

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université D'Oran 2

FACULTE DES SCIENCES DE TERRE ET GEOGRAPHIE ET
AMENAGEMENT DU TERRITOIRE

Département : géographie et aménagement du territoire



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Présente pour l'obtention du Diplôme de Mastère

Spécialité : Hydrologie, Climatologie et Territoire

Thème

**Impact du changement climatique sur les ressources
hydrauliques d'un bassin versant de Oued El Hammam.**

Réalisées par :

❖ **MESRI ABDELKRIM**

❖ **HELALI MAHIDDINE IMAD EDDINE**

Soutenu le 12 /07/2021, devant la commission d'examen :

Allal Nadir El Ouassini	MAA	Université d'Oran	Présidente
Gourine Farida	MAA	Université d'Oran	Rapporteur
Senhadji Hafida	MAA	Université d'Oran	Examinatrice

Remerciement

*On remercie en premier lieu **Dieu** de nous avoir donné la force et la patience pour terminer ce travail, on souhaite adresser aussi nos vifs remerciements à certaines personnes qui nous ont aidés au cours de cette formation.*

*On voudrait remercier très chaleureusement, notre directeur de mémoire madame **Gourine Farida** pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils qu'il a pu nous donner pour élaborer ce travail, sans oublier **Mr Taïbi Slimane**, professeur à l'Institut hydrométéorologique de formation et de Recherches (IHF_R) pour leurs aides et supports.*

*Nos remerciements iront également aux **membres du jury** pour avoir accepté d'évaluer notre travail de recherche. À tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin, par un geste, une parole ou un conseil, on leur dit merci.*

*Sans oublier tous **nos enseignants** qui nous ont assuré des études de haut niveau et qui nous permirent d'acquérir des connaissances*

Dédicace Mesri Abdelkrim

*Je dédie ce modeste travail aux êtres qui me sont les plus chers je cite :
Mme Bey Fatima, pour le temps qu'elle a su me consacrer, l'aide et les
conseils précieux.*

*Particulièrement mon binôme Helali Mahiddine Imad Eddine pour son
support et pour son ambition.*

*Sans oublier mes collègues et mes frères Arbouz Walid, Smahi Ramzi,
et ZIN EDDINE ABDELLAOUI, pour l'aide précieuse qu'ils m'ont
apportée pendant mes études et la préparation de ce mémoire.*

*Tous mes amis Mebrouk Younes, Boumazouza Fares, Makdour Aid,
Hadj Brahim Abdelnor, Mezrag Sid Ahmed, Sohabi Ilyas, pour leur
lecture attentive et leurs encouragements.*

*Mes sœurs Amina, Khadija et Souad, mes beaux-frères, Laazizi sid
Ahmed et Dekkiche Nabil. Et toute la famille Mesri qui ont toujours
cru en moi et qui m'ont soutenu dans ce projet de thèse et tout au long
de ses nombreuses années d'études. J'ai une pensée particulière pour
mon père qui aurait été très fier de voir l'aboutissement de ce travail,
Que Dieu le bénisse.*

*Je garde le mot de fin pour Maman. Je lui témoigne ma reconnaissance
pour son soutien permanent, pour sa patience et sa présence, son
écoute, sa confiance en moi m'assurent des bases solides me permettant
de persévérer et de me surpasser... Je la remercie d'avoir toujours su
être là et d'avoir été d'un très grand appui moral et affectif. Un
immense merci pour le bonheur que son amour m'apporte.*

Ce travail est évidemment dédié à toutes les personnes qui me sont chers.

Dédicace Helali Mahiddine Imad Eddine

Je dédie ce modeste travail aux êtres qui me sont les plus chers je cite :

***A ma très chère mère** Par les inestimables sacrifices que tu as consentis pour moi, tu as tant souhaité que je parvienne à ce but. Je te serai reconnaissant toute ma vie, qu'Allah t'accorde longue vie dans la santé !*

***A mon très cher père** Tu as toujours été pour moi un exemple du père respectueux, honnête, de la personne méticuleuse, je tiens à honorer l'homme que tu es. Grâce à toi j'ai appris le sens du travail et de la responsabilité. Je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité, ta compréhension... Ton soutien fut une lumière dans tout mon parcours. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour toi.*

***Mon Frère et ma Sœur** A tous les moments d'enfance passés avec vous, en gage de ma profonde estime pour l'aide que vous m'avez apporté. Vous m'avez soutenu, réconfortés et encouragés. Puissent nos liens fraternels se consolider et se pérenniser encore plus.*

Et toute ma famille sans exception

***Mon binôme Mesri Abdelkrim** Un ami, un collègue et un frère, je le remercie pour son engagement et son professionnalisme qui nous ont permis d'élaborer ce travail.*

***Mr Bouzid Ahmed** J'exprime envers vous particulièrement une profonde admiration et reconnaissance, je vous remercie pour votre orientation et support depuis que j'ai rejoint cet établissement*

***Bilel, Adel et Amine,** je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des Frères et des amis sur qui je peux compter.*

En témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

***Tous Mes collègues à AIESEC** Une équipe qui ma créer un espace ou j'ai pu développer mes capacités et me sentir chez moi, vous êtes ma deuxième famille et je tiens a vous remercier pour tous.*

Table des matières

Abréviation	I
Liste des figures	III
Liste des tableaux	IV
Résumé.....	V
Abstract.....	VI
Introduction générale	1
1 Chapitre I : Revue bibliographique	6
1.1 Introduction	6
1.2 Objectif de la modélisation hydrologique :.....	6
1.3 Les différentes approches de la modélisation :.....	10
1.3.1 Modèles stochastiques :	10
1.3.2 Modèles déterministes :.....	10
1.3.3 Modèles globaux :.....	11
1.3.4 Modèles distribués :.....	12
1.3.5 Exemple de quelques modèles :.....	16
1.4 Les modèles génie rural GR.....	17
1.4.1 Le calage et validation d'un modèle.....	17
1.4.2 Critères de qualité	17
1.4.3 Objectifs de développement	18
1.4.4 Mode de développement.....	18
1.4.5 Le modèle pluie-débit annuel GR1A.....	19
1.4.6 Le modèle pluie-débit mensuel GR2M.....	20
1.4.7 Le modèle pluie-débit journalier GR4J	22
1.5 Conclusion.....	26
2 Chapitre II : Caractéristiques du bassin versant de l'Oued El Hamam :	28
2.1 Introduction	28
2.2 Végétation :.....	29
2.3 Pédologie :.....	30
3 Chapitre III : caractérisation du changement climatique sur la zone d'étude	32
3.1 Introduction :	32
3.2 Le package Climate4R	33

3.3	Calage et validation des techniques de downscaling	34
3.4	Bases de données	37
3.5	Méthodologie d'analyses d'impacts du changement climatique	39
3.5.1	Utilisation des scénarios du changement climatique	39
3.5.2	Descente d'échelle statistique environnementale avec QGIS	39
3.6	Données hydro-climatiques (avec Lars-WG)	41
3.7	Méthode d'application des données de GCM dans l'étude d'impact.....	43
3.8	RESULTATS.....	45
3.8.1	Températures minimales :.....	45
3.8.2	Températures maximales :.....	46
3.8.3	Précipitations :.....	47
4	Chapitre IV Simulations des impacts du Changement Climatique sur les régimes hydrologiques de bassin versant El Hammam à l'horizon 2030	49
4.2	Données et méthodologie.....	51
4.3	Etude de la variation de paramètres hydro-climatiques pour la période de référence	52
4.3.1	Etude des précipitations.	52
4.4	Modèle journalier GR4J	56
4.4.1	Résultat pour la période de référence 1999-2006.....	56
4.4.2	Résultats des simulations pour l'horizon 2030	58
	Conclusion et perspective.....	64
5	Bibliographie	66

Abréviations

A.B.H : Agence de Bassin Hydrographique. Les cahiers de l'Agence.

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrique.

CanESM2 : Le modèle canadien du système terrestre de la deuxième génération.

CanRCM: The Canadian Regional Climate Model .

CCCma : Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis.

CEMAGRAF : Centre d'Étude du Machinisme Agricole et du Génie Rural des Eaux et Forêts.

CNRM : Centre National de Recherches Météorologiques regroupe l'essentiel des équipes de recherche de Météo-France.

COP21 : La Conférence de Paris de 2015 sur les changements climatiques a eu lieu du 30 novembre au 12 décembre 2015 au Bourget en France.

CORDEX: Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment.

CTEM : Le modèle canadien modèle du carbone terrestre.

EC- Earth : Le modèle climatique du centre ECMWF, A European community Earth-System model ECMWF, Le modèle de système terrestre (ESM) décrit le système climatique global et son évolution dans le temps par une combinaison de processus physiques et biogéochimiques couplés.

ETP :Evapo Transpiration Potentielle.

GCM : Global Climate Model.

GFDL-CM3 NOAA : Le modèle climatique du Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, modèle de circulation générale qui tient compte des caractéristiques de la banquise, de l'océan, de la couverture terrestre,

GR4J : Modèle Génie Rural à 4 paramètres Journalier.

HADGEM2-ES : Le modèle climatique du Met Office Hadley Centre (réalisations HadGEM2-ES supplémentaires effectuées par l'Institut National de Esquissas Esparciaux).

IHRACRES: Identification of unit Hydrographs And Component flows from Rainfall, Evaporation and Streamflow data).

IPCC ou **GIEC** : Intergovernmental Panel on Climate Change.

LARS WG : Long Asthon Reasearch Station Weather Generator) Générateur de climat développé par le 'Long Ashton Research Station'

MCCO : Le Modèle Canadien du Carbone Océanique.

Netcdf: Network Common Data Form.

ONM : Office Nationale de la Météorologie.

ODE: ordinary differential équation

PDF: Probability Differential Function.

RCM : Regional Climate Model.

