@univ-tlse3.fr; Tel: +213-778-696-894.

Abstract: The drought stress is expected to increase in the future in the Mediterranean region including Algeria. The decrease of discharge and rainfall are mostly underlined in January. The Tafna basin is one of the most important catchment ensuring the water-self efficiency in North-western Algeria. The objective of this study is to evaluate the trends of hydrological components of the Tafna basin, throughout 2020-2099. The SWAT model is applied to analyse the spatial and temporal evolution of hydrological components, over the period 2020–2099, compared to the reference period (1981-2000), using ten RCMs of Cordex Africa project. The results show that the decrease of rainfall in January reaches -40% over the future period (2020-2099). This diminution affects all water components and fluxes of a watershed namely in descending order of impact: the soil water available causing a decrease reaching -44%, the river discharge -41%, the lateral flow -34%, and the evapotranspiration -33%.

Keywords: Rainfall; Tafna basin; Cordex-Africa; SWAT; hydrology.

Introduction

Climate change affects the water supply necessary for drinking, industrial or agricultural activities. The water supply is impacted by the decline of rainfall and increase of temperature, which might handle the social and economic sectors and lead to serious droughts in some regions such is the example of the Mediterranean region ("AR5 Climate Change 2013: The Physical Science Basis — IPCC," 2013, p. 5; Roz Price, 2017). The drought in the Mediterranean region is caused by the decrease of rainfall (IPCC Working Group I et al., 2013; Jacob et al., 2014; Janpeter Schilling et al., 2012; Solomon S et al., 2007; Youssef Brouziyne et al., 2018; Zeroual et al., 2018) which is expected to reach -40% in the future as in the last decades of the 20th century. In this region, the Tafna basin is one of the most important catchment ensuring the water-self efficiency in the Northwestern Algeria (Zettam et al., 2017). Nevertheless, Arnell (1999) mentions that the level of water resource stress in Algeria is medium (-20 to -40% of Use/ water resource ratio) in the last decade of 20th century, and becomes high for the future period (2025-2085).

The impacts of climate change interests Scientifics in Northern Africa in the lasts decades of 20th century, the decline of rainfall and increase of temperature are noticed (Arnell N. W. et al., 2003; Zettam et al., 2017), the decrease of precipitation detected in the North-western of Algeria is estimated to -25% in 1970 Compared to the period of the last half-century (Arnell, 1999; Knippertz et al., 2003), which is predicted the increase of the vulnerability of this semi-arid region as regards water stress. Some studies already mentioned that the flow decreased until 60% in the decade of 1970 evaluated by studies done from 1930 to 1998 (Meddi et al., 2010; Taibi et al., 2017).

The diminution of rainfall affects river discharge, runoff, soil water availability and evapotranspiration. As in the southern part of the Mediterranean region, the decrease of runoff, discharge and rainfall are underlined mainly in winter (Arnell, 1999; Burek et al., 2019; Naumann et al., 2018; Youen Grusson et al., 2018; Youssef Brouziyne et al., 2018; Zeroual et al., 2018). Groundwater is also impacted, but it is difficult to separate the role of climate change and local anthropogenic interferences (Green, 2016; Kundzewicz and Doll, 2009; Taylor et al., 2011; Youen Grusson et al., 2018). All of those components are connected and the change of one of them could interfere with the other one (Youen Grusson et al., 2018), as evapotranspiration and soil water content are strongly linked (Calanca et al., 2006; Jung et al., 2010; Manabe et al., 2004; Verrot and Destouni, 2016; Youen Grusson et al., 2018).

The North-western region of Africa is characterized by a wet winter and a dry summer (Djilali Yebdri et al., 2007; Gevaert et al., 2018; Zettam et al., 2017). From this notice, the authors point out the purpose of this study, to treat the evolution of hydrological water balance and impact of climate changes at monthly scale for the future period (2020-2099) for two months having different climate characteristics, January a wet and a cold month and July a dry and warm month, and taking into consideration the evolution of climate change during the rest of months. In the future period Brouzyine (Youssef Brouziyne et al., 2018) mentioned that the months mostly affected by climate change are January for rainfall and July for temperature in the R'dom watershed (Morocco), near to the Tafna basin and having a similar climate charachteristics.

As noticed by Zettam et al. (2017) and Todini et al. (2007), hydrological models are useful for diverse objectives such as decisions: of water resource management, urban planners and administrations (Noori and Kalin, 2016). Different distributed physically-based models are able to simulate temporal and spatial variations of hydrological processes and figure out the influence of land use impacts (Lin et al., 2015). Among those models, there is VIC (Liang et al., 1994); IHDM (Beven et al., 1987); WATFLOOD (N. Kouwen et al., 1993); SHE (Abbott et al., 1986), etc.

On the other hand, the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (J. G. Arnold et al., 1998) is used for a supplementary functionality as assessing: Agricultural management practices (Moriasi et al., 2011), Hydrology and sediment transfer (Gassman et al., 2014; J. G. Arnold, et al., 1998) and evaluating the impacts of climate change (Singh and Gosain, 2011). Numerous studies have utilized SWAT in semi-arid watersheds, such as in Southern Australia (Shrestha et al., 2016), Spain (Molina-Navarro et al., 2014), Brazil (Santos et al., 2019) and Northern Africa (Bouraoui et al., 2005; Djilali Yebdri et al., 2007; Sellami et al., 2016; Zettam et al., 2017) and others for assessing climate change (Jin et al., 2016; Nerantzaki et al., 2015; Saddique et al., 2019; Yanjie et al., 2015; Youen Grusson et al., 2018; Youssef Brouziyne et al., 2018; Zhe Yuan et al, n.d.).

Different recent studies use regional climate models to investigate climate change in North of Africa, as in the western part, using RCMs of CNRM-CM5, IPSL-IPSL-CM5A-MR, ICHEC-EC-EARTH_DMI…etc of projects Cordex and Ensemble domains Europe and Africa by Taibi et al. (Taibi et al., 2017) Zeroual et al. for Algerian part (Zeroual et al., 2018) Bouziyne et al. (Youssef Brouziyne et al., 2018), Seifennasr et al. (Seif-Ennasr et al., 2016) for Moroccan part. The decrease of precipitation indicated in these studies is around -10 to -40% under RCPs 4.5 and 8.5, whose the most pronounced percentages are shown under the RCP 8.5. The

temperature is also affected by climate change, with an increase between 1 to 3 °C at monthly scale (Youssef Brouziyne et al., 2018). Also, the flow is not spared from the climate change which is mentioned a decrease of -30% of the flow in the Mediterranean region in the future (AR4, 2007).

This study aims to detect climate change over the future period (2020-2099) on hydrological components of the Tafna basin by hydrological modeling and using regional climate models. The approach developed in this article is considered for future climates for the period ranged at interval of 2020 to 2099. The latter is divided into four periods 2020-2039; 2040-2059, 2060-2079 and 2080-2099 to compare them to the reference period 1981-2000. This application uses the SWAT model to analyse the spatial and temporal evolution of hydrological water balance over the Tafna basin, for hydrological SWAT components (rainfall, river discharge, runoff, subsurface flow, soil water content, evapotranspiration...etc). The trends are presented in this study under two RCP scenarios (4.5 and 8.5) at a monthly scale.

Materials and Methods

Study area

The transboundary Tafna watershed is situated in the North-west of Algeria and 30% of its surface area is situated in the North-eastern part of Morocco (Djilali Yebdri et al., 2007). It represents one of the most important basins of the Oranie-chott-chergui region according to the classification of the Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH: National water resources Agency) (Agence Nationale des Ressources Hydriques, 1981). The area of Tafna basin is 7245 Km² and flows into the Mediterranean Sea near Beni-saf city (Figure 1).

Meteorological datasets

The meteorological and hydrometric datasets are represented in the figure 2, constitutes a monthly variation of precipitation, minimum/minimum temperature and river discharge in the reference period 1981-2000, these meteorological and hydrometric datasets are collected by the National Agency of the meteorology of Algeria.

Situated between the Mediterranean Sea and the Sahara desert, the climate is semi-arid characterized by wet winters and hot and dry summers. Annual mean temperature varies between 11°C in winter and 28°C in summer, and annual precipitations range from 220 to 673 mm/yr during 1981-2000 (Agence Nationale des Ressources Hydriques, 1981; Mami et al., in press). For the past period 1981-2010, monthly mean precipitation and minimum/maximum temperature in the Tafna basin are specified in Figure 2. The precipitations are almost negligible in summer (from June to September), not exceeding 10 mm, and varies between 20 and 60 mm in winter. While the maximum monthly temperature reaches 33°C in summer, the minimum monthly temperature in winter can decrease until 2°C (figure 2).

There are five dams in the Tafna basin: Beni Bahdel (built in 1952 across Oued Khmis and Oued Tafna, with capacity of 63Mm3), Mefrouche (1963, O. Meffrouche, 15Mm3), Sidi Abdely (1988, O. Isser, 110Mm3), Boughrara (1998, O. Mouilah, 177 Mm3) and Sikak (2005, O. Sikkak, 27Mm3) with a total capacity of 398 Hm3 (ANBT, 2015; Mami et al., in press;

Yebdri, 2006). The flow recorded during the studied period (1981-2000) is ranged on average between 0 and 10 m3/s (Agence Nationale des Ressources Hydriques, 1981).

Regional climate model outputs

Ten regional climate model outputs of precipitation and air temperature from the CORDEX-Africa project ("CORDEX Data Search | CORDEX | ESGF-CoG," n.d.) are used in this work (Table 1). Two regional climate models (RCM) are employed and forced with 8 different global climate models (GCM): the regional climate model CCLM4-8-17 is forced by EC-EARTH and CNRM-CM5, and RCA4 is forced by EC-EARTH, CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR, CCCma-CanESM2, MIROC, MPI-ESM-LR, NCC-NorESM1, and NOAA/ GFDL-ESM2M. The grid spacing of RCMs used in this study is 0.44 degrees (50 km of resolution). The reference period is the period with available observations (1981-2000). These RCMs are extracted and bias-corrected by the CMhyd software (Hendrik Rathjens et al., 2016), using the distribution mapping method for correcting both precipitation and air temperature, the performance of bias-correction used in this study is detailed in the previous study (Mami et al., in press).

Hydrological modelling

SWAT model is made for hydrological modeling watersheds varying from a few hundred to multiple thousand square kilometers (Zettam et al., 2017), which is the case of the Tafna basin (7245 km²). The application is divided into two steps: (1) the conception, calibration, and validation of the SWAT model for the Tafna basin detailed in the previous study (Mami et al., in press) during the period (1981-2000), and (2) the run of the model forced with a set of bias-corrected RCMs outputs to evaluate the future climatic and hydrologic components evolutions (2020-2099).

The inputs introduced into the SWAT model in order to produce the hydrological modeling and calibrate the Tafna project are: the digital elevation model (DEM) is introduced into SWAT with a resolution of 30 x 30 m to define the basin and delineate the sub-basins (in this study: 33 sub-basins for an area of 7245 km²) and the river channel network, the maps soil and land use are insert to characterize, joined to DEM, each Hydrological response unit (HRU). The slope classes are derived from DEM (four classes: 5%, 15%, 30%, and upper of 30%) (Mami et al., in press). The daily precipitation and minimum/maximum temperature datasets from five weather stations are employed for 1981-2010 to run the SWAT model. For the calibration and validation of the model, measured discharge from four hydrometric stations, obtained from the National Agency of water resources (ANRH) are used at monthly scale for the period 1981 to 2010. Additional information of datasets can be found in the table 2.

The hydrological modelling is proceeded by the application of SWAT hydrological model with version 2012 an ArcGIS interface (version 10.2). The Tafna hydrological model is calibrated and validated at the monthly scale, for the past period (1981-1995, 1996-2010) respectively including three years of warm-up period in the calibration period (Table 4), using SWAT-CUP (SWAT calibration and uncertainty procedures) (Abbaspour, K.C., 2013; Djilali Yebdri et al., 2007; Zettam et al., 2020, 2017) with SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting 2) algorithm (Abbaspour et al., 2004). For a detailed description of the performance of calibration and validation of the SWAT model in the case of the Tafna basin, the reader can referred to (Mami

et al., in press). The correlation between measured and simulated discharge observed and simulated is from satisfactory (station C with NSE = 0.54) to very good (station D with NSE = 0.84). The correlation at station A is only unsatisfactory during the validation step (NSE = 0.21).

Performance of RCMs outputs on SWAT model

This application is made for the hydrological SWAT components: precipitation, discharge, runoff, subsurface flow (lateral flow), soil water content and evapotranspiration.

In a first step, and after calibrating the SWAT model on Tafna basin, the 10 RCMs outputs (precipitation and air temperature) are introduced into SWAT to run the model. The SWAT components outputs of the ten RCMs, presented in this study, are compared to those of observation during the reference period (1981-2000) (figure 4). This step permits us to validate the RCMs used in this study, and investigate the trends of water cycle components at Tafna watershed-scale over the future period (2020-2099).

In a second step, the application of Mann-Kendall test (Henry B. Mann, 1945) is performed for each RCM on the two months: January and July to identify the significant trends over the periods concerned (reference and future). This application precedes the comparison of the future periods (2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 and 2080-2099) to the reference period (1981-2000) by estimating the delta existing between the future periods (every 19 years listed before) and the reference one (1981-2000) (the absolute variation). The delta computed between the future and reference periods is used to investigate the spatial distribution of each water cycle component at the Tafna basin, over the future period and understand the impact of climate changes in the region at periodic scale (for the periods 2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 and 2080-2099).

$$\Delta 1 = (2020 - 2039)_{\text{future period}} - (1981 - 2000)_{\text{reference period}}$$

With Δ: the difference between the variable in of the future period and that of the reference period, for each water cycle components (river discharge, precipitation, runoff, lateral flow, soil water content and evapotranspiration) in mm/year (in mean) for the months January and July. This application is produced for each future period from the first one 2020-2039 to the fourth and last one 2080-2099.

Results

An evaluation of the similarity between SWAT components outputs of the ten RCMs outputs, of Cordex Africa project, used in this study is presented in the figure 3. That shows concordance for the majority of RCMs. The similarity between the models is more suitable in the month of January. That can lead to precede the evaluation of trends at the Tafna watershed-scale over the future period (2020-2099).

The table 4 illustrates the evolution of monthly precipitation from the reference period (1981-2000) to the projected period (divided to 4 future periods: 2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 and 2080-2099). Considerable difference is detectable between the months January and July.

During January, the tendency of precipitation is divided between the models over the period studied, except, under RCP 4.5 and 8.5, that belongs to significant decrease from the periods 2080-2099, 2060-2079 and 2080-2099 until 24 mm. The geographic presentation in figure 4 gives more information about the tendency of precipitation of the ensemble of models over the Tafna basin. In the month of January, the precipitation in the reference period attains 60mm in the Southern and Eastern part of the basin, in the future period the decrease appears all the period, and seems more important in mountainous areas. However, in the month of July, an increase, ranged between 0.1 to 7.5 mm, is distributed over the basin compared to the reference period.

The ratio increase/decrease is balanced while the decrease of discharge appears significant in the periods 2040-2059 and 2080-2099 under RCP4.5 and the two last periods 2060-2079, 2080-2099 under RCP8.5 according to the Mann-Kendall test. This significant decrease is also marked in the figure 5.

Figure 6 shows a decrease in runoff high in January for the periods 2040-2059 and 2080-2099 under RCP4.5 and 2020-2039, 2060-2079, and 2080-2099 under RCP8.5. For the month of July the positive delta marked in the basin is negligible, not exceeding 1 mm. For the rest of the future period, the ratio of increase/ decrease is balanced between models (table 6), and some models give a poor significance of tendency, because the p-values are high.

The subsurface flow decreases in the majority of periods for both RCP4.5 and 8.5, especially in the eastern part of the basin (Figure 7). The results of Mann-Kendall test shown in the table 7 indicate that the RCMs having a significant decrease of lateral flow overpass those of significant increase, for both January and July over the future period.

Significant decrease of soil water content appears for the month of January, over the future period from 2020-2039 to 2080-2099 (Figure 8). Most of models indicate a significant decrease trend according to the Mann-Kendall test (table 8).

For the month of July, the reference period presents low rates not exceeding 2 mm, which implies no clear trends for the future period (table 8), and a minimal delta almost negligible (figure 8).

Concerning the evapotranspiration, in January a decrease is marked for the majority of RCMs in table 9, and appears also in figure 9, which is more pronounced under RCP 8.5 than RCP 4.5. Negative values of the delta are growing from the first period 2020-2039 to the last one 2080-2099. However, the low values in reference period for July, the ratio between increase/decrease in balanced, and the delta are varied between (-5 mm and +3 mm) over the basin.

Discussion

The SWAT model is performed for studying the impact of climate change on hydrological water balance components. The SWAT model implanted on the Tafna basin is calibrated and validated during the periods respectively 1981-1995 and 1996 – 2010 (Mami et al., in press), on multi-gauge stations in the watershed and has a very good Nash (Knoben et al., 2019) and KGE at the outlet . These results confirm that multi-sites calibration is useful to perform well the model despite the heterogeneity of the watershed (Jianwen Bai et al., 2017; Olkeba Tolessa Leta

et al., 2017; Rewati Niraula et al., 2012; Youen Grusson et al., 2018; Zettam et al., 2017). The assessment of the hydrological water balance is based on the calibration of the model on river discharge values only because no data is accessible with a sufficient temporal and spatial resolution for the other hydrological components. The hydrological water balance resulting from SWAT project is positively validated against the cartographies of hydrological water balance published by ANRH (National Agency of Hydrologic Resources (ANRH)., 2003a; National Agency of Hydrologic Resources (ANRH), 2003; National Agency of Hydrologic Resources (ANRH)., 2003b) for the period 1965-2003 and also Meddi et al., (2016), regarding rainfall (SWAT values =314 mm/yr, ANRH values = 250 – 550 mm/yr), runoff (SWAT values = 19 mm/yr, ANRH values = 10 – 100 mm/yr) and potential evapotranspiration (SWAT values = 1260 mm/yr, ANRH values =900 – 1400 mm/yr) (Mami et al., in press). The Tafna basin is characterized by very irregular flow with frequent dry summer, implying very limited permanent reserves (Olkeba Tolessa Leta et al., 2017; Youssef Brouziyne et al., 2018).

The assessment of the evolution of hydrological water balance components is preceded by the implantation of an ensemble of regional climate models into SWAT, to represent geographically the delta of trends for each SWAT component. These regional climate models are treated and unbiased (Mami et al., in press) by the method of distribution mapping (Block et al., 2009; Chen et al., 2011; Fang et al., 2015; Teutschbein and Seibert, 2013, 2012). The validation step of the regional climate models is produced by their comparison to the observed datasets for the reference period (1981-2000). The SWAT components resulted from the ten RCMs used in this study give an acceptable representation compared to those resulting from observed datasets. These results confirm the validation of the RCMs used to study the tendency of SWAT component on the Tafna basin for the two months January and July. This validation allows us to use the ensemble of the ten RCMs to study the climatic and hydrologic trends in the Tafna basin.

The North Western region of Africa is characterized by a wet winter and a dry summer (Djilali Yebdri et al., 2007; Gevaert et al., 2018; Mami et al., in press; Zettam et al., 2017), in the study of Xoplaxi (Xoplaki, 2002) the rate of precipitation is equivalent to 40% in winter of this region and 10% in summer in the past period. In additional of these characteristics Brouzyine et al. (Youssef Brouziyne et al., 2018) mentioned that the most months affected by the climate change in the future are January by reduction of the rainfall until -49 % and increase until +40% in July under RCP 8.5 and the significant increase of the temperature is in January in the R`dom watershed (Morocco) near to the Tafna basin, which could be comparable results to the results obtained in this study. By that, the authors focus the assessment of climate change in the future on the months of January and July, and taking into consideration the tendency of the rest of months and their influence on these two months.

The rainfall evolution marked a decrease in the month of January over the future period with delta ranging between 1 and 24 mm (-2 to -40 %), other studies can confirm this decrease as Zeroual et al. (2018) using RCMs of Cordex-Africa project, who mentioned that the aridification effect on hydrology. Other studies mentioned also an annual decrease in precipitation, reaching -30%, and more significant under RCP 8.5 scenario (IPCC Working Group I et al., 2013; Jacob et al., 2014; Janpeter Schilling et al., 2012; Solomon S et al., 2007). But the increase shown in July is around to +30% of the delta, this over-estimation is also mentioned by Taibi et al. (2017) for the Nord of Algeria by the RCMs of Ensemble project. The Mann-Kendall test indicates unclear trends for the RCMs. Brouzyine et al. (2018) obtained

almost similar results (-40% for January and +30% for July) for basin R'dom situated near to the Tafna. For the second future period 2040-2059, the results corroborate the study of Tramblay et al. (2013) by the monthly reduction of precipitation in months January and July in the period 2041-2062.

The evolution of the month January is representative in relation to the rainy months from November to Marsh (please see the figures presented the supplement), which the decrease in those months follow the same tendency. However, the over-estimation of precipitation shown in summer (the figures presented in the supplement) indicates an increase in months July, August and September and that affects all of components in the same months.

In the future period, the decrease in rainfall has an impact on hydrological components. The precipitation decreasing trends directly lead to decreasing the surface flow on the sub-basins of the Tafna watershed and river discharge and (-20 to -45 %), possessing the same behavior of evolution under RCP 4.5 scenario as the one of 8.5. However, in the month of July the tendency is negligible in the future period, and it is due to the interception of the precipitation in the canopy storage (Neitsch et al., 2005), therefore, this water is retained in the soil and made available for the evapotranspiration. Under the two emission scenarios RCP 4.5 and 8.5 the increase of river discharge starts to appear in the of August and September (figures in the supplement) while the increase in precipitation starts in July, that implies the these two months (August and September) are compensated by the month of July. The tendency mentioned in January and increase in July in the Tafna basin is also reported by Tramblay et al. (2013) in the Moroccan region (R'dom basin) near the Tafna basin.

On the other hand, the lateral flow (subsurface flow) is also impacted by the decrease of rainfall and presents a considerable decrease in the month of January around to -35%, and a less significant decrease in the month of July. However, the decrease is more important in the months February to April; the behavior of the impact of the decrease in rainfall on the lateral flow at seasonal scale is for the winter considered similar to that of the month of January. An increase is appeared after the month of July months precisely in the August, September and October (figures presented in the supplement), this increase is due to hypothesis of the excess of water in the soil is subject to lateral movements (Grusson, 2016), which are compensated by the month of July.

For the month of January, a significant diminution of soil water available affects over the watershed, during future period (until -44%). The decrease of soil water availability implicates a decrease of evapotranspiration. This decrease impacts the evapotranspiration, which depends on the increase of temperature and primordially on soil water availability, which confirms the decline of evapotranspiration in January. On the other hand, the increase of soil water content in July is due to the increase of precipitation estimated in the same month. Although evapotranspiration is discussed by different studies that it increases by the increase of temperature (Blanco-Gómez et al., 2019; Dakhlaoui et al., 2020; Saddique et al., 2019), but the precipitation factor is primordial. We can confirm the decrease on evapotranspiration influenced by the decrease of precipitation (in January) and therefore the decrease of the soil water available. Bucak et al.(2017), Grusson et al.(2018) and Ertürk et al. (2014) explain also the decrease of evapotranspiration due to the low level of soil water availability caused by the decrease of precipitation and increase of temperature. Regarding the study of Zittis et al. (2019), the slight precipitation increase obtained in July for the future period, affect the evapotranspiration by a small increase in the same month.

The dependence of the evapotranspiration to the soil water availability is confirmed in the

figures presented in the supplement, in warm months July, August which the increase of the evapotranspiration appears in August while the soil water available is seemed one month rather (July). However, in the warm months the soil water available starts to decrease from January and spreads until June, while the is more pronounced in the months of Marsh, April and May because of the elevated rate of evapotranspiration in the reference period for these months, therefore the decline of evapotranspiration seems more significant, this elevated rate of evapotranspiration is due to the considerable rainfall marked and the maximum temperature varies around 20°C which favours the evapotranspiration in these months. The month of January is not significantly affected by the temperature but it is affected by the main element studied in this work; the precipitation to assess the impact of climate change.

The evaluation of the impact of climate change studies on the water are fewer in Northwestern Africa and particularly Northwestern Algeria, a zone considered vulnerable to climate change in the lasts decades of the twentieth century (Meddi et al., 2010; Taibi et al., 2017). It is not simple to point out those hydrological components, however, this made it possible to present to evolutions expected in the months undergoing the most drastic changes in precipitation. This study is based on monthly volumes of water balance components, and developing only the months which are extremely different in term of rainfall and the impact of climate evolution is more visible.

The spatial distribution of water cycle effects is related to the surrounding areas. It is shown in the major water components (surface flow, ricer discharge, precipitation, evapotranspiration, and soil water available), the effects of climate change are more pronounced in the southern part of the basin, close to the Sahara where the temperature is higher and precipitation is lower. The distribution of the subsurface flow depends to the spatial distribution of slope classes in the basin, which implies the proportional relation with the subsurface flow and the slope classes.

In the future period, the water cycle components, precipitation, runoff, lateral flow, and evapotranspiration, are not so affected by the decrease in July, because during the reference period, their values are already quite low, and the RCMs over-estimate the rainfall in summer particularly in July and August..

In periodic term, the lasts two periods 2060-2079 and 2080-2099 are more impacted than the two first ones 2020-2069 and 2040-2059. In tune with the study of Zittis et al. (2019) the precipitation in the Southern part of the Mediterranean region is projected to decrease during all seasons. The decrease detected in this study, and which are in tune with different studies cited above, might be similar over the Nord Africa as it is presented in the study of Bates et Al. (2008) for precipitation, soil water content, runoff and evapotranspiration. Whereas, in the fifth report of IPCC ("AR5 Climate Change 2013: The Physical Science Basis — IPCC," 2013), the seasonal precipitation is more important temporally in winter (DJF) with a decrease of -30% than summer (JJA) with decrease ranged between (-10 to -15)%, and spatially in the Northwestern Africa under the SRES A1B scenario from CMIP3 (a scenario close to that of RCP 4.5 from CMIP5 in term of radiative forcing). But at the annual scale, as is presented in the fifth report of IPCC , the soil moisture, runoff and evaporation have the same decrease throughout the North of Africa.

Conclusion

For the purpose to understand and spatially present the behaviour of hydrological water balance evolution, in the future period, the regional models unbiased are implanted into the SWAT model for Tafna basin. The present study displays spatially trends of SWAT water components for two months (January and July) and under two pathway scenarios (RCP 4.5 and 8.5).

The calibration and validation of the SWAT model are done successfully over the observation period (1981-2011), compared to the cartographies of hydrological water balance published by ANRH. This application aims to prepare the project for analyzing the evolution of SWAT outputs running with RCMs of Cordex-Africa as inputs.

From this study, the others conclude that the decline of rainfall impacts the hydrological water balance, from the surface runoff and the evapotranspiration passing by lateral flow and soil water content of the Tafna basin. This decrease marked is more visible in the wet month of January than the dry month of July. Concerning the Pathways scenarios interpreted in this study (RCP 4.5 and 8.5), one would thus affirm that the trends RCP 8.5 appear more pronounced than RCP 4.5, from 2060 to 2099.

Author Contributions: Amina Mami, Djilali Yebdri, Sabine Sauvage and José Miguel Sánchez-Pérez conceived and designed the experiments; Amina Mami performed the experiments; Amina Mami, Djilali Yebdri, Sabine Sauvage, Mélanie Raimonet and José Miguel Sánchez-Pérez analyzed the results; Amina MAMI, Djilali Yebdri, Sabine Sauvage, Mélanie Raimonet and José Miguel Sánchez-Pérez wrote the paper.

Acknowledgments: The authors wish to thank Algerian institutions (Agence Nationale des Ressources Hydriques, Office National de Météorologie) for providing data series; author's stay in France was made possible thanks to a scholarship from "National Exceptional Program" (PNE-2017) awarded by the Ministry of Higher Education and Scientific Research of Algeria ; The laboratory of ecology environmental is gratefully acknowledged for its support of this research project; Eleni Katragkou from group of Cordex.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

Abbaspour, K.C., 2013. SWAT-CUP 2012: SWAT Calibration and Uncertainty Programs—A User Manual.

Abbaspour, K.C., Johnson, C.A., van Genuchten, M.T., 2004. Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure. Vadose Zone J. 3, 1340–1352. https://doi.org/10.2136/vzj2004.1340

Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E., Rasmussen, J., 1986. An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. J. Hydrol. 87, 45–59. https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90114-9

Agence Nationale des Ressources Hydriques, 1981. Daily data Flow in the North of Algeria.

ANBT, 2015. Agence National des Barrages et Transferts.

AR4, 2007. AR4 Climate Change 2007: Synthesis Report — IPCC [WWW Document]. URL https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/ (accessed 1.6.20).

AR5 Climate Change 2013: The Physical Science Basis — IPCC [WWW Document], 2013. URL https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/ (accessed 2.11.19).

Arnell N. W., Hudson D. A., Jones R. G., 2003. Climate change scenarios from a regional climate model: Estimating change in runoff in southern Africa. J. Geophys. Res. Atmospheres 108. https://doi.org/10.1029/2002JD002782

Arnell, N.W., 1999. Climate change and global water resources. Glob. Environ. Change 9, S31–S49. https://doi.org/10.1016/S0959-3780(99)00017-5

ASTER Global Digital Elevation Map [WWW Document], n.d. URL https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp (accessed 5.11.20).

Bates, B., Kundzewicz, Z.W., Wu, S., Palutikof, J. (Eds.), 2008. Climate change and water, Intergouvernmental panel on climate change. ed, IPCC Technical Paper; 6.

Beven, K., Calver, A., Morris, E.M., 1987. The Institute of Hydrology distributed model [WWW Document]. URL http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/5977/ (accessed 12.3.19).

Blanco-Gómez, P., Jimeno-Sáez, P., Senent-Aparicio, J., Pérez-Sánchez, J., 2019. Impact of Climate Change on Water Balance Components and Droughts in the Guajoyo River Basin (El Salvador). Water 11, 2360. https://doi.org/10.3390/w11112360

Block, P.J., Filho, F.A.S., Sun, L., Kwon, H.-H., 2009. A Streamflow Forecasting Framework using Multiple Climate and Hydrological Models1. J. Am. Water Resour. Assoc. 45, 828–843. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2009.00327.x

Bouraoui, F., Benabdallah, S., Jrad, A., Bidoglio, G., 2005. Application of the SWAT model on the Medjerda river basin (Tunisia). Phys. Chem. Earth Parts ABC, Assessment of Anthropogenic Impacts on Water Quality 30, 497–507. https://doi.org/10.1016/j.pce.2005.07.004

Bucak, T., Trolle, D., Andersen, H.E., Thodsen, H., Erdoğan, Ş., Levi, E.E., Filiz, N., Jeppesen, E., Beklioğlu, M., 2017. Future water availability in the largest freshwater Mediterranean lake is at great risk as evidenced from simulations with the SWAT model. Sci. Total Environ. 581–582, 413–425. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.149

Burek, P., Satoh, Y., Kahil, T., Tang, T., Greve, P., Smilovic, M., Guillaumot, L., Wada, Y., 2019. Development of the Community Water Model (CWatM v1.04) A high-resolution hydrological model for global and regional assessment of integrated water resources management. Geosci. Model Dev. Discuss. 1–49. https://doi.org/10.5194/gmd-2019-214

Calanca, P., Roesch, A., Jasper, K., Wild, M., 2006. Global Warming and the Summertime Evapotranspiration Regime of the Alpine Region. Clim. Change 79, 65–78. https://doi.org/10.1007/s10584-006-9103-9

Chen, J., Brissette, F.P., Leconte, R., 2011. Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. J. Hydrol. 401, 190–202. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.02.020

CORDEX Data Search | CORDEX | ESGF-CoG [WWW Document], n.d. URL https://esg-dn1.nsc.liu.se/search/cordex/ (accessed 10.30.18).

Dakhlaoui, H., Seibert, J., Hakala, K., 2020. Sensitivity of discharge projections to potential evapotranspiration estimation in Northern Tunisia. Reg. Environ. Change 20, 34. https://doi.org/10.1007/s10113-020-01615-8

Djilali Yebdri, Mohamed Errih, Abdelkader Hamlet, Abdellatif El-Bari Tidjani, 2007. The Water Resources Management Study of the Wadi Tafna Basin (Algeria) Using the Swat Model. Afr. Water J. 1, 33–47.

Ertürk, A., Ekdal, A., Gürel, M., Karakaya, N., Guzel, C., Gönenç, E., 2014. Evaluating the impact of climate change on groundwater resources in a small Mediterranean watershed. Sci. Total Environ. 499, 437–447. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.001

Fang, G.H., Yang, J., Chen, Y.N., Zammit, C., 2015. Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in China. Hydrol Earth Syst Sci 19, 2547–2559. https://doi.org/10.5194/hess-19-2547-2015

FAO (Harmonized World Soil Database), n.d.

Gassman, P.W., Sadeghi, A.M., Srinivasan, R., 2014. Applications of the SWAT Model Special Section: Overview and Insights. J. Environ. Qual. 43, 1–8. https://doi.org/10.2134/jeq2013.11.0466

Gevaert, A., Veldkamp, T., Ward, P., 2018. The effect of climate type on timescales of drought propagation in an ensemble of global hydrological models. Hydrol. Earth Syst. Sci. 22, 4649–4665. https://doi.org/Gevaert A, Veldkamp T <http://pure.iiasa.ac.at/view/iiasa/2895.html>, & Ward P (2018). The effect of climate type on timescales of drought propagation in an ensemble of global hydrological models. Hydrology and Earth System Sciences 22 (9): 4649-4665. DOI:10.5194/hess-22-4649-2018 <https://doi.org/10.5194/hess-22-4649-2018>.

