

Etude de l'impact des changements climatiques sur la disponibilité des ressources en eau basée sur les simulations du modèle climatique régional RCA4 : cas du bassin de Ain DALIA (Algérie)

S. Taïbi^{1*}, F.Z.H. Anza¹, S. Zeroual²

¹Université Saad Dahlab, département des sciences de l'eau et environnement, Blida, Algérie

²Université de M'sila, laboratoire VESDD, M'sila, Algérie

*Corresponding author: taibisabrina86@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History :

Received : 09/02/2020

Accepted : 10/07/2020

Key Words:

Climate change;
Water availability;
CORDEX Regional climate models ;
GR2M model;

Mots clés:

Changements climatiques;
Disponibilité des ressources en eau;
Modèles climatiques régionaux CORDEX;
Modèle GR2M;

ABSTRACT/RESUME

Abstract: Global warming is likely to have serious repercussions on the availability of water resources through changes in precipitation regimes and rising temperatures. Understanding these changes in northern Algeria, where human life depends heavily on surface water and rainfed agriculture, is of crucial importance. In this study, we assess the potential effects of climate change on water supplies from the Ain Dalia dam by the end of the 21st century. The climate projections of the RCA4 regional model (Rossby Center Atmosphere model, version 4) were used to perform the hydrological simulations from the GR2M conceptual hydrological model over two future periods (2021-2050 & 2071-210). The RCA4 model is forced by four global circulation models (MPI-ESM-LR, IPSL-CM5A-MR, MIROC5 and CNRM-CM5) under two radiative forcing scenarios "Representative Concentration Pathways" (RCPs) RCP4.5 and RCP8.5. Simulations of the most optimistic model RC4-CNRM-CM5 show respectively an increase of 1.3 ° C and 3.7 ° C in temperatures at the 2050 and 2100 horizons as well as a decrease in rainfall in wet seasons (winter and spring) which varies from minus 5% by 2050 to 28% by 2100. To this end, the availability of surface water collected at the Ain Dalia dam is likely to decrease from 5% to 13% by 2050 and from 21% to 44% by 2100. These results can contribute to the establishment of a water resources planning and management tool to cope with the impact of future climate change at the basin level and take adequate adaptation measures to maintain the sustainability of resources and meet the water needs of the various water users of the Souk Ahras region.

Résumé: Le réchauffement climatique est susceptible d'avoir de graves répercussions sur la disponibilité des ressources en eau à travers les changements dans les régimes de précipitations et l'augmentation des températures. Comprendre ces changements en Algérie septentrionale, où la vie humaine dépend fortement des eaux superficielles et de l'agriculture pluviale, est d'une importance cruciale. Dans cette étude, nous évaluons les effets potentiels des changements climatiques sur les apports en eau du barrage d'Ain Dalia d'ici la fin du 21^{ème} siècle. Les projections climatiques du modèle régional RCA4 (Rossby Centre Atmosphere model, version 4) ont été utilisées pour réaliser les simulations hydrologiques issues du modèle hydrologique conceptuel GR2M au cours de deux périodes future (2021-2050 & 2071-210). Le

modèle RCA4 est forcé par quatre modèles de circulation globale (MPI-ESM-LR, IPSL-CM5A-MR, MIROC5 et CNRM-CM5) sous deux scénarios de forçages radiatifs "Representative Concentration Pathways" (RCPs) RCP4.5 et RCP 8.5. Les simulations du modèle le plus optimiste RC4-CNRM-CM5 montrent respectivement une augmentation de 1,3 °C et 3,7°C des températures aux horizons 2050 et 2100 ainsi qu'une diminution de la pluviométrie en saisons humides (hiver et printemps) qui varie de moins 5% à l'horizon 2050 à 28% à l'horizon 2100. A cet effet, la disponibilité des eaux superficielles collectées au barrage de Ain Dalia risque de diminuer de 5 % à 13 % à l'horizon 2050 et de 21% à 44% à l'horizon 2100. Ces résultats peuvent contribuer à la mise en place d'un outil de planification et de gestion des ressources en eau pour faire face à l'impact des changements climatiques futures à l'échelle du bassin et prendre les mesures d'adaptation adéquates pour maintenir la durabilité des ressources et satisfaire les besoins en eau des différents usagers de la région de Souk Ahras.

I. Introduction

Depuis plusieurs années le changement climatique est devenu un sujet d'actualité continu. Cependant ce qui intéresse de plus en plus les chercheurs s'est bien l'impact environnemental et socio-économique de ces changements climatiques en vue de mettre en œuvre des mesures d'adaptation et d'atténuation pour une gestion durable des ressources en eau, de l'agriculture, de l'énergie et de la biodiversité...etc. Les précipitations, principale source d'eau, présentent de fortes variabilités spatiotemporelles et une tendance à la baisse sur une grande partie de la méditerranée ; en Algérie [1], au Maroc [2, 3] en Tunisie [4] en Espagne [5], en Italie [6,7] et en Grèce [8].

Selon [9], l'Algérie a connu au cours des 25 dernières années (1975-1998), une sécheresse intense et persistante qui a touché l'ensemble du territoire, et a été particulièrement rude dans l'Ouest du pays. L'analyse des séries temporelles de précipitations indique une rupture à partir des années 1970, et la décennie 1980 a été la plus déficitaire [10, 11, 12, 13, 14]. Les potentialités en eau superficielle du Nord de l'Algérie sont passées de 13 milliards de M³ à la fin des années 70 à 10 milliards de M³ actuellement [15].

Une attention particulière est portée ces dernières années sur l'évolution des précipitations et températures dans des scénarios de changements climatiques, par la modélisation de ces phénomènes à l'échelle de temps climatique. Les prévisions effectuées par les modèles climatiques montrent une augmentation de la température qui peut atteindre 4°C dans les pays du Maghreb [16] ainsi qu'une diminution des précipitations de 20 à 40% d'ici la fin du 21^{ème} siècle ce qui affectera par conséquent la disponibilité des ressources en eau.