RCP 4.5 : Representative Concentration Pathwayon atteint un forçage radiatif de 4,5 W/m²

RCP 8.5 : Representative Concentration Pathway atteint un forçage radiatif de 8,5 W/m²

SHE : Système Hydrologique Européen

SIG : Système d'information géographique

Liste des figures

Figure I-1 :Schéma représentant le fonctionnement d'un modèle pluie-débit, (Inspiré du schéma de Versiani (1983) et Boudhraa (2007)).....	8
Figure I-2 :Classification des modèles proposée par Singh, 1995.....	13
Figure I-3 :Tableau résumé de quelques modèles hydrologiques (Estupina Borrell V, 2004).	15
Figure I-4 : Schéma et Description mathématique du modèle GR2A (Perrin C., 2000).....	19
Figure I-5 : Schéma de la structure du modèle GR4J d'après (Perrin C., 2000).....	21
Figure II-1 : Situation du bassin versant de l'Oued El Hammam dans l'ensemble des bassins versants algériens. (Jean-Paul Bravard ; 10 Oct 2012.).....	29
Figure II-2 : Occupation du sol du bassin versant de l'Oued El Hammam	30
Figure III-1 : Organigramme climate4R M. Iturbide, al (2019).....	39
Figure III-2: Schéma qui décrit la méthode des anomalies appliquées dans un générateur climatique LARS-WG.....	40
Figure III-3: Les anomalies mensuelles de Tn pour CCCma RCP 4.5/85 resp(haut bas).....	48
Figure III-4: Les anomalies mensuelles de Tn pour CNRM RCP 4.5/85 resp (haut /bas).....	48
Figure III-5 : Les anomalies mensuelles de T _x pour CCCma RCP 4.5/85 resp (haut /bas)....	49
Figure III-6 : Les anomalies mensuelles de T _x pour CNRM RCP 4.5/85 resp (haut /bas).....	49
Figure III-7 : Les anomalies mensuelles de RR pour CCCma RCP 4.5/85 resp (haut /bas)...	50
Figure III-8: Les anomalies mensuelles de RR pour CNRM RCP 4.5/85 resp (haut /bas).....	50
Figure IV-1: La moyenne des précipitations annuelles du bassin El Hammam.....	54
Figure IV-2 : Les variations moyennes mensuelles des précipitations du bassin El Hammam	56
Figure IV-3 : La distribution saisonnière des précipitations du bassin El Hammam	57
Figure IV-4 : Les variations interannuelles des débits du bassin El Hammam	58
Figure IV-5 : Les débits moyens mensuels u bassin El Hammam	59
Figure IV-6 : La distribution saisonnière des débits du bassin El Hammam	60
Figure IV-7 : Résultat des simulations pluie et débit quotidien de GR4J, pour la période de référence 2002-2006 d'Oued Hammam	61
Figure IV-8 : Résultat des simulations régimes de GR4J, pour la période de référence 2002-2006	62
Figure IV-9 : Résultat des simulations des débits journaliers, de Oued El Hammam GR4, horizon 2030, ensemble RCP 4.5.....	63
Figure IV-10 : Résultat des simulations des débits journaliers, de Oued El Hammam GR4, horizon 2030 ,ensemble RCP 8.5	64
Figure IV-11 : des observation des précipitations a la stations de trois rivière dans la période (2000-2006)	67
Figure IV-12 : simulations des précipitations dans la période (2028-2033).....	67

Liste des tableaux

Table I-1 : Critères de classification des modèles en global ou distribué (Singh, 1995).....	14
Table I-2 : Valeur des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants (Perrin C., 2000).....	22
Table I-3 : Valeur des paramètres du modèle GR4J obtenues sur un large échantillon de bassins versants	24
Table III-1 : description des modèles climatiques utilisés dans le travail	43
Table IV- 1 :Résumé des statistiques sur des séries de précipitations simulées à l’horizon 2030 et observées dans la période(2000-2006).....	72
Table IV- 2 : Résumé des statistiques sur des séries de débits simulées à l’horizon 2030 et observées dans la période(2000-2006).....	73

Résumé

En Algérie, les conditions climatiques qui prévalent depuis trois décennies ont une influence négative sur la ressource en eau. Ce travail a pour finalité de déterminer leur impact sur les cours d'eau du bassin versant de Oued El Hammam (Nord-Ouest de l'Algérie).

Cette étude vise à faire des simulations des régimes hydrologiques, de bassin de El Hammam dans le contexte du changement climatique pour un horizon proche 2021-2040.

Toute étude d'impact du changement climatique passe par : la construction des scénarios d'émission, la modélisation climatique correspondant à ces scénarios, la désagrégation spatio-temporelle et enfin la modélisation d'impact.

Pour mener bien notre travail, une base de données de dix-sept modèles climatiques basés sur les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 de l'IPCC (Cordex), a été construite. Ces données ont subi un prétraitement avec les modules Climate4R (correction des biais et descente d'échelle). Concernant les simulations des débits le choix s'est porté sur le modèle GR4J ; un modèle conceptuel 'à réservoirs' à un pas de temps journalier. Les résultats satisfaisants, du calage et de la validation de ce modèle sur les données issues du réseau de l'ANRH, pour la période de référence. Et enfin des simulations des impacts ont été réalisées en introduisant les jeux de données des tendances futures générés par le LARS WG.

Les résultats présentés dans cette étude donnent un aperçu sur les effets du changement climatique sur les régimes des débits du bassin versant de Oued El Hammam. Ces tendances pourront être dramatiques pour la région en matière de disponibilité future d'eau et de pénurie d'eau.

Mots Clés : LARS WG, Climate4R, GR4J, CORDEX, El Hammam, changement climatique

ABSTRACT

In Algeria, the climatic conditions that have prevailed for three decades have a negative influence on water resources. This work aims to determine their impact on the river of the El Hammam watershed (North-West of Algeria).

This study aims to make simulations of hydrological regimes, of El Hammam in the context of climate change for a near 2021-2040 horizon.

Any study of the impact of climate change involves: the construction of emission scenarios, climate modelling corresponding to these scenarios, spatial-temporal disaggregation and finally impact modelling.

To carry out our work well, a database of seventeen climate models based on the IPCC (Cordex) scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5 was constructed. This data was pre-processed with the Climate4R modules (bias correction and scaling). Regarding the flow simulations, the choice was made on the GR4J model; a conceptual model with tanks at a daily time step. The satisfactory results of the calibration and validation of this model on the data from the ANRH network, for the reference period. Finally, impact simulations were carried out by introducing the datasets of future trends generated by the LARS WG.

The results presented in this study provide an overview of the effects of climate change on El Hammam flow regimes. These trends may be dramatic for the region in terms of future water availability and water scarcity.

Keywords: LARS WG, Climate4R, GR4J, CORDEX, El Hammam, climate change

Introduction générale

Même si certaines personnes nient l'existence du changement climatique, la communauté scientifique du « groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) » affirme que le réchauffement climatique global est en marche, influençant les cycles de l'eau et de l'énergie sur toute la planète (IPCC 2014). Dans ce contexte une question persiste toujours : quel impact aurait ces changements climatiques sur les différents secteurs, et comment peut-on prédire ce qui va réellement se passer les prochaines années afin de minimiser (atténuer) et comment se comporter (s'adapter) avec des circonstances extrêmes qu'on peut vivre dans le futur ?

L'humanité est de plus en plus menacée par le changement climatique, il est considéré comme l'un des plus grands défis actuels qu'elle doit affronter. Les pays en voie de développement sont les plus touchés par ce phénomène (IPCC 2014)

En pleine période de modifications climatiques, le secteur de ressources en eau est devant un défi énorme, celui de répondre aux besoins croissants de toute la population mondiale. La disponibilité de cet élément est alors en danger à cause de cette variabilité accrue du climat ainsi que des phénomènes météorologiques plus extrêmes et plus fréquents.

Au cours des deux dernières décennies, l'étude des effets du changement climatique sur le cycle de l'eau a suscité une mobilisation considérable de la communauté des climatologues et des gestionnaires de l'eau ((CARROGET A. 2017), (Boé 2007.); (Boé 2012) ; Nie et al., 2009 ; Karamouz et al., 2011 ; Gagnon, 2012 ; Harader, 2015). Ces études portent principalement sur les impacts hydrologiques (bilan hydrique des bassins versants, analyse des événements pluvieux extrêmes, etc.) à méso-échelles (bassins versants de 100 km²) et à des échelles temporelles quotidiennes (Willems et Vrac, 2011). Or, l'application des modèles d'impacts en projection climatique à l'échelle des bassins versants présente une problématique majeure : les échelles spatiale et temporelle des projections disponibles des modèles globaux ou régionaux sont inadaptées. Il est donc nécessaire d'opérer une descente d'échelle, à l'aide des méthodes de désagrégation

Les études d'impact du changement climatique dépendent de plusieurs étapes : 1) la construction des scénarios d'émission, 2) la modélisation climatique correspondant à ces scénarios, 3) la désagrégation spatio-temporelle et 4) la modélisation d'impact.

Ces étapes introduisent de nombreuses difficultés et des incertitudes qui s'accumulent avec les étapes, influençant les résultats finaux.