Green, T.R., 2016. Linking Climate Change and Groundwater, in: Jakeman, A.J., Barreteau, O., Hunt, R.J., Rinaudo, J.-D., Ross, A. (Eds.), Integrated Groundwater Management: Concepts, Approaches and Challenges. Springer International Publishing, Cham, pp. 97–141. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9_5

Grusson, Y., 2016. Modélisation de l'évolution hydroclimatique des flux et stocks d'eau verte et d'eau bleue du bassin versant de la Garonne (Doctorat en génie des eaux). Université Laval Québec, Canada/ INP Toulouse, France, Toulouse, France.

Hendrik Rathjens, Katrin Bieger, Raghavan Srinivasan, Indrajeet Chaubey, Jeffrey G. Arnold, 2016. CMhyd User Manual.

Henry B. Mann, 1945. Non parametric Tests Against Trend. Econom. Soc. 13, 245–259. https://doi.org/DOI: 10.2307/1907187

IPCC Working Group I, Stocker TF, Qin D et al, 2013. The Physical Science Basis.

J. G. Arnold, R. Srinivasan, P. W. Gassman, M. J. White, K. C. Abbaspour, C. Santhi, R. D. Harmel,, A. van Griensven, 1998. SWAT: model use, calibration, and validation. Am. Soc. Agric. Biol. Eng. 1491–1508.

J. G. Arnold, R. Srinivasan, R. S. Muttiah, J. R. Williams, 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. J. Am. Water Resour. Assoc. 34, 73–89. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x

Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O.B., Bouwer, L.M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., Meijgaard, E. van, Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J.-F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., Yiou, P., 2014. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. Reg. Environ. Change 14, 563–578. https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2

Janpeter Schilling, Korbinian P. Freier, Elke Hertig, Jürgen Scheffran, 2012. Climate change, vulnerability and adaptation in North Africa with focus on Morocco. Agric. Ecosyst. Environ. 156, 12–26. http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2012.04.021

Jianwen Bai, Zhenyao Shen, Tiezhu Yan, 2017. A comparison of single- and multi-site calibration and validation: a case study of SWAT in the Miyun Reservoir watershed, China. Front. Earth Sci. 11, 592–600. https://doi.org/10.1007/s11707-017-0656-x

Jin, H., Zhu, Q., Zhao, X., Zhang, Y., 2016. Simulation and Prediction of Climate Variability and Assessment of the Response of Water Resources in a Typical Watershed in China. Water 8, 490. https://doi.org/10.3390/w8110490

Jung, M., Reichstein, M., Ciais, P., Seneviratne, S.I., Sheffield, J., Goulden, M.L., Bonan, G., Cescatti, A., Chen, J., Jeu, R. de, Dolman, A.J., Eugster, W., Gerten, D., Gianelle, D., Gobron, N., Heinke, J., Kimball, J., Law, B.E., Montagnani, L., Mu, Q., Mueller, B., Oleson, K., Papale, D., Richardson, A.D., Roupsard, O., Running, S., Tomelleri, E., Viovy, N., Weber, U., Williams, C., Wood, E., Zaehle, S., Zhang, K., 2010. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. Nature 467, 951–954. https://doi.org/10.1038/nature09396

Knippertz, P., Christoph, M., Speth, P., 2003. Long-term precipitation variability in Morocco and the link to the large-scale circulation in recent and future climates. Meteorol. Atmospheric Phys. 83, 67–88. https://doi.org/10.1007/s00703-002-0561-y

Knoben, W.J.M., Freer, J.E., Woods, R.A., 2019. Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. Hydrol. Earth Syst. Sci. 23, 4323–4331. https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019

Kundzewicz, Z.W., Doll, P., 2009. Will groundwater ease freshwater stress under climate change? Hydrol. Sci. J. 54, 665–675. https://doi.org/10.1623/hysj.54.4.665

Land-Use Map [WWW Document], n.d. URL http://due.esrin.esa.int/page_globcover.php (accessed 5.17.17).

Liang, X., Lettenmaier, D.P., Wood, E.F., Burges, S.J., 1994. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. J. Geophys. Res. Atmospheres 99, 14415–14428. https://doi.org/10.1029/94JD00483

Lin, B., Chen, X., Yao, H., Chen, Y., Liu, M., Gao, L., James, A., 2015. Analyses of landuse change impacts on catchment runoff using different time indicators based on SWAT model. Ecol. Indic. 58, 55–63. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.05.031

Mami, A., Raimonet, M., Yebdri, D., Sauvage, S., Zettam, A., Sanchez-Perez, J.-M., in press. Future climatic and hydrologic changes estimated by bias-adjusted regional climate model outputs of the Cordex-Africa project: case of the Tafna basin (North-Western Africa). Int. J. Glob. Warm. in press.

Manabe, S., Milly, P.C.D., Wetherald, R., 2004. Simulated long-term changes in river discharge and soil moisture due to global warming / Simulations à long terme de changements d'écoulement fluvial et d'humidité du sol causés par le réchauffement global. Hydrol. Sci. J. 49, null-642. https://doi.org/10.1623/hysj.49.4.625.54429

Meddi, M., Assani, A.A., Meddi, H., 2010. Temporal Variability of Annual Rainfall in the Macta and Tafna Catchments, Northwestern Algeria. Water Resour. Manag. 24, 3817–3833. https://doi.org/10.1007/s11269-010-9635-7

Meddi, M., Toumi, S., Assani, A.A., 2016. Spatial and temporal variability of the rainfall erosivity factor in Northern Algeria. Arab. J. Geosci. 9, 282. https://doi.org/10.1007/s12517-015-2303-8

Molina-Navarro, E., Trolle, D., Martínez-Pérez, S., Sastre-Merlín, A., Jeppesen, E., 2014. Hydrological and water quality impact assessment of a Mediterranean limno-reservoir under climate change and land use management scenarios. J. Hydrol. 509, 354–366. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.053

Moriasi, D.N., Steiner, J.L., Arnold, J.G., 2011. Sediment measurement and transport modeling: impact of Riparian and filter strip buffers. J. Environ. Qual. 40, 807–814. https://doi.org/10.2134/jeq2010.0066

N. Kouwen, E. D. Soulis, A. Pietroniro, J. Donald, 1993. Grouped Response Units for Distributed Hydrologic Modeling. J. Water Resour. Plan. Manag. 119. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1993)119:3(289)

Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. J. Hydrol. 10, 282–290. https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6

National Agency of Hydrologic Resources (ANRH)., 2003a. Map of Potential Evapotranspiration in the North of Algeria.

National Agency of Hydrologic Resources (ANRH), 2003. Map of Average Annual Runoff in the North of Algeria.

National Agency of Hydrologic Resources (ANRH)., 2003b. Map of Annual Rainfall in the North of Algeria;

National Agency of meteorology of Algeria, 1981.

Naumann, G., Alfieri, L., Wyser, K., Mentaschi, L., Betts, R.A., Carrao, H., Spinoni, J., Vogt, J., Feyen, L., 2018. Global Changes in Drought Conditions Under Different Levels of Warming. Geophys. Res. Lett. 45, 3285–3296. https://doi.org/10.1002/2017GL076521

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., 2005. Soil and water assessment tool theorical documentation 494.

Nerantzaki, S.D., Giannakis, G.V., Efstathiou, D., Nikolaidis, N.P., Sibetheros, I.A., Karatzas, G.P., Zacharias, I., 2015. Modeling suspended sediment transport and assessing the

impacts of climate change in a karstic Mediterranean watershed. Sci. Total Environ. 538, 288–297. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.092

Noori, N., Kalin, L., 2016. Coupling SWAT and ANN models for enhanced daily streamflow prediction. J. Hydrol. 533, 141–151. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.050

Olkeba Tolessa Leta, Ann van Griensven, Willy Bauwens, 2017. Effect of Single and Multisite Calibration Techniques on the Parameter Estimation, Performance, and Output of a SWAT Model of a Spatially Heterogeneous Catchment. J. Hydrol. Eng. 22. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001471

Rewati Niraula, Laura M. Norman, Thomas Meixner,, James B. Callegary, 2012. Multi-gauge Calibration for Modeling the Semi-Arid Santa Cruz Watershed in Arizona-Mexico Border Area Using SWAT. Air Soil Water Res. 5, 41–57. https://doi.org/10.4137/ASWR.S9410

Roz Price, 2017. Climate change and stability in North Africa (K4D Helpdesk Report No. 242). Institute of Development Studies, Brighton, UK.

Saddique, N., Usman, M., Bernhofer, C., 2019. Simulating the impact of climate change on the hydrological regimes of a sparsely gauged mountainous basin, Northern Pakistan. Water 11, 2141. https://doi.org/10.3390/w11102141

Santos, C.A.S., Rocha, F.A., Ramos, T.B., Alves, L.M., Mateus, M., Oliveira, R.P. de, Neves, R., 2019. Using a Hydrologic Model to Assess the Performance of Regional Climate Models in a Semi-Arid Watershed in Brazil. Water 11, 170. https://doi.org/10.3390/w11010170

Seif-Ennasr, M., Zaaboul, R., Hirich, A., Caroletti, G.N., Bouchaou, L., El Morjani, Z.E.A., Beraaouz, E.H., McDonnell, R.A., Choukr-Allah, R., 2016. Climate change and adaptive water management measures in Chtouka Aït Baha region (Morocco). Sci. Total Environ. 573, 862–875. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.170

Sellami, H., Benabdallah, S., La Jeunesse, I., Vanclooster, M., 2016. Quantifying hydrological responses of small Mediterranean catchments under climate change projections. Sci. Total Environ., Special Issue on Climate Change, Water and Security in the Mediterranean 543, 924–936. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.006

Shrestha, M.K., Recknagel, F., Frizenschaf, J., Meyer, W., 2016. Assessing SWAT models based on single and multi-site calibration for the simulation of flow and nutrient loads in the semi-arid Onkaparinga catchment in South Australia. Agric. Water Manag., Agricultural water and nonpoint source pollution management at a watershed scale: PART I Overseen by: Brent Clothier 175, 61–71. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.02.009

Singh, A., Gosain, A.K., 2011. Climate-change impact assessment using GIS-based hydrological modelling. Water Int. 36, 386–397. https://doi.org/10.1080/02508060.2011.586761

Solomon S, Qin D, Manning M et al, 2007. the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.

Taibi, S., Meddi, M., Mahe, G., Assani, A., 2017. Relationships between atmospheric circulation indices and rainfall in Northern Algeria and comparison of observed and RCM-generated rainfall. Theor. Appl. Climatol. 127, 241–257. https://doi.org/10.1007/s00704-015-1626-4

Taylor, K.E., Stouffer, R.J., Meehl, G.A., 2011. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. Bull. Am. Meteorol. Soc. 93, 485–498. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1

Teutschbein, C., Seibert, J., 2013. Is bias correction of regional climate model (RCM) simulations possible for non-stationary conditions? Hydrol Earth Syst Sci 17, 5061–5077. https://doi.org/10.5194/hess-17-5061-2013

Teutschbein, C., Seibert, J., 2012. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. J. Hydrol. 456–457, 12–29. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052

Todini, E., 2007. Hydrological catchment modelling: past, present and future. Hydrol. Earth Syst. Sci. 11, 468–482. https://doi.org/10.5194/hess-11-468-2007

Tramblay, Y., Ruelland, D., Somot, S., Bouaicha, R., Servat, E., 2013. High-resolution Med-CORDEX regional climate model simulations for hydrological impact studies: a first evaluation of the ALADIN-Climate model in Morocco. Hydrol. Earth Syst. Sci. 17, 3721–3739. https://doi.org/10.5194/hess-17-3721-2013

Verrot, L., Destouni, G., 2016. Worldwide soil moisture changes driven by future hydro-climatic change scenarios. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. 1–26. https://doi.org/10.5194/hess-2016-165

Xoplaki, E., 2002. Climate variability over the Mediterranean (Doctorat). Universität Bern, Greece.

Yanjie, B., Yong, Z., Weihua, X., Di, W., 2015. The Quantitative Research of Impact of Climate Change and Reservoir Operation on the Runoff Based on Computer Simulation, in: 2015 Seventh International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Presented at the 2015 Seventh International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, pp. 1249–1252. https://doi.org/10.1109/ICMTMA.2015.304

Yebdri, D., 2006. Contribution à la gestion des ressources en eau superficielle du bassin versant de la Tafna (Doctorat d'état). Université des sciences et de la technologie d'Oran "Mohamed Boudiaf," Oran, Algérie.

Youen Grusson, François Anctil, Sabine Sauvage, José Miguel Sánchez Pérez, 2018. Coevolution of Hydrological Cycle Components under Climate Change: The Case of the Garonne River in France. Water-MDPI 10. https://doi.org/10.3390/w10121870

Youssef Brouziyne, Aziz Abouabdillah, Abdelaziz Hirich, Rachid Bouabid, Rashyd Zaaboul, Lahcen Benaabidate, 2018. Modeling sustainable adaptation strategies toward a climate-smart agriculture in a Mediterranean watershed under projected climate change scenarios. J. Mater. Environ. Sci. 9, 154–163. https://doi.org/10.26872/jmes.2018.9.1.16

Zeroual, A., Assani, A.A., Meddi, M., Alkama, R., 2018. Assessment of climate change in Algeria from 1951 to 2098 using the Köppen–Geiger climate classification scheme. Clim. Dyn. https://doi.org/10.1007/s00382-018-4128-0

Zettam, A., Taleb, A., Sauvage, S., Boithias, L., Belaidi, N., Sanchez-Perez, J.M., 2020. Applications of a SWAT model to evaluate the contribution of the Tafna catchment (north-west Africa) to the nitrate load entering the Mediterranean Sea. Environ. Monit. Assess. 192, 510. https://doi.org/10.1007/s10661-020-08482-0

Zettam, A., Taleb, A., Sauvage, S., Boithias, L., Belaidi, N., Sánchez-Pérez, J.M., 2017. Modelling Hydrology and Sediment Transport in a Semi-Arid and Anthropized Catchment Using the SWAT Model: The Case of the Tafna River (Northwest Algeria). Water 9, 216. https://doi.org/10.3390/w9030216

Zhe Yuan et al, n.d. Water | Free Full-Text | Impact of Climate Variability on Blue and Green Water Flows in the Erhai Lake Basin of Southwest China 11. https://doi.org/10.3390/w11030424

Zittis, G., Hadjinicolaou, P., Klangidou, M., Proestos, Y., Lelieveld, J., 2019. A multi-model, multi-scenario, and multi-domain analysis of regional climate projections for the Mediterranean. Reg. Environ. Change 19, 2621–2635. https://doi.org/10.1007/s10113-019-01565-w

Table captions

Table 1. List of regional climate model outputs used in this study. (The domain used is Africa with 50 Km of resolution). Details about GCM and RCM models can be found on the CORDEX website (https://esg-dn1.nsc.liu.se/search/cordex/).

Table 2. Datasets characteristics for SWAT model inputs and discharge for calibration/validation procedures.

Table 3. Calibration/validation (with performance rating of the NSE (Nash & Sutcliffe 1970)), the results of NSE and R^2 are taken from our previous study (Mami et al., in press)

Table 4. Precipitation trends at the watershed scale for January and July, for the reference period (1981-2000) and the future period (2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 and 2080-2099). Bold numbers are significant trends (T) considering $\alpha = 0.1$ and underlined numbers considering $\alpha = 0.05$ with the Mann-Kendall test.

Table 5. Same as Table 4 but for River discharge.

Table 6. Same as Table 4 but for surface flow (runoff).

Table 7. Same as Table 4 but for subsurface flow (lateral flow).

Table 8. Same as Table 4 but for soil water content.

Table 9. Same as Table 4 but for evapotranspiration.

Figure captions

Figure 1. Location of the Tafna catchment, with [station (number/letter): meteorological/ hydrological stations] (Mami et al., in press)

Figure 2. Observed monthly mean flow, precipitation and maximum/minimum temperature for the period 1981-2000 (Agence Nationale des Ressources Hydriques 1981; National Agency of meteorology of Algeria 1981) .

Figure 3. Comparison between SWAT components outputs in mm/year of simulations from observation and the ten bias-corrected RCMs, of Cordex Africa project, at the watershed scale, during the reference period (1981-2000), [RCM1: EC-EARTH- CCLM4-8-17 , RCM2 : IPSL-CM5A-MR- RCA4 , RCM3 : CCCma-CanESM2- RCA4, RCM4 : CNRM-CM5- CCLM4-8-17, RCM5 : CNRM-CM5- RCA4 ,RCM6 : EC-EARTH- RCA4 , RCM7 : MIROC5- RCA4, RCM8 : MPI-ESM-LR- RCA4, RCM9 : NCC-NorESM1- RCA4, RCM10 : NOAA/ GFDL-ESM2M- RCA4.

Figure 4. Total monthly precipitation during the reference period (1981-2000) and absolute variations for the periods (2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 and 2080-2099) under RCPs 4.5 and 8.5, for January (left) and July (right).

720 Figure 5. Mean river discharge during the reference period (1981-2000) and mean absolute
721 variations for the periods (2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 and 2080-2099), under RCPs 4.5
722 and 8.5, compared to 1981-2000 for January and July.

723 Figure 6. Runoff during the reference period (1981-2000) and absolute variations for the periods
724 (2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 and 2080-2099) at monthly scale for January and July.

725 Figure 7. Subsurface flow (lateral flow) during the reference period (1981-2000) and absolute
726 variations for the periods (2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 and 2080-2099) at monthly scale
727 for January and July.

728 Figure 8. Soil water content during the reference period (1981-2000) and absolute variations for
729 the periods (2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 and 2080-2099) at monthly scale for January
730 and July.

731 Figure 9. Evapotranspiration during the reference period (1981-2000) and absolute variations
732 for the periods (2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 and 2080-2099) at monthly scale for January
733 and July.

734

Figure

Spatio-temporal trends of hydrological components: case of the Tafna basin (North-western Africa)

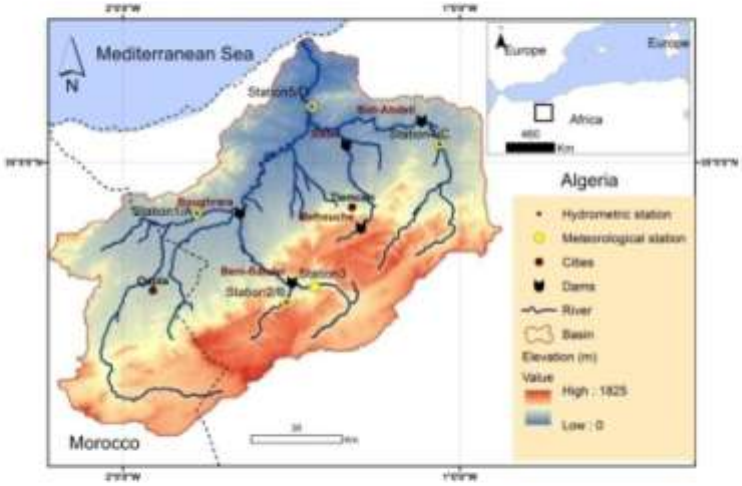


Figure 1. Location of the Tafna catchment, with [station (number/letter): meteorological/ hydrological stations] (Mami et al., in press).

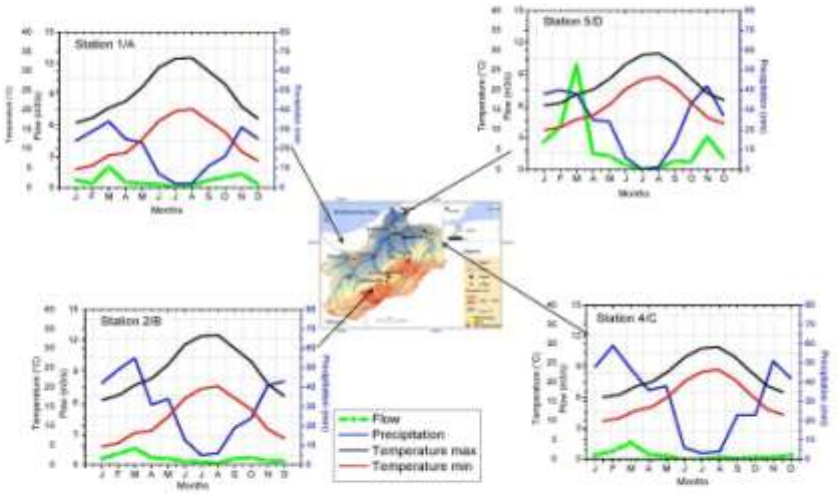


Figure 2. Observed monthly mean flow, precipitation and maximum/minimum temperature for the period 1981-2000 (Agence Nationale des Ressources Hydriques, 1981; "National Agency of meteorology of Algeria," 1981) .

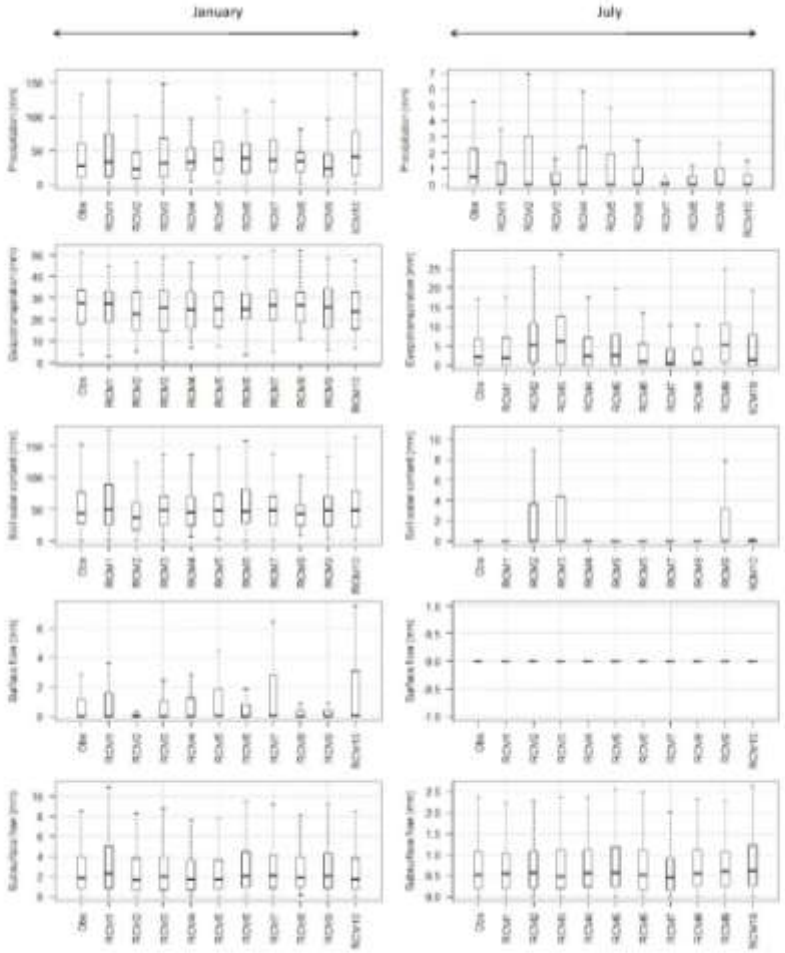


Figure 3. Comparison between SWAT components outputs in mm/year of simulations from observation and the ten bias-corrected RCMs, of Cordex Africa project, at the watershed scale, during the reference period (1981-2000). [RCM1: EC-EARTH- CCLM4-8-17 , RCM2 : IPSL-CM5A-MR- RCA4 , RCM3 : CCCma-CanESM2- RCA4, RCM4 : CNRM-CM5- CCLM4-8-17, RCM5 : CNRM-CM5- RCA4 ,RCM6 : EC-EARTH- RCA4 , RCM7 : MIROC5- RCA4, RCM8 : MPI-ESM-LR- RCA4, RCM9 : NCC-NorESM1- RCA4, RCM10 : NOAA/ GFDL-ESM2M- RCA4.

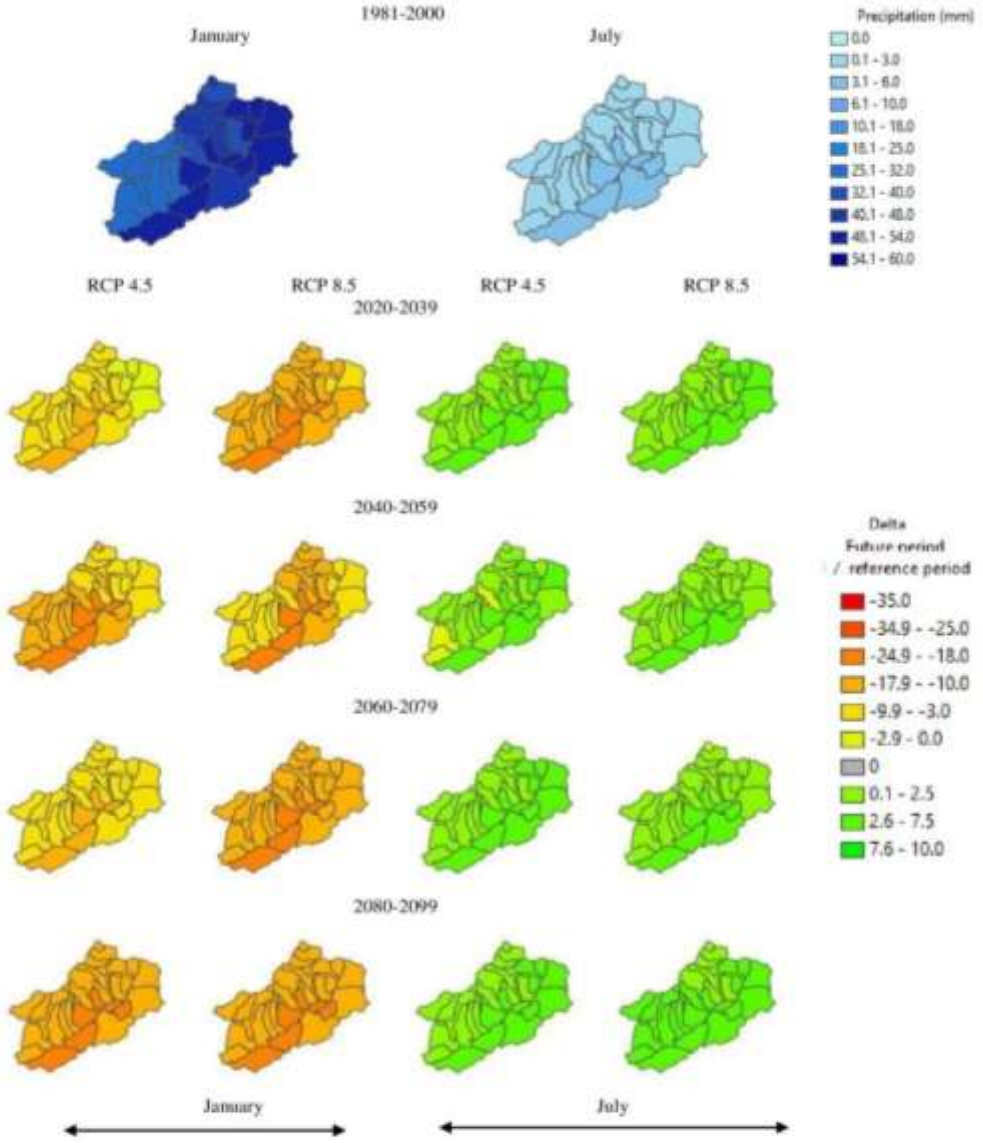


Figure 4. Total monthly precipitation during the reference period (1981-2000) and absolute variations for the periods (2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 and 2080-2099) under RCPs 4.5 and 8.5, for January (left) and July (right).

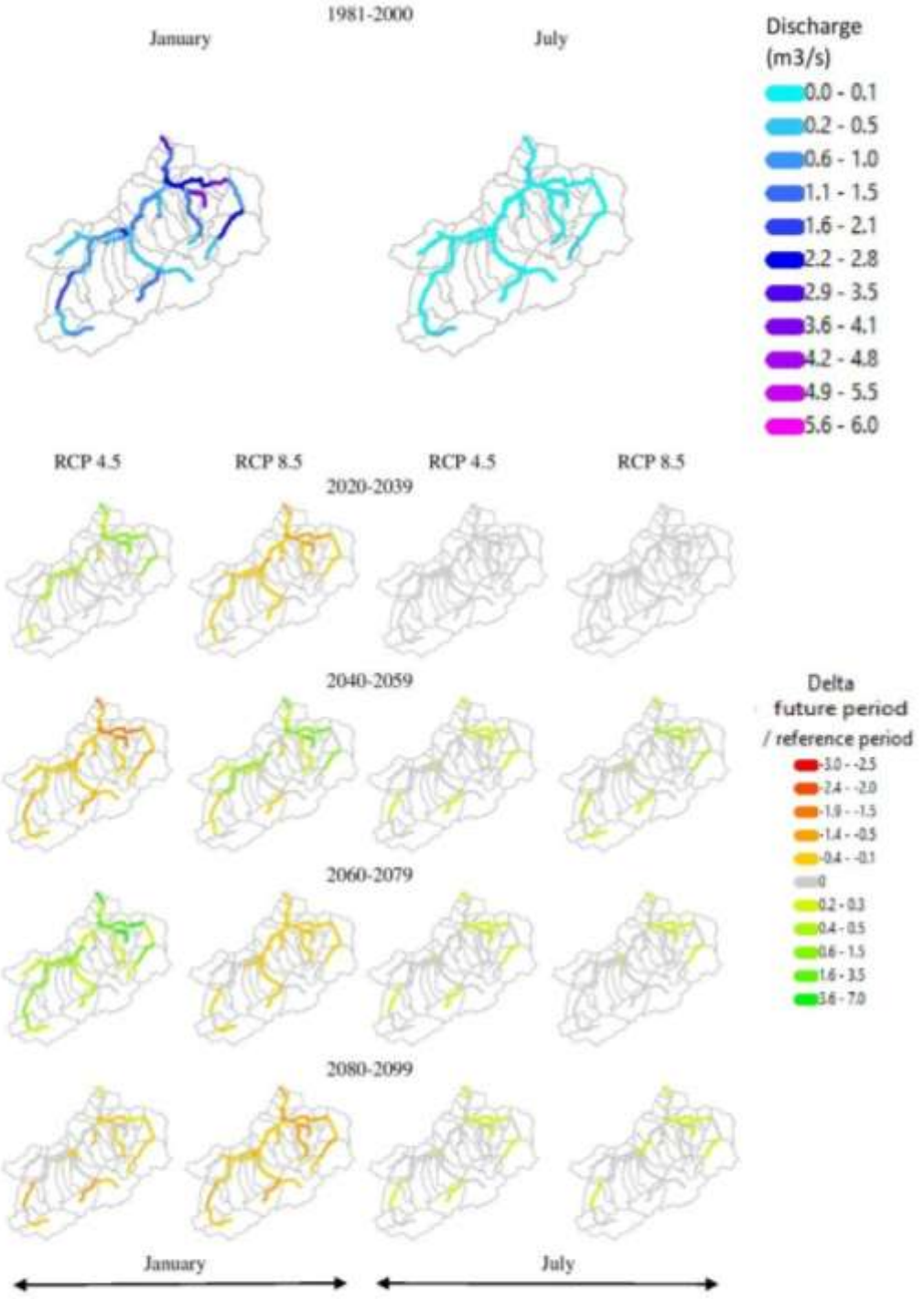


Figure 5. Mean river discharge during the reference period (1981-2000) and mean absolute variations for the periods (2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 and 2080-2099), under RCPs 4.5 and 8.5, compared to 1981-2000 for January and July.

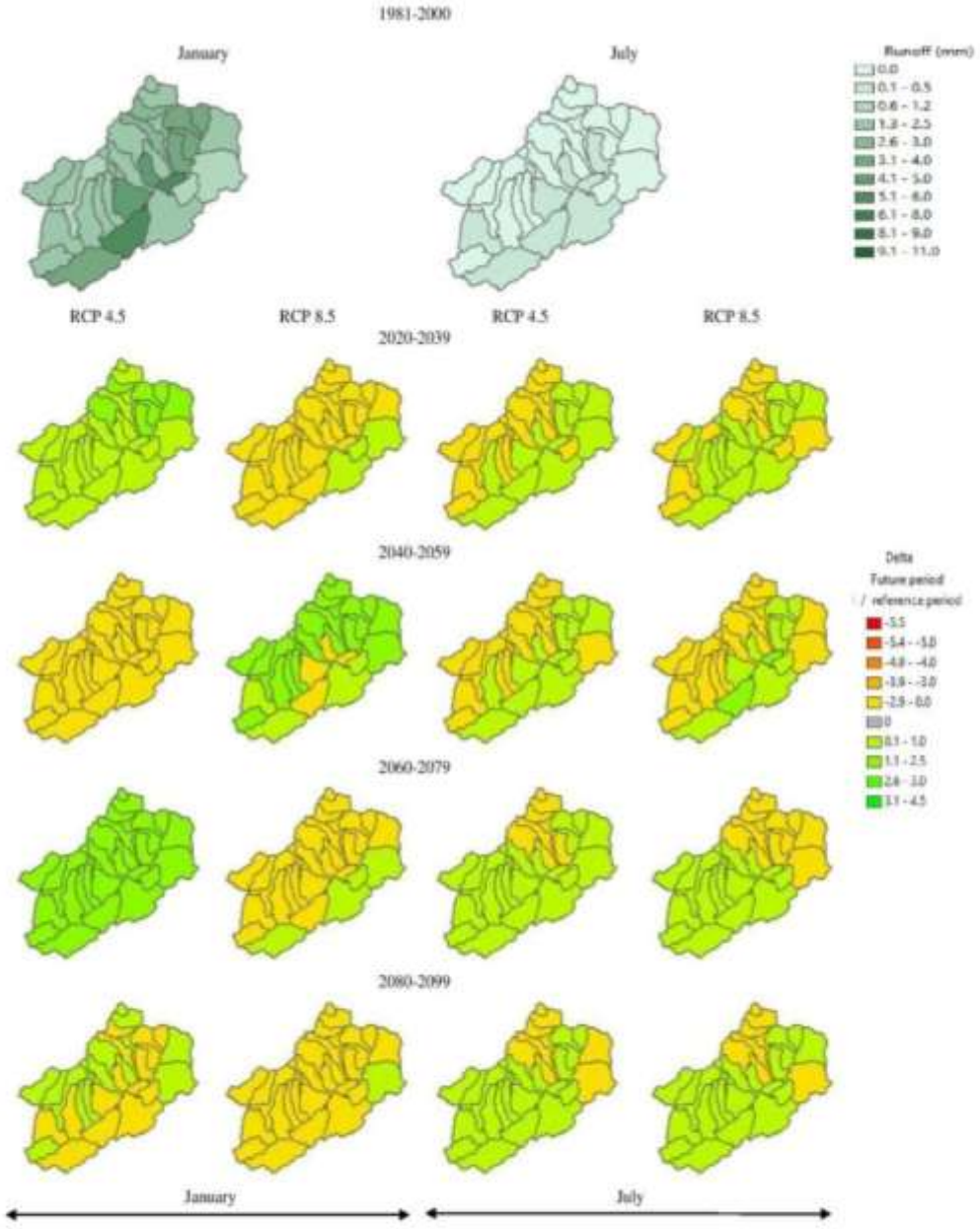


Figure 6. Runoff during the reference period (1981-2000) and absolute variations for the periods (2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 and 2080-2099) at monthly scale for January and July.