L'élaboration de stratégies d'adaptation pour faire face d'une façon adéquate aux effets néfastes du

changement climatique sur la disponibilité des ressources en eau et la production agricole est l'un des défis les plus importants auquel l'Algérie doit faire face. Quelles que soient les stratégies adoptées à cet égard, l'objectif est de comprendre comment établir des plans efficaces d'atténuation de la sécheresse, de gestion des risques pour le futur et assurer une gestion efficace des ressources en eau, en particulier dans les régions confrontées à des problèmes majeurs de pénurie d'eau [17].

L'évaluation de l'impact des changements climatiques sur la disponibilité des ressources en eau, peut se faire suivant deux approches différentes. La première est basée sur l'utilisation directe du ruissellement simulé par les Modèles climatiques globaux du CMIP5 ou régionaux [18, 19], tandis que, la deuxième approche suggère l'utilisation de modèles hydrologiques calibrés pour mieux comprendre le processus hydrologique dans les études d'impact. En plus d'être robuste et n'utilisant que peu de données d'entrée (pluie et évapotranspiration), les modèles hydrologiques conceptuels ont montré des résultats très satisfaisants dans plusieurs régions du monde comparés aux ruissellements simulés directement par les modèles climatiques [20]. Cette approche est la plus souvent utilisée et a fait l'objet de nombreuses études qui visent à simuler les écoulements futurs à l'échelle d'un bassin versant, en utilisant les sorties de modèles climatiques des pluies et des températures comme données d'entrée du modèle hydrologique [21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30]. En Algérie, le modèle Hydrologique GR2M est le plus utilisé compte tenu de sa simplicité mais aussi de sa capacité à reproduire convenablement le fonctionnement hydrologique des bassins versants algériens [26, 27, 31].

A l'issue des travaux présentés ci-dessus, notre étude vise à évaluer l'impact des changements climatiques sur les écoulements du barrage de Ain

Dalia situé dans la wilaya de Souk Ahras (Algérie). Il s'agit d'abord d'évaluer la capacité de quatre modèles climatiques régionaux Cordex-Africa à reproduire les observations, pour ensuite simuler les données futures des précipitations et des températures et les introduire dans le modèle GR2M pour générer les débits futurs à l'horizon 2050 et 2100 selon deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre RCP 4.5 et RCP 8.5.

II. Matériels et méthodes

II.1. Description de la zone d'étude

Le barrage de Ain Dalia est situé sur l'Oued Medjerda à environ 10km en amont de la ville de Souk Ahras à une altitude de 635m (Fig.1). Ce barrage a été construit en 1987 et mis en service en 1991. Il contrôle un bassin versant d'une superficie de 193 km². La zone d'étude se trouve dans la région des hauts plateaux Est. Cette région est caractérisée par un relief accentué ou l'altitude varie de 700 à 1400 m. La moyenne pluviométrique calculée à la station de Souk Ahras sur une période de 49 ans (1969-2017) est de 665,5 mm et la température moyenne annuelle est d'environ 16°C (Tableau 1).

II.2. Données hydro-climatologiques

Pour cette étude, les données pluviométriques et hydrométriques ont été respectivement collectées auprès de l'Agence nationale des ressources Hydrauliques (ANRH) et l'Agence nationale des barrages et transferts (ANBT) (Tableau 2). Les données de températures sont issues de la station météorologique de Souk Ahras gérée par l'Office national de Météorologie (ONM).

Ainsi pour la modélisation pluie-débit à l'échelle mensuelle, nous avons sélectionné:

- Les pluies mensuelles de la station de Khmissa qui se trouve à l'amont du bassin dont les données sont disponibles au cours de la période Septembre 1981–Aout 2013.
- Les débits mensuels de la station de Ain Dalia dont les données sont disponibles à partir de 1997.
- Les données mensuelles des températures de la station météorologique de Souk Ahras afin d'estimer l'évapotranspiration potentielle par la formule de Thornthwaite.

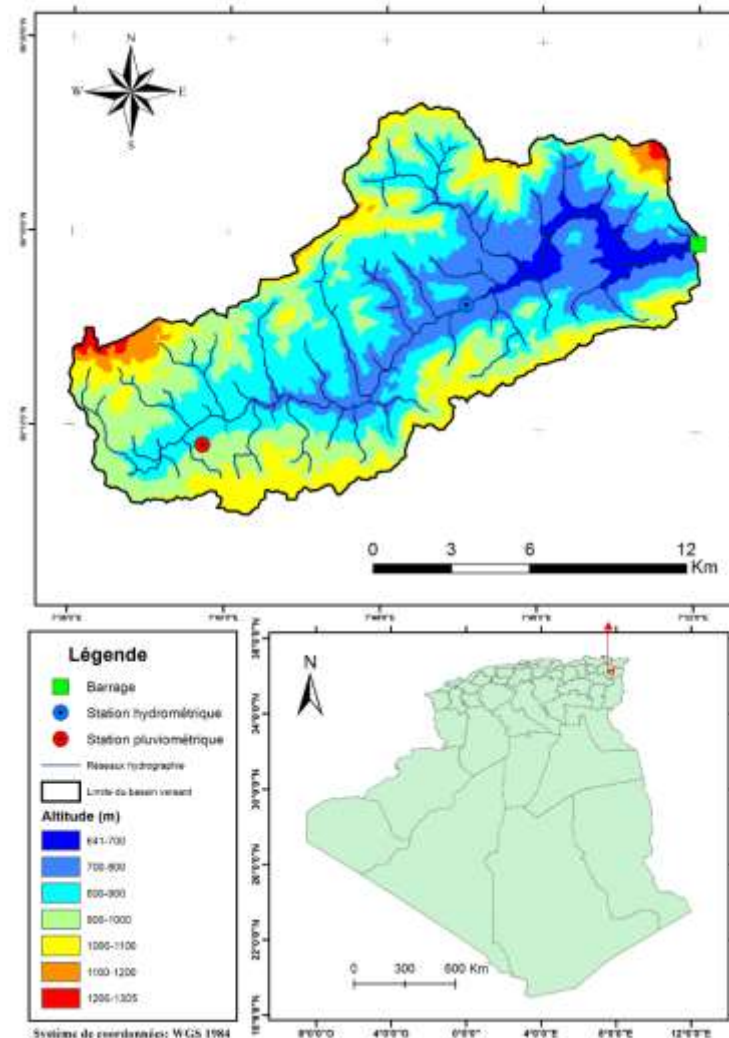


Fig 1. Situation géographique du bassin de Ain Dalia

II.3. Modèle GR2M et critères de validation

Le modèle GR2M est un modèle conceptuel qui permet de simuler les débits à partir des données de précipitations et des évapotranspirations potentielles au pas de temps mensuel. Il est caractérisé par deux réservoirs, avec deux paramètres, le paramètre X1 qui contrôle la fonction de production et le paramètre X2 qui contrôle la fonction de transfert. Il existe plusieurs versions du modèle GR2M, cependant pour notre étude nous avons utilisée celle proposée par [32]. La description détaillée du modèle est présentée dans l'article de [33].