Selon Boé et al. (2009), la construction des scénarios d'émission contient des incertitudes importantes économiques et sociologiques. Ces incertitudes sont également appelées «réflexives », car elles dépendent de l'homme qui est à l'origine du problème comme de sa solution (Pagé et Terray, 2010). Quant aux modèles climatiques (globaux ou régionaux) et aux modèles d'impact appliqués, ils sont associés aux incertitudes physiques et numériques. Par ailleurs, plusieurs sources de la littérature (Boé et al., 2009 ; Willems et Vrac, 2011; Willems, 2013) constatent qu'une difficulté principale réside dans l'écart entre la résolution temporelle et spatiale des sorties (projections climatiques) fournies par les modèles climatiques (GCM, RCM) et la résolution spatiale et temporelle nécessaire à la modélisation d'impact. Il existe deux groupes de modèles climatiques qui se différencient en fonction de leur domaine spatial d'application : les modèles climatiques globaux (GCM) et les modèles climatiques régionaux (RCM). Les GCM simulent des processus physiques à l'échelle du globe, tandis que les RCM couvrent une région précise (Gagnon, 2012). Contraint par le temps de calcul, la résolution spatiale de GCM est ainsi de l'ordre de ~100 km. C'est ainsi, que les maillages spatiaux des modèles globaux sont généralement trop grossiers pour des applications en hydrologie (Karamouz et al., 2011 ; Harader, 2015). Quant aux RGM, ils produisent des données à des échelles spatiale (~10 km) et temporelle (parfois tri-horaire mais plus souvent journalier) plus petites. Ils permettent alors de capturer la majorité des changements des processus climatiques (Boé et al., 2009). Cependant, considérant la taille de quelques hectares à quelques km et le temps de réponse infra-horaire des bassins versants, une résolution spatiale et temporelle beaucoup plus fine doit être prise en compte en hydrologie (Willems et Vrac, 2011 ; Willems et al, 2012).

De plus, comme la précipitation est une variable déterminante des processus hydrologiques, il est primordial de prendre en compte sa distribution spatio-temporelle (Berne et al., 2004 ; Gagnon, 2012). Toutefois, les champs de pluie sont fortement variables dans l'espace et dans le temps. Le réalisme des précipitations dans un modèle climatique est ainsi un indicateur clé de sa capacité à représenter les processus physiques en projection (Kendon et al, 2012). Cependant, cette variable climatique présente des difficultés pour des modèles climatiques du fait de sa non-linéarité, et de sa dépendance à la topographie locale, à la dynamique et à la physique du modèle utilisé (Harderer, 2015 ; Willems et al, 2012 ; Laflamme et al., 2016). Ainsi, les projections sont en générale plus fiables pour la température que pour les précipitations (Vavrus et al, 2015 ; Baumberger et al., 2017). Pour des applications en hydrologie, il est ainsi primordial d'évaluer la représentation spatiale de

la pluie des méthodes de désagrégation. Ainsi, nous nous concentrerons sur la question de descente en échelle spatiale des variables climatiques, notamment de la pluie, pour la modélisation d'impact en hydrologie.

Afin de pouvoir appliquer un modèle, comme GR4J, en projection, il est indispensable de tenir compte de toutes les variables climatiques nécessaires pour son forçage. Ainsi, les projections climatiques doivent comprendre la température et les précipitations.

De ce fait, nous ne pouvons pas nous baser sur des projections climatiques disponibles, afin d'évaluer l'application de GR4J en projection climatique. Nous avons donc adopté une autre approche. Nous considérons une période historique sur laquelle nous évaluons plusieurs méthodes de désagrégation spatiale. Pour cela nous nous basons sur des méthodes de correction des biais, les outils de climate4R (Iturbide M 2018), est un ensemble de packages R pour l'accès libre aux données climatiques, le post-traitement (y compris la collocation des données et la correction des biais et réduction d'échelle) et la visualisation, fournissent des algorithmes de correction des biais. Mais aussi des méthodes de désagrégation appliquées au bassin versant de El Hammam. La jonction du passé et du futur se fait le plus souvent par l'intermédiaire d'un chaînage de modèles organisé selon une logique descendante (top-down en anglais) ayant pour point de départ, les scénarios d'émission et de concentration en gaz à effet de serre (GES), et comme point d'arrivée, les sorties déterministes ou ensemblistes d'un ou de plusieurs modèles pluie-débit (Ducharne et al., 2011).

Evoquant les liens entre changement climatique futur et hydrologie, l'hydrologue Keith Beven, écrivait que les simulations des modèles de climat ne sont pas encore « fit for purpose » (Beven, 2012). En d'autres termes, elles ne sont pas encore adaptées aux besoins de l'hydrologie des cours d'eau notamment en raison de la forte incertitude épistémique qui subsiste aujourd'hui (connaissance imparfaite du système climatique) et de la difficulté d'articuler échelle climatique et échelle hydrologique. Sur ce point, Richard et al. (2012) se veulent optimistes et soutiennent « qu'à moyen terme (d'ici une dizaine d'années), de manière concomitante à l'évolution des puissances des calculateurs, on peut s'attendre à l'émergence de modèles [de climat] multi-échelles en remplacement de modèles emboîtés/forcés ». Mais pour l'heure, le forçage direct et définitif d'un modèle pluie-débit par une sortie brute de MCG ou de MCR serait une erreur méthodologique majeure.

Le scepticisme de Beven (2012), loin d'être isolé dans la communauté des hydrologues, souligne le défi que représente l'évaluation rigoureuse de l'amplitude, de la localisation du changement climatique et de son impact sur l'hydrologie des cours d'eau dans un futur

proche (les deux prochaines décennies) ou lointain (la fin du siècle). Par ailleurs, comme nous l'évoquions précédemment, la chaîne de modélisation descendante qui sous-tend l'étude d'impact du changement climatique futur se termine par le maillon du modèle pluie-débit... En est-il le « maillon faible » ? Ou pour rester optimiste, le « maillon le moins faible » ? Pour les projections futures des débits d'étiage, la réponse semble être négative... Les travaux récents de Vidal et al. (2016) démontrent en effet que le maillon le plus faible correspond au modèle hydrologique qui contribue plus fortement que le MCG à l'incertitude totale de la chaîne de modélisation. Ainsi, comme tout modèle, le modèle pluie-débit possède une incertitude « congénitale » qui ne peut être négligée. Tout l'enjeu des réponses apportées à cette question de l'incertitude du modèle pluie-débit est de réussir à poser un diagnostic sur les limites de l'utilisation de ce modèle en extrapolation climatique. L'indispensable calage des paramètres des modèles hydrologiques et leur difficile validation imposent une contrainte d'unité de lieu, d'action et de temps (de Marsily, 1994), limitant considérablement leur utilisation en extrapolation. Les travaux de Chiew et al. (2009), Vaze et al. (2010) et Coron (2013), par exemple, mettent clairement en évidence le fait que la robustesse d'un modèle pluie-débit, autrement dit sa capacité à conserver ses qualités dans des conditions climatiques contrastées, dépend de la transférabilité temporelle de ses paramètres de calage, de sa structure (formulation interne de la transformation pluie-débit) et de la qualité des données d'entrée (y compris la façon dont celles-ci sont calculées à partir des observations météorologiques). En conséquence, comme il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode 'universelle' pour extrapoler climatiquement l'écoulement d'un bassin, a fortiori pour des futurs climatiques 'non jaugés' (Peel et Blöschl, 2011), l'hydroclimatologue doit effectuer un travail indispensable de benchmarking, d'étude comparative des méthodes d'extrapolation climatique existantes.

Le principal but de ce travail est de contribuer à celle-ci en évaluant la chaîne de modélisation descendante de l'effet du changement climatique futur sur l'écoulement du bassin versant de Oued El Hammam. Cette méthode repose sur la recherche de liens directs et optimaux entre climat et les débits. Ces liens sont détectés grâce au modèle Génie rurale GR4j dans les conditions climatiques actuelles, puis transposée dans un horizon temporel proche afin d'extrapoler l'impact climatique futur sur l'écoulement du bassin, puis transposée dans un horizon temporel proche afin d'extrapoler l'impact climatique futur sur l'écoulement du bassin.

Le choix d'une conceptuelle paraît adaptée à notre site car seules des observations météorologiques de base sont disponibles sur plusieurs décennies

Introduction générale

Dans cette optique, nous allons examiner l'évolution des précipitations et des écoulements au cours des dernières décennies dans le bassin versant de El Hammam.

1 Chapitre I : Revue bibliographique

1.1 Introduction

La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants est incontournable dès lors que l'on s'intéresse à des problématiques relatives à la gestion des ressources en eau, à l'aménagement du territoire, ou à l'une des différentes facettes du risque hydrologique. Elle doit pouvoir décrire les différentes étapes de la transformation pluie-débit et en particulier les processus liés à la formation des crues et à l'apparition des étiages. Elle est censée aussi fournir des informations exploitables pour le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques, de protection contre les crues ou pour la gestion hydrologique et écologique du bassin versant étudié.

Un modèle hydrologique n'est qu'une simplification d'un système complexe (Payraudeau, 2002). A chaque stade de la modélisation, des approximations sont réalisées : perception du phénomène, formalisation en un cadre conceptuel, traduction dans un langage de programmation (Ambroise, 1999).

Il existe, dans la littérature, de nombreux modèles hydrologiques de bassins versants ayant chacun leurs spécificités et leur domaine d'application. Une fois le modèle choisi, il faut évaluer sa capacité à représenter la réalité. Ceci se fait le plus souvent en comparant les résultats du modèle avec les observations. C'est une étape très délicate.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différents types de modèles rencontrés dans la littérature. Ensuite, nous allons aborder les problèmes d'échelle au niveau de la modélisation et ceux relatifs à la représentation spatio-temporelle des processus. La dernière partie de ce chapitre sera consacrée à l'étape de calage et à l'évaluation des incertitudes dans la modélisation hydrologique.

1.2 Objectif de la modélisation hydrologique :

La modélisation pluie-débit peut réussir à répondre à de nombreuses questions centrées sur l'eau, gestion des risques et de la ressource notamment Michel (Michel, 1989) et Abbott (Abbott, 1996) répertorient l'essentiel de ces problématiques. Si des aspects de qualité des eaux peuvent être étroitement liés à des aspects de quantité, nous nous intéresserons ici uniquement à une modélisation pluie-débit quantitative, dont nous donnons quelques-unes de ces problématiques :

➤ **Simulation de débits :**

Pour le comblement de lacunes dans des séries de données, la reconstitution de débits historiques (les données de pluie étant souvent disponibles sur des périodes beaucoup plus longues que les débits) ou pour permettre des traitements statistiques ;

➤ **Prédétermination des débits de crue ou d'étiage :**

On désire savoir avec quelle fréquence des débits de crue (supérieurs à un seuil de risque par exemple) ou des faibles débits (en deçà d'un débit réservé par exemple) risquent de se produire, et sur quelle durée.