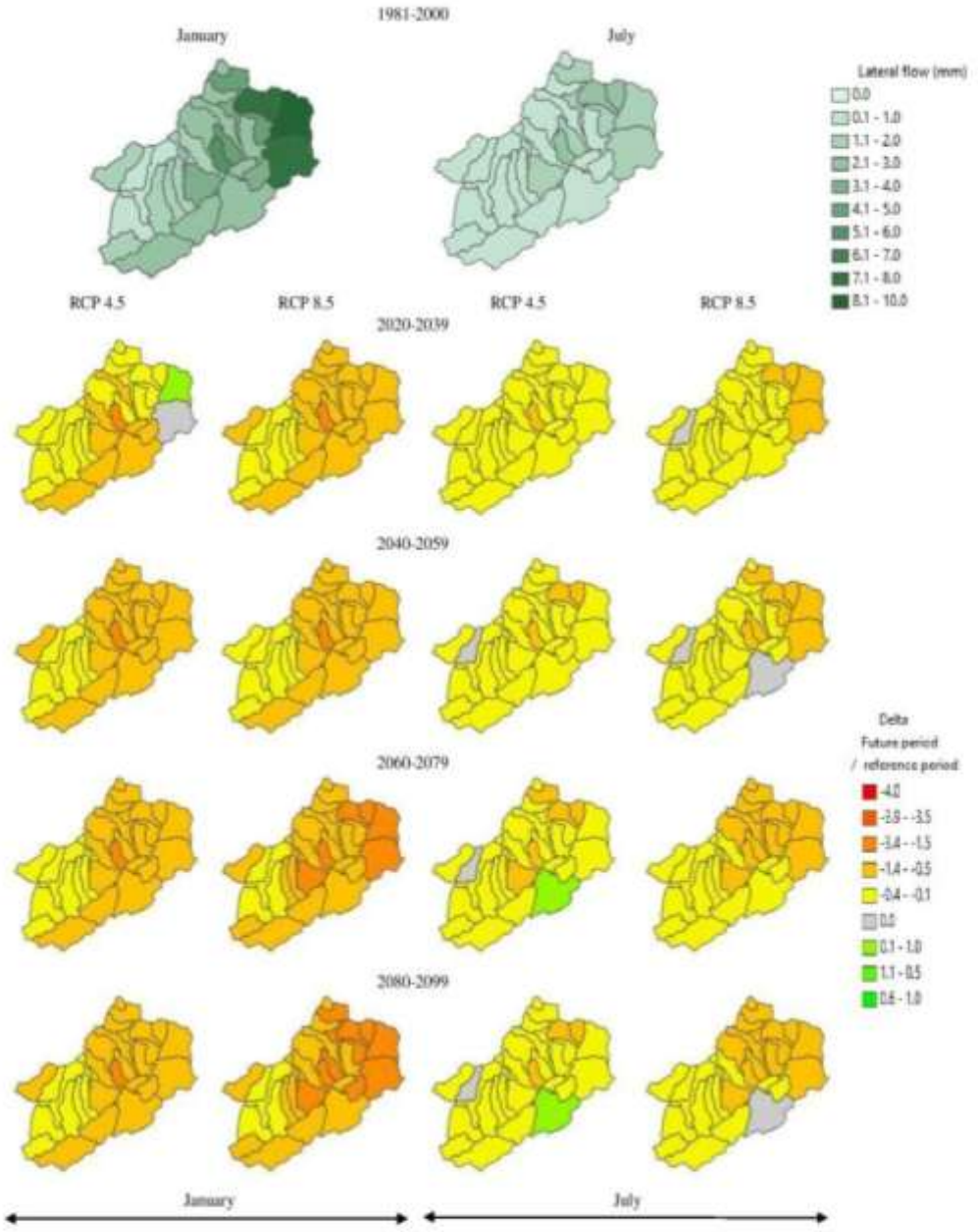


Figure 7. Subsurface flow (lateral flow) during the reference period (1981-2000) and absolute variations for the periods (2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 and 2080-2099) at monthly scale for January and July.

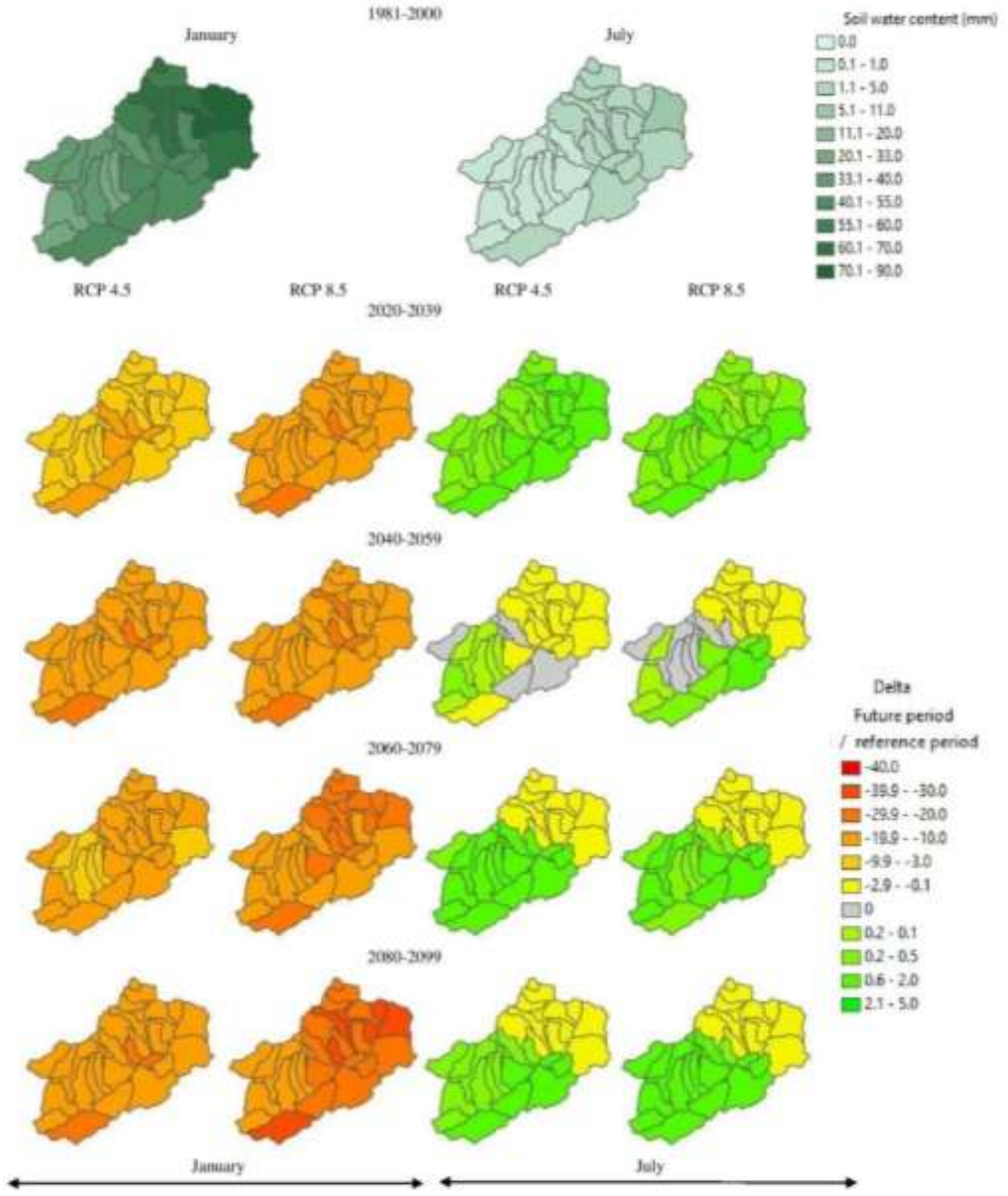


Figure 8. Soil water content during the reference period (1981-2000) and absolute variations for the periods (2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 and 2080-2099) at monthly scale for January and July.

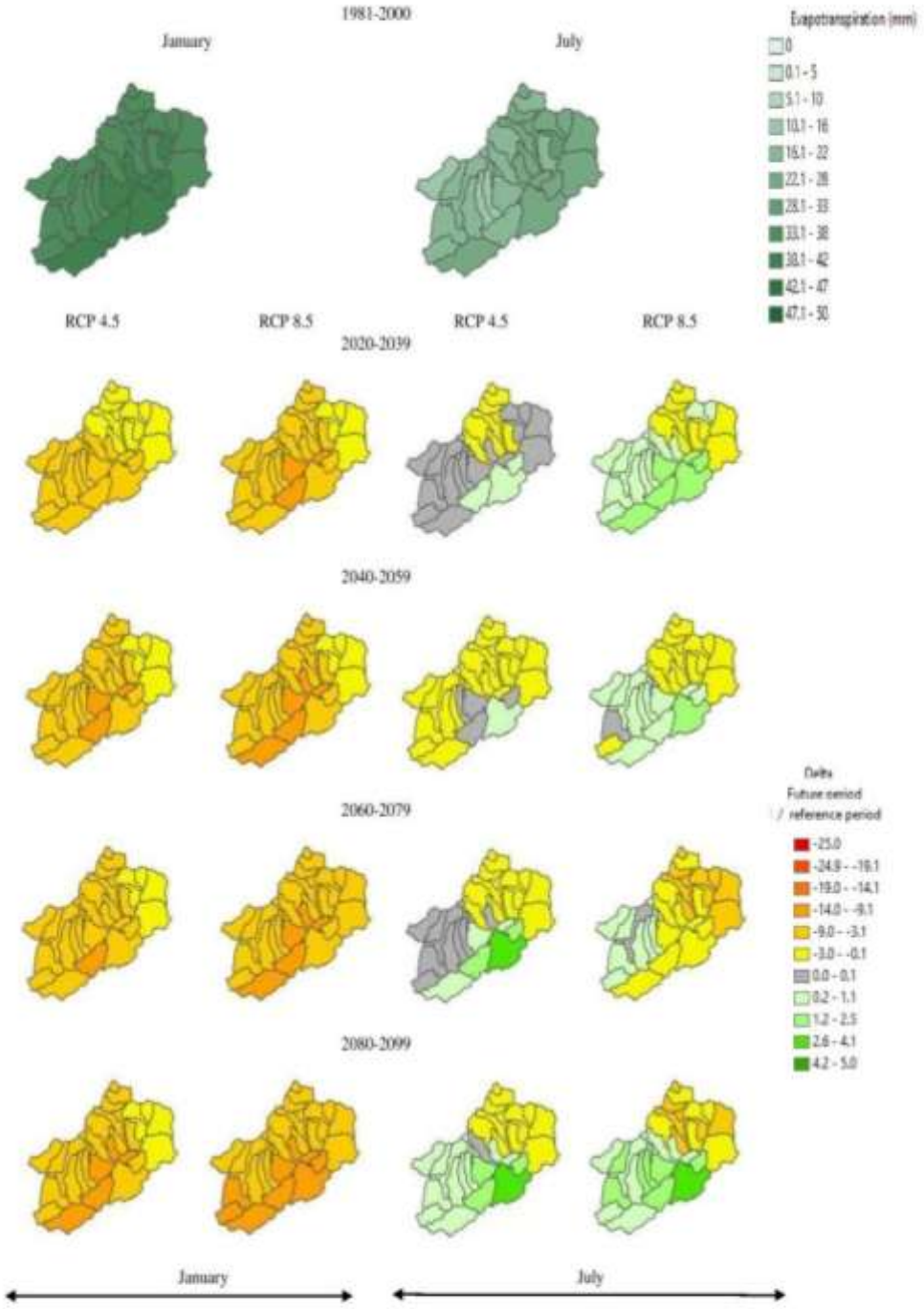


Figure 9. Evapotranspiration during the reference period (1981-2000) and absolute variations for the periods (2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 and 2080-2099) at monthly scale for January and July.

Table

Spatio-temporal trends of hydrological components: case of the Tafna basin (North-western Africa)

Table 1. List of regional climate model outputs used in this study. (The domain used is Africa with 50 Km of resolution). Details about GCM and RCM models can be found on the CORDEX website (https://esg-dn1.nsc.liu.se/search/cordex/).

Regional climate model (RCM)	Global climate model (GCM)	Historical	RCP 4.5	RCP 8.5
CCLM4-8-17	EC-EARTH	X	X	X
	CNRM-CM5	X	X	X
RCA4	EC-EARTH	X	X	X
	CNRM-CM5	X	X	X
	IPSL-CM5A-MR	X	X	X
	CCCma-CanESM2	X	X	X
	MIROC5	X	X	X
	MPI-ESM-LR	X	X	X
	NCC-NorESM1	X	X	X
	NOAA/ GFDL-ESM2M	X	X	X

Table 2. Datasets characteristics for SWAT model inputs and discharge for calibration/validation procedures.

Data type	Data source	chronology	Data scale
DEM (digital elevation model)	ASTER global digital elevation model ("ASTER Global Digital Elevation Map," n.d.)	/	30 m x 30 m
Land use	The European land use Agency ("Land-Use Map," n.d.)	/	1:100,000
Soil	FAO soil ("FAO (Harmonized World Soil Database)," n.d.)	/	1:1,000,000
Climatic data (1; 2; 3; 4; 5)	National Agency of meteorology of Algeria	1981-2010	Daily
Hydrometric data (A; B; C; D)	ANRH: Agence Nationale des Ressources Hydriques)	1981-2010	monthly

Table 3. Calibration/validation (with performance rating of the NSE (Nash and Sutcliffe, 1970)), the results of NSE and R^2 are taken from our previous study (Mami et al., in press)

stations	Calibration (1981-1995)				Validation (1996-2010)			
	NSE	R^2	KGE	Performance rating	NSE	R^2	KGE	Performance rating
A	0.61	0.65	0.58	Satisfactory	-0.30	0.21	0.16	Unsatisfactory
B	0.62	0.69	0.65	Good	0.65	0.71	0.57	Good
C	0.52	0.54	0.4	Satisfactory	0.54	0.58	0.43	Satisfactory
D	0.83	0.84	0.72	Very good	0.66	0.70	0.56	Good

Table 4. Precipitation trends at the watershed scale for January and July, for the reference period (1981-2000) and the future period (2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 and 2080-2099). Bold numbers are significant trends (T) considering $\alpha = 0.1$ and underlined numbers considering $\alpha = 0.05$ with the Mann-Kendall test.

Precipitation				
1981-2000				
	January		July	
	T	p-value	T	p-value
Simulated from observation	-	0.9	+	0.7
EC-EARTH- CCLM4-8-17	+	0.005	-	0.33
IPSL-CM5A-MR- RCA4	+	0.007	-	0.9
CCCma-CanESM2- RCA4	+	0.9	-	0.01
CNRM-CM5- CCLM4-8-17	-	0.004	-	0.37
CNRM-CM5- RCA4	+	0.9	+	<0.001
EC-EARTH- RCA4	+	0.66	+	0.34
MIROC5- RCA4	-	0.68	-	<0.001
MPI-ESM-LR- RCA4	+	<0.001	-	<0.001
NCC-NorESM1- RCA4	+	0.48	+	0.8
NOAA/ GFDL-ESM2M- RCA4	-	<0.001	-	<0.001

RCP 4.5																
	2020-2039				2040-2059				2060-2079				2080-2099			
	January		July		January		July		January		July		January		July	
	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value
EC-EARTH- CCLM4-8-17	+	0.1	-	<0.001	-	0.003	-	<0.001	+	0.9	-	<0.001	-	0.02	-	<0.001
IPSL-CM5A-MR- RCA4	-	<0.001	-	0.8	-	0.02	+	<0.001	+	<0.001	-	0.01	-	<0.001	+	<0.001
CCCma-CanESM2- RCA4	-	0.3	-	<0.001	+	0.2	+	0.4	-	<0.001	+	<0.001	-	0.5	+	<0.001
CNRM-CM5- CCLM4-8-17	+	0.1	+	<0.001	+	0.004	-	0.001	+	<0.001	+	0.2	-	0.06	+	0.2
CNRM-CM5- RCA4	-	<0.001	+	<0.001	+	<0.001	+	0.03	+	<0.001	+	0.9	-	0.09	-	<0.001
EC-EARTH- RCA4	+	<0.001	-	<0.001	-	<0.001	-	0.4	+	<0.001	-	<0.001	-	<0.001	-	0.003
MIROC5- RCA4	+	<0.001	+	0.4	-	<0.001	+	0.003	+	0.008	-	0.009	-	<0.001	+	<0.001
MPI-ESM-LR- RCA4	+	0.005	+	0.5	+	<0.001	+	<0.001	-	<0.001	+	0.004	-	<0.001	+	0.007
NCC-NorESM1- RCA4	-	<0.001	-	0.03	+	<0.001	-	<0.001	+	0.1	+	<0.001	-	<0.001	+	0.0003
NOAA/ GFDL-ESM2M- RCA4	-	<0.001	+	0.1	-	<0.001	-	0.01	+	0.2	+	0.1	-	<0.001	-	<0.001
RCP 8.5																
	2020-2039				2040-2059				2060-2079				2080-2099			
	January		July		January		July		January		July		January		July	
	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value
EC-EARTH- CCLM4-8-17	-	<0.001	-	<0.001	+	0.01	-	<0.001	+	0.7	+	0.9	-	<0.001	+	<0.001
IPSL-CM5A-MR- RCA4	-	<0.001	+	<0.001	-	<0.001	-	0.001	+	<0.001	-	0.4	+	<0.001	-	<0.001
CCCma-CanESM2- RCA4	+	<0.001	-	0.9	+	0.01	-	0.1	-	<0.001	-	<0.001	-	0.0001	+	0.7
CNRM-CM5- CCLM4-8-17	+	0.007	-	0.001	+	<0.001	+	0.003	-	0.6	-	<0.001	-	<0.001	+	0.01
CNRM-CM5- RCA4	+	0.4	+	0.07	+	<0.001	+	0.7	-	<0.001	+	<0.001	-	<0.001	-	0.04
EC-EARTH- RCA4	-	<0.001	+	0.1	+	0.1	-	<0.001	-	0.005	-	0.0006	-	0.06	+	0.002
MIROC5- RCA4	+	<0.001	+	<0.001	-	<0.001	-	0.02	-	<0.001	-	<0.001	-	<0.001	-	0.03
MPI-ESM-LR- RCA4	-	<0.001	+	<0.001	+	0.2	+	0.001	-	0.0006	-	0.06	+	<0.001	-	<0.001
NCC-NorESM1- RCA4	+	0.06	+	<0.001	-	<0.001	+	0.03	+	<0.001	+	<0.001	-	0.1	+	0.6
NOAA/ GFDL-ESM2M- RCA4	+	<0.001	-	0.006	-	<0.001	+	<0.001	-	0.01	-	<0.001	+	0.1	-	<0.001

Table 5. Same as Table 4 but for River discharge.

Discharge				
1981-2000				
	January		July	
	T	p	T	p
Simulated from observation	+	0.022	-	0.31

EC-EARTH- CCLM4-8-17		+		0.67		+		<0.001							
IPSL-CMSA-MR- RCA4		+		0.30		-		0.38							
CCCma-CanESM2- RCA4		-		0.14		+		0.06							
CNRM-CM5- CCLM4-8-17		-		0.16		+		0.31							
CNRM-CM5- RCA4		+		<0.001		+		<0.001							
EC-EARTH- RCA4		-		0.007		+		0.57							
MIROC5- RCA4		+		0.56		-		0.18							
MPI-ESM-LR- RCA4		-		0.055		-		<0.001							
NCC-NorESM1- RCA4		+		0.96		+		0.25							
NOAA/ GFDL-ESM2M- RCA4		-		<0.001		-		<0.001							
RCP 4.5															
	2020-2039				2040-2059				2060-2079				2080-2099			
	January		July		January		July		January		July		January		July	
	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value
EC-EARTH- CCLM4-8-17	-	0.5	-	0.8	-	<0.001	-	<0.001	-	0.8	-	0.7	-	0.1	-	<0.001
IPSL-CMSA-MR- RCA4	-	0.001	-	0.001	-	<0.001	-	0.003	+	<0.001	+	<0.001	-	<0.001	-	<0.001
CCCma-CanESM2- RCA4	-	<0.001	-	<0.001	+	0.02	+	0.2	-	<0.001	-	0.002	+	0.01	-	0.3
CNRM-CM5- CCLM4-8-17	+	<0.001	+	<0.001	-	0.4	+	0.06	-	<0.001	+	0.01	+	0.6	+	<0.001
CNRM-CM5- RCA4	-	0.3	+	<0.001	-	0.03	+	<0.001	+	<0.001	+	0.3	-	0.4	+	0.1
EC-EARTH- RCA4	+	0.7	-	<0.001	-	<0.001	-	<0.001	-	0.6	+	0.5	-	0.04	-	0.007
MIROC5- RCA4	+	0.4	-	<0.001	-	0.2	+	0.07	+	0.08	-	<0.001	-	0.3	+	0.002
MPI-ESM-LR- RCA4	-	<0.001	+	0.5	+	0.01	+	<0.001	+	0.07	-	0.8	-	0.02	+	<0.001
NCC-NorESM1- RCA4	-	<0.001	+	0.001	-	0.3	+	0.2	-	0.006	-	0.06	+	<0.001	-	<0.001
NOAA/ GFDL-ESM2M- RCA4	-	<0.001	+	0.9	-	<0.001	-	<0.001	+	0.1	+	0.1	-	<0.001	-	0.005
RCP 8.5																
	January		July		January		July		January		July		January		July	
	2020-2039				2040-2059				2060-2079				2080-2099			
	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value
EC-EARTH- CCLM4-8-17	+	0.04	+	<0.001	-	0.007	-	<0.001	-	<0.001	-	0.4	-	<0.001	-	0.001
IPSL-CMSA-MR- RCA4	-	0.04	-	<0.001	-	<0.001	-	0.003	-	<0.001	+	<0.001	-	0.7	-	<0.001
CCCma-CanESM2- RCA4	+	0.5	+	0.02	-	0.2	+	0.2	+	0.6	-	<0.001	-	<0.001	-	<0.001
CNRM-CM5- CCLM4-8-17	-	<0.001	-	0.006	+	0.7	+	0.06	+	<0.001	+	0.06	-	<0.001	-	0.4
CNRM-CM5- RCA4	-	0.009	-	0.004	+	0.9	+	<0.001	-	0.004	+	<0.001	-	<0.001	-	<0.001
EC-EARTH- RCA4	+	0.03	+	0.06	+	0.07	-	<0.001	-	<0.001	-	<0.001	-	0.01	-	0.5
MIROC5- RCA4	+	0.01	+	<0.001	-	0.003	+	0.07	-	<0.001	+	0.8	-	<0.001	-	<0.001
MPI-ESM-LR- RCA4	-	<0.001	+	0.1	+	0.4	+	<0.001	-	<0.001	-	<0.001	+	0.03	-	<0.001
NCC-NorESM1- RCA4	-	0.2	-	0.8	-	<0.001	+	0.2	+	0.02	-	0.6	-	<0.001	+	0.06
NOAA/ GFDL-ESM2M- RCA4	+	0.001	+	0.9	-	0.06	-	<0.001	-	0.9	+	0.001	-	0.006	-	<0.001

Table 6. Same as Table 4 but for surface flow (runoff).

surface flow (runoff)

1981-2000				
	January		July	
	T	p-value	T	p-value
Simulated from observation	+	0.79	-	0.9

RCP 4.5	2020-2039				2040-2059				2060-2079				2080-2099			
	January		July		January		July		January		July		January		July	
	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value
EC-EARTH- CCLM4-8-17	+	0.2	-	<0.001	-	<0.001	-	<0.001	+	0.47	+	0.66	+	0.058	-	<0.001
IPSL-CM5A-MR- RCA4	-	<0.001	-	0.062	-	<0.001	+	0.001	+	<0.001	+	<0.001	-	0.22	+	<0.001
CCCma-CanESM2- RCA4	-	<0.001	-	0.68	+	<0.001	+	0.036	-	0.022	+	<0.001	+	0.66	+	0.021
CNRM-CM5- CCLM4-8-17	+	0.003	+	<0.001	+	0.002	-	0.85	+	<0.001	+	<0.001	-	0.3	-	0.093
CNRM-CM5- RCA4	-	0.001	+	<0.001	+	0.023	+	<0.001	+	<0.001	-	0.83	+	<0.001	+	0.38
EC-EARTH- RCA4	+	<0.001	-	0.027	-	<0.001	-	0.48	+	<0.001	-	0.006	-	0.001	+	0.36
MIROC5- RCA4	+	<0.001	+	<0.001	-	<0.001	-	0.63	+	0.0001	-	0.4	-	<0.001	+	0.01
MPI-ESM-LR- RCA4	-	0.59	+	<0.001	+	<0.001	+	<0.001	+	<0.001	+	<0.001	-	<0.001	+	<0.001
NCC-NorESM1- RCA4	-	<0.001	+	<0.001	+	<0.001	-	<0.001	-	0.62	+	0.007	-	0.47	-	0.8
NOAA/ GFDL-ESM2M- RCA4	-	<0.001	-	0.77	-	<0.001	+	<0.001	+	<0.001	-	<0.001	-	<0.001	-	<0.001

RCP 8.5	2020-2039				2040-2059				2060-2079				2080-2099			
	January		July		January		July		January		July		January		July	
	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value
EC-EARTH- CCLM4-8-17	-	0.005	+	<0.001	+	0.004	-	0.34	-	0.073	+	<0.001	-	<0.001	+	0.54
IPSL-CM5A-MR- RCA4	-	<0.001	+	0.49	-	0.28	+	<0.001	-	0.72	+	<0.001	+	<0.001	+	<0.001
CCCma-CanESM2- RCA4	+	0.55	+	0.002	+	0.82	+	0.62	-	0.028	-	0.01	-	<0.001	+	0.52
CNRM-CM5- CCLM4-8-17	+	0.012	-	0.0005	+	<0.001	-	<0.001	+	0.58	+	<0.001	-	<0.001	+	0.044
CNRM-CM5- RCA4	+	0.49	+	0.052	+	0.01	-	0.011	-	<0.001	-	0.027	-	<0.001	+	<0.001
EC-EARTH- RCA4	-	0.15	+	0.12	+	0.23	-	<0.001	-	0.28	+	0.097	-	0.001	+	0.61
MIROC5- RCA4	+	<0.001	+	0.12	-	<0.001	-	<0.001	-	<0.001	+	0.097	-	<0.001	+	0.61
MPI-ESM-LR- RCA4	-	<0.001	+	<0.001	-	0.47	+	0.61	-	<0.001	+	<0.001	+	0.0005	-	0.67
NCC-NorESM1- RCA4	+	0.004	+	0.28	-	<0.001	+	0.61	+	<0.001	+	0.028	-	0.0008	-	0.061
NOAA/ GFDL-ESM2M- RCA4	+	0.007	+	0.1	-	<0.001	-	0.45	-	<0.001	+	0.14	-	0.057	-	0.3

Table 7. Same as Table 4 but for subsurface flow (lateral flow).

Lateral flow																
1981-200																
	Jan						July									
	T		p-value				T		p-value							
Simulated from observation	+		0.009				-		0.48							
4.5																
	2020-2039				2040-2059				2060-2079				2080-2099			
	January		July		January		July		January		July		January		July	
	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value
EC-EARTH- CCLM4-8-17	-	0.019	+	0.67	-	<0.001	-	<0.001	-	0.33	-	0.13	-	0.006	-	<0.001
IPSL-CM5A-MR- RCA4	-	<0.001	-	<0.001	-	<0.001	-	<0.001	+	0.75	+	0.038	-	<0.001	-	<0.001
CCCma-CanESM2- RCA4	-	<0.001	-	<0.001	+	0.055	+	0.76	-	<0.001	-	0.01	+	0.019	-	0.51
CNRM-CM5- CCLM4-8-17	+	<0.001	+	<0.001	-	0.44	+	0.6	+	<0.001	+	0.77	+	0.41	+	0.013
CNRM-CM5- RCA4	-	0.43	+	<0.001	-	0.033	+	0.42	-	0.04	+	0.52	-	0.063	+	0.98
EC-EARTH- RCA4	-	0.17	-	<0.001	-	<0.001	-	<0.001	+	0.008	-	0.64	-	0.02	-	<0.001
MIROC5- RCA4	-	0.9	-	<0.001	-	<0.001	+	0.051	+	0.5	-	<0.001	-	0.14	+	0.022
MPI-ESM-LR- RCA4	-	<0.001	+	0.42	+	0.28	+	0.16	+	<0.001	-	0.3	-	0.029	+	0.12
NCC-NorESM1- RCA4	-	<0.001	+	0.3	-	0.088	+	0.47	-	0.01	-	0.002	+	0.001	-	<0.001
NOAA/ GFDL-ESM2M- RCA4	-	<0.001	-	<0.001	-	<0.001	-	<0.001	+	0.78	+	0.78	-	<0.001	-	<0.001
8.5																
	2020-2039				2040-2059				2060-2079				2080-2099			
	January		July		January		July		January		July		January		July	
	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value
EC-EARTH- CCLM4-8-17	-	0.83	+	<0.001	-	0.091	-	0.52	-	<0.001	-	0.29	-	<0.001	-	0.034
IPSL-CM5A-MR- RCA4	-	0.004	-	<0.001	-	<0.001	-	0.09	-	<0.001	+	0.001	+	0.26	-	<0.001
CCCma-CanESM2- RCA4	+	0.03	+	0.87	-	0.043	-	<0.001	+	0.88	-	<0.001	-	<0.001	-	<0.001
CNRM-CM5- CCLM4-8-17	-	0.004	-	0.059	-	0.392	+	0.18	+	<0.001	+	0.79	-	0.01	-	0.044
CNRM-CM5- RCA4	-	<0.001	-	0.011	-	0.092	+	0.17	-	<0.001	+	0.09	-	<0.001	-	0.004
EC-EARTH- RCA4	+	0.076	+	0.41	-	0.35	+	0.11	-	<0.001	-	<0.001	-	0.009	-	0.56
MIROC5- RCA4	+	0.78	+	<0.001	-	0.002	-	<0.001	-	<0.001	+	0.82	-	<0.001	-	0.002
MPI-ESM-LR- RCA4	-	<0.001	+	<0.001	+	0.001	-	0.38	-	<0.001	-	<0.001	+	0.092	-	<0.001
NCC-NorESM1- RCA4	-	0.49	-	0.039	-	<0.001	-	0.005	+	0.18	-	0.81	-	<0.001	+	0.075
NOAA/ GFDL-ESM2M- RCA4	+	0.02	-	0.75	-	0.012	-	0.57	-	0.33	+	0.26	-	0.025	-	<0.001

Table 8. Same as Table 4 but for soil water content.