Comme tout modèle les étapes de calage et validation sont indispensables avant de passer à son exploitation. Un bon calage signifie que le modèle est capable de reproduire efficacement le fonctionnement hydrologique du bassin versant.

Ainsi, pour juger les performances du modèle GR2M sur le bassin de Ain Dalia, nous avons utilisé deux critères :

➤ **Le coefficient de détermination (R²)**

Il permet de juger la qualité de l'ajustement entre deux variables X et Y par la droite de régression, en expliquant la proportion de la variance de Y par les variations de X.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{cal,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{moy})^2}$$

$Q_{obs,i}$: lame d'eau écoulée observée.

$Q_{cal,i}$: lame d'eau écoulée simulée

Q_{moy} : moyenne des débits observés.

➤ **Le Critère de Nash**

Ce critère (Nash and Sutcliffe, 1970) s'impose comme celui qui, globalement, permet d'accéder au meilleur calage.

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{obs,i}} - \sqrt{Q_{cal,i}})^2}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{obs,i}} - \sqrt{Q_{moy}})^2}$$

n: le nombre des valeurs calculées et observées.

$Q_{obs,i}$: lame d'eau écoulée observée.

$Q_{cal,i}$: lame d'eau écoulée simulée

Q_{moy} : moyenne des N valeurs de la racine carrée des lames d'eau écoulées observées.

II.4. Modèles climatiques régionaux et critère d'évaluation

Pour évaluer l'impact des changements climatiques sur les écoulements du barrage de Ain Dalia, les simulations climatiques (précipitations et températures) du modèle climatique régional de Rossby Centre (RCA4) forcé par quatre modèles de circulation globale (MPI-ESM-LR, CNRM-CM5, IPSL-CM5A et MIROC5) pilotées par quatre GCM disponibles dans le cadre du projet CORDEX ont été extraits pour notre station. Ces quatre modèles ont été jugés par [34] satisfaisants pour l'Algérie par rapport aux autres GCM utilisées dans le cadre de l'initiative CORDEX-Africa. Ce projet a été achevé par 15 simulations RCM, exécutées à la même résolution horizontale d'environ 0,44 °, en utilisant la combinaison de 4 RCM et 10 AOGCM. L'ensemble de données simulées, couvrant la période 1951–2100, comprend la période historique (1951–2005) et la période des projections (2006–2098). La période de projection a été forcée par

deux scénarios de forçages radiatifs "Representative Concentration Pathways" (RCPs) RCP4.5 et RCP8.5.

L'évaluation de la capacité des modèles climatiques à reproduire les observations ce fait par l'estimation du biais au cours de la période dite de référence (1981-2010).

$$\text{Biais} = \frac{x_{sim} - x_{obs}}{x_{obs}}$$

Où :

x_{obs} : moyenne mensuelle ou annuelle des précipitations (températures) observées

x_{sim} : moyenne mensuelle ou annuelle des précipitations (températures) simulées durant la période historique.

Cette méthode permet de choisir le RCA4-GCMs le plus performant pour pouvoir simuler les données futures des pluies et des températures utilisées comme input dans le modèle GR2M afin de générer les débits futurs.

III. Résultats et discussions

III.1. Validation du modèle GR2M sur le bassin de Ain Dalia

La modélisation pluie-débit permet d'obtenir la simulation des lames d'eau écoulées à partir des précipitations. L'exploitation du modèle ne peut se faire sans les deux étapes de calage et de validation. Le critère de Nash et le coefficient de détermination sont utilisés pour juger la performance du modèle.

Le calage du modèle au cours de la période septembre1997- Aout2007 montre une représentation satisfaisante des débits observés. Le critère de Nash est d'environ 72% et le coefficient de détermination est de 71%, ce qui permet de passer à l'étape de validation qui consiste à vérifier que le modèle garde toujours sa performance en passant à une période indépendante de la période de calage tout en gardant les mêmes paramètres de calage **X1** et **X2**.

Tableau 3. Résultats de la modélisation pour les périodes de calage et validation

Etapes	Calage	Validation
Période	Sept 1997/aout 2007	Sept 2007/aout 2013
Nash	71,7%	78,50%
R²	71%	76%

La validation du modèle au cours de la période septembre 2007-aout 2013 montre un critère de Nash de 78,5% et un R² de 76%. Les performances du modèle sont encore meilleures qu'en période de calage.

III.2.Evaluation des modèles climatiques régionaux

Afin de simuler les débits futurs au niveau du barrage de Ain Dalia, il est nécessaire d'avoir les données simulées futures des précipitations et des températures. Pour cela nous avons évalué quatre RCA4-GCMs du projet Cordex-Africa à reproduire les précipitations observées à la station de Khemissa au cours de la période de référence 1981-2005. L'intérêt d'évaluer plusieurs modèles est d'identifier le ou les modèles qui reproduisent le mieux la variabilité interannuelle des pluies mensuelles. L'évaluation de la performance des modèles est opérée par la méthode du biais qui consiste en la différence de moyennes entre les pluies simulées et observées par rapport aux pluies observées. Il permet d'évaluer l'écart des pluies simulées aux observations.