On se place ici dans une démarche d'analyse fréquentielle. Cette connaissance peut permettre le dimensionnement d'ouvrages et de réservoirs ou d'aménagements dans le lit (mineur à majeur) du cours d'eau ;

•**Prévision des crues et des étiages :** il s'agit d'évaluer par avance (avec un délai de quelques heures à quelques jours), connaissant l'état du bassin, les débits de crues susceptibles de présenter des risques (inondation) ou les débits d'étiages pouvant demander de mettre en place une gestion particulière de la ressource (par des barrages-réservoirs par exemple) pour assurer l'approvisionnement en eau ou la préservation de la vie halieutique. On s'inscrit ici dans une démarche d'analyse en continu du bassin ;

•**Influence d'aménagements sur l'hydrologie :** on désire pouvoir prédire les changements de la réponse du bassin suite à des modifications des caractéristiques du bassin d'origine humaine ou à des changements environnementaux. Ces problématiques font ressortir deux aspects importants, celui de l'évaluation du risque et celui de la gestion de la ressource. La pertinence des réponses que l'on peut leur apporter est conditionnée par celle du modèle dans sa représentation du bassin relativement aux objectifs fixés. Si d'autres approches hydrologiques que la modélisation pluie-débit propose des réponses à certaines de ces problématiques (analyse fréquentielle statistique sur les débits pour la prédétermination), cette dernière paraît cependant très profitable pour des questions supposant un traitement temporel continu, comme la prévision des débits. Dans ce cas, le fait de remonter à l'origine des débits (la pluie) permet en plus de profiter d'un délai supplémentaire par rapport à des méthodes n'exploitant que l'information sur les débits.

.Modélisation pluie-débit

La modélisation pluie-débit est désormais un volet important des sciences hydrologiques. Elle permet d'entreprendre l'étude du comportement des bassins versants à travers l'établissement de leur bilan hydrologique. Plusieurs questions relatives à

l'identification des processus dont ils sont le siège ainsi qu'aux modes de cheminement de l'eau y sont traitées.

Le concept de « modèle » (Clarke, 1973), apparu dans les années cinquante, a permis de disposer d'un outil opérationnel grâce à une représentation de la réalité permettant de restituer au mieux le comportement des bassins .

Les premiers modèles datent des années 70 (Le Moigne, 1977), (Musy, 1998). Un modèle y est défini comme une « représentation schématique d'un phénomène physique pour mieux étudier ou analyser l'influence qu'il exerce ». Dans le contexte hydrologique, il consiste à décrire les différentes phases du cycle de l'eau soit dans sa totalité soit juste en partie.

En hydrologie, un modèle pluie-débit est une représentation mathématique simplifiée du comportement d'un bassin versant. Il est généralement défini par :

- ses variables d'entrée (variables indépendantes) : il s'agit des entrées du modèle, qui sont essentiellement les chroniques de pluie, d'évapotranspiration (ETP) ou de température.

- ses variables de sortie (variables dépendantes) : il s'agit des sorties du modèle, qui sont généralement les débits simulés à l'exutoire du bassin versant, mais qui peuvent parfois être aussi des niveaux piézométriques, ou d'une autre variable intéressant le modélisateur.

- ses variables d'état : il s'agit des variables internes au système, qui évolue en fonction du temps et rendent compte de l'état du système à un moment donné. Typiquement, ces variables sont les niveaux de remplissage des différents réservoirs (neige, production, routage).

- ses paramètres : les paramètres des modèles hydrologiques, qu'ils aient une pseudo-signification physique ou qu'ils soient calés, servent à adapter la paramétrisation des lois régissant le fonctionnement du modèle, au bassin versant étudié.

- ses performances : il s'agit d'estimer l'amplitude des erreurs de modélisation, calculées généralement sur la base d'une mesure de l'écart entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées. Le critère le plus souvent employé en hydrologie pour quantifier l'erreur est l'écart quadratique.

$$\text{Err} = \sum_{i=1}^N (Q_i - Q_i^m)^2$$

N : Nombre d'observations,

Q_i : Débit simulé pour le pas de temps i ,

Q_i^m : Débit mesuré pour le pas de temps i .

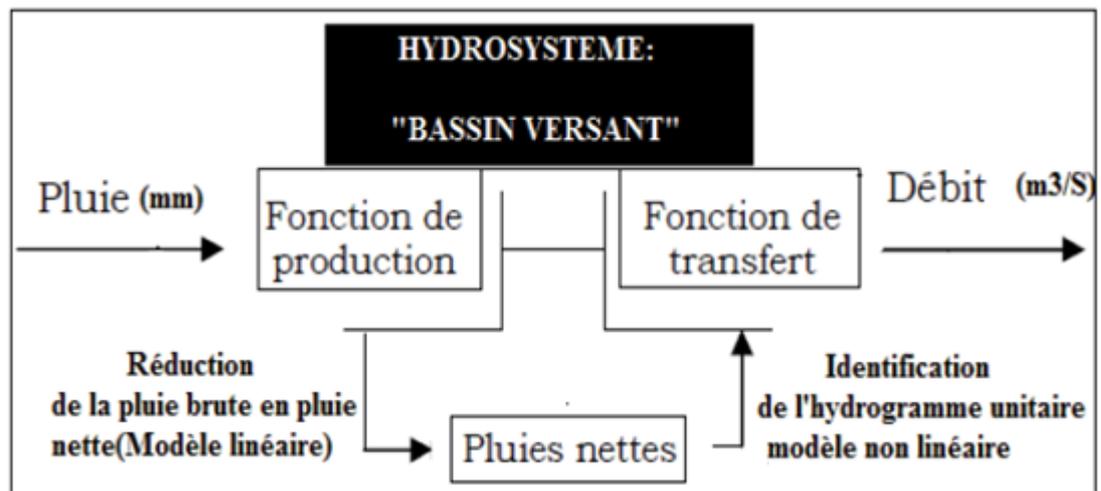


Figure I-1 : Schéma représentant le fonctionnement d'un modèle pluie-débit, (Inspiré du schéma de Versiani (1983) et Boudhraa (2007))

Types de modèles hydrologiques :

Un modèle est une représentation d'un phénomène physique, afin d'en avoir une meilleure compréhension ou d'analyser l'influence qu'il exerce. La représentation peut être physique, analogique ou mathématique (Gaume, 2000). Dans le premier cas, le modèle est une maquette qui reproduit d'une manière adéquate la réalité. Les modèles analogiques utilisent les similitudes qui existent entre le phénomène à étudier et un autre phénomène physique. La modélisation mathématique est un outil essentiel pour la connaissance des phénomènes naturels, elle essaye d'établir un lien entre les variables d'entrée et de sortie par des relations mathématiques.

Au cours de ces dernières années, les efforts de la recherche pour la compréhension du cycle de l'eau dans les milieux naturels (bassin versant, rivières, nappes, etc.), associés aux développements de l'informatique, se sont concrétisés par l'apparition d'une multitude de modèles mathématiques. On peut distinguer trois types d'utilisation des modèles mathématiques en hydrologie.

➤ La modélisation comme outil de recherche :

La modélisation peut être utilisée pour interpréter des données mesurées. Différents scénarios de fonctionnement hydrologique des bassins versants peuvent être confrontés aux mesures.

➤ La modélisation comme outil de prévision :

Elle nous donne une anticipation des évolutions futures du débit d'un cours d'eau. Il s'agit de l'utilisation opérationnelle la plus courante des modèles hydrologiques. Dans la plupart des cas cependant, les modèles développés sont basés sur des régressions linéaires entre les

variables indépendantes (pluie, débit amont) et les variables dépendantes (débits aval), et font peu appel aux connaissances sur les processus hydrologiques.

➤ **La modélisation comme outil d'extrapolation :**

Reconstitution de séries de débits possibles. Dans certains cas, comme par exemple le dimensionnement de déversoirs de sécurité de barrages hydroélectriques ou encore la délimitation de zones inondables dans le cadre d'un plan de prévention des risques. L'utilisation de longues séries de pluies éventuellement générées à l'aide d'un modèle stochastique de pluie couplées à un modèle hydrologique permet de reconstituer des scénarios rares.

1.3 Les différentes approches de la modélisation :

1.3.1 Modèles stochastiques :

Compte tenu des incertitudes sur les données et quelque fois même sur les processus en jeu, une modélisation stochastique peut sembler appropriée, qu'il s'agisse de l'hydrologie ou de l'environnement. Ainsi Jensen (Jensen, 1992) considère qu'une approche stochastique est un moyen rationnel de traiter la caractérisation spatiale de la variabilité, et d'établir un lien entre les incertitudes des paramètres et celles des prédictions. Toutefois cette approche, qui semble par ailleurs le meilleur moyen de caractériser la variabilité des grandeurs, nécessite la connaissance des lois de probabilité les plus courantes pour la variabilité considérée ou au moins de leurs premiers moments (M. Vauclin & G. Vachaud, 1991).