Soil water content																
1981-2000																
	January				July				January				July			
	T				p-value				T				p-value			
Simulated from observation	+				≤0.001				-				0.011			
RCP 4.5																
	2020-2039				2040-2059				2060-2079				2080-2099			
	January		July		January		July		January		July		January		July	
	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value
EC-EARTH- CCLM4-8-17	-	0.016	-	≤0.001	-	≤0.001	-	≤0.001	-	0.7	-	≤0.001	-	0.11	-	0.096
IPSL-CM5A-MR- RCA4	-	≤0.001	-	≤0.001	-	≤0.001	-	0.66	+	0.002	+	0.006	-	≤0.001	-	0.056
CCCma-CanESM2- RCA4	-	0.002	-	≤0.001	+	0.024	+	0.42	-	≤0.001	+	0.001	+	0.016	+	0.057
CNRM-CM5- CCLM4-8-17	+	≤0.001	+	≤0.001	+	0.44	+	0.09	+	≤0.001	+	≤0.001	+	0.38	-	0.18
CNRM-CM5- RCA4	-	0.001	+	0.12	+	0.97	-	0.33	-	0.31	-	0.87	-	≤0.001	+	0.37
EC-EARTH- RCA4	-	0.53	-	≤0.001	-	≤0.001	-	≤0.001	+	0.001	-	0.22	-	0.99	-	0.019
MIROC5- RCA4	+	≤0.001	+	0.21	-	≤0.001	+	0.006	+	0.075	-	≤0.001	-	≤0.001	+	≤0.001
MPI-ESM-LR- RCA4	-	0.0005	-	0.007	+	0.01	+	≤0.001	+	≤0.001	-	0.35	-	≤0.001	+	0.044
NCC-NorESM1- RCA4	-	≤0.001	+	0.1	-	0.009	-	0.002	-	0.035	+	0.31	+	0.01	-	0.28
NOAA/ GFDL-ESM2M- RCA4	-	≤0.001	-	0.52	-	≤0.001	+	0.017	-	0.51	-	0.012	-	≤0.001	-	≤0.001
RCP 8.5																
	2020-2039				2040-2059				2060-2079				2080-2099			
	January		July		January		July		January		July		January		July	
	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value
EC-EARTH- CCLM4-8-17	-	≤0.001	+	0.001	+	0.69	-	0.1	-	≤0.001	-	0.011	-	≤0.001	+	0.88
IPSL-CM5A-MR- RCA4	-	≤0.001	-	0.13	-	≤0.001	-	≤0.001	-	≤0.001	+	0.14	-	0.17	-	≤0.001
CCCma-CanESM2- RCA4	+	≤0.001	+	≤0.001	-	0.41	-	0.009	-	0.097	-	0.007	-	≤0.001	-	≤0.001
CNRM-CM5- CCLM4-8-17	-	≤0.001	-	≤0.001	-	0.83	-	0.016	+	≤0.001	+	0.84	-	≤0.001	+	≤0.001
CNRM-CM5- RCA4	-	≤0.001	-	0.038	+	0.28	-	0.001	-	≤0.001	+	≤0.001	-	≤0.001	+	0.003
EC-EARTH- RCA4	-	0.0001	-	0.46	-	0.85	-	0.27	-	≤0.001	-	≤0.001	-	0.0026	+	0.18
MIROC5- RCA4	+	0.021	+	≤0.001	-	≤0.001	-	0.001	-	≤0.001	-	0.17	-	≤0.001	+	0.6
MPI-ESM-LR- RCA4	-	≤0.001	+	≤0.001	+	0.043	+	0.001	-	≤0.001	-	0.33	+	0.68	-	≤0.001
NCC-NorESM1- RCA4	-	0.029	-	0.62	-	≤0.001	-	0.037	+	≤0.001	+	0.14	-	≤0.001	+	0.003
NOAA/ GFDL-ESM2M- RCA4	+	≤0.001	-	≤0.001	-	≤0.001	+	0.013	-	0.87	+	0.44	-	0.01	-	≤0.001

Table 9. Same as Table 4 but for evapotranspiration.

Evapotranspiration																
1981-2000																
	January				July				January				july			
	T				p-value				T				p-value			
Simulated from observation	+				0.03				-				0.037			
RCP 4.5																
	2020-2039				2040-2059				2060-2079				2080-2099			
	January		July		January		July		January		July		January		July	
	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value
EC-EARTH- CCLM4-8-17	-	0.007	-	0.001	-	<0.001	-	<0.001	-	0.8	-	<0.001	-	0.004	-	<0.001
IPSL-CM5A-MR- RCA4	-	<0.001	-	<0.001	-	<0.001	-	0.19	+	0.58	+	0.01	-	0.06	-	0.01
CCCma-CanESM2- RCA4	-	0.17	-	<0.001	+	<0.001	-	0.9	-	<0.001	+	0.05	+	0.05	+	0.021
CNRM-CM5- CCLM4-8-17	+	<0.001	+	<0.001	+	0.9	-	0.44	+	<0.001	+	<0.001	+	0.02	+	0.03
CNRM-CM5- RCA4	+	0.8	+	<0.001	-	0.02	+	0.14	-	0.9	-	0.03	-	0.12	-	0.58
EC-EARTH- RCA4	+	0.6	-	<0.001	-	<0.001	-	0.013	+	<0.001	-	0.18	-	<0.001	-	0.03
MIROC5- RCA4	+	<0.001	-	0.1	-	<0.001	+	0.09	+	0.05	-	<0.001	-	0.63	+	<0.001
MPI-ESM-LR- RCA4	+	0.1	-	0.5	+	0.11	+	<0.001	+	<0.001	+	0.29	-	0.21	+	<0.001
NCC-NorESM1- RCA4	-	<0.001	-	0.01	+	0.29	-	<0.001	-	0.02	+	0.03	+	0.16	-	0.026
NOAA/ GFDL-ESM2M- RCA4	-	<0.001	-	0.9	-	<0.001	-	<0.001	+	0.22	+	<0.001	-	<0.001	-	<0.001
RCP 8.5																
	2020-2039				2040-2059				2060-2079				2080-2099			
	January		July		January		July		January		July		January		July	
	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value	T	p-value
EC-EARTH- CCLM4-8-17	+	0.9	+	<0.001	+	0.054	-	0.48	-	<0.001	-	0.75	-	<0.001	+	0.006
IPSL-CM5A-MR- RCA4	-	<0.001	+	0.73	-	<0.001	-	0.14	-	<0.001	-	0.043	+	<0.001	-	<0.001
CCCma-CanESM2- RCA4	+	<0.001	+	0.014	+	0.45	-	0.036	-	0.45	-	<0.001	-	<0.001	-	<0.001
CNRM-CM5- CCLM4-8-17	-	0.0011	-	0.01	-	0.032	+	0.011	+	<0.001	-	<0.001	-	<0.001	+	0.61
CNRM-CM5- RCA4	-	<0.001	-	<0.001	-	0.021	+	0.006	-	<0.001	+	<0.001	-	<0.001	+	0.9
EC-EARTH- RCA4	+	0.006	+	0.13	-	0.9	+	0.63	-	<0.001	-	<0.001	-	0.035	+	0.3
MIROC5- RCA4	+	0.9	+	<0.001	-	0.032	-	<0.001	-	<0.001	-	<0.001	-	<0.001	-	0.05
MPI-ESM-LR- RCA4	-	<0.001	+	<0.001	+	<0.001	+	0.0004	-	0.006	-	0.0002	+	<0.001	-	<0.001
NCC-NorESM1- RCA4	+	0.033	-	0.052	-	<0.001	-	<0.001	+	0.015	+	<0.001	-	<0.001	-	0.55
NOAA/ GFDL-ESM2M- RCA4	+	0.0008	-	<0.001	-	0.001	+	<0.001	+	0.87	+	0.23	-	0.047	-	<0.001

Supplementary Material

Spatio-temporal trends of hydrological water components: case of the Tafna basin (North-western Africa)

Amina MAMI [1,2,*], Djilali YEBDRI [1], Sabine SAUVAGE [2], Mélanie RAIMONET[2] and José Miguel SANCHEZ PEREZ[2,*]

[1] LGTE, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran « Mohamed Boudiaf », Oran, Algérie
2 Laboratoire Ecologie fonctionnelle et Environnement, UMR 5245, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse, France
* mami.amina89@yahoo.fr; amina.mami@univ-usto.dz; jose-miguel.sanchez-perez@univ-tlse3.fr; Tel: +213-778-696-894.

Supplement.

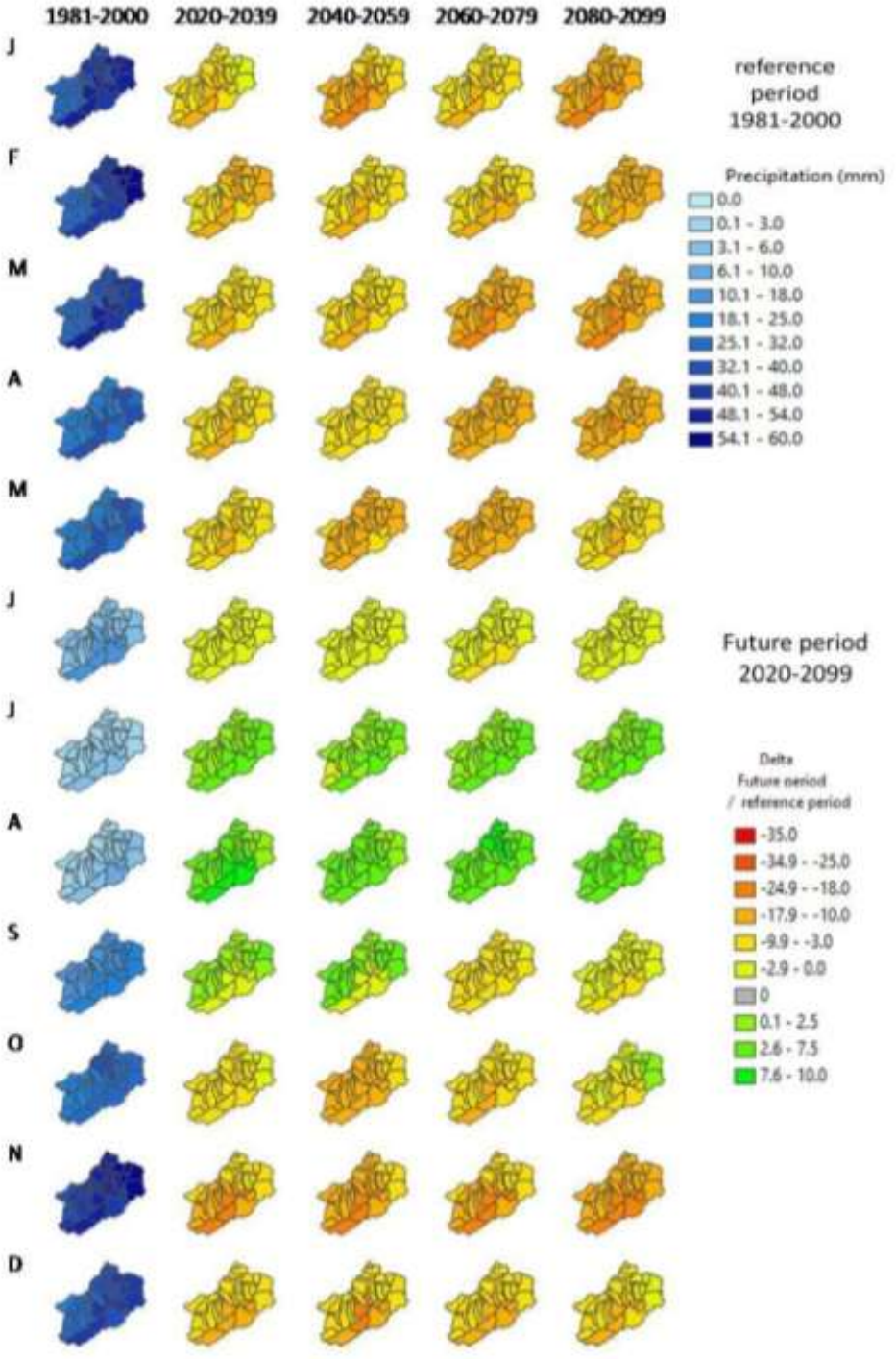


Figure A. Precipitation during the reference period (1981-2000) and absolute variations for the periods (2020-2039; 2040-2059; 2060-2079 and 2080-2099) at monthly scale with RCP 4.5.

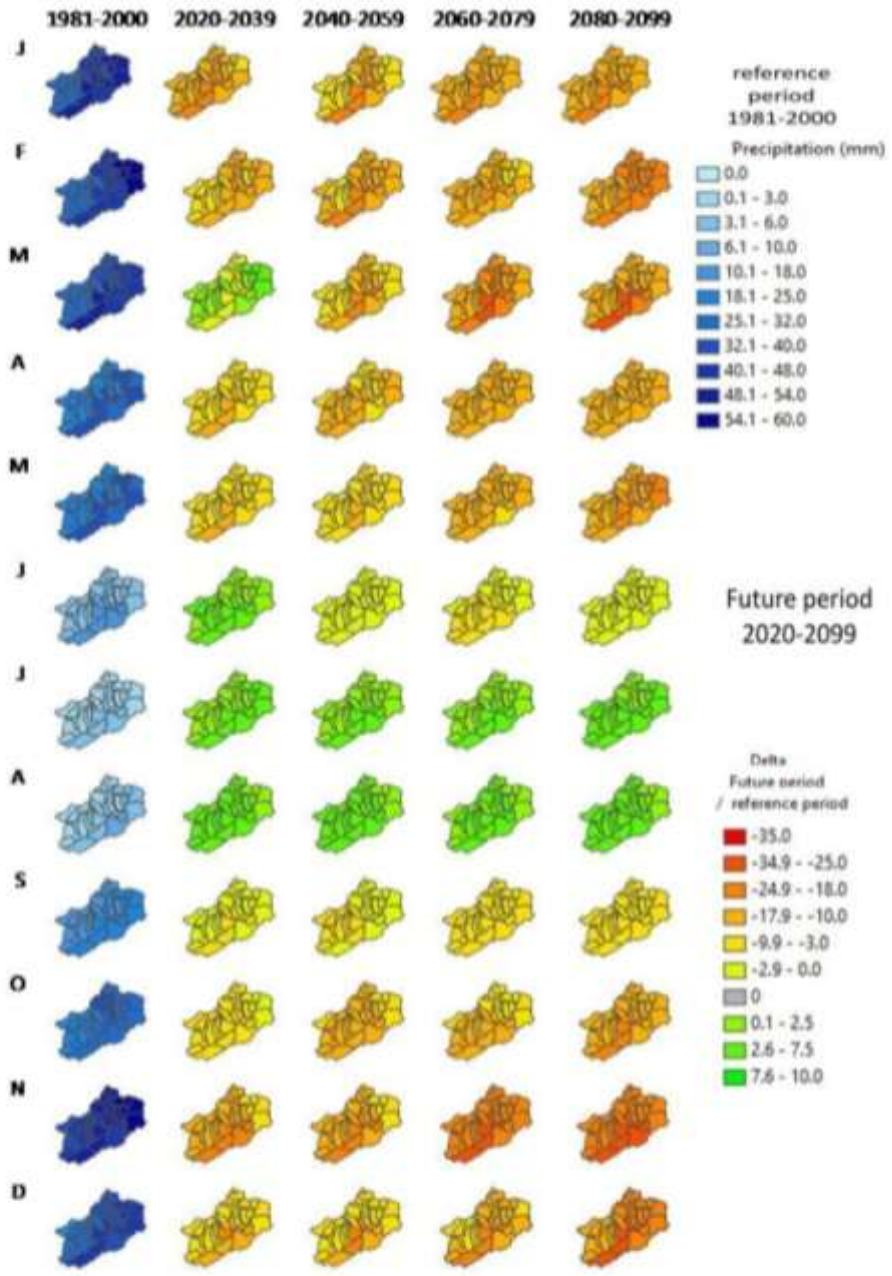


Figure B. Precipitation during the reference period (1981-2000) and absolute variations for the periods (2020-2039; 2040-2059; 2060-2079 and 2080-2099) at monthly scale with RCP 8.5.

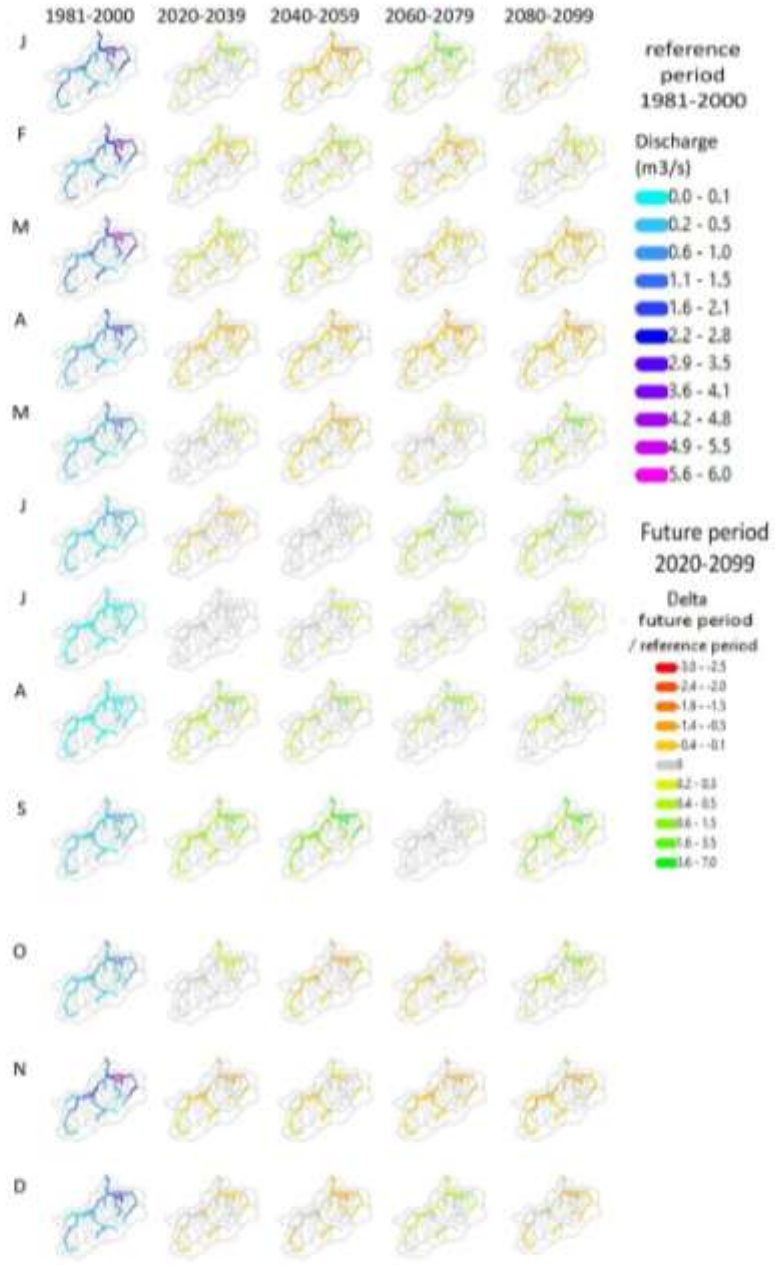


Figure C. Mean river discharge during the reference period (1981-2000) and absolute variations for the periods (2020-2039; 2040-2059; 2060-2079 and 2080-2099) at monthly scale with RCP 4.5.

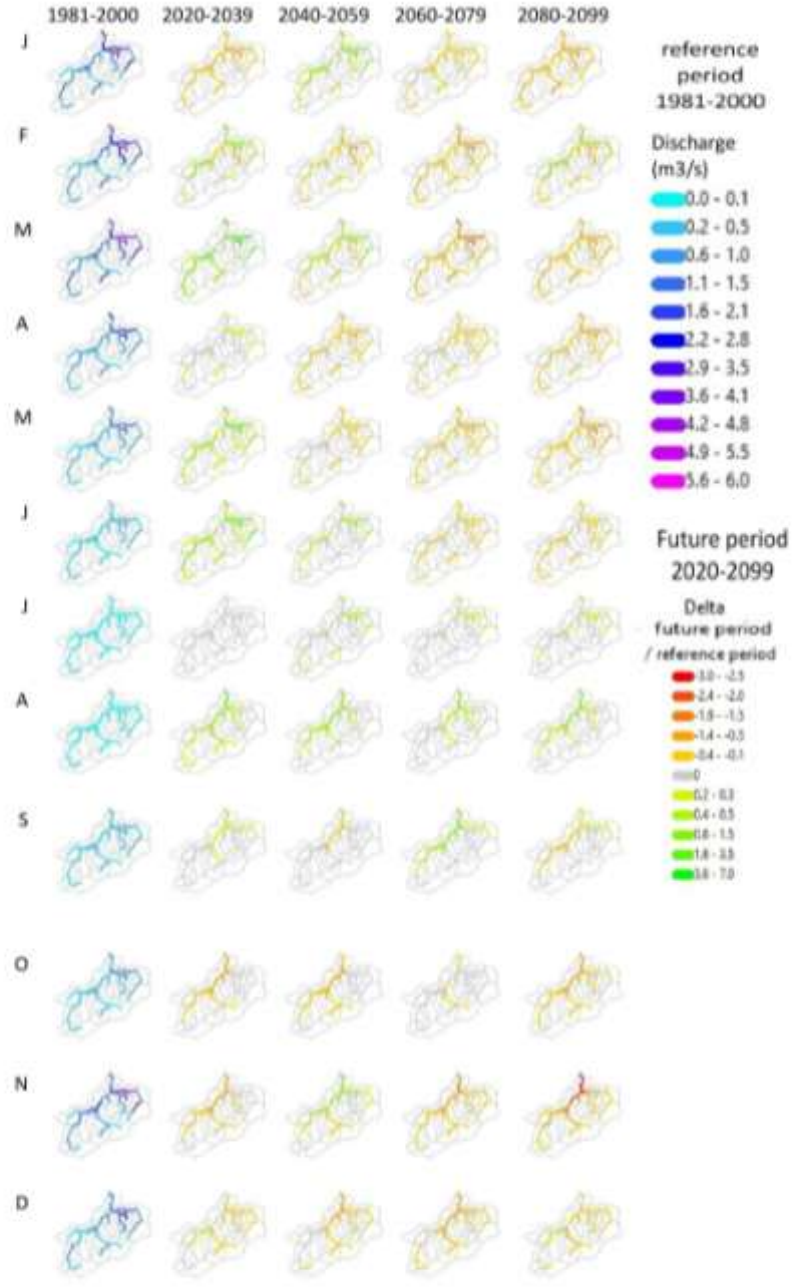


Figure D. Mean river discharge during the reference period (1981-2000) and absolute variations for the periods (2020-2039; 2040-2059; 2060-2079 and 2080-2099) at monthly scale with RCP 8.5.

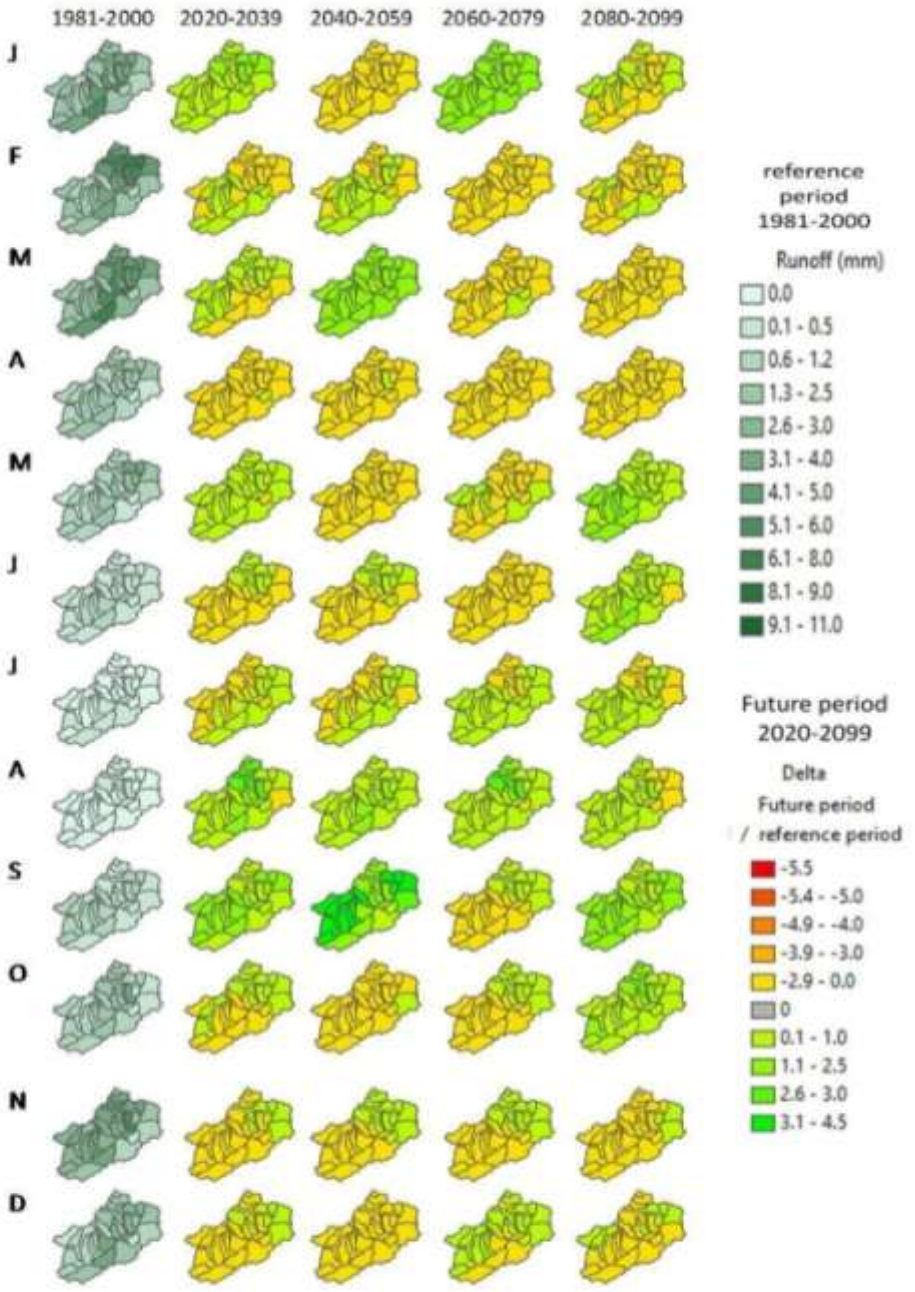


Figure E. Runoff during the reference period (1981-2000) and absolute variations for the periods (2020-2039; 2040-2059; 2060-2079 and 2080-2099) at monthly scale with RCP 4.5.

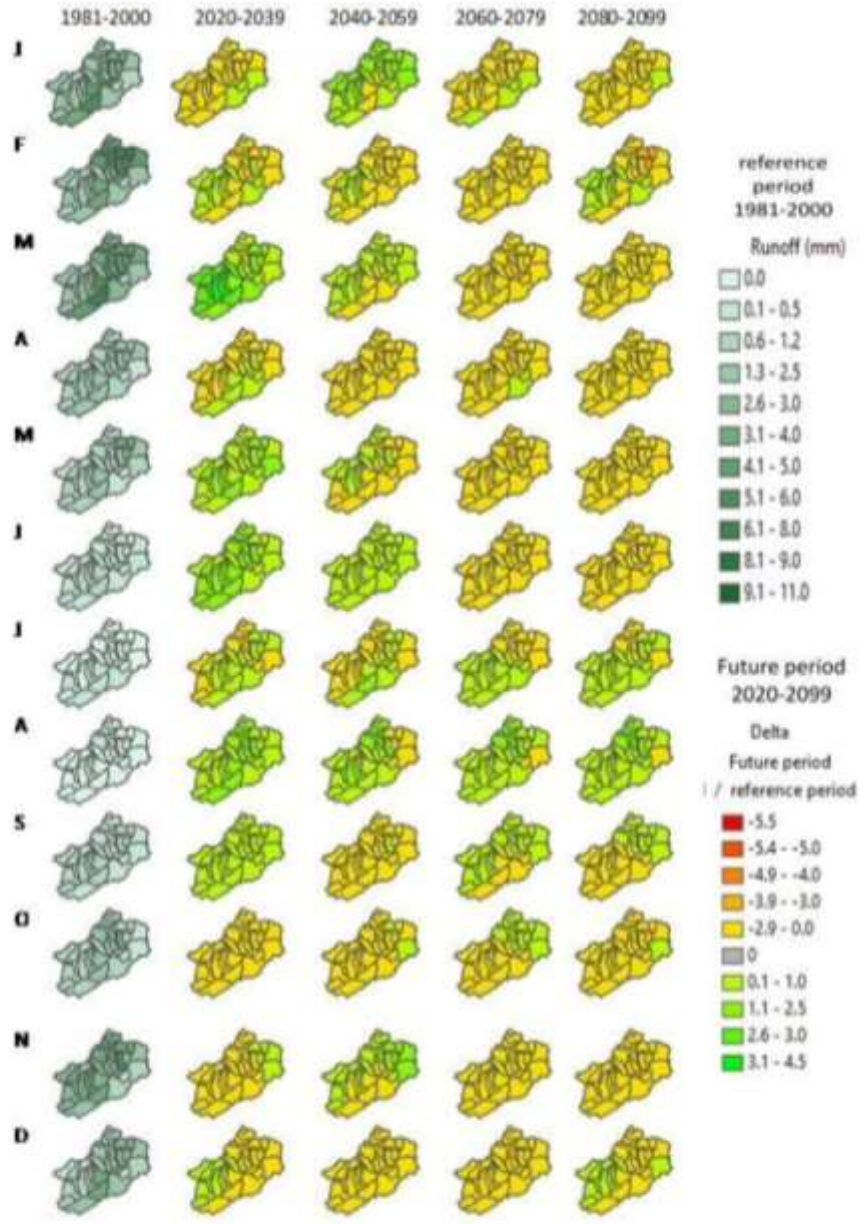


Figure F. Runoff during the reference period (1981-2000) and absolute variations for the periods (2020-2039; 2040-2059; 2060-2079 and 2080-2099) at monthly scale with RCP 8.5.

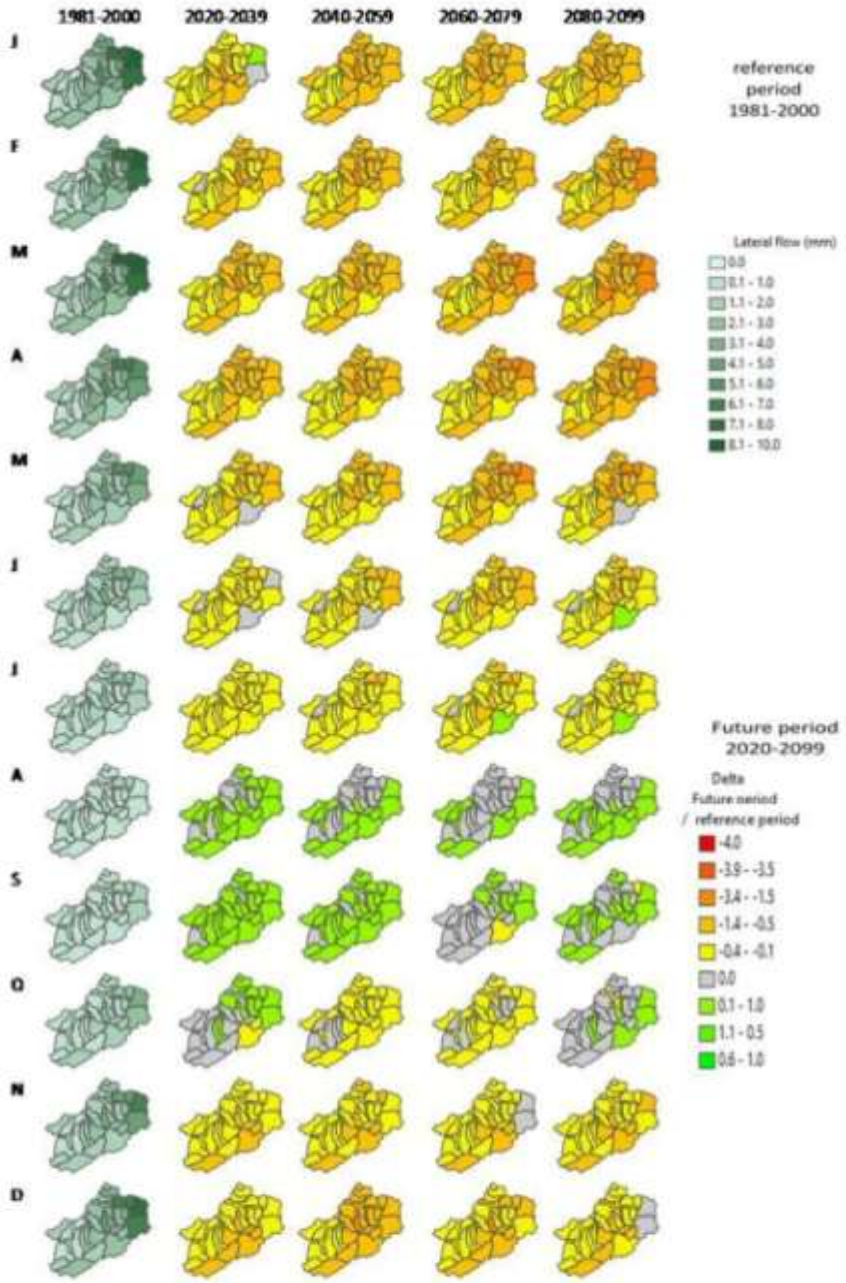


Figure G. Lateral flow during the reference period (1981-2000) and absolute variations for the periods (2020-2039; 2040-2059; 2060-2079 and 2080-2099) at monthly scale with RCP 4.5.