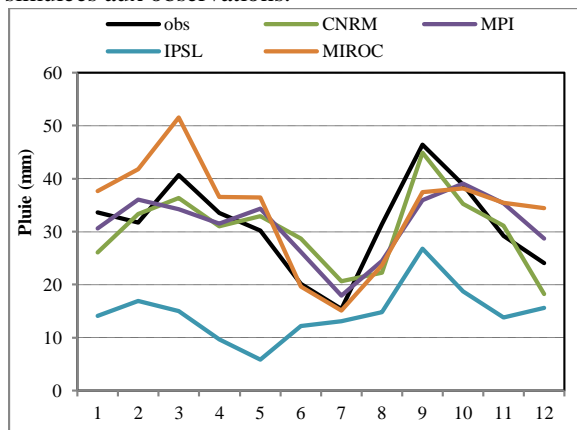


Fig 2. Représentation du cycle saisonnier par les quatre RCA4-GCMs.

Les résultats montrent dans l'ensemble que les modèles ont tendance à sous-estimer les pluies de la période humide et surestimer les pluies de la période sèche. Ce constat a déjà été soulevé dans d'autres études [1, 35, 36]. A cet effet, le choix du modèle le plus performant se fera par rapport au biais estimé au cours de la période humide d'octobre à mai. Pour cette période les deux modèles RCA4-MPI-ESM-LR et RCA4-CNRM-CM5 sont les plus performants. Le modèle RCA4-CNRM-CM5 sous-estime les pluies de la période humide de 7% alors que le modèle RCA4-MPI-ESM-LR surestime les pluies de cette période de 3%. Cette différence n'est pas significative et qui s'explique par la paramétrisation des modèles qui diffèrent d'un modèle à l'autre [37]. C'est pour cette raison aussi que le modèle RCA4-MIROC surestime les pluies au cours de la période humide (biais= 19%) alors que le modèle IPSL les sous-estime fortement (biais= -58%).

Compte tenu des résultats obtenus, le choix s'est porté sur le modèle qui sous-estime le moins et celui qui surestime le moins les pluies observées à

la station de Khemissa. Il s'agit des modèles RCA4-MPI-ESM-LR et RCA4-CNRM-CM5 pour lesquels les données simulées de pluies seront utilisées pour analyser la variabilité climatique à l'horizon 2100. Toutefois, la correction des biais entre les modèles climatiques et les valeurs observées est nécessaire afin d'améliorer la précision des études hydrologiques. Parmi les différentes approches présentées dans la littérature, nous avons utilisé la technique de cartographie empirique des quantiles (empirical quantile mapping (EQM)) [38] pour corriger les précipitations et la température mensuelles les plus efficaces du RCA4-GCM au cours de la période future. Cette méthode a été considérée comme l'une des techniques les plus adaptées pour l'amélioration des capacités de simulation hydrologique des précipitations et de la température mensuelles simulées par les GCM [39].

III.3. Evolution des précipitations et des températures à l'horizon 2100

Les modèles RCA4-MPI-ESM-LR et RCA4-CNRM-CM5 offrent des données de pluies simulées jusqu'à 2100 et pour deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre RCP 4.5 et RCP 8.5. Pour analyser l'évolution future des précipitations, les données simulées de deux périodes de projections à moyen terme (2021-2050) et à long terme (2071-2100) sont comparées aux données simulées de la période de référence (1981-2010).

Le modèle RCA4-MPI-ESM-LR simule une diminution de la pluviométrie en hiver et au printemps à l'horizon 2050. Cette baisse de la pluviométrie simulée par le RCP 4.5 est quasiment insignifiante de l'ordre de 3% et ne dépasse pas 14% selon le RCP 8.5. La variabilité pluviométrique devient plus importante à l'horizon 2100. Le scénario optimiste (RCP 4.5) simule une diminution de 27% en hiver et 18% en été tandis que le scénario pessimiste prédit une diminution plus sévère d'environ 34% en hiver et 45% au printemps ce qui risque d'influencer négativement les écoulements. Aussi, le modèle RCA4-MPI-ESM-LR simule une augmentation de 7% des précipitations l'horizon 2050 en été et en automne, mais cette augmentation reste insignifiante compte tenue des faibles quantités de pluies souvent enregistrées au cours de ces saisons.

Le modèle RCA4-CNRM prédit également une baisse de la pluviométrie au cours des saisons humides mais qui est moins importante que celle simulée par le modèle MPI. Le scénario 8.5 prédit une réduction de 28% en hiver et 15% au printemps à l'horizon 2100.

L'ETP est la deuxième entrée du modèle hydrologique. Pour déterminer l'ETP selon la formule de Thornthwaite il est donc primordial de simuler les températures futures.