1.3.2 Modèles déterministes :

Un modèle est dit déterministe si aucune de ses grandeurs n'est considérée comme aléatoire. La plupart des modèles hydrologiques sont déterministes. Ces modèles associés à chaque jeu de variables de forçage (variables indépendantes d'entrée du modèle, peuvent être essentiellement des mesures de pluie), de variables d'état (variable permettant de caractériser l'état du système modélisé, par exemple : le niveau de remplissage des différents « réservoirs » d'eau du bassin versant, taux de saturation des sols, profondeur des sols...etc.), une valeur de réalisation unique des variables de sortie (il s'agit essentiellement des débits simulés à l'exutoire d'un bassin versant) (Maftai, 2002)

a. Modèles à base physique :

Le modèle à base physique est basé uniquement sur des équations de la physique, et ne comportant idéalement aucun paramètre. Il n'existe pas de modèle à base physique au sens strict en hydrologie. Certains modèles comme le SHE (système hydrologique européen)

tendent à s'en rapprocher. L'importance de l'hétérogénéité spatiale dans la réponse hydrologique des bassins versants rend cependant difficile voire impossible l'utilisation de tels modèles.

b. Modèles paramétriques :

Les modèles paramétriques sont les modèles incluant des paramètres dont la valeur doit être estimée par calage.

b1. Modèles empiriques :

Le type de fonction reliant les variables est fixé à priori (fonction polynomiales, fonction sigmoïdes). Le niveau de complexité (nombre de fonctions à utiliser, ordre du polynôme) étant fixé, le calage consiste alors à déterminer la combinaison de fonctions s'ajustant le mieux aux données mesurées. (Gaume , 2002)

b2. Modèles analytiques :

Ce sont des modèles pour lesquels les relations entre les variables d'entrée ont été établies par analyse de séries de données mesurées. L'exemple type est celui des modèles linéaires : les paramètres de ces modèles sont liés aux coefficients de corrélation entre les variables. Notons que l'analyse des données peut conduire au choix de relations non linéaires entre variables. (Gaume, 2000)

b3. Modèles conceptuels :

Ce type de modèle repose sur l'analogie remarquée entre le fonctionnement d'un bassin versant et un ensemble de réservoirs interconnectés. Plus précisément, quand la structure du système et des lois le régissant sont inconnues ou lorsque la pauvreté des informations et la complexité des phénomènes en jeu prévalent, le comportement du système en question est simplifié. Ainsi, les modèles conceptuels intègrent des facteurs complexes en essayant de décrire le concept physique du comportement du système par une représentation plus simple. Au travers de ce type de modélisation, sont construites des structures empiriques censées reproduire les sorties du système étudié (débit, concentration,...) à partir des variables d'entrée (pluie, évapotranspiration, fertilisation, pratiques agricoles). Ce type de modèle reproduit donc au mieux le comportement d'un système, plutôt qu'il n'avance d'explications causales sur son comportement. Le modèle CEQUEAU (Morin . G, 1991) en est un exemple.

1.3.3 Modèles globaux :

Dans un modèle global (Lumped model) ou « boîte noire », le bassin est considéré comme une entité unique. Des relations empiriques (issues de l'expérience) relient les

entrées et les sorties sans chercher à se rapprocher d'une loi physique. Les équations sont souvent des équations différentielles ordinaires (ODE, Ordinary Differential Equation) qui ne prennent pas en compte la variabilité spatiale des processus, des entrées, des conditions aux limites et les caractéristiques géométriques du système (dans ce cas, le bassin versant).

Les processus sont décrits sous forme d'équations simplifiées ou d'équations issues de raisonnement empiriques Singh, (1995)

Les modèles globaux offrent à l'utilisateur un choix très attractif, car ils présentent une structure très simplifiée, ils ne demandent pas trop de données, faciles à utiliser et à calibrer. La représentation du processus hydrologique est très simplifiée. Il peut souvent mener à des résultats satisfaisants, et spécialement si l'objectif majeur est la prévision d'une crue. Deux exemples de ce type de modèle, le modèle IHRACRES. (Identification of unit Hydrographs And Component flows from Rainfall, Evaporation and Streamflow data) et le model GR (Génie Rural) (CEMAGRAF).

1.3.4 Modèles distribués :

Le modèle **distribué (distributed model)**, quant à lui prend explicitement en compte la variabilité spatiale des processus Dans un modèle global (lumped model) ou « boîte noire », le bassin est considéré comme une entité unique. Des relations empiriques (issues de l'expérience) relient les entrées et les sorties sans chercher à se rapprocher d'une loi physique. Les équations sont souvent des équations différentielles ordinaires (ODE, ordinary differential equation) qui ne prennent pas en compte la variabilité spatiale des processus, des entrées, des conditions aux limites et les caractéristiques géométriques du système (dans ce cas, le bassin versant de Oued ElHamman).

Les processus sont décrits sous forme d'équations simplifiées ou d'équations issues de raisonnement empiriques Singh, 1995) et /ou des variables d'entrées et /ou des conditions aux limites et /ou des caractéristiques du bassin versant. Les équations sont parfois des fonctions de probabilité de type PDF (probability differential function). Bien sûr dans la réalité, le volume de données nécessaires pour l'implémentation de ce modèle n'est en général pas disponible sur le bassin d'application, ce qui rend ce type de modèle peu opérationnel.

L'approche **distribuée** offre au moins deux avantages : elle peut mieux capturer la variabilité spatio-temporelle des composantes du cycle de l'eau et elle permet d'étudier les conséquences de changement d'échelle (Landarto, 2002), et elle permet d'aborder par exemple la question d'évolution du système (changement d'occupation du sol) ou d'étudier

l'effet de la variabilité spatiale des entrées et des sorties, comme le soulignent Kloching et Haberlandt (2002).

L'utilisation des modèles hydrologiques distribués est devenue très fréquente car ils permettent non seulement de décrire la situation passée mais aussi de tester des scénarios futurs. Comme modèle distribué, nous citons : SWAT, ATHYS, CEQUEAU, MIKESHE, TOPMODEL.

Une connaissance géographique et physique détaillée du bassin versant est une nécessité pour la modélisation hydrologique distribuée. L'accès à cette connaissance est de plus en plus facilité grâce au SIG (Système d'information géographique) qui permet de gérer et d'exploiter les données relatives aux bassins versants.

L'intégration de la variabilité spatiale de l'occupation du sol du bassin versant dans la modélisation hydrologique peut améliorer d'une façon nette l'adéquation observation/simulation.

Flugel (1995) montre, dans son travail, l'importance de la représentation de l'occupation du sol dans la modélisation hydrologique distribuée d'un bassin versant. La formule de Penman-Monteith, en prenant en compte la couverture végétale pour le calcul de l'évapotranspiration, donne de bons résultats par rapport à d'autres formules où la couverture végétale n'est pas prise en compte (Flugel, 1995).

Néanmoins, ce type de modèle pose de nombreux problèmes. A titre d'exemple, nous pouvons citer le problème de sur-paramétrisation le nombre de paramètres possibles est en effet croissant avec l'augmentation du nombre de mailles ou d'unités de modèle (Beven, 1989 in Payraudeau, 2002). Ce genre de problème pose d'une part des difficultés météorologiques (acquisition des données expérimentales pour renseigner les paramètres) et d'autre part des problèmes dans la phase de calage du modèle.

Dans la majorité des cas, le modèle n'est pas totalement distribué étant donné que certains composants du système peuvent être globalisés. Le modèle est alors de type semi-distribué (semi-distributed model) qui tient compte de la variabilité spatiale à travers des classes ayant des comportements hydrologiques supposés similaires. A titre d'exemple, nous pouvons citer TOPMODEL (Beven et Kirkby, 1979, Oblet, 2003).

Entrée	Caractéristiques du système	Composant du processus	Equations	Sortie	Type du Modèle
Global	Global	Global	EDO	Global	Global
Global	Global	Distribué	PDF	Distribué	Distribué
Distribué	Distribué	Distribué	PDF	Distribué	Distribué
Distribué	Global	Distribué	PDF	Distribué	Distribué

ODE: Ordinary Differential Equation,

PDF: Probability Differential Function.

Table I-1 : Critères de classification des modèles en global ou distribué (Singh, 1995)