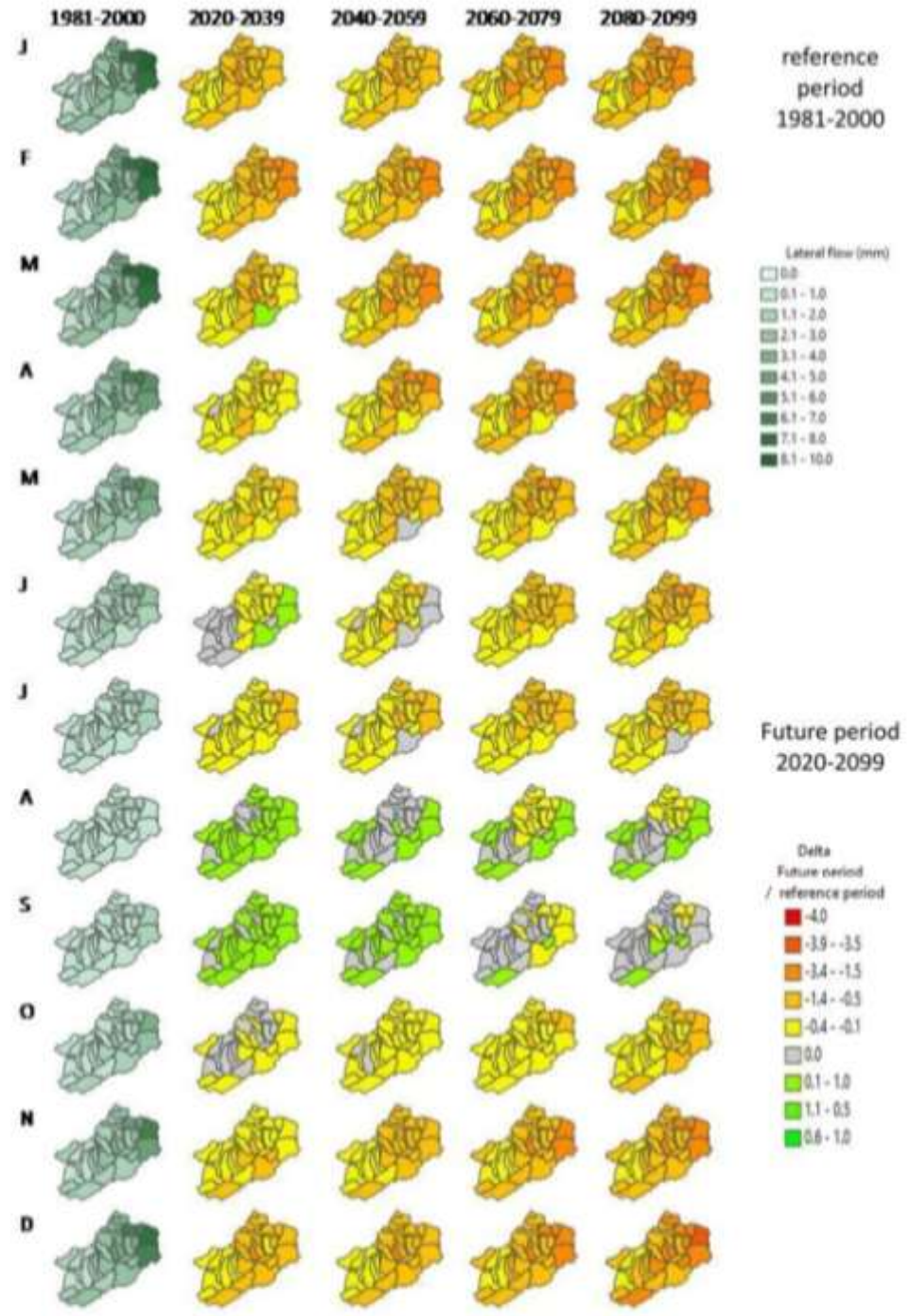


Figure H. Lateral flow during the reference period (1981-2000) and absolute variations for the periods (2020-2039; 2040-2059; 2060-2079 and 2080-2099) at monthly scale with RCP 8.5.

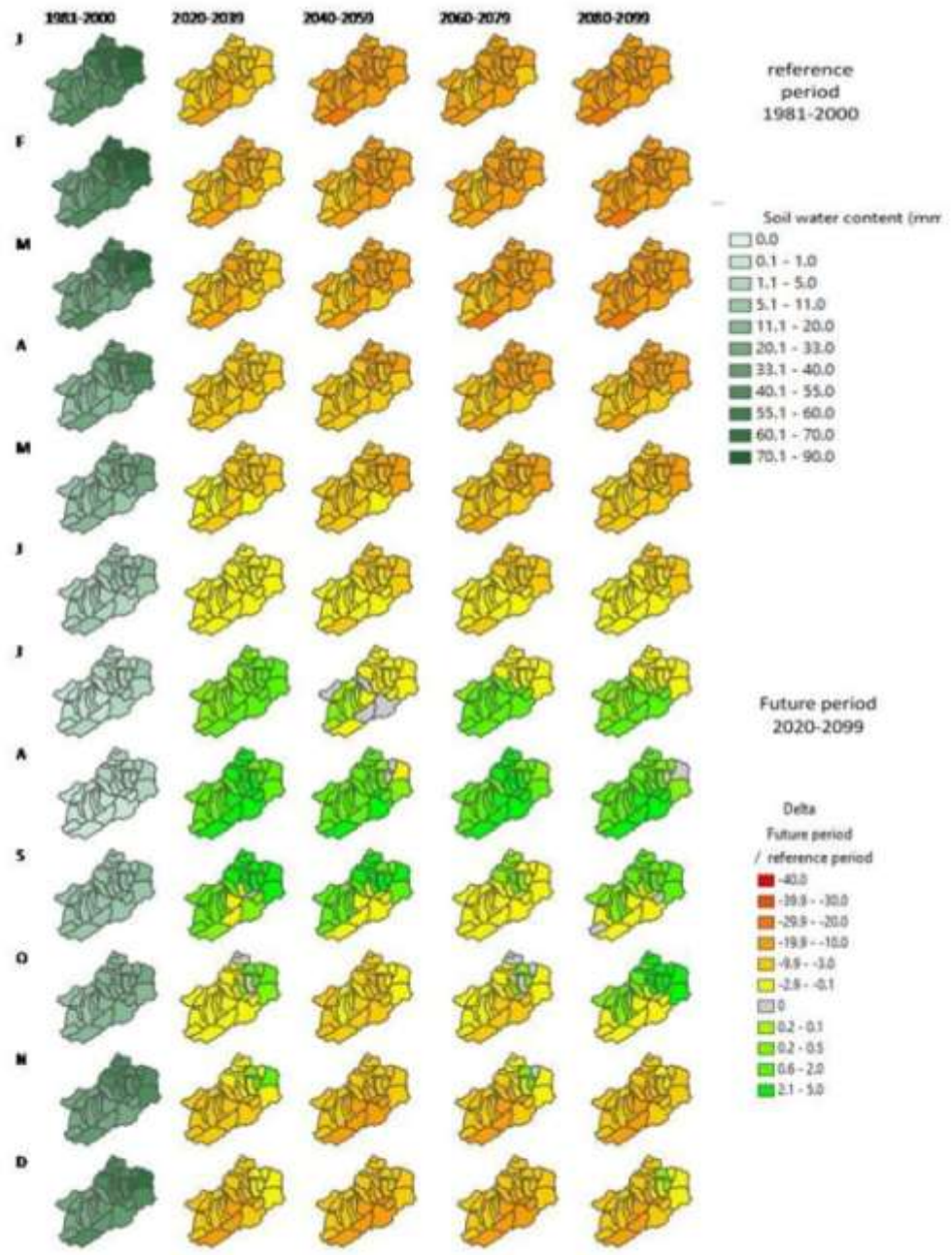


Figure I. Soil water content during the reference period (1981-2000) and absolute variations for the periods (2020-2039; 2040-2059; 2060-2079 and 2080-2099) at monthly scale with RCP 4.5.

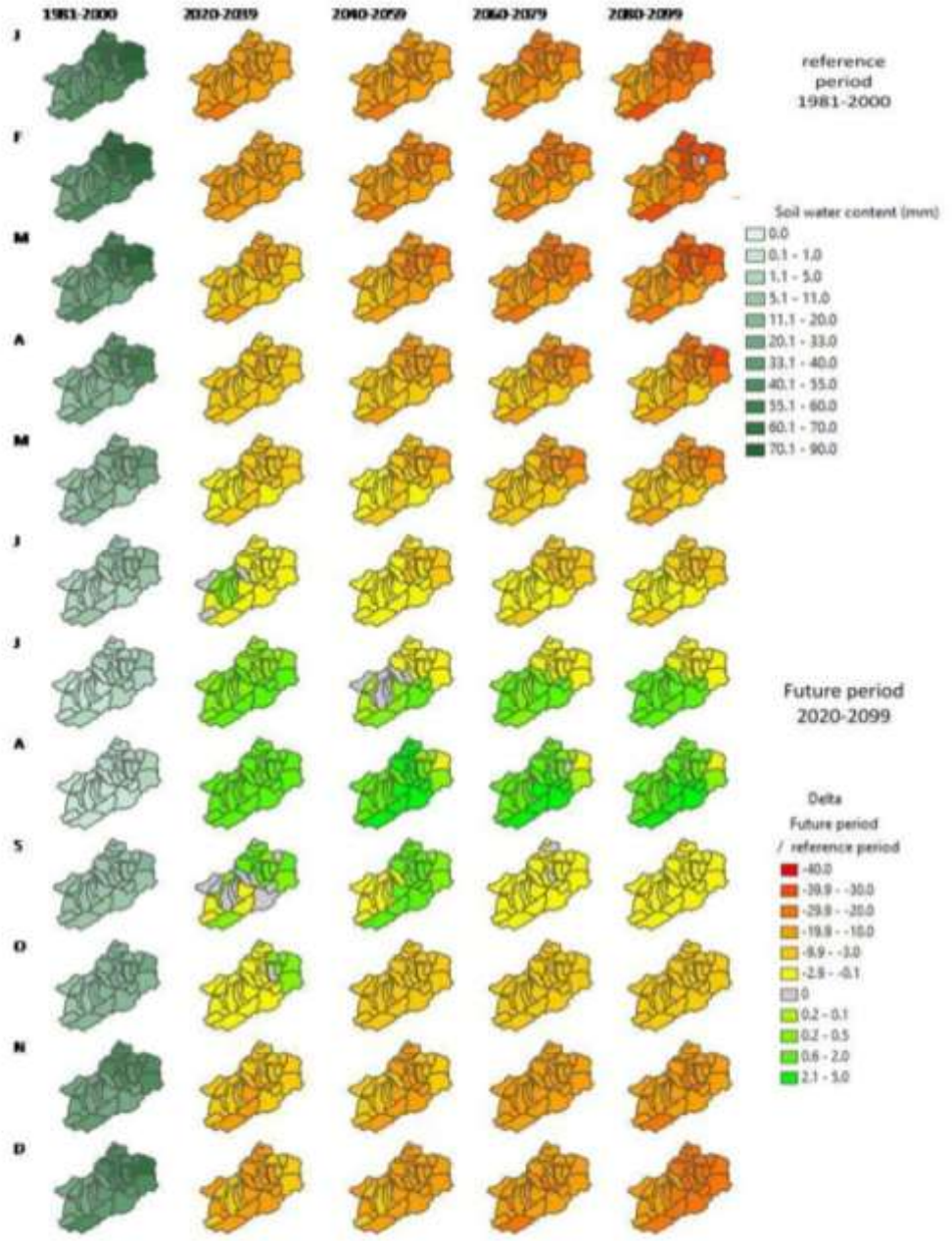


Figure J. Soil water content during the reference period (1981-2000) and absolute variations for the periods (2020-2039; 2040-2059; 2060-2079 and 2080-2099) at monthly scale with RCP 8.5.

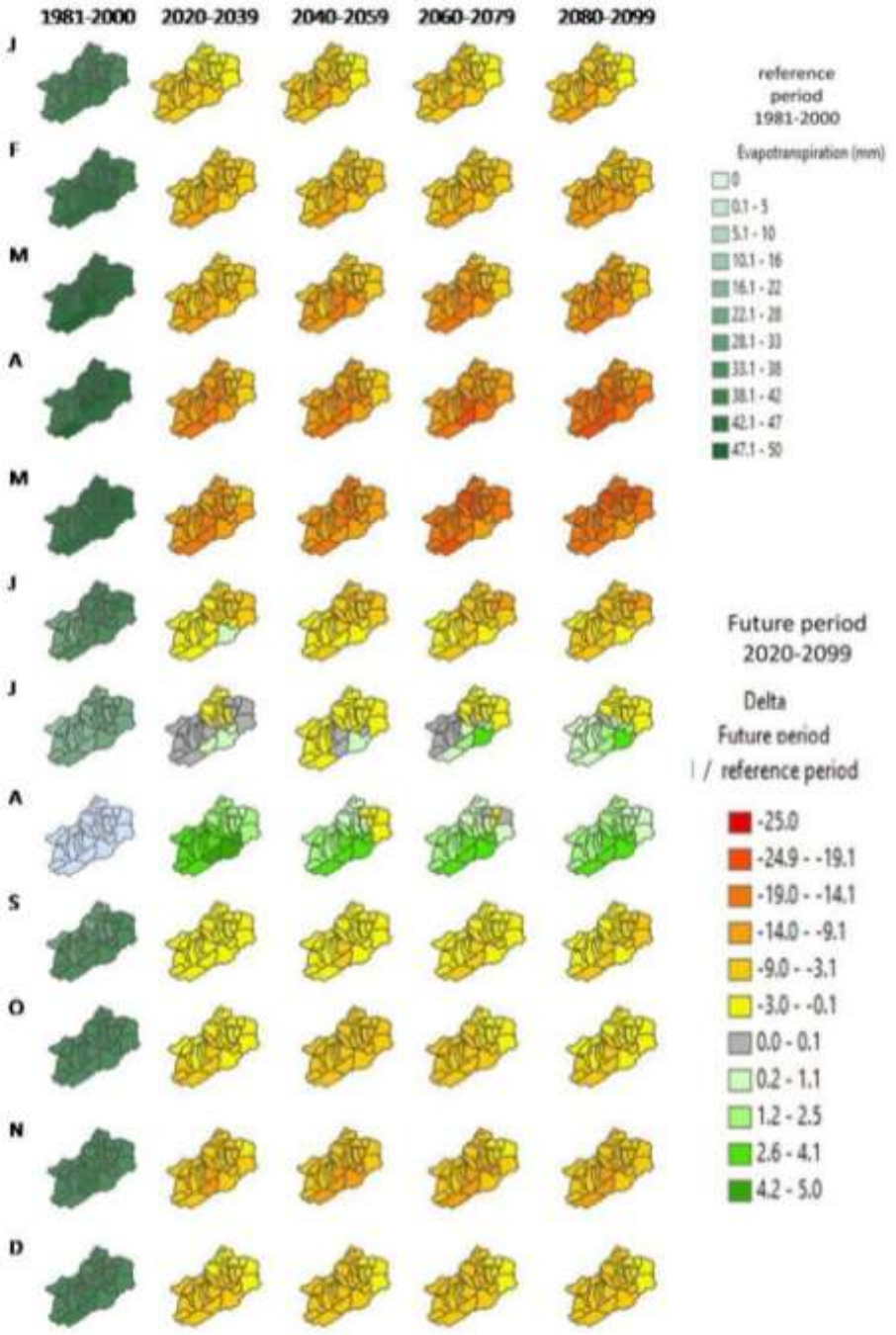


Figure K. Evapotranspiration during the reference period (1981-2000) and absolute variations for the periods (2020-2039; 2040-2059; 2060-2079 and 2080-2099) at monthly scale with RCP 4.5.

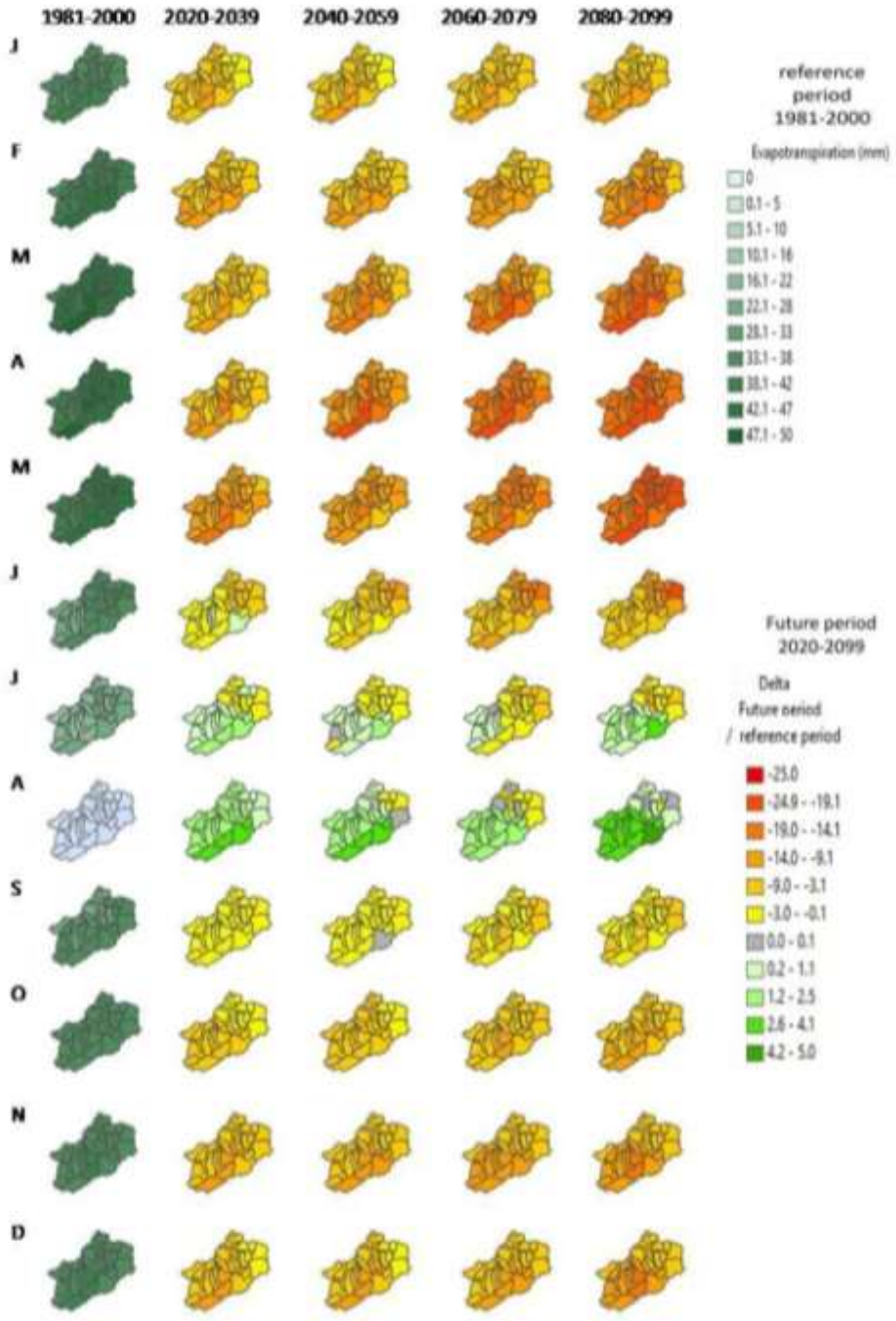


Figure L. Evapotranspiration during the reference period (1981-2000) and absolute variations for the periods (2020-2039; 2040-2059; 2060-2079 and 2080-2099) at monthly scale with RCP 8.5.

CHAPITRE VII : L'EVALUATION DES CARACTERISTIQUES DE SECHERESSE A L'AIDE D'INDICES STANDARDISES

CHAPITRE VIII : DISCUSSION GÉNÉRALE

L'objectif de notre modeste travail est d'évaluer l'impact des changements climatiques sur le cycle hydrologique. La mise en place de ce projet est réalisée sur le bassin de la Tafna, à l'aide du modèle conceptuel semi-distribué SWAT (Soil and Water Assessment Tool), ainsi qu'avec le forçage des modèles climatiques régionaux du projet Cordex-Africa, traités et ajustés, par le modèle SWAT.

Dans la première partie de notre étude nous avons évalué l'utilisation des RCMs, leur correction du biais et l'influence de cette dernière sur l'hydrologie. Les sorties des précipitations à partir des RCMs sont hautement biaisées dans la région Méditerranéenne citant les CLMcom et SHMI, avec un intervalle de biais variant entre -40% et +80% par rapport aux observations (Panthou et al., 2016; Kotlarski et al., 2014; Vautard et al., 2013).

Des méthodes de corrections de biais sont proposées pour ajuster les sorties des MCRs afin d'évaluer les changements climatiques, de la simple méthode « linear scaling » à la sophistiquée, non linéaire « distribution mapping ».

Le logiciel CMhyd est utilisé dans notre étude pour extraire et corriger le biais des sorties des MCRs (précipitation et température), mais aussi pour préparer les résultats obtenus selon le format adéquat pour modéliser et analyser l'impact des changements climatiques par le modèle SWAT (Senent-Aparicio et al., 2017; Brouziyne et al., 2018; Xiang et al., 2018). Dans certaines études on trouve que les chercheurs ont opté directement pour une méthode de correction du biais telle que « distribution mapping » (Senent-Aparicio et al., 2017; Xiang et al., 2018) ou celle de « linear scaling » (Brouziyne et al., 2018) sans étudier la performance de chaque méthode dans la région étudiée. Cependant, il est recommandé d'évaluer la performance des méthodes de corrections citées ci-dessus ainsi que leur impact sur l'hydrologie. De ce fait, nous comparons les sorties hydrologiques en mensuel obtenues par le forçage des RCMs dans le modèle SWAT, des deux versions, les RCMs brutes et les RCMs corrigés du biais pendant la période de référence (1981-2000).

Dans cette étude les méthodes (LS, DM, LOCI) pour les précipitations, et (LS, DM, et VS) pour les températures minimales/maximales, ont été testées pour corriger les biais existants dans les RCM du projet Cordex-Afrique par rapport aux observations durant la période de référence. Ces méthodes linéaires (Linear scaling et Local intensity scaling) (Schmidli et al., 2006; Leander and Buishand, 2007) et non linéaire (Distribution mapping) (Ahmed et al., 2015; Fang et al., 2015; Kim et al., 2016; Luo et al., 2018; Vithlani and Rank, 2016; Teutschbein and Seibert, 2012) donnent de résultats acceptables de réduction de biais pour les RCMs utilisés dans cette étude.

Néanmoins pour les précipitations, la méthode non linéaire « DM » réduit considérablement le biais dans la majorité des stations climatiques de notre étude. Ce résultat est en concordance avec différentes études pour différentes régions (Luo et al., 2018; Senent-Aparicio et al., 2017; Teutschbein and Seibert, 2012). Pour la température minimale et maximale, les méthodes DM et VS corrigent mieux le biais par rapport à la méthode LS. Ce résultat coïncide avec d'autres études (Luo et al., 2018; Szabó-Takács et al., 2019; Teutschbein and Seibert, 2012).

Afin de procéder à l'évaluation des changements climatiques et à l'estimation de l'impact de la correction du biais des RCMs sur l'hydrologie, par la modélisation hydrologique, nous avons réalisé et introduit différentes combinaisons dans le modèle SWAT les paramètres (précipitations et températures) corrigés par les méthodes étudiées dans ce travail, ce qui nous a montré que l'ajustement des températures influence moins la modélisation du débit des cours d'eau, par rapport à l'ajustement des précipitations. Ces combinaisons des méthodes nous permettent de mieux sélectionner la méthode adéquate afin d'obtenir le débit du cours d'eau simulé correspondant aux observations durant la période de référence (1981-2000).

La correction du biais des précipitations est primordiale afin d'atteindre notre objectif d'évaluation de l'impact des changements climatiques sur l'hydrologie. Muerth et al. (2013) souligne que le fait d'utiliser les RCMs corrigés du biais dans les modèles hydrologiques donne une représentation des hydrographes similaires aux observations. La dynamique des débits des cours d'eau est similaire tant dans la version corrigée que celle non corrigée du biais des précipitations, en revanche, le biais est significativement réduit après correction, ce qui confirme la nécessité de la correction des RCMs pour une étude hydrologique.

Certaines études recommandent l'utilisation des RCMs brutes parce que la correction du biais pourrait mener à des résultats trompeurs (Maraun et al., 2010; Kjellstro et al., 2011; Thomas et al., 2012; Luo et al., 2018), mais en général, la correction du biais est recommandée pour réduire le biais existant entre les variables climatiques simulées et celles observées (Lenderink et al., 2007; Robert Leander and T. Adri Buishand, 2007; Youssef Brouziyne et al., 2018), et spécialement pour les études de l'évaluation des impacts des changements climatiques sur l'hydrologie (Lenny Bernstein et al, 2007).

L'application du modèle SWAT est réalisée pour étudier l'impact des changements climatiques sur les composantes du cycle hydrologique. le modèle SWAT conçu sur le bassin de la Tafna est calibré et validé durant une période passée, de 1981 à 1995 et de 1996 à 2010 respectivement (Mami et al., in press), par différentes stations hydrométriques ayant des résultats de NSE et KGE (Knoben et al., 2019) très bons à l'exutoire à l'exception de la station A (NSE = -0.30 et KGE = 0.16) lors de la validation. Cette anomalie a été observée dans l'étude de Zettam et al. (2017). Ceci est dû à l'influence des eaux résiduaires domestiques et industrielles provenant des villes de Tlemcen et Maghnia en Algérie et Oujda au Maroc. A l'exception de cette station, les résultats des outils statistiques obtenus lors de la calibration et la validation sont similaires à plusieurs études faites sur des régions à climat semi-aride : celle de Zettam (2017) pour le même bassin en question avec un NSE rangé entre 0,42 et 0,75, de Neranrzaki (2015) pour le bassin Hamadan-Bahar en Iran avec des valeurs de NSE rangées entre 0,33 et 0,77, de Bouraoui (2005) pour le bassin de Medjerda en Tunisie avec des valeurs variées entre 0,31 et 0,65, et celle de Hallouz (2019) pour le bassin versant de Harraza (Nord ouest de l'Algérie) avec des valeurs rangées entre 0.77 et 0.82. Ces résultats confirment que la calibration sur plusieurs stations dans le bassin est utile pour une bonne performance du modèle malgré l'hétérogénéité du site étudié (Jianwen Bai et al., 2017; Olkeba Tolessa Leta et al., 2017; Rewati Niraula et al., 2012; Youen Grusson et al., 2018; Zettam et al., 2017). L'évaluation du cycle hydrologique est basée sur la calibration du modèle sur les débits des cours d'eau, car aucune autre composante hydrologique ne possède des valeurs suffisantes à l'échelle spatiale et temporelle. La calibration du modèle est validée et comparée aux données cartographiques publiées par l'agence nationale des ressources hydrique (National Agency of Hydrologic Resources (ANRH), 2003a; National Agency of Hydrologic Resources (ANRH), 2003; National Agency of Hydrologic Resources (ANRH), 2003b) et aussi de l'étude de Meddi et al. (2016). En ce

qui concerne la pluie les valeurs obtenues dans SWAT représentent 314 mm/an (valeurs de l'ANRH = 250 – 550 mm/an), l'évapotranspiration potentielle 1260 mm/an (valeurs de l'ANRH = 90 – 1400 mm/an), et le ruissellement 19 mm/an (valeurs de l'ANRH = 10 – 100 mm/an), ce qui confirme la validité des résultats de notre étude.

Les résultats de l'évolution annuelle des variables températures minimales/maximales et précipitation sont développés dans le chapitre V. La tendance ascendante de la température minimale/maximale est déjà observée depuis des décennies, cet accroissement est estimé à +0,2°C par décennie (Bernstein et al, 2007). Ce qui confirme les résultats obtenus par notre étude montrant une augmentation approximative de +0,3°C par vingt ans suivant le scénario RCP 4.5 et +0,5°C suivant le RCP 8.5. Une similarité de ces tendances est ainsi remarquée par les travaux effectués dans le Nord de l'Afrique en utilisant les RCMs du projet Cordex domaine « MENA » (the Middle East and North Africa) et « Europe » (Ahmadalipour and Moradkhani, 2018; Dosio and Panitz, 2016; Jacob et al., 2014; Zeroual et al., 2018). Cette augmentation de la température minimale/maximale entraîne à un réchauffement de la région en question, en l'associant avec la diminution de la pluie conduirait à une intensification de la sécheresse.

Dans la région Méditerranéenne, la diminution de la pluie est estimée respectivement, à -20% et -30% suivant les RCPs 4.5 et 8.5 (IPCC Working Group I et al., 2013; Jacob et al., 2014; Schilling et al., 2012; Philandras et al., 2011; Solomon et al., 2007; Brouziyne et al., 2018). Les dix RCMs évalués dans notre étude montrent une diminution significative des précipitations pour la quasi-totalité de la période future, avec une intensité plus prononcée suivant le RCP 8.5 (-34%) comparée à celui du RCP 4.5 (-25%). Ces résultats sont en harmonie avec ceux de Zeroual (2018) dans le Nord de l'Algérie, utilisant le RCMs du projet Cordex-Africa, qui a signalé que l'aridité paraît plus prononcée durant la période 2045-2098. Cette diminution affecte directement les débits des cours d'eau du bassin de la Tafna, ce qui pourrait ralentir la période de remplissage des barrages causant un déséquilibre entre le système de l'offre et la demande de l'eau de consommation.

Le 4ème rapport de l'IPCC (2007) indique une diminution atteignant les -30% des débits des cours d'eau pour la région Méditerranéenne durant la période future. Tramblay et al. (2013) et Brouzyine et al. (2018) ont obtenu des résultats similaires pour la région Marocaine. Ces résultats sont complémentaires à notre étude, qui présente une réduction du débit des cours

d'eau en utilisant 10 combinaisons de GCM/RCM. La diminution du débit qui apparaît à partir de 2060 pour le RCP 4.5 et de 2040 pour le RCP 8.5 influence la disponibilité des ressources en eau superficielles et souterraines, ce qui pourrait causer des sécheresses associées à des vagues de chaleur, impliquant une diminution voire une disparition de la faune et la flore. Ceci pourrait ainsi causer un déséquilibre entre l'alimentation et la demande en eau disponible, et implicitement avoir un effet négatif sur l'alimentation en eau potable qui représente le pourcentage majoritaire de la demande en eau par rapport à l'irrigation des terres agricoles et l'alimentation en eau pour l'industrie. Cette diminution du débit des cours d'eau pourrait d'un autre côté influencer négativement sur l'emmagasinement de la réserve utile des réservoirs, et augmenter le stress hydrique dans cette région vulnérable à la sécheresse.

La diminution importante du débit des cours d'eau suivant le RCP 8.5 indique que l'émission du CO_2 sans stabilisation pourrait causer de sévères impacts dans le Nord de l'Afrique. Il est donc important de souligner la nécessité de la stabilisation de la concentration du gaz CO_2 émie afin d'éviter les conséquences sur le domaine socio-économique dans ces régions semi-arides.

Notre travail renforce les études faites sur l'évaluation des impacts des changements climatiques sur la région Méditerranéenne (Gan et al., 2016; Ruti et al., 2016; Zittis et al., 2019, Hadour et al., 2020).

Zittis et al. (2019) mentionne que la majorité des RCMs du Projet Cordex donne de significatives augmentations de température tout au long de la période future, et que cette augmentation est plus prononcée par rapport aux évolutions globales. Toutefois, la majorité des études est basée sur le Projet Med-Cordex (domaine Méditerranéen) (Gan et al., 2016; Ruti et al., 2016; Zittis et al., 2019), et notre étude basée sur l'utilisation du projet Cordex-Africa confirme l'augmentation de la température et la diminution des pluies durant la période future au niveau du bassin de la Tafna qui fait partie de la région Méditerranéenne.

Dans la partie qui suit, nous discuterons les tendances spatio-temporelles sur les différentes composantes du cycle hydrologique, en utilisant le modèle semi-distribué SWAT, afin de représenter l'évolution de ces composantes à l'échelle spatiale et temporelle pour les mois de Janvier et Juillet au niveau du bassin de la Tafna. Cette évaluation est appliquée à

l'échelle mensuelle à l'aide du forçage de l'ensemble des RCMs, traités et ajustés, par le modèle SWAT.

Le Nord de l'Afrique est caractérisé par un hiver humide et un été sec (Yebdri et al., 2007; Gevaert et al., 2018; Mami et al., in press; Zettam et al., 2017), dans l'étude de Xoplaxi (2002) le taux des pluies est équivalent à 40% en hiver et 10% en été pendant la période passée dans cette région. En plus de ces caractéristiques, Brouzyine et al. (2018) indique que les mois les plus affectés par les changements climatiques dans le futur sont Janvier par une réduction de pluie de -49% et Juillet par un accroissement de température de +40% suivant le RCP 8.5, ainsi que de significatifs accroissements de température en Janvier au niveau du bassin de R'dom (Maroc) avoisinant le bassin de notre étude, ce qui pourrait être une étude comparable à notre travail. Nous avons ciblé notre évaluation des changements climatiques sur les deux mois Janvier et Juillet, tout en prenant en considération la tendance du reste des mois et leur influence sur ces deux mois en question.

L'évolution de la pluie a marqué une diminution en mois de Janvier tout au long de la période future avec un delta variant entre 1 et 24 mm (-2% à -40%). Autres résultats confirment cette diminution tel que ceux de Hadour et al. (2020) et Zeroual et al. (2018) en utilisant les RCMs de Cordex-Africa. Une diminution des précipitations annuelles est mentionnée dans différents travaux atteignant les -30% voire plus prononcée suivant les RCP 8.5 (IPCC Working Group I et al., 2013; Jacob et al., 2014; Janpeter Schilling et al., 2012; Solomon et al., 2007). Mais une augmentation des précipitions apparue en Juillet jusqu'à +30%, cette surestimation est aussi signalée dans les études de Taibi et al. (2017) et Hadour et al. (2020) sur la région du Nord de l'Afrique en utilisant les RCMs du projet Ensemble. Une similarité des résultats obtenus par Brouzyine et al. (2018) sur le bassin de R'dom (Maroc). Les résultats de la seconde période future 2040-2059 concordent avec ceux de Tramblay et al. (2013) par la diminution des précipitations durant les mois de Janvier en 2041-2062.