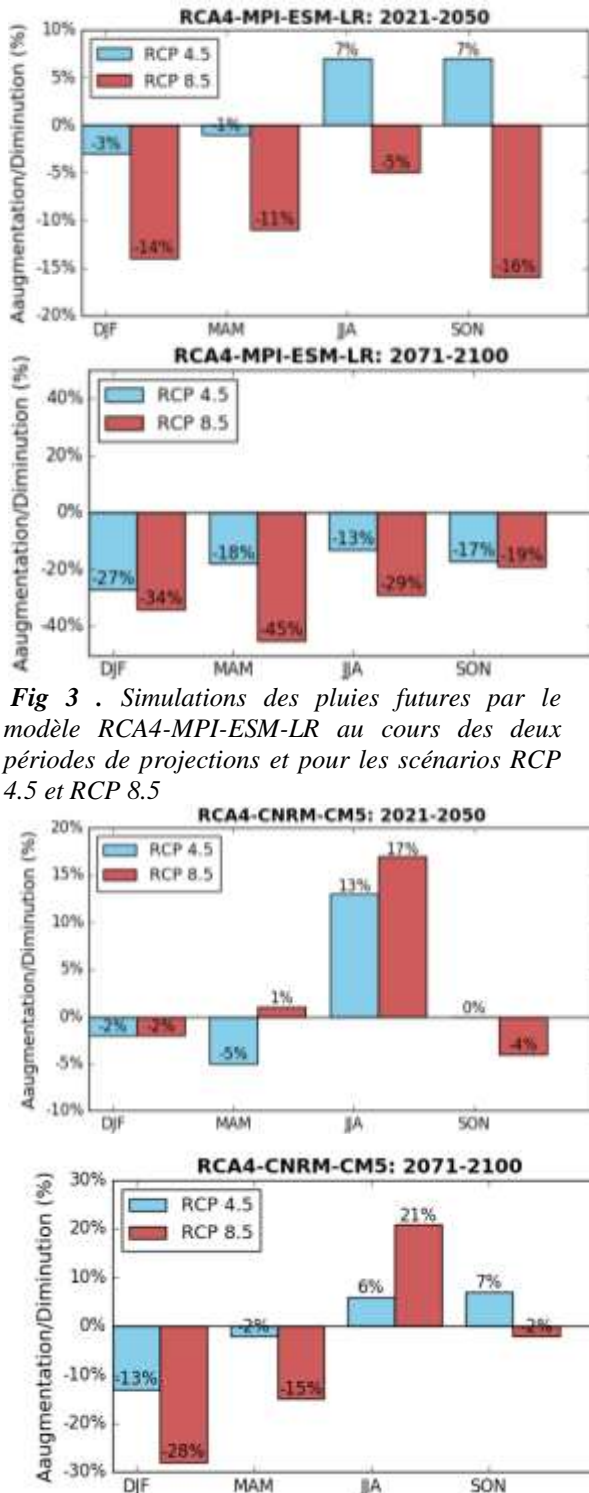


Fig 3 . Simulations des pluies futures par le modèle RCA4-MPI-ESM-LR au cours des deux périodes de projections et pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5

Fig 4 . Simulations des pluies futures par le modèle RCA4-CNRM-CM5 au cours des deux périodes de projections et pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5

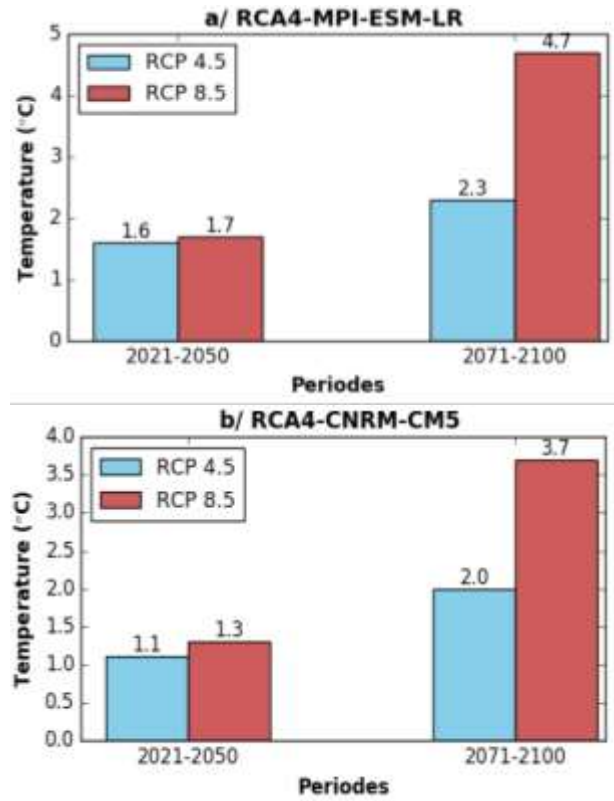


Fig 5 . Projections des températures par le modèle RCA4-MPI-ESM-LR (a) et RCA4-CNRM-CM5 (b)

Les températures simulées par le modèle RCA4-MPI-ESM-LR montre une augmentation des températures de plus de 1,5 °C pour les deux scénarios à l'horizon 2050. A l'horizon 2100 le scénario optimiste prédit une augmentation de 2,3°C alors que le scénario pessimiste prédit une augmentation de 4,7°C.

Le modèle RCA4-CNRM simule également une augmentation des températures mais moins que le modèle MPI. A l'horizon 2100, le scénario RCP 4.5 indique une augmentation de 2°C alors que le scénario RCP 8.5 simule une augmentation de 3,7°C.

Cette augmentation des températures va engendrer une augmentation de l'évapotranspiration ce qui va influencer négativement sur la disponibilité des ressources en eau au sein du barrage de Ain Dalia. L'ETP a été estimée par la formule de Thornthwaite sur la base des températures simulées par les deux MCR.

A l'horizon 2050 le modèle RCA4-MPI-ESM-LR montre une augmentation non significative de l'ETP qui varie de 1 à 5% d'après le RCP 4.5 et de 2 à 12% selon le RCP 8.5. A l'horizon 2100, le modèle simule une augmentation plus importante de l'ETP au printemps et en été qui est respectivement de 16% et 15% selon le RCP 4.5, et de 29% et 31% selon RCP 8.5.

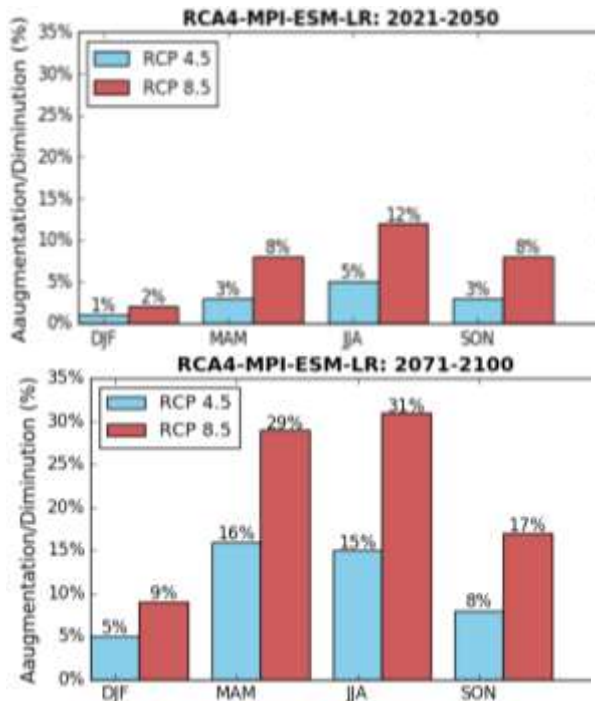


Fig 7. Variation des ETP à l'horizon 2100 pour les deux scénarios RCP 4.5 et 8.5 selon le modèle RCA4-MPI-ESM-LR