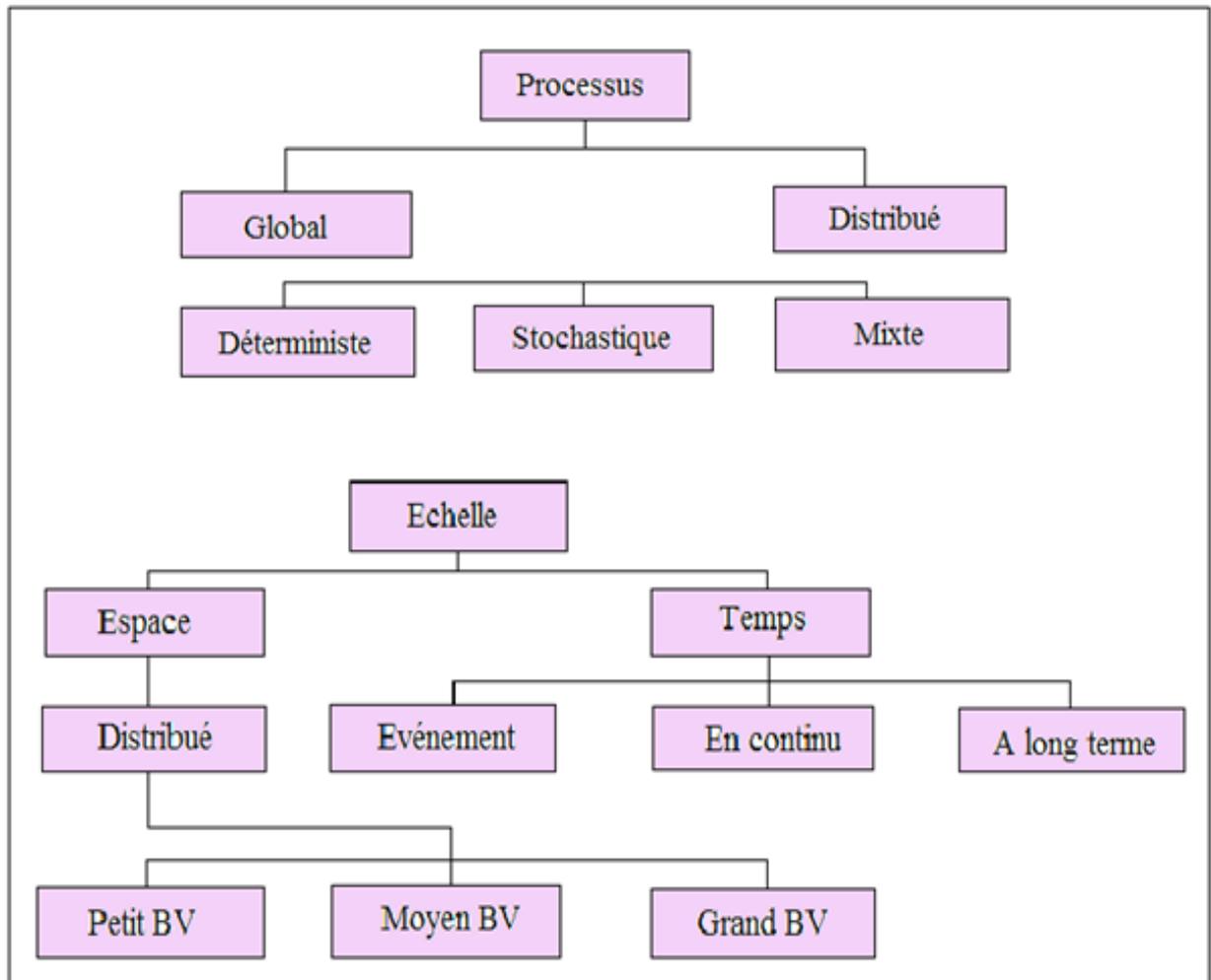


Figure I-2 : Classification des modèles proposée par Singh, 1995

1.3.5 Exemple de quelques modèles :

Modèles	Statistique ou à base physique	Taille de l'unité hydrologique	Type de calage	Nature de la sortie
TOPMODEL	À base physique (zones contributives saturées)	Versant	À base physique (zones contributives saturées)	Hydrogramme de Crue à l'exutoire
TOPKAPI	À base physique (processus complexes)	Pixel	Paramètres à caler à Partir de chroniques PQ	Hydrogrammes de Crue
HECHMS	À base physique (processus de type hortonien)	Sous-bassin versant	Prédétermination possible puis calage à partir de chroniques PQ	Hydrogrammes de crue en différents points du bassin
SOPHIE	Modèles à propagation le long d'un cours d'eau et modèles pluie PQ globaux	Sous-bassin versants	Calage statistique à partir de chroniques PQ	Hydrogrammes de crue en différents points du bassin
MIKESHE	À base physique (processus complexes)	Pixel	Prédétermination possible et calage à partir de chroniques PQ	Hydrogrammes de Crue en différents points du bassin
AIGA	À base physique (processus de type hortonien)	Pixel	Prédétermination possible puis calage à partir de chroniques PQ	Risque hydrologique
HYDROTEL	À base physique	Pixel	Prédétermination possible puis calage à partir de chroniques PQ	Hydrogrammes de crue

Table II-2 : Tableau résumé de quelques modèles hydrologiques (Estupina Borrell V, 2004).

Les progrès informatiques ont permis un développement important de la modélisation en hydrologie. De ce fait, il existe un très grand nombre de modèles variés, simples ou complexes, qui dépendent de l'utilisateur et des questions auxquelles ils cherchent à répondre (prédiction de crues, simulation d'ouvrage, gestion de la ressource en eau, aménagement des bassins versants...). Les modèles font intervenir un certain nombre de paramètres. Pour les ajuster à un bassin versant donné, il est nécessaire de disposer d'une série de précipitations, d'une série d'évaporation et d'une série de débits à l'exutoire afin de pouvoir utiliser le modèle. Ces trois séries de données doivent impérativement être disponibles sur la même période d'observation. Un modèle hydrologique peut être défini

comme une représentation simplifiée d'une réalité physique. En hydrologie, la modélisation concerne généralement la relation pluie débit c'est-à-dire que les modèles utilisent la pluie comme variable d'entrée et calculent un hydrogramme en sortie du bassin.

1.4 Les modèles génie rural GR

Dans cette partie, nous développerons plus particulièrement la description du modèle que nous utiliserons pour notre étude.

La division hydrologie du CEMAGREF Antony développe depuis une vingtaine d'années une série de modèles pluie-débit pour l'hydrologie opérationnelle : les modèles GR pour Génie Rural ; (Edijatno, Nascimento, N.O., Yang, X., Makhlof, Z. et Michel, C. , 1999) (Michel, 1989).

Ces modèles appartiennent à la famille des modèles conceptuels à réservoirs. L'approche est globale. Le pas de temps est le plus souvent journalier même si des modèles dérivés à pas de temps mensuel, annuel et interannuel ont été construits (Michel M. e., 1994). Ces modèles privilégient le principe de parcimonie : la version de base GR3J possède trois paramètres ajustables et aucune version n'en compte plus de cinq.

1.4.1 Le calage et validation d'un modèle

Le calage consiste donc à sélectionner le jeu de paramètres d'un modèle de façon à ce que celui-ci simule le comportement hydrologique du bassin versant de la meilleure façon possible (Madsen H, 2000). Le critère utilisé est le critère des moindres carrés des erreurs, présenté sous la forme adimensionnelle du critère de Nash borné. L'opération de calage consiste à trouver des valeurs des paramètres du modèle qui minimise l'erreur de modélisation sur la période considérée. Une période de 5 ans généralement est utilisée pour caler le modèle. La validation porte sur l'application des modèles sur les données qui n'ont pas été utilisées lors de calage des modèles.

1.4.2 Critères de qualité

La validation du modèle est vérifiée par une comparaison des débits calculés et observés à travers un critère de qualité. Le critère le plus connu et le plus utilisé pour les modèles conceptuels est le critère de Nash et Sutcliffe (Nash, J.E. et Sutcliffe, J.V., 1970) qui s'exprime par l'équation ci-dessous :

$$Nash(Q) = 100 \times \left[1 - \frac{\sum (Q_{i,obs} - Q_{i,cal})^2}{\sum (Q_{i,obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \right]$$

$Q_{i,obs}$ et $Q_{i,cal}$: sont les débits observés et calculés au pas de temps i ,

\bar{Q}_{obs} , est la moyenne des débits observés sur la période considérée. Pour tenir compte de certaines valeurs particulières des débits, ce critère a été calculé en utilisant la racine carré des débits pour atténuer l'importance des débits de pointe, ou le logarithme pour les débits d'étiage. En pratique, on estime que la simulation est de mauvaise qualité lorsque le critère de Nash est faible <70%, elle est acceptable lorsqu'il est supérieur à 70%, parfaite lorsqu'il est égal à 100%.

1.4.3 Objectifs de développement

La simulation du débit à l'exutoire d'un bassin versant est nécessaire voire indispensable pour de nombreuses applications d'ingénierie et de gestion de la ressource en eau, telles que le dimensionnement et la gestion d'ouvrages, la prévision des crues ou des étiages, la détection d'impact, etc. C'est pour répondre à ces questions que le CEMAGREF a commencé à développer au début des années 1980 des modèles hydrologiques (du Génie Rural – GR) permettant de faire le lien entre la lame d'eau précipitée sur un bassin versant et son débit à l'exutoire (Michel C, 1983). Au-delà de leur aspect pratique, ces modèles ont soulevé des questions essentielles sur la façon de représenter la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant.

1.4.4 Mode de développement

Bien que ces modèles soient parfois apparentés à des modèles conceptuels du fait de leur structure à réservoirs, ce sont en fait des modèles empiriques : leur construction s'est faite sur la base de grands jeux de données et en découvrant progressivement la structure permettant de reproduire au mieux le comportement hydrologique du bassin versant (c'est-à-dire sa réponse aux pluies). Les idées suivantes se sont progressivement imposées au cours du développement de ces modèles pour permettre d'obtenir des modèles fiables et robustes (Mathevet . T, 2005) :

- Représentation globale du bassin versant,
- Approche empirique de développement sans recours a priori à la physique des écoulements,
- Augmentation progressive de la complexité de la structure du modèle en partant de structures simples,
- Justification de la complexité de la structure d'un modèle par ses performances,
- Recherche de structures générales de modèle (applicables à des bassins variés),
- Utilisation de larges échantillons de bassins versants pour tester les performances des modèles,
- Evaluation d'un modèle par comparaison à d'autres structures de modèle

1.4.5 Le modèle pluie-débit annuel GR1A

Le modèle GR1A (modèle du Génie Rural à 1 paramètre Annuel) est un modèle pluie-débit global à un seul paramètre. Son développement a été initié au CEMAGREF à la fin des années 1990, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie-débit robuste et fiable en vue d'utilisations pour des applications d'évaluation et de gestion de la ressource en eau.

- **Description mathématique**

La structure du modèle est très simple puisqu'elle se résume à une simple équation, le débit (Q_k) de l'année k étant proportionnelle à la pluie P_k de la même année, avec un coefficient d'écoulement dépendant de P_k , de la pluie P_{k-1} de l'année $k-1$ et de l'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne E . Le modèle GR1A s'écrit sous la forme d'une simple équation :

$$Q_K = P_K \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{0.7P_K + 0.3P_{K-1}}{X.E_K} \right)^2 \right]^{0.5}} \right\}$$

Où :

- Q_K est le débit simulé de l'année k
- P_K est la pluie observée de l'année k
- P_{K-1} est la pluie observée de l'année $k-1$
- E_K est l'évapotranspiration potentielle de l'année k
- X est le paramètre du modèle à optimiser

Le paramètre X traduit l'influence d'une ouverture du bassin sur l'extérieur non atmosphérique (par exemple échange avec des nappes profondes ou avec des bassins adjacents dans le cas d'une non-superposition des limites topographiques et géologiques) : si X est supérieur à 1, le système perd de l'eau et si X est plus petit que 1, le système en gagne, le tout exprimé en fraction de l'ETP.

- **Paramètre**

Le modèle ne comporte qu'un paramètre optimisable, le paramètre X adimensionnel, qui apparaît comme un coefficient modulateur de l'évapotranspiration potentielle. Sur un large échantillon de bassins versants, la médiane de X vaut 0.7 et un intervalle de confiance à 90% est donné par [0.13 ; 3.5].