L'évolution des tendances en mois de Janvier est représentative aux mois pluvieux de l'année (de Novembre à Mars), la diminution des pluies pendant ces mois-ci suit la même tendance. En revanche, la surestimation montrée en été comprend les mois de Juillet, Août et Septembre et affecte toutes les composantes hydrologiques étudiées. Ces résultats

s'approchent de ceux de Hadour et al. (2020) évaluant les tendances climatiques sur le sous bassin versant de Choufly, ce dernier fait partie du bassin de la Tafna.

Cette diminution des précipitations pendant la période future affecte directement le ruissellement de surface et les débits des cours d'eau pour atteindre un pourcentage de réduction compris entre -20% et -45%, en ayant la même dynamique pour les deux scénarios de forçage radiatif RCP 4.5 et RCP 8.5. Néanmoins, la tendance au mois de Juillet est négligeable, et est due à l'interception des précipitations dans la conopée (Neitsch et al., 2005). Par conséquent, cette quantité d'eau reste retenue dans le sol puis devient disponible à l'évapotranspiration. L'augmentation du débit des cours d'eau, suivant les deux RCP 4.5 et 8.5, débute en mois d'Aout puis Septembre, alors que l'accroissement des précipitations débute le mois de Juillet, ce qui implique que ces deux mois Août et Septembre sont compensés par le mois de Juillet. Cette tendance de diminution de pluie en Janvier et l'augmentation en Juillet est aussi figurée dans l'étude de Tramblay et al. (2013) pour un bassin Marocain avoisinant à celui de la Tafna.

Par ailleurs, l'écoulement latéral est aussi affecté par la diminution des précipitations et suit la même dynamique de diminution des précipitations en mois de Janvier avec un pourcentage variable aux alentours de -35% et suit la même dynamique pendant les mois pluvieux avec une accentuation à partir du mois de Février jusqu'à Avril, mais moins signifiant en Juillet pour une augmentation du taux d'écoulement latéral pour les mois, -Aout, Septembre, Octobre-. Ceci pourrait être dû à l'hypothèse de la mise en mouvement de l'écoulement latéral provoqué par l'excès de l'eau dans le sol (Grusson, 2016).

Parallèlement, en Janvier, une significative diminution de la teneur en eau dans le sol couvre toute la surface du bassin de la Tafna durant la période future, avec un pourcentage de diminution d'environ -40%. Cette diminution de la teneur en eau dans le sol implique la diminution de l'évapotranspiration, qui dépend de l'augmentation de la température et principalement de la teneur en eau dans le sol. Ceci confirme la diminution de l'évapotranspiration en mois de Janvier. D'autre part, l'accroissement de la teneur en eau dans le sol en Juillet est dû à l'augmentation des précipitations estimées du même mois. Cependant, l'évapotranspiration est discutée dans différentes études par son augmentation en parallèle de l'augmentation de la température en période estivale (Blanco-Gómez et al., 2019; Dakhlaoui et

al., 2020; Saddique et al., 2019), alors que, la pluie est un facteur fondamental qui impacte l'évapotranspiration. On peut confirmer que la diminution de l'évapotranspiration en Janvier est influencée par la diminution de la pluie impliquant une diminution du niveau de la teneur en eau dans le sol.

Bucak et al. (2017), Ertürk et al. (2014), et Grusson et al. (2018) expliquent aussi que la diminution de l'évapotranspiration est due à la réduction du niveau de la teneur en eau dans le sol et est causée par la diminution des précipitations et l'augmentation de la température. Dans l'étude de Zittis et al. (2019), l'augmentation des précipitations obtenue en Juillet durant la période future par une augmentation de l'évapotranspiration durant le même mois.

La dépendance de l'évapotranspiration à la teneur en eau dans le sol est confirmée dans les figures présentées dans l'annexe de l'article (Mami et al., in revision) par rapport aux mois chauds (Juillet et Août). L'accroissement de l'évapotranspiration apparaît en Août alors que celui de la teneur en eau dans le sol commence à partir du mois de Juillet. Cependant, durant les mois froids, la teneur en eau dans le sol commence à diminuer à partir de Janvier et s'étend jusqu'à Juin, avec une diminution plus importante pendant les mois de Mars, Avril et Mai, puisque pendant la période de référence on remarque que l'évapotranspiration est plus élevée durant ces mois-ci suite au niveau de la pluie qui diminue significativement et la température variant aux alentours de 20 °C ce qui favorise une évapotranspiration considérable ces mois-ci. Le mois de Janvier n'est pas très impacté par la température mais plutôt par l'élément fondamental de notre étude qui est la pluie.

Les études qui concernent l'évaluation de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau sont peu nombreuses dans le Nord-Ouest de l'Afrique et particulièrement le Nord-Ouest de l'Algérie, une région considérée vulnérable aux changements climatique durant les dernières décennies du 20ème siècle (Meddi et al., 2010; Taibi et al., 2017, zeroual et al., 2018, Hadour et al., 2020).

Il n'est pas aisé de signaler ces composantes du cycle hydrologique, cependant, c'est possible de présenter l'évolution estimée pendant les mois subissant les plus drastiques changements dans les précipitations. Cette partie de notre travail est basée sur les volumes mensuels des composantes du cycle hydrologique, développée sur les mois extrêmement

différents en termes de pluviométrie et où l'impact des changements climatiques est plus visible.

La distribution spatiale du cycle hydrologique est liée aux zones environnantes. Il est visible dans la majeure partie des composantes hydrologiques du modèle SWAT (le ruissellement, débit des cours d'eau, l'évapotranspiration, la teneur en eau du sol) que les impacts des changements climatiques sont plus accentués dans la partie Sud du bassin de la Tafna, avoisinante au Sahara de l'Algérie, où les températures sont plus élevées et les pluies sont plus rares. La distribution spatiale de l'écoulement latéral dépend de celle des classes de pente du bassin, ce qui explique la proportionnalité entre l'écoulement latéral et les classes de pentes du bassin de la Tafna.

Les composantes du cycle hydrologique étudiées dans cette partie de notre étude sont d'un niveau inférieur en Juillet comparée à la période de référence, ce qui implique que ce mois est moins impacté durant la période future.

En terme périodique, les deux dernières périodes 2060-2079 et 2080-2099 sont plus impactées par rapport aux périodes qui les précèdent 2020-2039 et 2040-2059. En concordance avec l'étude de Zittis et al. (2019) et Hadour et al. (2020), les précipitations dans la partie Sud de la région Méditerranéenne sont projetées à des diminutions durant toutes les saisons. Les diminutions détectées dans notre étude, et qui sont en similarité avec les études citées auparavant, pourraient être similaires tout au long du Nord de l'Afrique comme c'est mentionné par Bates et al. (2008) pour les précipitations, la teneur en eau dans le sol, le ruissellement et l'évapotranspiration. Tandis que, dans le 5ème rapport de l'IPCC (2013), les précipitations saisonnières sont plus prononcées, en terme temporel, en *hiver* (DJF) avec une diminution de -30% comparée à celle de l'*été* qui varie entre -10 % et -15%, et en terme spatial, dans le *Nord-Ouest* de l'Afrique par rapport au *Nord-Est*, selon le scénario SRES A1B du CMIP3 (le scénario de forçage radiatif le plus proche du RCP 4.5 du CMIP5). Mais en terme annuel, tel que c'est présenté dans 5ème rapport de l'IPCC (2013), la teneur en eau dans le sol, le ruissellement et l'évapotranspiration procèdent au même changement tout au long du Nord de l'Afrique.

Dans la dernière partie de notre travail, nous discutons de l'utilisation et des résultats de l'application des indices de sécheresses standardisés obtenus au niveau du bassin de la Tafna.

L'applicabilité de l'utilisation des indices de sécheresse dans le Nord de l'Afrique est approuvée par différentes études antérieures (Ghenim and Megnounif, 2013) et (Ghenim and Megnounif, 2014) dans le bassin versant de la Tafna, (Habibi et al., 2018) dans le bassin de Chellif Zahrez (Nord-Ouest de l'Algérie), (Lazri et al., 2015) le Nord de l'Algérie, (Djerbouai and Souag-Gamane, 2016) dans le bassin versant Algérois, (Merabti et al., 2018) dans le Nord-Est de l'Algérie, et (Zhim et al., 2019) dans le basin versant de Oum er-Rbia (Nord du Maroc).

Notre application d'indices standardisés a cerné les deux mois étudiés dans cette thèse, Janvier et Juillet pour les stations climatiques avec le SPI et SPEI et les stations hydrométriques avec le SRI. Le choix de l'échelle de calcul des indices de sécheresse a été porté sur le long terme soit 12 mois. Les résultats obtenus tout au long de cette thèse on été présentés à une échelle inter-périodique de la période future comparée à la période de référence, pour différentes variables mensuelles à savoir : les précipitations, les débits des cours d'eau, l'évapotranspiration, au niveau du bassin versant de la Tafna.

Les diminutions des précipitations et augmentation des températures enregistrées dans la période future ne sont pas sans répercutions au niveau du cycle hydrologique, et impacte toutes les composantes citées ci-dessus.

Les résultats obtenus à partir de l'indice de précipitation standardisé SPI ont montré que dans l'ensemble la tendance vers l'humidité est minimale dans la période future, par rapport à la période de référence (1981-2000). Les résultats obtenus du SPI 12 mois, par les sorties de RCMs traités, pour la période de référence (1981-2000) avoisinent ceux de (Ghenim and Megnounif, 2014) pour la période 1986 – 1997 qui varient entre -1 et 1 et de (Zhim et al., 2019) pour la période 1980-2000 variant entre -1.2 et 2 et qui enregistrent un état normal à une humidité extrême au niveau des bassins versants de la Tafna et le Oum er-Rbia (Maroc) respectivement. Ainsi dans l'étude de Hertig and Tramblay (2017) le SPI minimum a été enregistré inférieur à -1 en région Méditerranéenne. Lopez-Bustins et al. (2013) a indiqué une tendance vers une humidité avant l'année 2000 pour la région Nord-Méditerranéenne (Espagne).

la sécheresse est répartie pendant la période future de l'état normal passant d'une sécheresse modérée durant la période 2040-2059 à une sécheresse forte pour la période 2060-2079 et extrême pour la période 2080-2099. Lopez-Bustins et al. (2013) a aussi indiqué que la

seconde moitié du 21ème siècle enregistre de graves et longues sécheresses (sécheresse modérée à extrême).

L'indicateur SPEI montre que la considération de la température à donné une distribution similaire à celle du SPI durant la période de référence en estimant une humidité, mais la distribution est plus concentrée vers la sécheresse pendant la période future qui tend vers une sécheresse plutôt forte, par rapport à l'indicateur SPI. La tendance vers la sécheresse par rapport des SPI montre l'influence de l'augmentation de la température, durant la période future (Mami et al., in press), dans l'estimation de la sécheresse.

Les résultats obtenus du SRI 12 mois, par les sorties du modèle SWAT, pour la période de référence (1981-2000) avoisinent ceux de SSFI 12 mois (standardized stream flow index) de Ghenim (2014) pour la période 1986 – 1997 qui enregistrent un état de normal à une sécheresse extrême au niveau du bassin versant de la Tafna, sachant que dans ce dernier les débits estimés sont faibles à très faibles en hiver et en été, respectivement. Les diminutions des précipitations ainsi que l'augmentation des températures (Mami et al., in press) durant la période future se traduisent par la sécheresse estimée dans la région en question.

La sécheresse détectée avec le scenario RCP 8.5 est plus accentuée que celui de RCP 4.5 pour les indices SPEI et SPI, cette accentuation est due à la forte diminution des précipitations suivant le scenario RCP 8.5 montrée dans les chapitres précédents V et VI pour les périodes 2060-2079 et 2080-2099. Cette accentuation est aussi montrée dans le travail de (Zeroual et al., 2018) dans l'ensemble du territoire Algérien.

Les indices détectent de manières satisfaisantes les diminutions des précipitations. L'utilisation du SPEI (tient compte du défit hydrique considéré par l'évapotranspiration) semble plus raisonnable pour l'évaluation des disponibilités futures des ressources en eau (Lopez-Bustins et al., 2013). (Stagge et al., 2014) aussi recommande l'utilisation de SPEI en Méditerranée. Lopez-Bustins et al. (2013) recommande l'utilisation des indices de sécheresse hydrologiques en utilisant les débits des cours d'eau dérivés du SWAT, qui le cas de notre travail.

CHAPITRE IX : CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail traite l'évolution climatique et hydrologique du Nord Ouest de l'Algérie, sur les bassins sujets à la sécheresse. Cette thèse procède à une évaluation des tendances futures des composantes du cycle hydrologique face aux changements climatiques. Cette procédure s'effectue à l'aide d'une modélisation hydrologique basée sur un modèle conceptuel semi-distribué, SWAT « Soil and water assessment tool » et applique sur le fleuve Tafna un des plus grands fleuves du Nord de l'Afrique..

L'outil SWAT nous a permis de répondre aux objectifs de cette thèse, dont le premier est l'implantation du modèle sur le bassin de la Tafna sur une période passée d'une trentaine d'année (1981-2010) tout en le calibrant et le validant à l'aide de l'outil SWAT-CUP sur cette même période afin de le préparer à l'étape de prédiction et d'estimation des impacts des changements climatiques sur le système hydrologique à l'échelle spatiale couvrant tous points du bassin de la Tafna, et temporelle pour une évolution tout au long du 21ème siècle. Ces tendances futures ont été estimées à l'aide de l'utilisation des modèles climatiques régionaux du projet Cordex, domaine de l'Afrique. L'utilisation du modèle SWAT pour l'évaluation hydro-climatique a permis d'estimer les tendances et changements détectés pendant la période future (2020-2099), tous les points du bassin versant.

Les résultats de la correction du biais des modèles climatiques régionaux ont montré que l'ajustement statistique est primordial pour un bassin versant avec des caractéristiques similaires à ceux de la Tafna. Comme nous l'avons constaté, le climat de la Tafna est semi-aride avec des hivers humides et des étés secs et les modèles climatiques régionaux surestiment les pluies durant les mois secs (Juin à Août). Cette correction du biais nous a permis d'avoir des

résultats climatiques et hydrologiques des tendances futures réalistes et qui sont dans le même ordre des recherches de la région Méditerranéenne.

Les tendances les plus significatives ont été marquées pour les baisses de précipitation tout au long du 21ème siècle (période future). Ces baisses ont influencé toutes les composantes du cycle hydrologique, du débit des cours d'eau jusqu'à l'évapotranspiration.

Le modèle SWAT nous a permis de représenter à l'échelle temporelle ainsi que spatiale la distribution, des différentes composantes hydrologiques, débits des cours d'eau, ruissellement en tout point des sous-bassins versants, la pluie, l'écoulement latéral, la teneur en eau dans le sol, et l'évapotranspiration pendant la période de référence ainsi que les tendances de changements futurs étudiés dans ce travail. Ces résultats nous ont permis de définir l'impact des diminutions des pluies sur ces composantes hydrologiques, durant les deux mois traités dans cette étude (Janvier et Juillet), ainsi que d'avoir une vision globale de la distribution des tendances et des interactions de l'ensemble des mois de l'année.

Les composantes hydrologiques (ruissellement, évapotranspiration…etc.) sont impactées par la baisse des pluies durant la période future. Cet impact est visible pendant les mois humides. Par contre, la surestimation des RCMs pendant la période estivale a inversé la tendance vers une augmentation des pluies ainsi que les composantes SWAT.

Afin d'avoir une vue générale sur les résultats de tendances obtenues dans cette étude, nous avons évalué le degré de sécheresse à l'aide d'indices de sécheresse standardisés, en utilisant certaines composantes tels que la pluie, l'évapotranspiration et le ruissellement. Ces indices utilisés nous ont permis d'attribuer des catégories de sécheresse et d'humidité pour les résultats de projections obtenus dans cette étude.

La réalisation de ce travail a rendu possible l'évaluation de l'impact des changements climatiques au niveau du bassin versant de la Tafna, un bassin de la région sud de la méditerranée, à l'échelle mensuelles inter-périodique pour la période restante du 21ème siècle, et nous a permis de développer une méthodologie robuste pour l'étude de l'impact des changement climatiques sur le cycle hydrologique d'un bassin versant Nord Africain.

Afin d'apporter une ou des améliorations à ce travail, nous vous proposons quelques perspectives pour permettre des évaluations plus approfondies et des qualités de résultats plus larges ou plus fines :

- Disposer d'une série de données climatiques et hydrométriques plus large à l'échelle journalière de l'ordre de demi-siècle ou davantage, pour estimer et comparer l'impact des tendances climatiques par rapport à une période de référence contenant de multiples variabilités comme est le cas du bassin versant de la Tafna ;

- L'utilisation du nouveau projet CMIP6, à des résolutions plus fines, qui serait la succession des projets des simulations climatiques avec de nouveaux scénarios d'émission de gaz à effet de serre ;

- L'utilisation d'outils de télédétection afin de prendre en considération l'évolution d'occupation des sols en parallèle avec les tendances climatiques, et de valider les teneurs en eaux des sols par les modèles;

- Élargir l'échelle du bassin pour étudier l'impact des changements climatiques des grands bassins versants tout au long de l'Afrique du Nord, à l'échelle mensuelle ainsi que annuelle.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abbaspour, K.C., 2013. SWAT-CUP 2012: SWAT Calibration and Uncertainty Programs—A User Manual.

Abbaspour, K.C., Johnson, C.A., van Genuchten, M.T., 2004. Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure. Vadose Zone J. 3, 1340–1352. https://doi.org/10.2136/vzj2004.1340

Achour, K., Meddi, M., Zeroual, A., Bouabdelli, S., Maccioni, P., Moramarco, T., 2020. Spatio-temporal analysis and forecasting of drought in the plains of northwestern Algeria using the standardized precipitation index. J. Earth Syst. Sci. 129, 42. https://doi.org/10.1007/s12040-019-1306-3

Agence de Bassin Hydrographique - Oranie - Chott - Chergui [WWW Document], n.d. URL http://www.abhoranie.dz/Tafna.html (accessed 12.11.19).

AGIRE [WWW Document], n.d. . Agence Natl. Gest. Intégrée Ressour. En Eau. URL https://www.agire.dz/agire/ (accessed 2.24.20).

Ahmed, K., Shahid, S., Harun, S., Nawaz, N., 2015. Performance assessment of different bias correction methods in statistical downscaling of precipitation. Malays. J. Civ. Eng. 27. https://doi.org/10.11113/mjce.v27n0.416

Ali Ahmadalipour, Hamid Moradkhani, 2018. Escalating heat-stress mortality risk due to global warming in the Middle East and North Africa (MENA). Environ. Int. 117, 215–225. https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.05.014

AR4, 2007. AR4 Climate Change 2007: Synthesis Report — IPCC [WWW Document]. URL https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/ (accessed 1.6.20).

AR5 Climate Change 2013: The Physical Science Basis — IPCC [WWW Document], 2013. URL https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/ (accessed 2.11.19).

Arnell, N.W., 1999. Climate change and global water resources. Glob. Environ. Change 9, S31–S49. https://doi.org/10.1016/S0959-3780(99)00017-5

Arnold, J.G., Allen, P.M., Bernhardt, G., 1993. A comprehensive surface-groundwater flow model. J. Hydrol. 142, 47–69. https://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90004-S

Asadi Zarch, M.A., Sivakumar, B., Sharma, A., 2015. Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized precipitation index (SPI) and Reconnaissance drought index (RDI). J. Hydrol., Drought processes, modeling, and mitigation 526, 183–195. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.071

Bakreti, A., 2014. Modélisation hydrologique du bassin de la Tafna.

Bates, B., Kundzewicz, Z.W., Wu, S., Palutikof, J. (Eds.), 2008. Climate change and water, Intergouvernmental panel on climate change. ed, IPCC Technical Paper; 6.

Beguería, S., Vicente-Serrano, S.M., Reig, F., Latorre, B., 2014. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. Int. J. Climatol. 34, 3001–3023. https://doi.org/10.1002/joc.3887

Bessière, H., 2008. Assimilation de données variationnelle pour la modélisation hydrologique distribuée des crues à cinétique rapide (phd).

Blanco-Gómez, P., Jimeno-Sáez, P., Senent-Aparicio, J., Pérez-Sánchez, J., 2019. Impact of Climate Change on Water Balance Components and Droughts in the Guajoyo River Basin (El Salvador). Water 11, 2360. https://doi.org/10.3390/w11112360

Boé, J., 2007. Changement global et cycle hydrologique: Une étude de régionalisation sur la France (phdthesis). Université Paul Sabatier - Toulouse III.

Bouraoui, F., Benabdallah, S., Jrad, A., Bidoglio, G., 2005. Application of the SWAT model on the Medjerda river basin (Tunisia). Phys. Chem. Earth Parts ABC, Assessment of Anthropogenic Impacts on Water Quality 30, 497–507. https://doi.org/10.1016/j.pce.2005.07.004

Bucak, T., Trolle, D., Andersen, H.E., Thodsen, H., Erdoğan, Ş., Levi, E.E., Filiz, N., Jeppesen, E., Beklioğlu, M., 2017. Future water availability in the largest freshwater Mediterranean

lake is at great risk as evidenced from simulations with the SWAT model. Sci. Total Environ. 581–582, 413–425. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.149

CORDEX Data Search | CORDEX | ESGF-CoG [WWW Document], n.d. URL https://esg-dn1.nsc.liu.se/search/cordex/ (accessed 10.30.18).

Dakhlaoui, H., Seibert, J., Hakala, K., 2020. Sensitivity of discharge projections to potential evapotranspiration estimation in Northern Tunisia. Reg. Environ. Change 20, 34. https://doi.org/10.1007/s10113-020-01615-8

Djerbouai, S., Souag-Gamane, D., 2016. Drought Forecasting Using Neural Networks, Wavelet Neural Networks, and Stochastic Models: Case of the Algerois Basin in North Algeria. Water Resour. Manag. 30, 2445–2464. https://doi.org/10.1007/s11269-016-1298-6

Djilali Yebdri, Mohamed Errih, Abdelkader Hamlet, Abdellatif El-Bari Tidjani, 2007. The Water Resources Management Study of the Wadi Tafna Basin (Algeria) Using the Swat Model. Afr. Water J. 1, 33–47.

Docs | SWAT | Soil & Water Assessment Tool [WWW Document], n.d. URL https://swat.tamu.edu/docs/ (accessed 11.17.20).

Dosio, A., Panitz, H.-J., 2016. Climate change projections for CORDEX-Africa with COSMO-CLM regional climate model and differences with the driving global climate models. Clim. Dyn. 46, 1599–1625. https://doi.org/10.1007/s00382-015-2664-4

Emissions Scenarios — IPCC [WWW Document], n.d. URL https://www.ipcc.ch/report/emissions-scenarios/ (accessed 1.29.20).

Ertürk, A., Ekdal, A., Gürel, M., Karakaya, N., Guzel, C., Gönenç, E., 2014. Evaluating the impact of climate change on groundwater resources in a small Mediterranean watershed. Sci. Total Environ. 499, 437–447. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.001

Fang, G.H., Yang, J., Chen, Y.N., Zammit, C., 2015. Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in China. Hydrol Earth Syst Sci 19, 2547–2559. https://doi.org/10.5194/hess-19-2547-2015

Faramarzi, M., Abbaspour, K.C., Ashraf Vaghefi, S., Farzaneh, M.R., Zehnder, A.J.B., Srinivasan, R., Yang, H., 2013. Modeling impacts of climate change on freshwater availability in Africa. J. Hydrol. 480, 85–101. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.016

Filippo Giorgi, Colin Jones, Ghassem R. Asrar, 2009. Addressing Climate Information Needs at the Regional Level: the CORDEX Framework (No. 58).

G. Panthou, M. Vrac, P. Drobinski, S. Bastin, L. Li, 2016. Impact of model resolution and Mediterranean sea coupling on hydrometeorological extremes in RCMs in the frame of HyMeX and MED-CORDEX. Clim. Dyn. 51, 915–932. https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-016-3374-2

Gan, Thian Yew, Ito, Mari, Hülsmann, Stephan, Qin, Xiaosheng, Lu, Xi Xi, Liong, Shie-Yui, Rutschman, Peter, Disse, Markus, Koivusalo, Harri, 2016. Possible Climate Change/Variability and Human Impacts, Vulnerability of Drought-Prone Regions, Water Resources and Capacity Building for Africa. Hydrol. Sci. J., Taylor & Francis Group 61, 1209–1226. https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1057143

Gevaert, A., Veldkamp, T., Ward, P., 2018. The effect of climate type on timescales of drought propagation in an ensemble of global hydrological models. Hydrol. Hydrology and Earth System Sciences 22 (9): 4649-4665. DOI:10.5194/hess-22-4649-2018 <https://doi.org/10.5194/hess-22-4649-2018>.

Ghenim, A.N., Megnounif, A., 2014. Drought characterization by SPI and SSFI index (North-West of Algeria). Rev. LJEE. 18, 59-77. <https://share.ensh.dz/index.php/ljee/article/view/563>.

Ghenim, A.N., Megnounif, A., 2013. Analyse des précipitations dans le Nord-Ouest Algérien. Sci. Chang. Planétaires Sécher. 24, 107–114. https://doi.org/10.1684/sec.2013.0380

Grusson, Y., 2016. Modélisation de l'évolution hydroclimatique des flux et stocks d'eau verte et d'eau bleue du bassin versant de la Garonne (Doctorat en génie des eaux). Université Laval Québec, Canada/ INP Toulouse, France, Toulouse, France.

Grusson, Y., Anctil, F., Sauvage, S., Perez, J.M.S., 2017. Testing the SWAT Model with Gridded Weather Data of Different Spatial Resolutions. Water 9, 54. https://doi.org/10.3390/w9010054

Habibi, B., Meddi, M., Torfs, P.J.J.F., Remaoun, M., Van Lanen, H.A.J., 2018. Characterisation and prediction of meteorological drought using stochastic models in the semi-arid Chéliff–Zahrez basin (Algeria). J. Hydrol. Reg. Stud. 16, 15–31. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.02.005

Hadour, A., Mahe, G., Meddi, M., 2020. Watershed based hydrological evolution under climate change effect : An exemple from North Western Africa. J. Hydrol. Reg. Stud. 28, 100671. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100671

Hallouz, F., Meddi, M., Mahe, G., Alirahmani, S., Keddar, A., 2019. Modeling of discharge and sediment transport Through the SWAT model in the basin of Harraza (Northwest of Algeria). Water Science. 2:1, 79-88, DOI: 10.1016/j.wsj.2017.12.004

Hamlet, A., 2014. Contribution à la gestion des ressources en eau des bassins versants de l'ouest de Algérie à l'aide d'un système informatisé (Doctorat es-sciences). Université des sciences et de la technologie d'Oran "Mohamed Boudiaf," Oran, Algérie.

Hertig, E., Tramblay, Y., 2017. Regional downscaling of Mediterranean droughts under past and future climatic conditions. Glob. Planet. Change, Climate Variability and Change in the Mediterranean Region 151, 36–48. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.10.015

IPCC Working Group I, Stocker TF, Qin D et al, 2013. The Physical Science Basis.

Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O.B., Bouwer, L.M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., Meijgaard, E. van, Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J.-F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., Yiou, P., 2014. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. Reg. Environ. Change 14, 563–578. https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2

Janpeter Schilling, Korbinian P. Freier, Elke Hertig, Jürgen Scheffran, 2012. Climate change, vulnerability and adaptation in North Africa with focus on Morocco. Agric. Ecosyst. Environ. 156, 12–26. http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2012.04.021

Jehanzaib, M., Sattar, M.N., Lee, J.-H., Kim, T.-W., 2020. Investigating effect of climate change on drought propagation from meteorological to hydrological drought using multi-model ensemble projections. Stoch. Environ. Res. Risk Assess. 34, 7–21. https://doi.org/10.1007/s00477-019-01760-5

Jianwen Bai, Zhenyao Shen, Tiezhu Yan, 2017. A comparison of single- and multi-site calibration and validation: a case study of SWAT in the Miyun Reservoir watershed, China. Front. Earth Sci. 11, 592–600. https://doi.org/10.1007/s11707-017-0656-x.

Jürg Schmidli, Christoph Frei, Pier Luigi Vidale, 2006. Downscaling from GCM precipitation: a benchmark for dynamical and statistical downscaling methods. R. Meteorol. Soc. 26, 679–689. https://doi.org/10.1002/joc.1287.

Kalisa, W., Zhang, J., Igbawua, T., Ujoh, F., Ebohon, O.J., Namugize, J.N., Yao, F., 2020. Spatio-temporal analysis of drought and return periods over the East African region using Standardized Precipitation Index from 1920 to 2016. Agric. Water Manag. 237, 106195. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106195

Kendall, M.G., 1975. Rank Correlation Methods, Charles Griffin. ed, 4th Edition. London.

Khomsi, K., 2014. Variabilite hydroclimatique dans les bassins versants du Bouregreg et du tensift au Maroc : Moyennes, Extremes Et Projections Climatiques (Doctorat). Université Mohammed V, Rabat, Maroc.

Kim, S., Noh, H., Jung, J., Jun, H., Kim, H.S., 2016. Assessment of the Impacts of Global Climate Change and Regional Water Projects on Streamflow Characteristics in the Geum River Basin in Korea. Water-MDPI 8, 91. https://doi.org/10.3390/w8030091.

Kjellstro¨M, E., Nikulin, G., Hansson, U., Strandberg, G., Ullerstig, A., 2011. 21st century changes in the European climate: uncertainties derived from an ensemble of regional climate model simulations. Tellus Dyn. Meteorol. Oceanogr. 63, 24–40. https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2010.00475.x

Knoben, W.J.M., Freer, J.E., Woods, R.A., 2019. Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. Hydrol. Earth Syst. Sci. 23, 4323–4331. https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019.

Kotlarski, S., Keuler, K., Christensen, O.B., Colette, A., Déqué, M., Gobiet, A., Goergen, K., Jacob, D., Lüthi, D., van Meijgaard, E., Nikulin, G., Schär, C., Teichmann, C., Vautard, R., Warrach-Sagi, K., Wulfmeyer, V., 2014. Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. Geosci. Model Dev. 7, 1297–1333. https://doi.org/10.5194/gmd-7-1297-2014.

Lafon Thomas, Dadson Simon, Buys Gwen, Prudhomme Christel, 2012. Bias correction of daily precipitation simulated by a regional climate model: a comparison of methods. Int. J. Climatol. 33, 1367–1381. https://doi.org/10.1002/joc.3518.

L'Algérie en quelques chiffres (No. 32), 2003. . Office Nationale des Statistiques.

L'eau en Algérie: le grand défi de demain (Avant-projet), 2001. . République algérienne démocratique et populaire, Conseil national économique et social, Commission de l'aménagement du territoire et de l'environnement.

L'algérienne des eaux - Présentation [WWW Document], n.d. URL https://www.ade.dz/index.php/presentation/presentation (accessed 2.24.20).

Lazri, M., Ameur, S., Brucker, J.M., Lahdir, M., Sehad, M., 2015. Analysis of drought areas in northern Algeria using Markov chains. J. Earth Syst. Sci. 124, 61–70. https://doi.org/10.1007/s12040-014-0500-6.

Lenderink, G., Buishand, A., Deursen, W. van, 2007. Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. Hydrol. Earth Syst. Sci. 11, 1145–1159. https://doi.org/10.5194/hess-11-1145-2007.

Lenny Bernstein et al, 2007. IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change [WWW Document]. URL http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_climate_change_2007_the_ar4_synthesis_report_french.htm (accessed 10.30.18).

Li, Y., Urban, M.A., 2016. Water Resource Variability and Climate Change. Water 8, 348. https://doi.org/10.3390/w8080348.

Lopez-Bustins, J.A., Pascual, D., Pla, E., Retana, J., 2013. Future variability of droughts in three Mediterranean catchments. Nat. Hazards 69, 1405–1421. https://doi.org/10.1007/s11069-013-0754-3.

Luo, M., Liu, T., Meng, F., Duan, Y., Frankl, A., Bao, A., De Maeyer, P., 2018. Comparing Bias Correction Methods Used in Downscaling Precipitation and Temperature from Regional Climate Models: A Case Study from the Kaidu River Basin in Western China. Water 10, 1046. https://doi.org/10.3390/w10081046.

Mami, A., Raimonet, M., Yebdri, D., Sauvage, S., Zettam, A., Sanchez-Perez, J.-M., in press. Future climatic and hydrologic changes estimated by bias-adjusted regional climate model outputs of the Cordex-Africa project: case of the Tafna basin (North-Western Africa). Int. J. Glob. Warm. in press.

Mami, A., Yebdri, D., Sauvage, S., Raimonet, M., Sanchez-Perez, J.M., in revision. Spatio-temporal trends of hydrological components: case of the Tafna basin (Northwestern Africa). J. Water Clim. Change. in revision.

Mann, H.B., 1945. Nonparametric Tests Against Trend. Econometrica 13, 245–259. https://doi.org/10.2307/1907187.

Maraun, D., F. Wetterhall, A. M. Ireson, R. E. Chandler et al, 2010. Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. Rev. Geophys. 48. https://doi.org/10.1029/2009RG000314.

Mckee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Eighth Conf. Appl. Climatol. 179–186.

Meddi, M., Assani, A.A., Meddi, H., 2010. Temporal Variability of Annual Rainfall in the Macta and Tafna Catchments, Northwestern Algeria. Water Resour. Manag. 24, 3817–3833. https://doi.org/10.1007/s11269-010-9635-7.

Meddi, M., Hubert, P., 2003. Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du nord-ouest de l'Algérie. Hydrol. Mediterr. Semiarid Reg. 229–235.