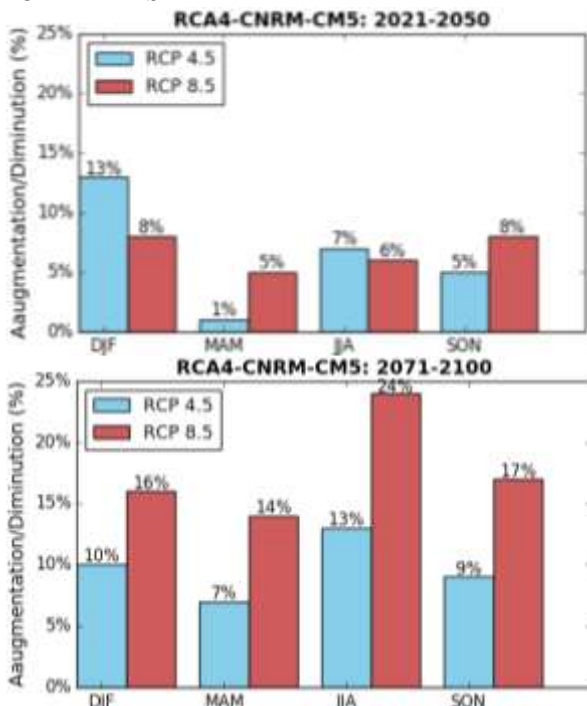


Fig 8. Variation des ETP à l'horizon 2100 pour les deux scénarios RCP 4.5 et 8.5 d'après le modèle RCA4-CNRM-CM5

L'ETP estimée sur la base des températures du modèle RCA4-CNRM montre à son tour une augmentation qui ne dépasse pas 13% à l'horizon 2050 pour les deux scénarios climatiques. Alors

qu'à l'horizon 2100, le modèle simule une augmentation plus importante des ETP particulièrement en été qui atteint 24% selon le RCP 8.5.

III.4. Evolution future des écoulements du barrage de Ain Dalia

Le modèle hydrologique GR2M est utilisé pour déterminer les débits futurs du barrage de Ain Dalia, simulés aux deux horizons 2050 et 2100 en introduisant les données simulées des pluies et des ETP comme entrée du modèle.

Les débits générés par les données d'entrée simulées par le modèle RCA4-MPI-ESM-LR à l'horizon 2050 montrent une diminution importante de l'ordre de 30% durant la période humide (d'octobre à mai), tandis qu'elle dépasse 50% à l'horizon 2100 et atteint 64% selon le scénario pessimiste.

Le modèle RCA4-CNRM simule une diminution moins importante que MPI, elle est de l'ordre de 5% à l'horizon 2050 et 20% à l'horizon 2100 selon le scénario RCP4.5, alors que le scénario pessimiste simule respectivement une diminution de 13% et 44%.

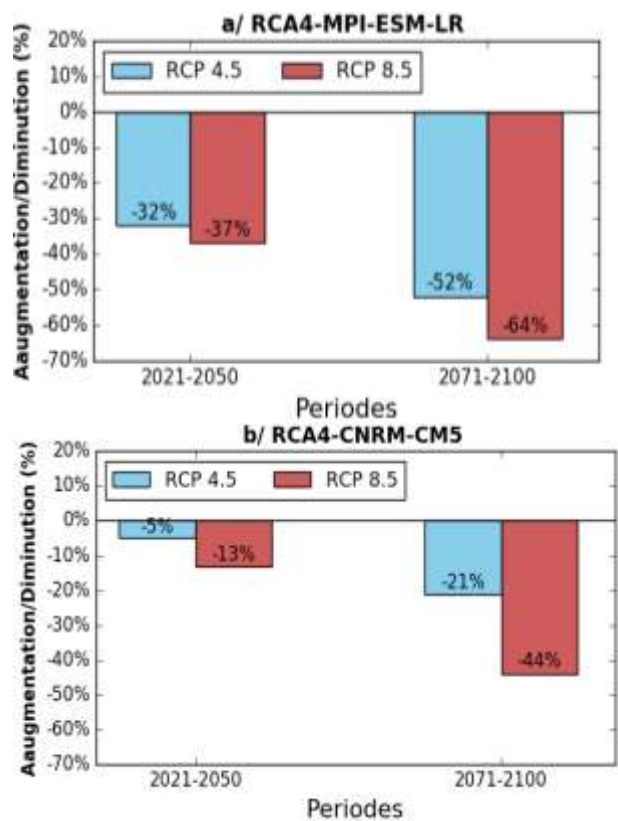


Fig 9. Variation de la lame d'eau écoulée future selon le modèle RCA4-MPI-ESM-LR (a) et RCA4-CNRM-CM5 (b) au cours de la période humide (Octobre-Mai)

Tableau 1. Moyennes mensuelles des pluies et des températures de la station de Souk Ahras au cours de la période 1969-2017.

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	an.
P (mm)	35,8	49,8	69,9	82,6	93,6	88,6	88	67,6	48,7	17	6,8	17,1	665,5
T (°C)	21,7	18,3	12,3	8,5	7,9	7,6	10,5	13,5	17,2	22,4	26,3	25,8	16,0

Tableau 2. Caractéristiques des stations hydro-climatiques

Nom	type de station	Origine	X	Y	Z (m)
Souk Ahras	Hydrométrique	ANBT	967.7	342.2	580
khemissa	Pluviométrique	ANRH	945.5	332.8	900
Souk Ahras	Météorologique	ONM	36°17'N	07°58'E	680

Tableau 4. Biais estimé entre les pluies observées et simulées au cours de la période de référence 1981-2010

Biais	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Période Humide
CNRM	-23%	5%	-11%	-8%	9%	42%	34%	-29%	-3%	-9%	6%	-24%	-7%
MPI	-9%	14%	-16%	-6%	14%	30%	17%	-22%	-23%	0%	21%	19%	3%
IPSL	-58%	-47%	-63%	-71%	-81%	-40%	-15%	-53%	-42%	-52%	-53%	-35%	-58%
MIROC	12%	32%	27%	9%	21%	-3%	-2%	-25%	-19%	-2%	21%	43%	19%