1.4.6 Le modèle pluie-débit mensuel GR2M

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) est un modèle pluie-débit global à deux paramètres. Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1980, avec des objectifs d'applications dans le domaine des ressources en eau et des étiages. Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement par Kabouya (1990), Kabouya et Michel (1991), (Makhlouf Z., Michel C., 1992), (Mouelhi S., 2003) et (Mouelhi S., Michel, C., Perrin, C. et Andréassian, V. 2006a.) (Mouelhi S., Michel, C., Perrin, C. et Andréassian, V., 2006b), qui ont permis d'améliorer progressivement les performances du modèle. La version présentée ici est celle de Mouelhi (Mouelhi S., Michel, C., Perrin, C. et Andréassian, V., 2006b) qui paraît la plus performante. Sa structure, bien qu'empirique, l'apparente à des modèles conceptuels à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui semble être le meilleur moyen de tenir compte des conditions antérieures et d'assurer un fonctionnement en continu du modèle. Sa structure associe un réservoir de production et un réservoir de routage ainsi qu'une ouverture sur l'extérieur autre que le milieu atmosphérique. Ces trois fonctions permettent de simuler le comportement hydrologique du bassin.

- **Description mathématique**

Un schéma de la structure est donné à la Figure ci-dessus P_k est la pluie mensuelle du mois k et E l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même mois calendaire.

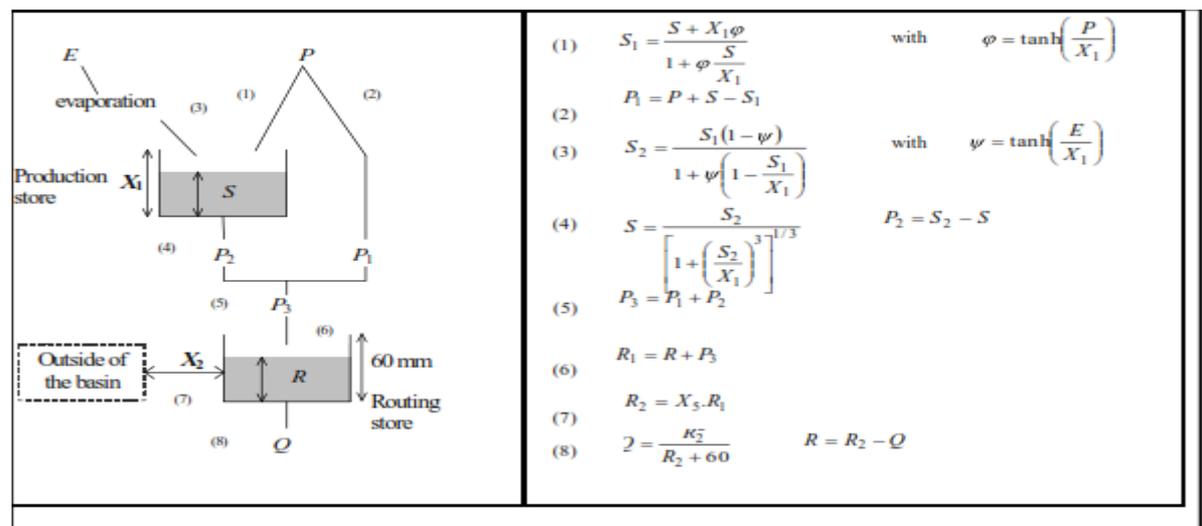


Figure I-3 : Schéma et Description mathématique du modèle GR2M (Perrin C., 2000)

La fonction de production du modèle repose sur un réservoir de suivi d'humidité du sol, très similaire à celui existant dans le modèle GR4J. Du fait de la pluie P , le niveau S dans le réservoir devient S_1 défini par :

$$S_1 = \frac{S + X_1 \varphi}{1 + \varphi \frac{S}{X_1}} \quad \text{Où} \quad \varphi = \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right).$$

Le paramètre X_1 , capacité du réservoir, est positif et exprimé en mm. La pluie P_1 en excès est donnée par :

$$P_1 = P + S - S_1$$

Du fait de l'évapotranspiration, le niveau S_1 devient S_2 :

$$S_2 = \frac{S_1(1-\psi)}{1+\psi\left(1-\frac{S_1}{X_1}\right)} \quad \text{Où} \quad \psi = \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)$$

E est l'évapotranspiration potentielle. Le réservoir se vidange ensuite en une percolation P_2 et son niveau S_2 prêt pour les calculs du mois suivant, est alors donné par :

$$S = \frac{S_2}{\left[1 + \left(\frac{S_2}{X_1}\right)^3\right]^{1/3}} \quad \text{Et} \quad P_2 = S_2 - S$$

La pluie totale P_3 qui atteint le réservoir de routage est donnée par : $P_3 = P_1 + P_2$

Le niveau R dans le réservoir devient alors R_1 : $R_1 = R + P_3$

Un terme d'échange en eau est alors calculé par : $F = (X_2 - 1)R_1$

Le paramètre X_2 est positif et adimensionnel. Le niveau dans le réservoir devient :

$$R_2 = X_2 \cdot R_1$$

Le réservoir, de capacité fixe égale à 60 mm, se vidange suivant une fonction quadratique. Le débit est donné par :

$$Q = \frac{R_2^2}{R_2 + 60}$$

• Paramètres

Le modèle a deux paramètres optimisables :

- X_1 : capacité du réservoir de production (mm).
- X_2 : coefficient d'échanges souterrains (-).

Sur un large échantillon de bassins versants, on obtient les valeurs données dans le tableau ci-dessous.

Paramètre	Médiane	Intervalle de confiance à 90%
X_1 (mm)	380	140 – 2640
X_2 (-)	0,92	0,21 – 1,31

Table I-3 : Valeur des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants (Perrin C., 2000)

1.4.7 Le modèle pluie-débit journalier GR4J

Le modèle GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier) est un modèle pluie-débit global à quatre paramètres. Son développement a été initié au CEMAGRAF au début des années 1980, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie-débit robuste et fiable en vue d'utilisations pour des applications de gestion de la ressource en eau et d'ingénierie (dimensionnement d'ouvrage, prévision des crues et des étiages, gestion de réservoirs, détection d'impact...).

- **Description mathématique**

GR4J est un modèle global à réservoir : le caractère global du modèle signifie qu'il considère le bassin comme une entité élémentaire, sans représentation explicite de la variabilité spatiale de ses caractéristiques. La structure de GR4J représente la transformation pluie-débit par un assemblage simple de réservoirs et d'outils mathématiques.

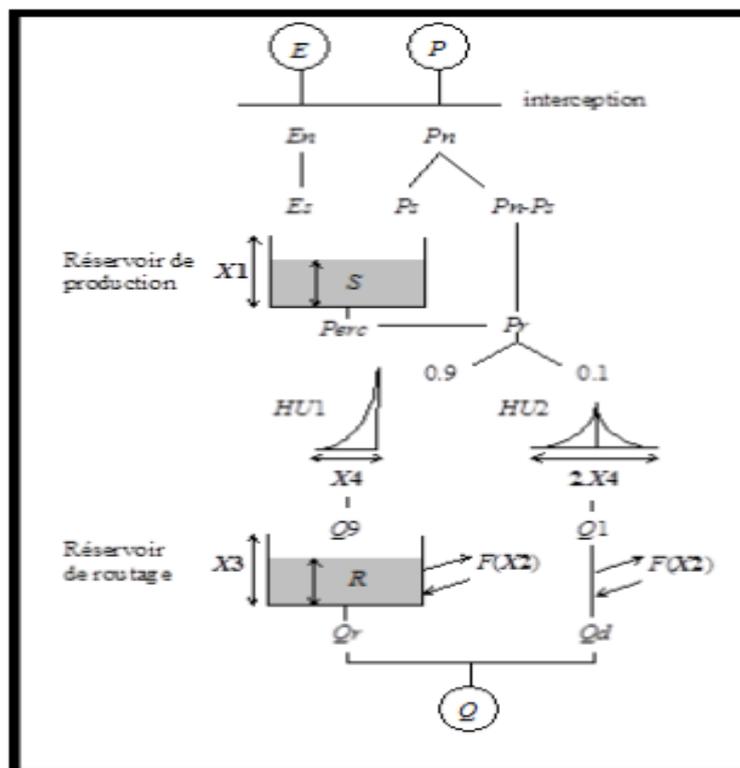


Figure I-4 : Schéma de la structure du modèle GR4J d'après (Perrin C., 2000)

Le modèle a quatre paramètres optimisables

On désigne par P (mm) la hauteur de la pluie et par E (mm) l'évapotranspiration potentielle (ETP). P est une estimation de la pluie de bassin et E peut être issue d'une courbe d'ETP moyenne interannuelle. Les équations suivantes correspondent aux équations intégrées sur un pas de temps.

La première opération est la neutralisation de P par E pour déterminer une pluie nette P_n et une évapotranspiration nette E_n calculée par :

$$\text{Si } P > E \text{ alors } P_n = P - E \text{ et } E_n = 0$$

$$\text{Si } P < E \text{ alors } P_n = 0 \text{ et } E_n = E - P$$

Dans le cas où P_n est différente de zéro, une partie P_s de P_n alimente le réservoir de production et est calculée par :

$$P_s = \frac{X_1 \left(1 - \left(\frac{S}{X_1}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{X_1}\right)}{1 + \frac{S}{X_1} \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{X_1}\right)}$$

Où X_1 (mm) et S sont respectivement la capacité maximum et le niveau du réservoir de production. Sont respectivement la capacité maximum et le niveau du réservoir de production. Sont respectivement la capacité maximum et le niveau du réservoir de production.