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 Phys. Environ. 61–84. https://doi.org/10.4000/physio-geo.686.

Meddi, M., Toumi, S., Assani, A.A., 2016. Spatial and temporal variability of the rainfall erosivity factor in Northern Algeria. Arab. J. Geosci. 9, 282. https://doi.org/10.1007/s12517-015-2303-8.

Meehl, G.A., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAvaney, B., Mitchell, J.F.B., Stouffer, R.J., Taylor, K.E., 2007. THE WCRP CMIP3 Multimodel Dataset: A New Era in Climate Change Research. Bull. Am. Meteorol. Soc. 88, 1383–1394. https://doi.org/10.1175/BAMS-88-9-1383.

Merabti, A., Martins, D.S., Meddi, M., Pereira, L.S., 2018. Spatial and Time Variability of Drought Based on SPI and RDI with Various Time Scales. Water Resour. Manag. 32, 1087–1100. https://doi.org/10.1007/s11269-017-1856-6.

Milano, M., Ruelland, D., Fernandez, S., Dezetter, A., Fabre, J., Servat, E., Fritsch, J.-M., Ardoin-Bardin, S., Thivet, G., 2013. Current state of Mediterranean water resources and future trends under climatic and anthropogenic changes. Hydrol. Sci. J. 58, 498–518. https://doi.org/10.1080/02626667.2013.774458.

Muerth, M.J., Gauvin St-Denis, B., Ricard, S., Velázquez, J.A., Schmid, J., Minville, M., Caya, D., Chaumont, D., Ludwig, R., Turcotte, R., 2013. On the need for bias correction in regional climate scenarios to assess climate change impacts on river runoff. Hydrol. Earth Syst. Sci. 17, 1189–1204. https://doi.org/10.5194/hess-17-1189-2013.

N. S. Vithlani, H. D. Rank, 2016. Climate Change Impact Assessment for Aji Basin Using Statistical Downscaling and Bias Correction of Climate Model Outputs. Curr. World Environ. 11, 670–678. http://dx.doi.org/10.12944/CWE.11.2.40.

Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. J. Hydrol. 10, 282–290. https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6.

National Agency of Hydrologic Resources (ANRH)., 2003a. Map of Potential Evapotranspiration in the North of Algeria.

National Agency of Hydrologic Resources (ANRH), 2003. Map of Average Annual Runoff in the North of Algeria.

National Agency of Hydrologic Resources (ANRH)., 2003b. Map of Annual Rainfall in the North of Algeria;

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., 2005. Soil and water assessment tool theorical documentation 494.

Nerantzaki, S.D., Giannakis, G.V., Efstathiou, D., Nikolaidis, N.P., Sibetheros, I.A., Karatzas, G.P., Zacharias, I., 2015. Modeling suspended sediment transport and assessing the impacts of climate change in a karstic Mediterranean watershed. Sci. Total Environ. 538, 288–297. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.092.

Norrant, C., Douguédroit, A., 2003. Tendances récentes des précipitations et des pressions de surface dans le Bassin méditerranéen / Recent trends in precipitation, and sea level pressures in the Mediterranean Basin. Ann. Géographie 112, 298–305. https://doi.org/10.3406/geo.2003.917.

Nicks, A.D., 1974. Stochastic generation of the occurrence, pattern and location of maximum amount of daily rainfall. P. 154-171. In Proc. Symp. Statistical Hydrology, Tucson, AZ. Aug-Sept. 1971. USDA Misc. Publ. 1275. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.

Olkeba Tolessa Leta, Ann van Griensven, Willy Bauwens, 2017. Effect of Single and Multisite Calibration Techniques on the Parameter Estimation, Performance, and Output of a SWAT Model of a Spatially Heterogeneous Catchment. J. Hydrol. Eng. 22. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001471.

ONA : Office National de l'Assainissement [WWW Document], n.d. URL http://ona-dz.org/article/presentation.html (accessed 2.24.20).

Paloque, E., 1949. La sécheresse à Toulouse pendant ces dernières années. Rev. Géographique Pyrén. Sud-Ouest Sud-Ouest Eur. 20, 85–105. https://doi.org/10.3406/rgpso.1949.1253.

Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. J. Hydrol. 279, 275–289. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7.

Pezet, F., 2014. Bilans et transferts de phosphore dans le bassin versant du lac du Bourget : caractérisation, interprétation et modélisation des flux (phdthesis). Université de Grenoble.

Philandras, C.M., Nastos, P.T., Kapsomenakis, J., Douvis, K.C., Tselioudis, G., Zerefos, C.S., 2011. Long term precipitation trends and variability within the Mediterranean region. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 11, 3235–3250. https://doi.org/10.5194/nhess-11-3235-2011.

Remini, B., 2018. LES BARRAGES EN ALGÉRIE, UNE HISTOIRE AVEC L'ENVASEMENT. Première Conférence Internationale sur les Barrages : Perspectives et nouveaux challenges des barrages et réservoirs au XXIème siècle, ICD BISKRA'2018. Biskra, 12 et 13 Décembre 2018.

Rewati Niraula, Laura M. Norman, Thomas Meixner,, James B. Callegary, 2012. Multi-gauge Calibration for Modeling the Semi-Arid Santa Cruz Watershed in Arizona-Mexico Border Area Using SWAT. Air Soil Water Res. 5, 41–57. https://doi.org/10.4137/ASWR.S9410.

Robert Leander, T. Adri Buishand, 2007. Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows. J. Hydrol. 332, 487–496. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.08.006.

Robert Vautard, Andreas Gobiet, Daniela Jacob et al, 2013. The simulation of European heat waves from an ensemble of regional climate models within the EURO-CORDEX project. Clim. Dyn. 41, 2555–2575. https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-013-1714-z.

Ruti, P.M., Somot, S., Giorgi, F., Dubois, C., Flaounas, E., Obermann, A., Dell'Aquila, A., Pisacane, G., Harzallah, A., Lombardi, E., Ahrens, B., Akhtar, N., Alias, A., Arsouze, T., Aznar, R., Bastin, S., Bartholy, J., Béranger, K., Beuvier, J., Bouffies-Cloché, S., Brauch, J., Cabos, W., Calmanti, S., Calvet, J.C., Carillo, A., Conte, D., Coppola, E., Djurdjevic, V., Drobinski, P., Elizalde-Arellano, A., Gaertner, M., Galàn, P., Gallardo, C., Gualdi, S., Goncalves, M., Jorba, O., Jordà, G., L'Heveder, B., Lebeaupin-Brossier, C., Li, L., Liguori, G., Lionello, P., Maciàs, D., Nabat, P., Önol, B., Raikovic, B., Ramage, K., Sevault, F., Sannino, G., Struglia, M.V., Sanna, A., Torma, C., Vervatis, V., 2016. Med-CORDEX initiative for Mediterranean climate studies. Bull. Am. Meteorol. Soc. 97, 1187–1208. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00176.1.

Saddique, N., Usman, M., Bernhofer, C., 2019. Simulating the impact of climate change on the hydrological regimes of a sparsely gauged mountainous basin, Northern Pakistan. Water 11, 2141. https://doi.org/10.3390/w11102141.

Senent-Aparicio, J., Pérez-Sánchez, J., Carrillo-García, J., Soto, J., 2017. Using SWAT and Fuzzy TOPSIS to Assess the Impact of Climate Change in the Headwaters of the Segura River Basin (SE Spain). Water 9, 149. https://doi.org/10.3390/w9020149.

Shukla, S., Wood, A.W., 2008. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. Geophys. Res. Lett. 35. https://doi.org/10.1029/2007GL032487.

Solomon, S., Intergovernmental Panel on Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change (Eds.), 2007. Climate change 2007: the physical science basis: contribution of

Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge ; New York.

Stagge, J., Tallaksen, L., Xu, C.-Y., Van, L.H., 2014. Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI): sensitivity to potential evapotranspiration model and parameters, in: Hydrology in a Changing World, Environmnetal and Human Dimensions. In Proceedings of FRIEND-Water 2014, Montpellier, France. Daniell TM (ed). IAHS Publ. IAHS Press, Centre for Ecology and Hydrology: Wallingford, UK., Monpelier, France, pp. 367–373.

Stehr, N. (Ed.), 2000. Eduard Brückner - The Sources and Consequences of Climate Change and Climate Variability in Historical Times. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9612-1.

Svoboda, M., Fuchs, B.A., 2016. Integrated Drought Management Programme, World Meteorological Organization, Global Water Partnership, University of Nebraska--Lincoln, National Drought Mitigation Center. Handbook of drought indicators and indices.

Szabó-Takács, B., Farda, A., Skalák, P., Meitner, J., 2019. Influence of Bias Correction Methods on Simulated Köppen−Geiger Climate Zones in Europe. Climate 7, 18. https://doi.org/10.3390/cli7020018.

Taabni, M., Jihad, M.-D.E., 2012. Eau et changement climatique au Maghreb : quelles stratégies d'adaptation ? Cah. D'Outre-Mer Rev. Géographie Bordx. 65, 493–518. https://doi.org/10.4000/com.6718.

Taibi, S., 2016. Influence de la circulation atmosphérique générale sur les précipitations du Nord de l'Algérie (Doctorat es-sciences). Ecole Nationale Supérieure D'hydraulique, Blida, Algérie.

Taibi, S., Meddi, M., Mahe, G., Assani, A., 2017. Relationships between atmospheric circulation indices and rainfall in Northern Algeria and comparison of observed and RCM-generated rainfall. Theor. Appl. Climatol. 127, 241–257. https://doi.org/10.1007/s00704-015-1626-4.

Taylor, K.E., Stouffer, R.J., Meehl, G.A., 2011. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. Bull. Am. Meteorol. Soc. 93, 485–498. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1.

Teutschbein, C., Seibert, J., 2012. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. J. Hydrol. 456–457, 12–29. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052.

Todini, E., 2007. Hydrological catchment modelling: past, present and future. Hydrol. Earth Syst. Sci. 11, 468–482. https://doi.org/10.5194/hess-11-468-2007.

Todini, E., 1988. Rainfall-runoff modeling — Past, present and future. J. Hydrol. 100, 341–352. https://doi.org/10.1016/0022-1694(88)90191-6.

Tramblay, Y., Ruelland, D., Somot, S., Bouaicha, R., Servat, E., 2013. High-resolution Med-CORDEX regional climate model simulations for hydrological impact studies: a first evaluation of the ALADIN-Climate model in Morocco. Hydrol. Earth Syst. Sci. 17, 3721–3739. https://doi.org/10.5194/hess-17-3721-2013.

USDA, 1972. National engineering handbook for hydrology. Natl. Eng. Handb. section 4 : Hydrology, 127.

van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., Rose, S.K., 2011. The representative concentration pathways: an overview. Clim. Change 109, 5. https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z.

Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I., 2010. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. J. Clim. 23, 1696–1718. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1.

Villeneuve J.P., Hubert P., Mailhot A., A.N. Rousseau, 1998. La modélisation hydrologique et la gestion de l'eau. Rev Sci Eau 11, 19–39.

Voici les réserves en eau dont dispose l'Algérie en 2020, 2020. . Dzair Dly. URL https://www.dzairdaily.com/algerie-reserves-en-eau-potable-surface-souterrain-2020/ (accessed 11.17.20).

What is regional downscaling?, n.d. . Cordex. URL http://www.cordex.org/about/what-is-regional-downscaling/ (accessed 2.5.20).

Xoplaki, E., 2002. Climate variability over the Mediterranean (Doctorat). Universität Bern, Greece.

Xoplaki, E., González-Rouco, J.F., Luterbacher, J., Wanner, H., 2004. Wet season Mediterranean precipitation variability: influence of large-scale dynamics and trends. Clim. Dyn. 23, 63–78. https://doi.org/10.1007/s00382-004-0422-0.

Xoplaki, E., Luterbacher, J., Burkard, R., Patrikas, I., Maheras, P., 2000. Connection between the large-scale 500 hPa geopotential height fields and precipitation over Greece during wintertime. Clim. Res. 14, 129–146. https://doi.org/10.3354/cr014129.

Yang, C., Tuo, Y., Ma, J., Zhang, D., 2019. Spatial and Temporal Evolution Characteristics of Drought in Yunnan Province from 1969 to 2018 Based on SPI/SPEI. Water. Air. Soil Pollut. 230, 269. https://doi.org/10.1007/s11270-019-4287-6.

Yang, J., Reichert, P., Abbaspour, K.C., Xia, J., Yang, H., 2008. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. J. Hydrol. 1–2, 1–23. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.05.012.

Yebdri, D., 2006. Contribution à la gestion des ressources en eau superficielle du bassin versant de la Tafna (Doctorat d'état). Université des sciences et de la technologie d'Oran "Mohamed Boudiaf," Oran, Algérie.

Youen Grusson, François Anctil, Sabine Sauvage, José Miguel Sánchez Pérez, 2018. Coevolution of Hydrological Cycle Components under Climate Change: The Case of the Garonne River in France. Water-MDPI 10, 1870. https://doi.org/10.3390/w10121870.

Youssef Brouziyne, Aziz Abouabdillah, Abdelaziz Hirich, Rachid Bouabid, Rashyd Zaaboul, Lahcen Benaabidate, 2018. Modeling sustainable adaptation strategies toward a climate-smart agriculture in a Mediterranean watershed under projected climate change scenarios. J. Mater. Environ. Sci. 9, 154–163. https://doi.org/10.26872/jmes.2018.9.1.16.

Youssef Brouziyne, Aziz Abouabdillah2, Rachid Bouabid, Lahcen Benaabidate1, 2017. SWAT streamflow modeling for hydrological components' understanding within an agro-sylvo-pastoral watershed in Morocco. J. Mater. Environ. Sci. 9, 128–138. https://doi.org/10.26872/jmes.2018.9.1.16.

Zanis, P., Kapsomenakis, I., Philandras, C., Douvis, K., Nikolakis, D., Kanellopoulou, E., Zerefos, C., Repapis, C., 2009. Analysis of an ensemble of present day and future regional climate simulations for Greece. Int. J. Climatol. 29, 1614–1633. https://doi.org/10.1002/joc.1809.

Zeroual, A., Assani, A.A., Meddi, M., 2017. Combined analysis of temperature and rainfall variability as they relate to climate indices in Northern Algeria over the 1972–2013 period. Hydrol. Res. 48, 584–595. https://doi.org/10.2166/nh.2016.244.

Zeroual, A., Assani, A.A., Meddi, M., Alkama, R., 2018. Assessment of climate change in Algeria from 1951 to 2098 using the Köppen–Geiger climate classification scheme. Clim. Dyn. 52, 227–243. https://doi.org/10.1007/s00382-018-4128-0.

Zettam, A., 2018. Transfert des Nitrates du bassin versant de la Tafna (Nord Ouest de l'Algérie) vers la Méditerranée; Approche couplant mesures, modélisation et changement d'échelle vers les grands bassins nNord Africains (Doctorat LMD). Université de Tlemcen "Abou Bekr Blekaid"/ INP Toulouse, Tlemcen, Algérie.

Zettam, A., Taleb, A., Sauvage, S., Boithias, L., Belaidi, N., Sánchez-Pérez, J.M., 2017. Modelling Hydrology and Sediment Transport in a Semi-Arid and Anthropized Catchment Using the SWAT Model: The Case of the Tafna River (Northwest Algeria). Water 9, 216. https://doi.org/10.3390/w9030216.

Zhim, S., Larabi, A., Brirhet, H., 2019. Analysis of precipitation time series and regional drought assessment based on the standardized precipitation index in the Oum Er-Rbia basin (Morocco). Arab. J. Geosci. 12, 507. https://doi.org/10.1007/s12517-019-4656-x.

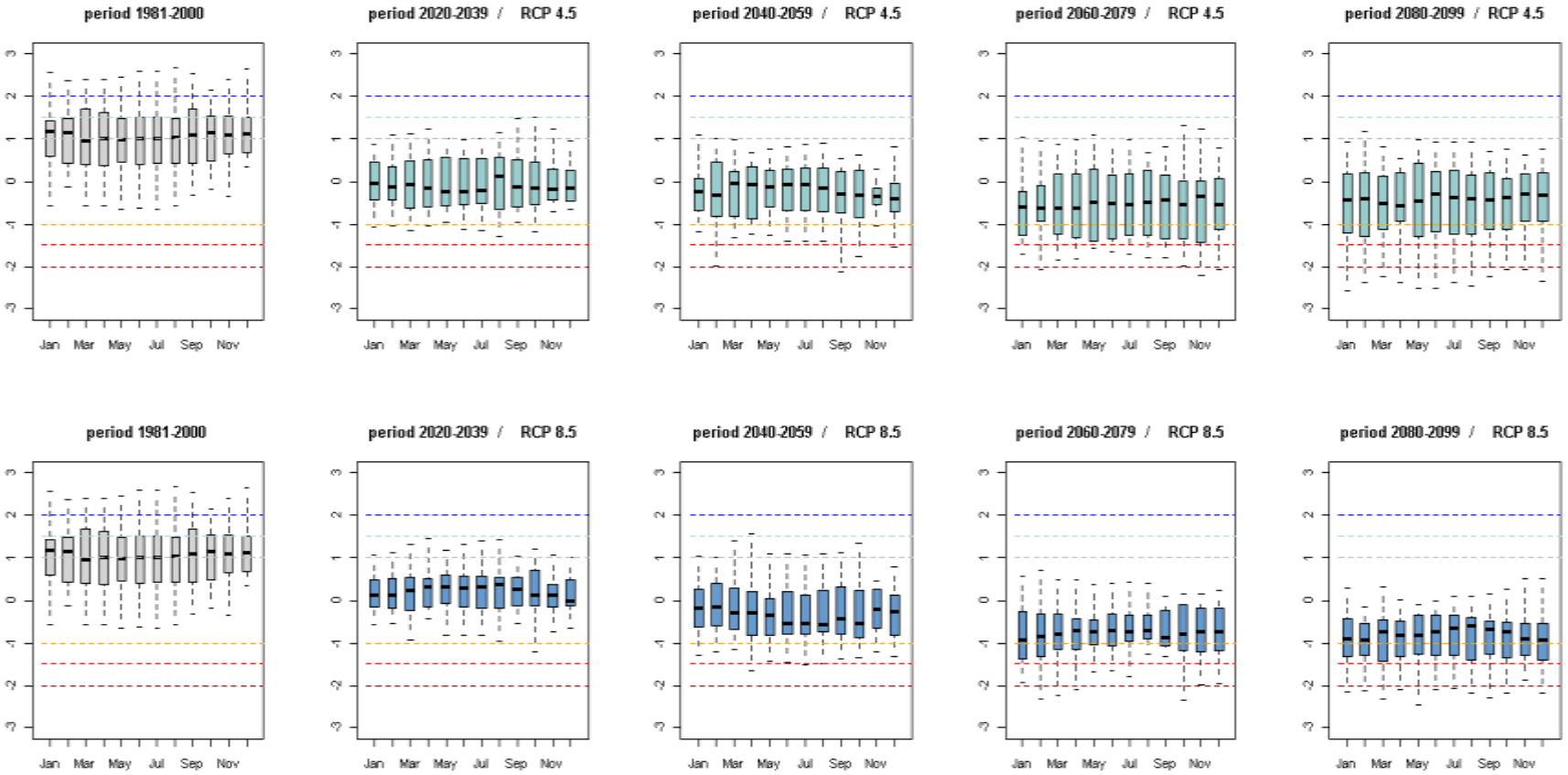
Zhongrun Xiang, Hubert J. Montas, Adel Shirmohammadi, Paul T. Leisnham, Kaye Brubaker, 2018. Impact of Climate Change on Critical Source Areas in a Chesapeake Bay Watershed. Presented at the ASABE 2018 Annual International Meeting Page 1 An ASABE Meeting Presentation, ASABE, Detroit, Michigan. https://doi.org/10.13031/aim.201801831.

Zittis, G., Hadjinicolaou, P., Klangidou, M., Proestos, Y., Lelieveld, J., 2019. A multi-model, multi-scenario, and multi-domain analysis of regional climate projections for the Mediterranean. Reg. Environ. Change 19, 2621–2635. https://doi.org/10.1007/s10113-019-01565-w.

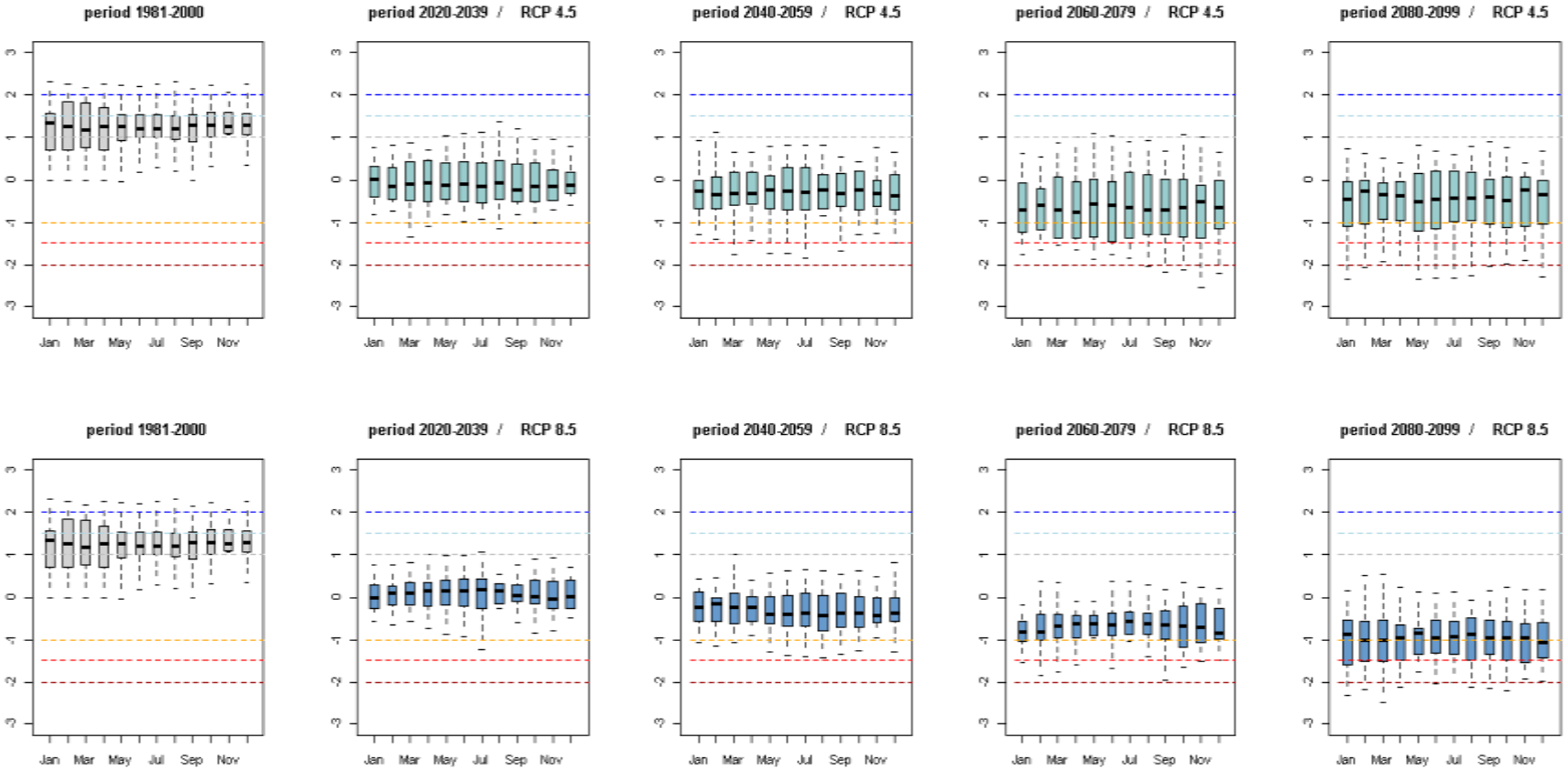
ANNEXE

ANNEXE. PRÉSENTATION DE LA DISTRIBUTION MENSUELLE INTER-PÉRIODIQUE DES INDICES DE SÉCHERESSE.

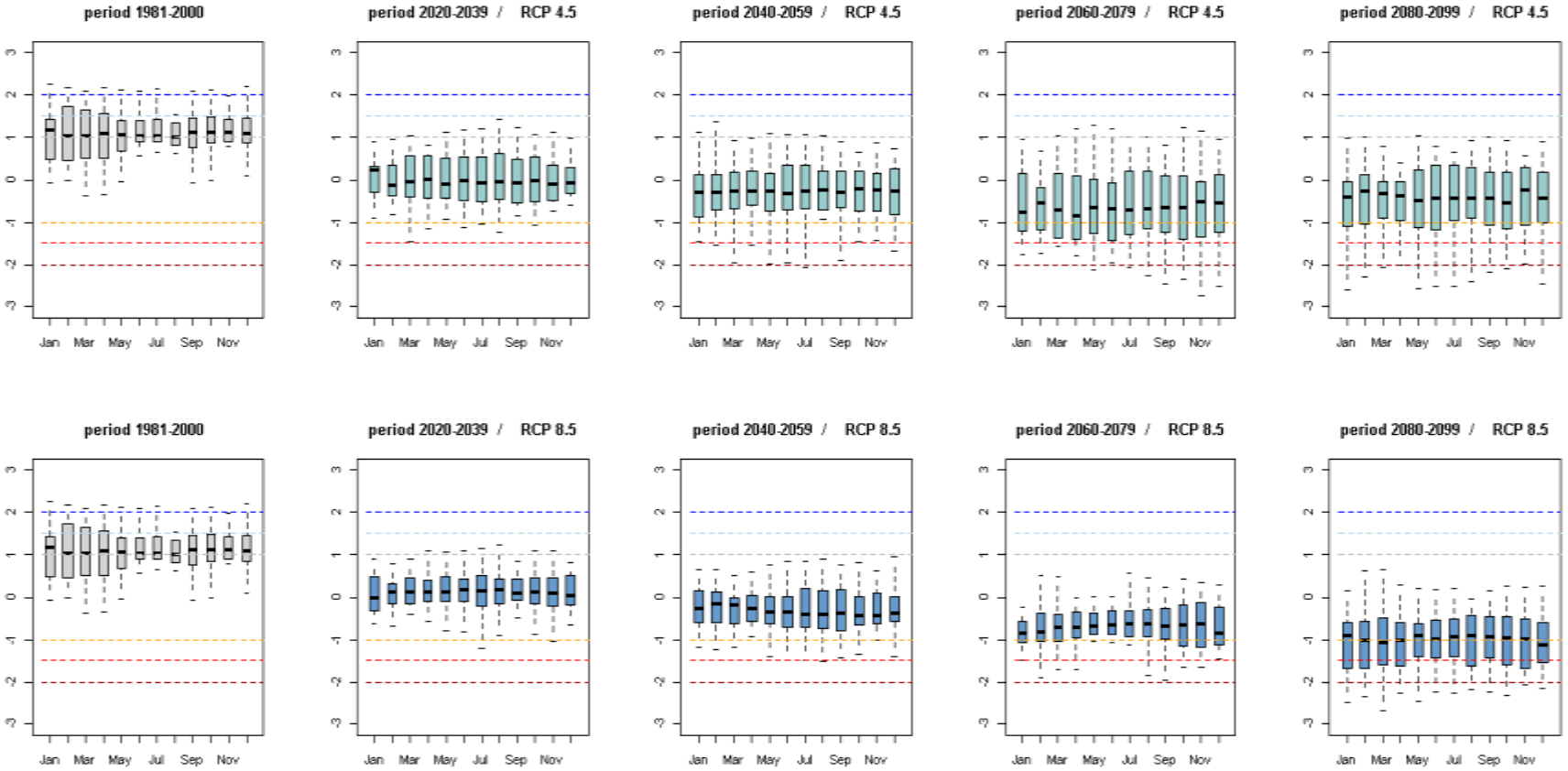
1. Distribution mensuelle inter-périodiques de SPI 12 mois au niveau de la station 1



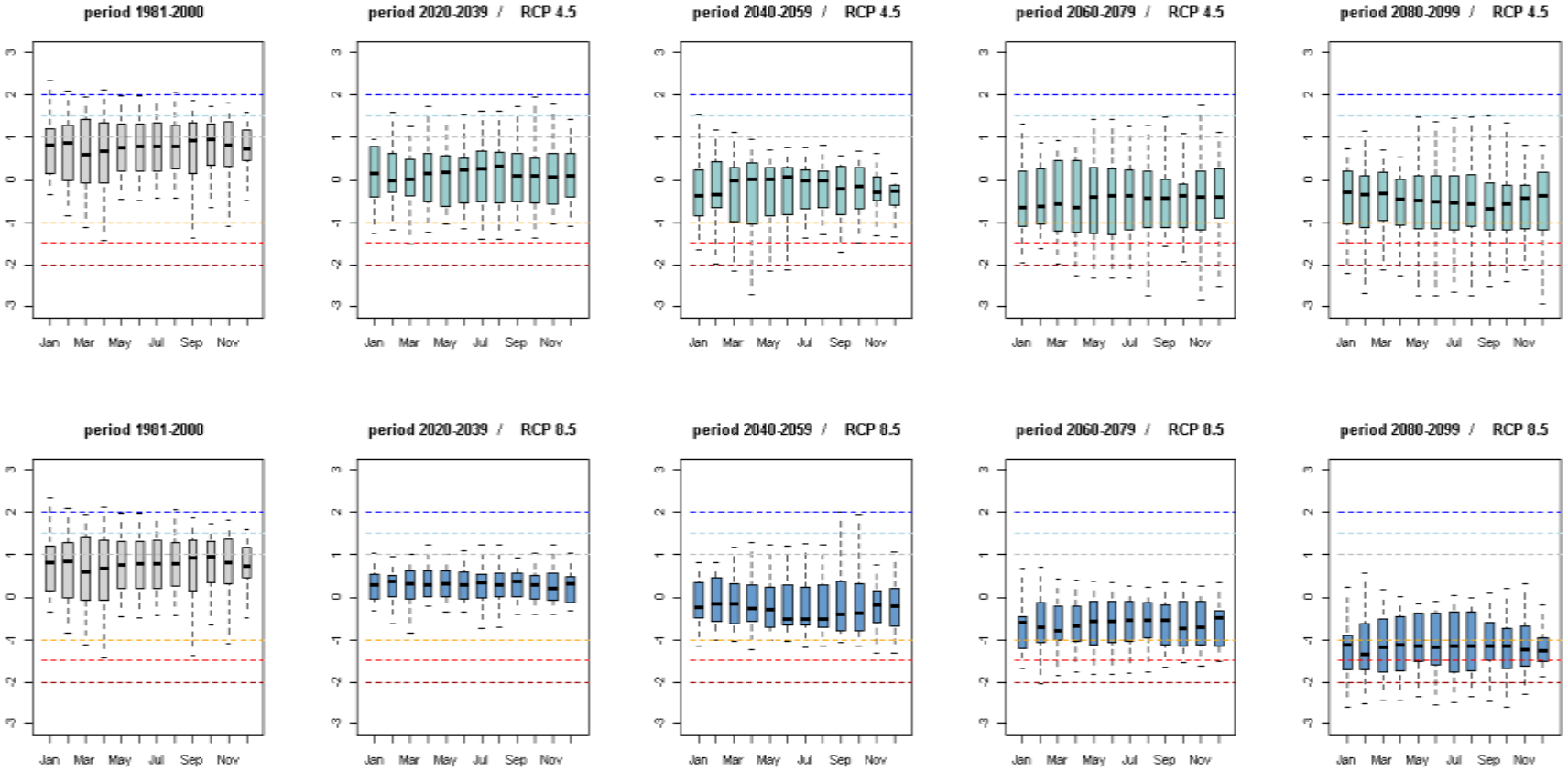
2. Distribution mensuelle inter-périodiques de SPI 12 mois au niveau de la station 2