IV. Conclusion

Ce travail a pour objectif d'évaluer l'impact des changements climatiques sur l'évolution future des écoulements au barrage de Ain Dalia par l'utilisation des simulations de 4 modèles climatiques régionaux du projet Cordex-Africa. L'évaluation de la performance des modèles climatiques à reproduire les précipitations observées a montré que dans l'ensemble les modèles ont tendance à sous-estimer les pluies en saisons humides et les surestimer en saisons sèches. Ce constat a déjà été soulevé par d'autres études menées à l'échelle du bassin méditerranéen [34, 35, 40, 1]. Les modèles RCA4-CNRM et RCA4-MPI-ESM-LR ont été jugés performants et ils ont été sélectionnés par rapport à la plus faible valeur du biais relatif calculé entre les données observées et simulées au cours de la période humide (Octobre-Mai). Une différence est observée dans l'évolution future des précipitations et des températures simulée par les deux modèles. Toutefois, si on tient compte uniquement des simulations du modèle RCA4-CNRM une augmentation de 1,3 °C et 3,7° C des températures est simulée respectivement aux horizons 2050 et 2100, si on tient compte du scénario pessimiste. Cette augmentation des températures s'accompagne par une diminution de la pluviométrie en saisons humides (hiver et printemps) qui varie de moins 5% à l'horizon 2050 à 28% à l'horizon 2100, d'après le même scénario. Même si l'Est de l'Algérie n'a pas connu une

modification significative du régime pluviométrique suite aux sécheresses qui ont frappé le pays depuis la moitié des années 70 [14], les modèles climatiques prédisent le contraire d'ici la fin du 21^{ème} siècle. D'après les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre RCP 4.5 et RCP 8.5, la disponibilité des eaux superficielles collectées au barrage de Ain Dalia va respectivement diminuer de 5 % à 13 % à l'horizon 2050 et de 21% à 44% à l'horizon 2100. Selon l'Agence Nationale des Barrages et Transferts, le barrage d'Ain Dalia est destiné à l'alimentation en eau potable et industrielle de la région de Souk Ahras [41]. L'augmentation de la population et de l'industrialisation à moyen et à long terme associée à une diminution de la disponibilité des ressources en eau au sein du barrage va constituer une contrainte pour répondre aux besoins en eau de la région. Les résultats de cette étude peuvent contribuer à la mise en place d'un outil de planification et de gestion des ressources en eau pour faire face à l'impact des changements climatiques futures à l'échelle du bassin et prendre les mesures d'adaptation adéquates pour maintenir la durabilité des ressources et satisfaire les besoins en eau des différents usagers.

V. Remerciement

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude envers les institutions qui ont mis à leur disposition les données nécessaires pour la réalisation de cette étude. Il s'agit de l'Agence Nationale des

Ressources Hydrauliques (ANRH), l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) et l'Office National de Météorologie (ONM).

VI. References

1. Taibi, S.; Meddi, M.; Mahé, G.; Assani A. Relationships between atmospheric circulation indices and rainfall in Northern Algeria and comparison of observed and RCM-generated rainfall. *Theoretical and Applied Climatology* 127 (2017) 241-257.
2. Benassi, M. Drought and climate change in Morocco. Analysis of precipitation field and water supply. *Options méditerranéennes* 80 (2008) 83-87.
3. Singla, S.T.; Mahé, G.; Dieulin, C.; Driouech, F.A.; Milano, M.A., El Guelai, F.Z.; Ardoin-Bardin, S. Evolution des relations pluie-débit sur des bassins versants du Maroc. *Global change: Facing risks and threats to water resources* (2010) 679-87.
4. Kingumbi, A.; Bargaoui, Z.; Hubert, P. Investigation of the rainfall variability in central Tunisia. *Hydrological Sciences Journal* 50 (2005) 493-508.
5. Ruiz Sinoga, J. D.; Garcia Marin, R.; Martinez Murillo, J. F.; Gabarron Galeote, M. A. Precipitation dynamics in southern Spain: trends and cycles. *International journal of climatology* 31(2011) 2281-2289.
6. Longobardi, A.; Villani, P. Trend analysis of annual and seasonal rainfall time series in the Mediterranean area. *International journal of Climatology* 30 (2010)1538-1546.
7. Caloiero, T.; Coscarelli, R.; Ferrari, E.; Mancini, M. Precipitation change in Southern Italy linked to global scale oscillation indexes. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11(2011) 1683-1694.
8. Feidas, H.; Nouloupoulou, C.; Makrogiannis, T.; Bora-Senta, E. Trend analysis of precipitation time series in Greece and their relationship with circulation using surface and satellite data: 1955–2001. *Theoretical and Applied Climatology* 87(2007) 155-177.
9. Demmak, A.; Ould Amara, A.. La sécheresse en Algérie des années 1970/1990 et son impact sur les ressources en eau. Table ronde. *sécheresse-changement climatique-désertification* (2001)10p.
10. Medjerab, A.; Henia, L. Régionalisation des pluies annuelles dans l'Algérie Nord-Occidentale. *Revue géographique de l'Est* 45 (2005) 1-14.
11. Meddi, M.; Talia, A. Pluviometric regime evolution in the North of Algeria. *Arab Gulf Journal of Scientific Research* 27 (2007) 152-162.
12. Bekkoussa, B.; Meddi, M.; Jourde, H. Forçage climatique et anthropique sur la ressource en eau souterraine d'une région semi-aride : cas de la plaine de Ghriss (Nord-Ouest algérien). *Sécheresse* 18 (2008) 173-184.
13. Meddi, M.; Assani, A. A.; Meddi, H. 2010. Temporal variability of annual rainfall in the Macta and Tafna catchments; Northwestern Algeria. *Water Resources Management* 24 (2010) 3817-3833.
14. Taibi S.; Meddi M.; Souag D.; Mahe G. Évolution et régionalisation des précipitations au nord de l'Algérie (1936-2009). *Climate and land surface changes in hydrology, IAHS Publ* 359 (2013) 191-197.
15. ANRH. Impact des changements climatiques sur les ressources en eaux. *Note de synthèse* (2007) 12p.
16. Stocker, T.F.; Qin, D.; Plattner, G.-K.; Tignor, M.; Allen, S.K.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V.; Midgley, P.M. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change* (2013) 1535 pp.
17. Naumann, G.; Alfieri, L.; Wyser, K.; Mentaschi, L.; Betts, R. A.; Carrao, H.; Feyen, L.. Global changes in drought conditions under different levels of warming. *Geophysical Research Letters* 45 (2018) 3285-3296.
18. Alkama, R.; Marchand, L.; Ribes, A.; Decharme, B. Detection of global runoff changes: results from observations and CMIP5 experiments. *Hydrology and Earth System Sciences* 17(2013) 2967–2979.
19. Zheng, H.; Chiew, F. H. S.; Charles, S. ; Podger, G. Future climate and runoff projections across South Asia from CMIP5 global climate models and hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 18 (2018) 92–109.
20. Giuntoli, I.; Villarini, G.; Prudhomme, C.; Hannah, D.M. Uncertainties in projected runoff over the conterminous United States. *Climatic Change* 150(2018) 149–162.
21. Ibrahim, B.; Karambiri, H.; Polcher, J. Hydrological impacts of the changes in simulated rainfall fields on Nakanbe Basin in Burkina Faso. *Climate* 3 (2015) 442–458.
22. Al-Safi, H.I.J.; Kazemi, H.; Sarukkalige, P.R. Comparative study of conceptual versus distributed hydrologic modelling to evaluate the impact of climate change on future runoff in unregulated catchments. *Journal of Water and Climate Change* 2 (2020) 341-366.
23. Okkan, U.; Fistikoglu, O. Evaluating climate change effects on runoff by statistical downscaling and hydrological model GR2M. *Theoretical and Applied Climatology* 117 (2014) 343–361.
24. Sidibe, M.; Dieppois, B.; Eden, J.; Mahé, G.; Paturol, J.E.; Amoussou, E.; Anifowose, B.; Van De Wiel, M.; Lawler, D.; 2020. Near-term impacts of climate variability and change on hydrological systems in West and Central Africa. *Climate Dynamics* 54 (2020) 2041-2070.
25. Todorovic, A.; Plavsic, J.; 2016. The role of conceptual hydrologic model calibration in climate change impact on water resources assessment. *Journal of Water and Climate Change* 1 (2016) 16-28.
26. Zeroual, A.; Meddi, M. ; Bensaad, S. The impact of climate change on river flow in arid and semi-arid rivers in Algeria. *Proceedings of IAHS: Climate and land-surface changes in hydrology* 1 (2013) 105-110.
27. Hadour, A.; Mahe, G.; Meddi, M. Watershed based hydrological evolution under climate change effect: An example from North Western Algeria. *Journal of Hydrology* 28 (2020) 1-13.
28. Singla, S.T. ; Mahé, G. ; Dieulin, C., Driouech, F.A. ; Milano, M.A. ; El Guelai, F.Z. ; Ardoin-Bardin S. Evolution des relations pluie-débit sur des bassins versants du Maroc. *Global change: Facing risks and threats to water resources* (2010) 679-687.
29. Piao, S.; Ciais, P.; Huang, Y.; Shen, Z.; Peng, S.; Li, J.; Zhou, L.; Liu, H.; Ma, Y.; Ding, Y.;

- Friedlingstein, P. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature* 467(2010) 43-51.
30. García-Ruiz, J.M.; López-Moreno, J. I.; Vicente-Serrano, S. M.; Lasanta-Martínez, T.; Beguería, S. Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Science Reviews* 105 (2011) 121-139.
31. Ouhamdouch, S.; Bahir, M.; Carreira, P.M.; Zouari, K. Climate change impact on future flows in semi-arid environment; case of Essaouira Basin (Morocco). In *Conference of the Arabian Journal of Geosciences* (2018) 305-308. Springer, Cham.
32. Mouelhi, S.; Michel, C.; Perrin, C.; Andréassian, V. Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology* 318 (2006) 200–214.
33. Perrin, C.; Michel, C.; Andréassian, V. Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR). *Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés* (2007) 16p.
34. Zeroual, A.; Assani, A. A.; Meddi, M.; Alkama, R. Assessment of climate change in Algeria from 1951 to 2098 using the Köppen–Geiger climate classification scheme. *Climate dynamics*; 52(2019) 227-243.
35. Bargaoui, Z.; Trambly, Y.; Lawin, E. A.; Servat, E. Seasonal precipitation variability in regional climate simulations over Northern basins of Tunisia. *International Journal Climatology* 34 (2014) 235–248.
36. Ceglar, A.; Honzak, L.; Žagar, N.; Skok, G.; Žabkar, R.; Rakovec J. Evaluation of precipitation in the ENSEMBLES regional climate models over the complex orography of Slovenia. *International Journal of Climatology* 35 (2015) 2574-2591.
37. Teutschbein, C.; Seibert, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology* 456 (2012) 12–29.
38. Themeßl, M. J.; Gobiet, A.; Heinrich, G.. Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal. *Climatic Change* 2 (2012) 449-468.
39. Ghimire, U.; Srinivasan, G.; Agarwal, A. Assessment of rainfall bias correction techniques for improved hydrological simulation. *International Journal of Climatology* 39(2019) 2386–2399.
40. Alemseged, T.H.; Tom, R. Evaluation of regional climate model simulations of rainfall over the Upper Blue Nile basin. *Atmospheric research* 161 (2015) 57-64.
41. ANBT, 2019. <https://www.soudoud-dzair.com/>

Please cite this Article as:

Taïbi S., Anza F.Z.H., Zeroual S., Etude de l'impact des changements climatiques sur la disponibilité des ressources en eau basée sur les simulations du modèle climatique régional RCA4 : cas du bassin de Ain DALIA (Algérie), *Algerian J. Env. Sc. Technology*, 7:2 (2021) 1860-1869