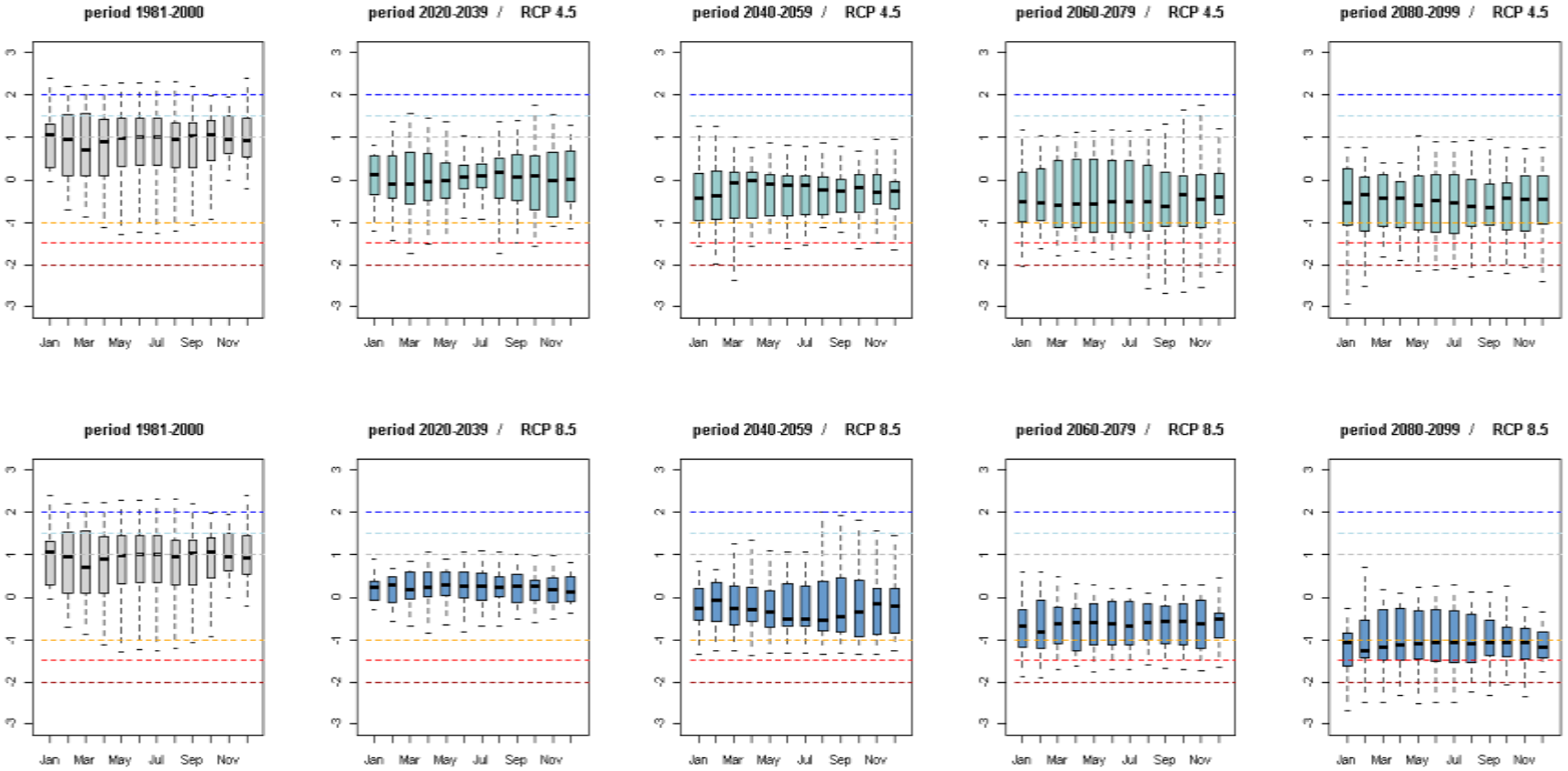
3. Distribution mensuelle inter-périodiques de SPI 12 mois au niveau de la station 3



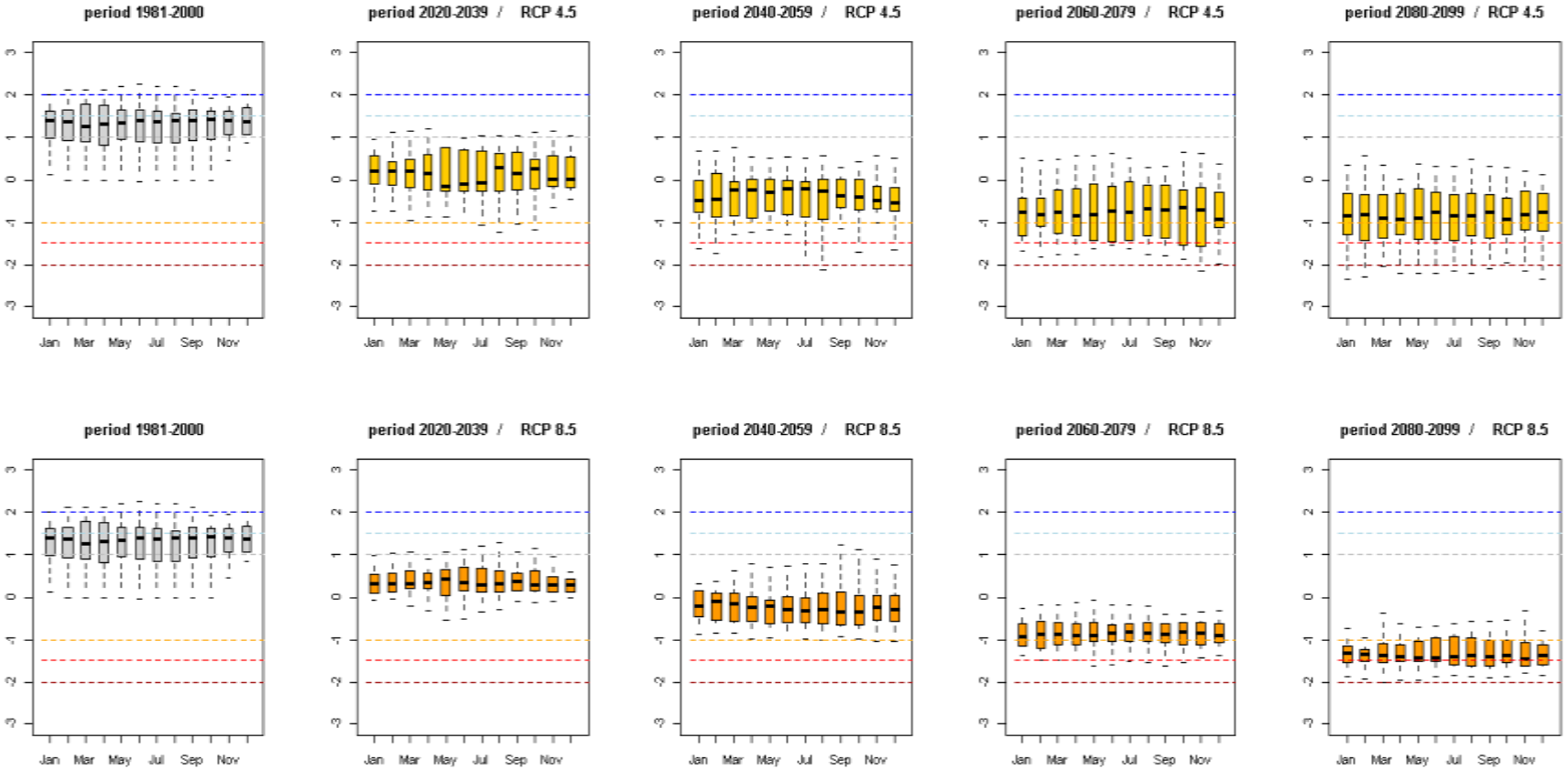
4. **Distribution mensuelle inter-périodiques de SPI 12 mois au niveau de la station 4**



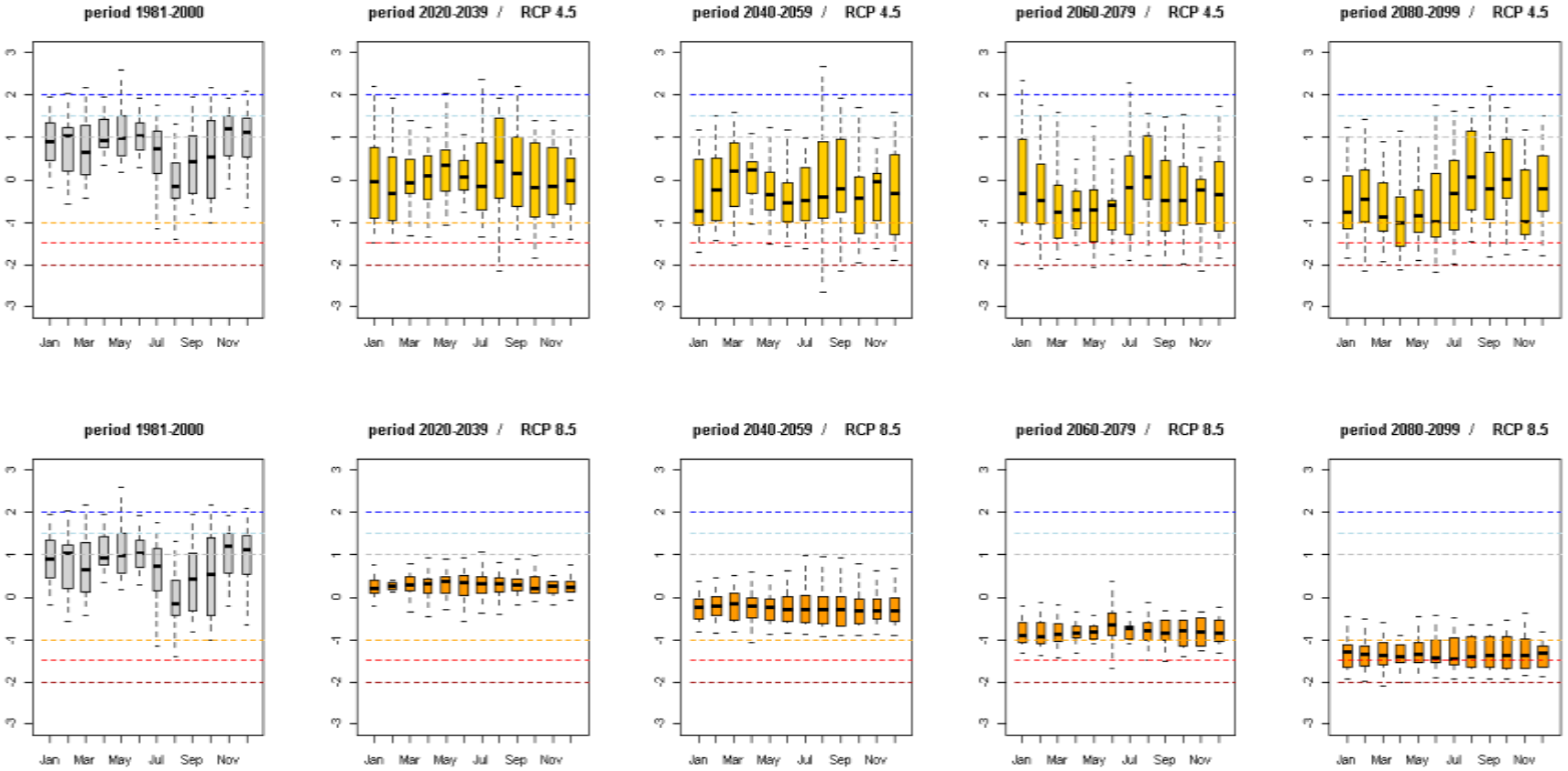
5. **Distribution mensuelle inter-périodiques de SPI 12 mois au niveau de la station 5**



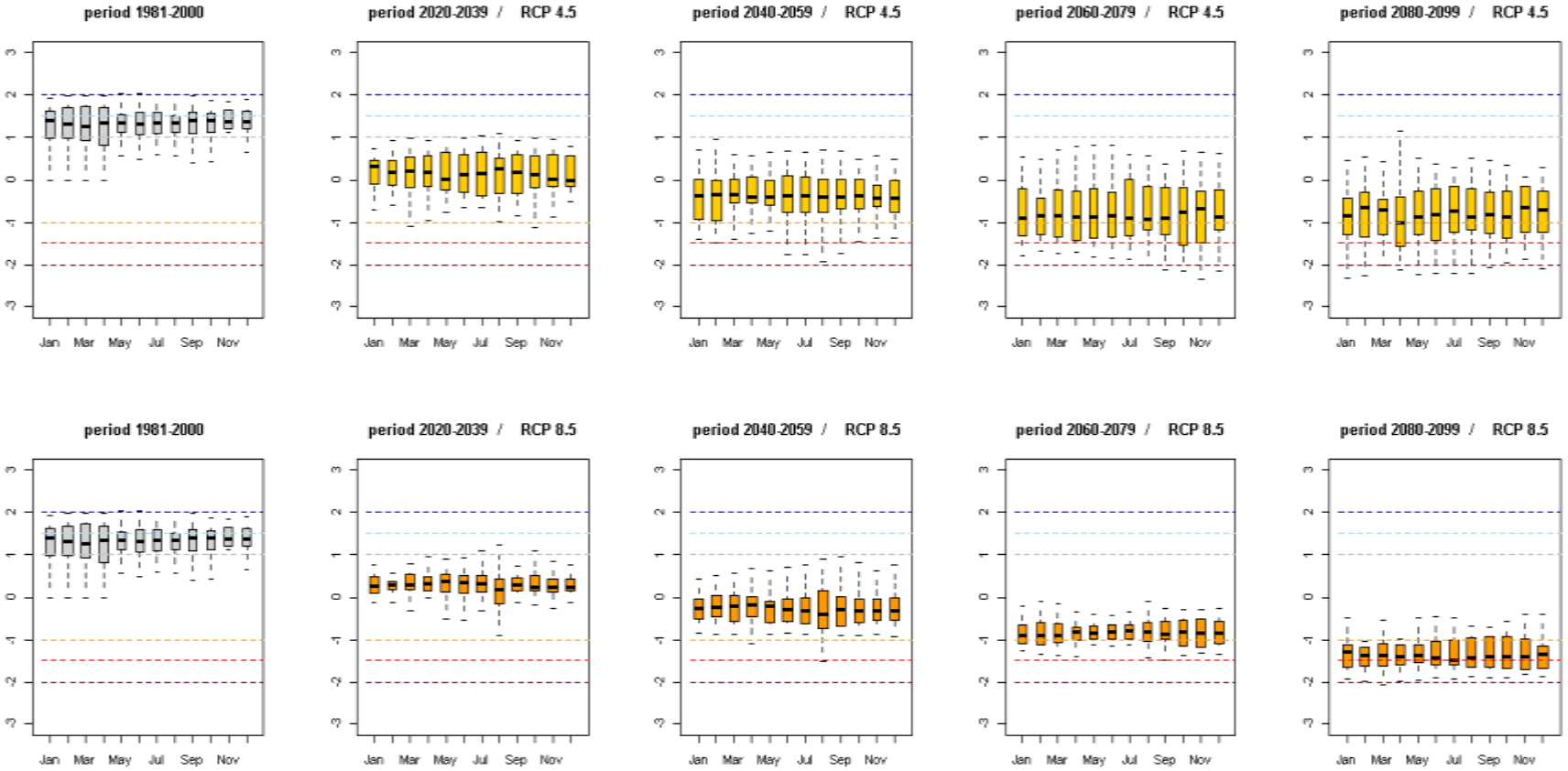
6. Distribution mensuelle inter-périodiques de SPEI 12 mois au niveau de la station 1



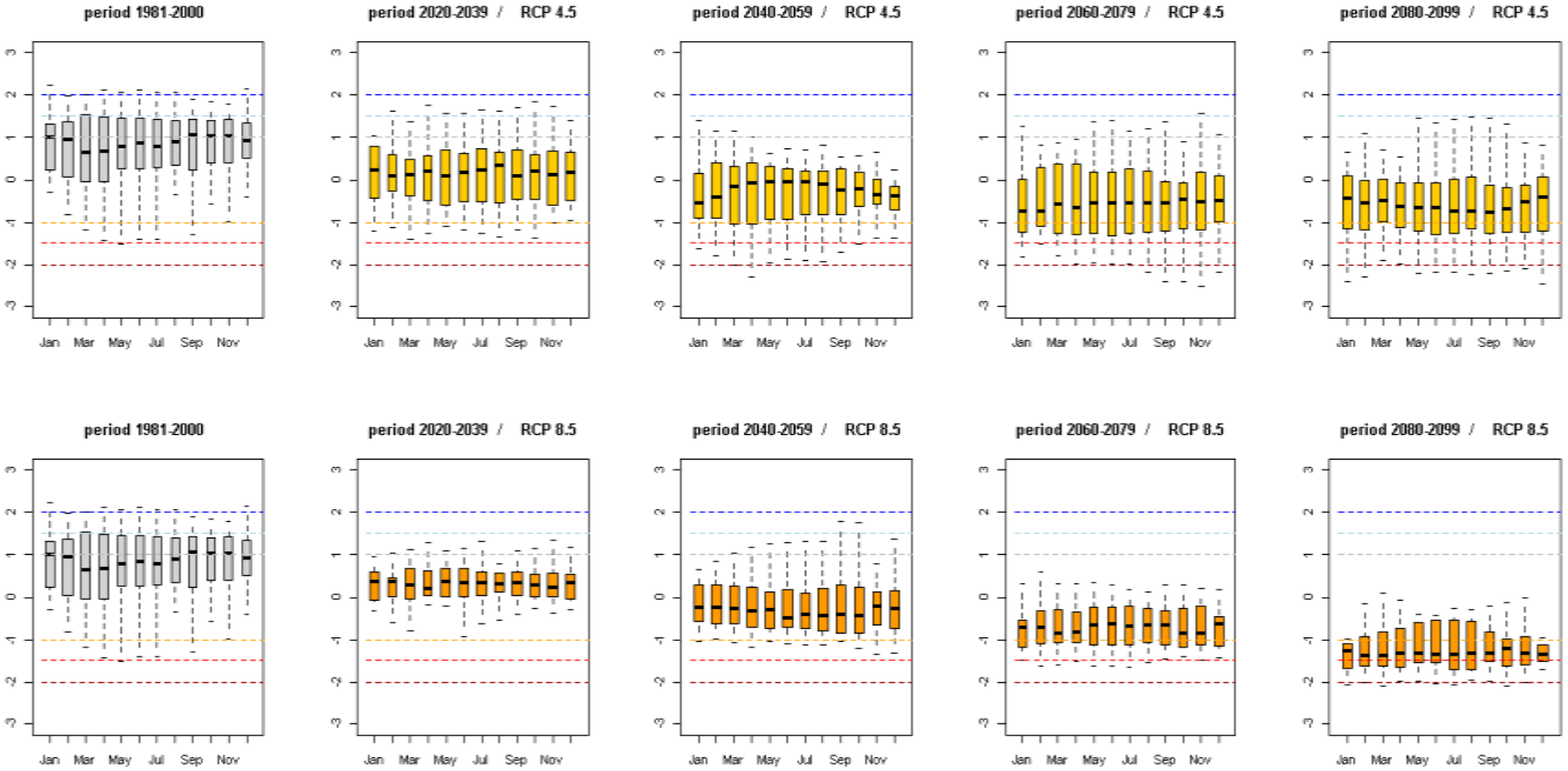
7. Distribution mensuelle inter-périodiques de SPEI 12 mois au niveau de la station 2



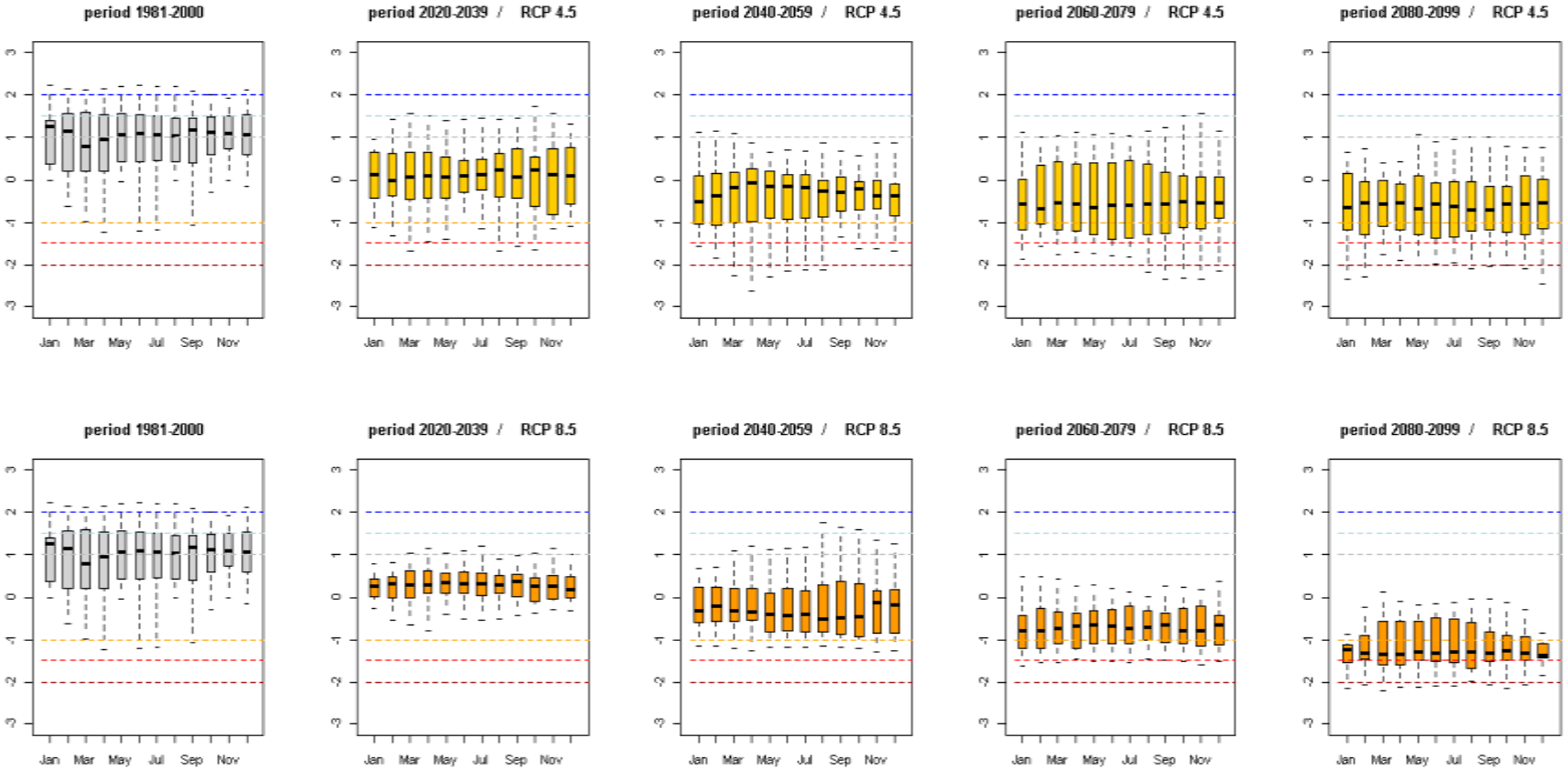
8. Distribution mensuelle inter-périodiques de SPEI 12 mois au niveau de la station 3



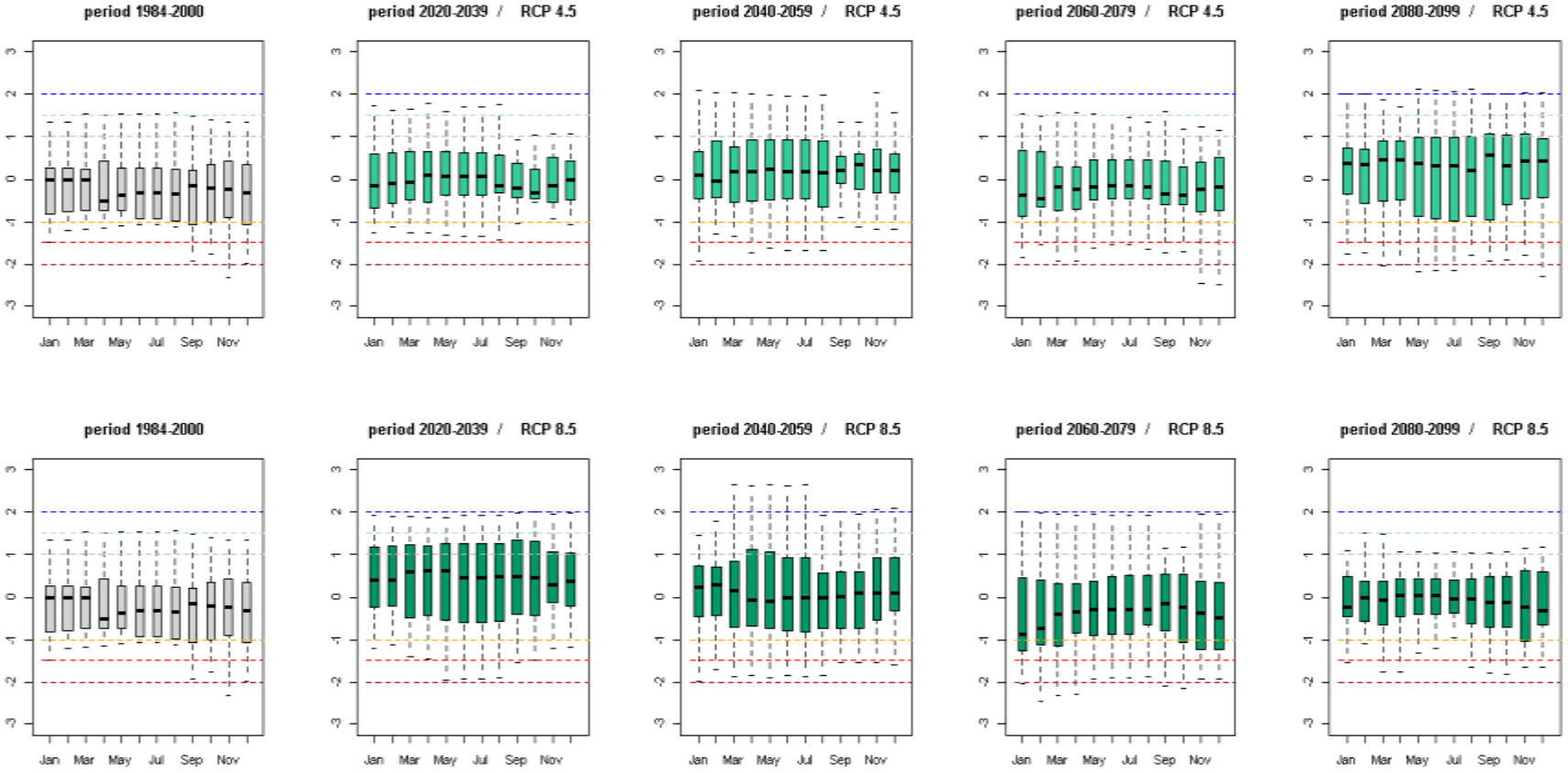
9. Distribution mensuelle inter-périodiques de SPEI 12 mois au niveau de la station 4



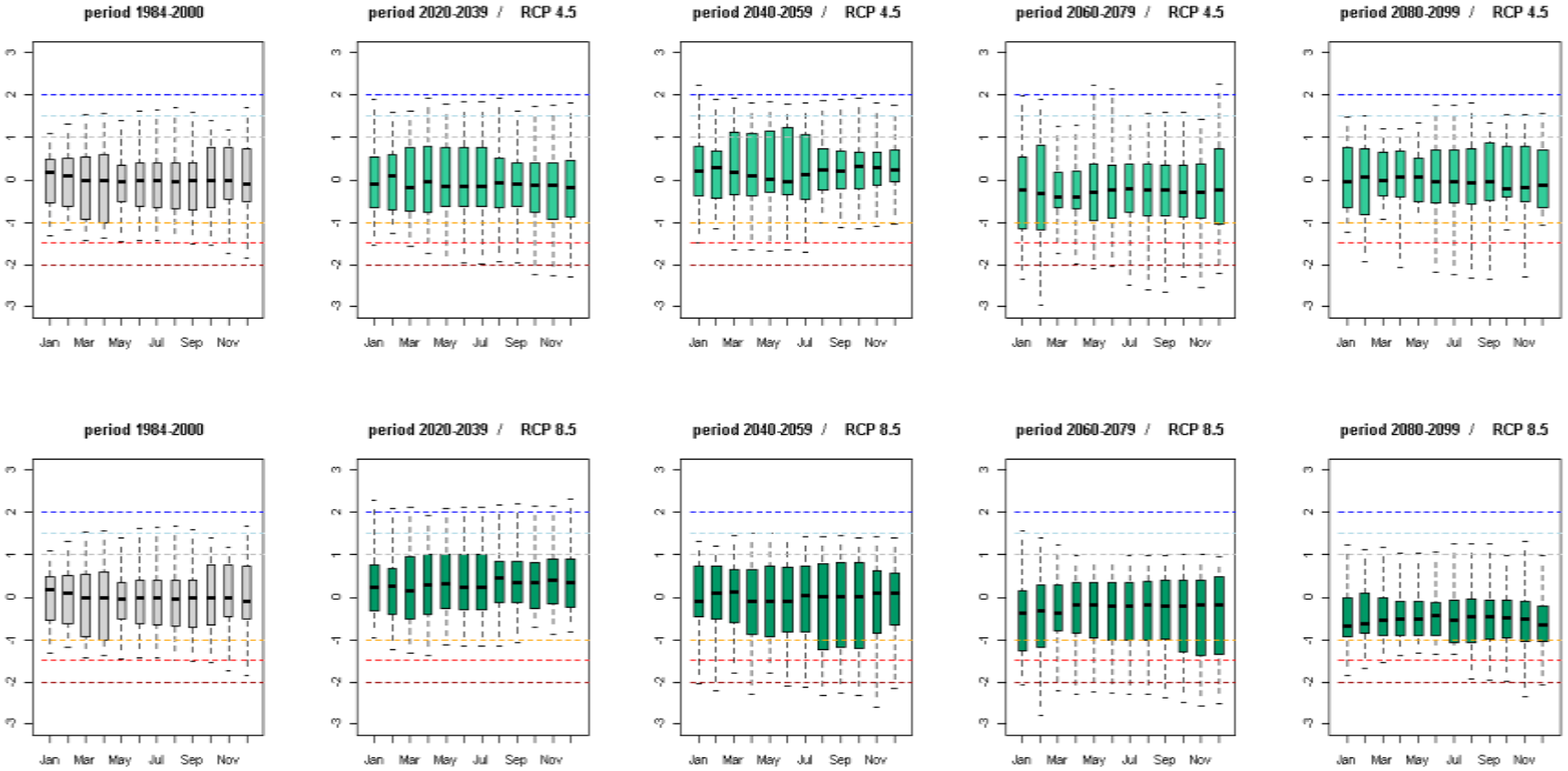
10. **Distribution mensuelle inter-périodiques de SPEI 12 mois au niveau de la station 5**



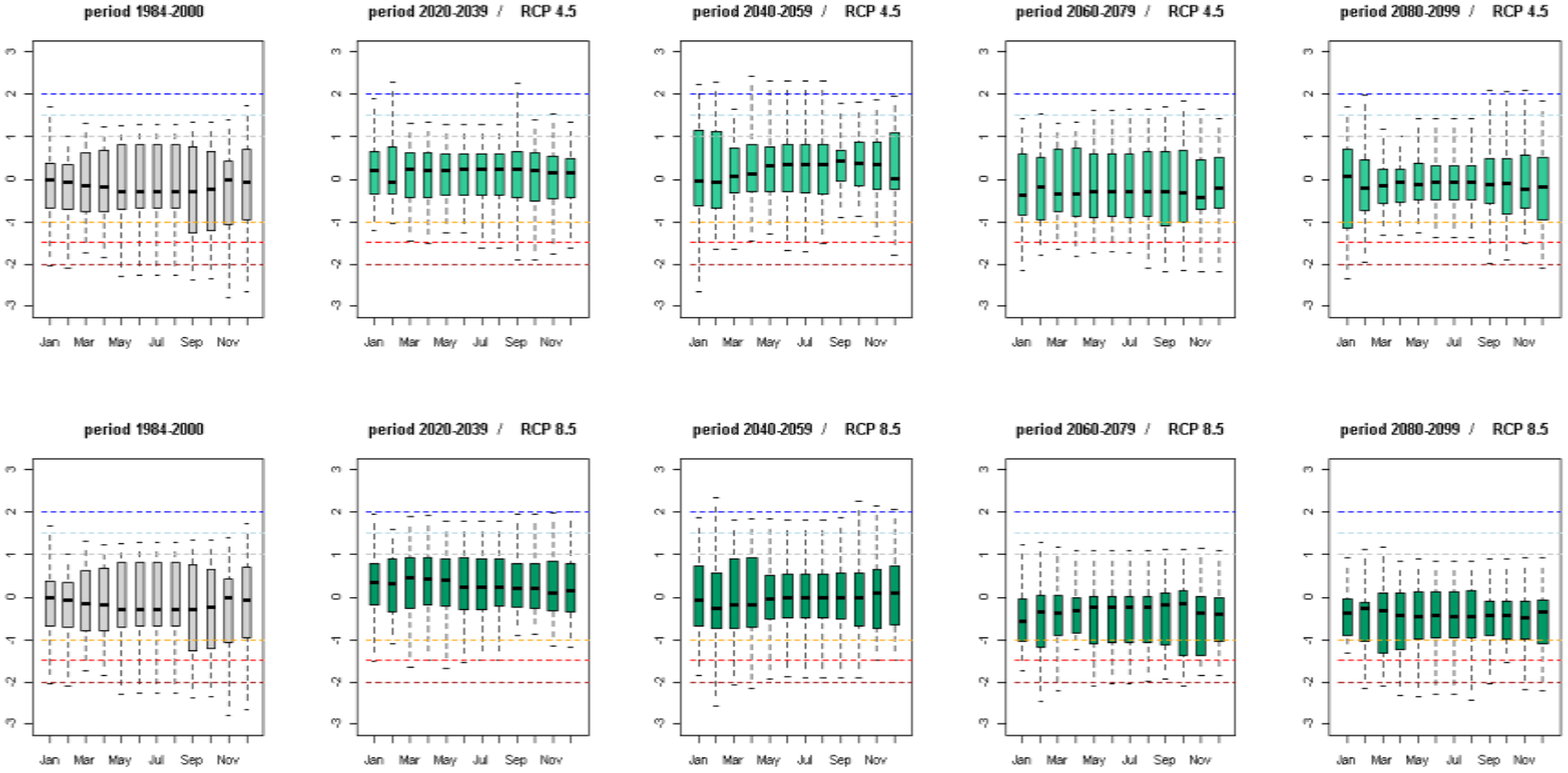
11. **Distribution mensuelle inter-périodiques de SRI 12 mois au niveau de la station A**



12. **Distribution mensuelle inter-périodiques de SRI 12 mois au niveau de la station B**



13. **Distribution mensuelle inter-périodiques de SRI 12 mois au niveau de la station C**



14. **Distribution mensuelle inter-périodiques de SRI 12 mois au niveau de la station D**