Dans le cas contraire, lorsque E_n est différent de zéro, une quantité d'évaporation E_s est retirée du réservoir de production. Elle est donnée par :

$$E_s = \frac{S \left(2 - \frac{S}{X_1}\right) \tanh\left(\frac{E_n}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{X_1}\right) \tanh\left(\frac{E_n}{X_1}\right)}$$

Le contenu du réservoir est mis à jour par :

$$S = S - E_s + P_s$$

Une percolation P_{erc} issue du réservoir de production est alors calculée :

$$P_{erc} = S \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4S}{9X_1}\right)^4 \right]^{\frac{1}{4}} \right\}$$

Le contenu du réservoir est de nouveau mis à jour par :

$$S = S - P_{erc}$$

La quantité d'eau P_r qui atteint finalement la partie routage du modèle est :

$$P_r = P_{erc} + (P_n - p_s)$$

P_r Est divisé en deux composantes d'écoulement, 90 % étant routés par un hydrogramme unitaire HU_1 et un réservoir de routage et 10 % par un unique hydrogramme unitaire HU_2 .

HU_1 et HU_2 dépendent du même paramètre X_4 , temps de base de HU_1 exprimé en jours.

Les ordonnées des hydrogramme sont calculées à partir des courbes en S (cumul de la proportion de la pluie unitaire traitée par l'hydrogramme en fonction du temps) notées respectivement SH_1 et SH_2

- **SH_1 est définie en fonction du temps par :**

Pour $t = 0$ $SH_1(t) = 0$

$$\text{Pour } 0 < t < X_4 \quad SH_1(t) = \left(\frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}}$$

Pour $t > X_4$ $SH_1(t) = 1$

- **SH_2 est définie en fonction du temps par :**

Pour $t = 0$ $SH_2(t) = 0$

$$\text{Pour } 0 < t < X_4 \quad SH_2(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}}$$

$$\text{Pour } X_4 < t < 2X_4 \quad SH_2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}}$$

Pour $t > 2X_4$ $SH_2(t) = 1$

- Les ordonnées de HU_1 et HU_2 sont alors calculées par :

$$HU_1(j) = SH_1(j) - SH_1(j - 1)$$

$$HU_2(j) = SH_2(j) - SH_2(j - 1)$$

Où (j) est un entier.

A chaque pas de temps i , les sorties Q_0 et Q_1 des deux hydrogrammes sont calculées par

$$:Q_0(i) = 0,9 \sum_{k=1}^l HU_1(k) \cdot P_r(i - k + 1)$$

$$Q_1(i) = 0,1 \cdot \sum_{k=1}^m HU_2(k) \cdot P_r(i - k + 1)$$

Où $l = \text{int}(X_4) + 1$ et $m = \text{int}(2X_4) + 1$ avec $\text{int}(\cdot)$ désignant la partie entière.

Un échange souterrain en eau (perte ou gain) est calculé par :

$$F = X_2 \left(\frac{R}{X_3} \right)^{7/2}$$

Où R est le niveau dans le réservoir, X_3 la capacité à un jour du réservoir et X_2 le coefficient d'échange en eau qui peut être positif dans le cas d'apports, négatif dans le cas de pertes vers des nappes profondes ou nul.

Le niveau dans le réservoir de routage est mis à jour en ajoutant la sortie Q_9 de l'hydrogramme HU_1 et F :

$$R = \max(0; R + Q_9 + F)$$

Il se vidange ensuite en une sortie Q_r donnée par :

$$Q_r = R \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{X_3} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\}$$

Le niveau dans le réservoir devient : $R = R - Q_r$

La sortie Q_1 de l'hydrogramme HU_2 est soumise au même échange pour donner la composante d'écoulement Q_d :

$$Q_d = \max(0; Q_1 + F)$$

Le débit total Q est alors donné par : $Q = Q_r + Q_d$

• Paramètres

Le modèle GR4J ne comporte que quatre paramètres à caler :

X_1 : Capacité du réservoir de production (mm)

X_2 : Coefficient d'échanges souterrains (-)

X_3 : Capacité à un jour du réservoir de routage (mm)

X_4 : Temps de base de l'hydrogramme unitaire HU_1 (j).

Sur un large échantillon de bassins versants, on obtient les valeurs données dans le Tableau suivant :

Paramètre	Médiane	Intervalle de confiance à 80%
X ₁ (mm)	350	100 à 1200
X ₂ (-)	0	-5 à 3
X ₃ (mm)	90	20 à 300
X ₄ (jours)	1.7	1.1 à 2.9

Table I-4 : Valeur des paramètres du modèle GR4J obtenues sur un large échantillon de bassins versants

Les modèles du Génie Rural sont des modèles simples (peu de paramètres à caler). Par suite, ils ont des besoins en données limités, dans un domaine où les modèles tendent à devenir de plus en plus complexes pour intégrer des processus supposés exister à l'échelle ponctuelle. Les modèles GR ont été testés sur des bassins et des contextes climatiques très variés, en France mais aussi dans d'autres pays (Etats-Unis, Australie, Brésil, Allemagne, Angleterre, Côte d'Ivoire, etc.). Applicables à l'échelle du bassin versant, ils ont été testés pour des bassins versants allant de moins de 10 km² à plus de 100 000 km². Ils sont également été utilisés dans des bassins en Algérie et particulièrement au niveau des bassins de l'Oued Mouilah ; Zennaki.(2009) ; de l'Oued Tafna (Bouanani A., 2004) ; de l'Oued Isser Benhazil.(2011) ; l'Oued Lakhdar Gherissi (2012) et Oued Boumessoud Madani (2012). Les résultats obtenus nous ont encouragés à tester ce modèle sur le bassin versant El Hammam.

1.5 Conclusion

Nous pouvons conclure, à travers cette synthèse bibliographique sur la modélisation hydrologique, à une variabilité de description des processus hydrologiques selon le type du modèle. Le choix dépend de l'échelle spatiale et temporelle de la modélisation. Concernant l'échelle temporelle, plus le pas de modélisation est long, plus la description des processus hydrologiques est simple. Au contraire, la modélisation des processus à un pas de temps court nécessite une description des processus plus complexe. En ce qui concerne l'échelle spatiale, la relation entre l'échelle et le processus hydrologique reste encore un sujet de discussion dans la communauté hydrologique.

En effet, les hypothèses utilisées dans la spatialisation ou le concept de découpage du modèle distribué supposent qu'à une échelle spatiale donnée, il existe une homogénéité ou une similarité qui peut être approchée selon : le seuil de processus, l'interprétation de la variabilité des données topographiques, la définition d'unités de réponse hydrologique et

l'analyse des comportements hydrologiques du bassin (Indarto, 2002). Il faut noter aussi que certains modèles peuvent utiliser un mélange de deux ou plusieurs concepts pour modéliser les processus. Ainsi, l'espace peut être discrétisé selon différentes hypothèses dans le modèle afin de comprendre la variabilité des processus hydrologiques à une échelle spatiale donnée. Mais, cette discrétisation est souvent limitée par la disponibilité des données. Le choix de la résolution est encore une décision pragmatique pour un problème spécifique (Indarto, 2002). En plus de ce problème d'échelle spatiale, le calage et la validation d'un modèle hydrologique distribué sont encore délicats à établir. Compte tenu des différents problèmes existants dans la modélisation hydrologique distribuée et des données disponibles sur notre bassin d'étude. Nous souhaitons apporter quelques éléments de réponse à cette problématique.

2 Chapitre II : Caractéristiques du bassin versant de l'Oued El Hammam :

2.1 Introduction

Le bassin de l'Oued El-Hammam, situé sur le flanc nord des hautes plaines oranaises, présente une forme allongée et son altitude moyenne est de 790 m. Si avec environ 65% de la superficie du bassin de l'Oued El Hammam se tient en dessous de 1000 m, 3,6 % sont à plus de 1200 m, le point culminant dépassant les 1400 m à proximité de la confluence de la Macta.

L'Oued El Hammam prend sa source à 16 km au Sud-ouest de Ras El ma et parcourt une distance de 175,5 km à une altitude de 1200 m suivant une direction sud-ouest nord-est et reçoit ses principaux affluents à la station hydrométrique des Trois Rivières. Il longe toute la partie des monts des Beni Chougrane, après avoir drainé dans son haut cours les monts de Daya et Saida, et se perd ensuite dans la plaine marécageuse de l'Habra tout en alimentant les nappes aquifères à la base des alluvions et des sables (voir photo 1).



Photo1 du bassin versant de l'Oued El Hammam

Le débit de l'Oued El Hammam est régularisé par les trois barrages de Fergoug, Bouhanifia et Ouizert. Les sols calcaires humifères occupent la plus vaste superficie de ce bassin versant. Des zones de sols calcaires typiques se retrouvent également dans la partie Nord tandis que des zones de sols calciques s'observent dans la partie Sud. Finalement des sols alluviaux bordent les berges des Oueds. C'est généralement sur les versants tournés vers le nord que sont présentes des tâches de verdure. Les espèces dominantes sont le chêne et le pin d'Alep. La densité forestière a diminué ces dernières années suite à l'action anthropique et aux incendies. Une arboriculture riche domine pratiquement tout au long de l'Oued El Hammam, sur les riches terrasses que l'on trouve dans la vallée, les arbres rustiques tels que l'amandier, le figuier et l'olivier occupant des surfaces importantes.

Toutefois les cultures céréalières et le maraîchage prédominent dans la partie Sud et Sud-Est du bassin versant ; ces cultures sont temporaires, discontinues et ne protègent pas efficacement le sol. Le climat régnant sur le bassin, typiquement semi-aride, avec une moyenne de 280 mm de précipitations, est caractérisé par :

La diminution de la pluviométrie du Nord au Sud (350 à 150 mm)

L'irrégularité des précipitations saisonnières

Une longue période de sécheresse estivale

Les variations pluviométriques sont particulièrement contrastées, tant du point de vue intra-annuel qu'interannuel, avec des années de sécheresse sévère. Le régime hydrologique de l'oued se caractérise par son extrême irrégularité, à la fois spatiale et temporelle ; le régime est caractérisé par des hautes eaux d'automne, par un hiver et un printemps à écoulement modéré et par un étiage estival très prononcé

Au cours de ce chapitre, on va présenter tout d'abord la zone d'étude, ses caractéristiques topographiques et géologiques. (Voir photo 2).



Photo 2 les terrains agricoles dans le bassin versant).

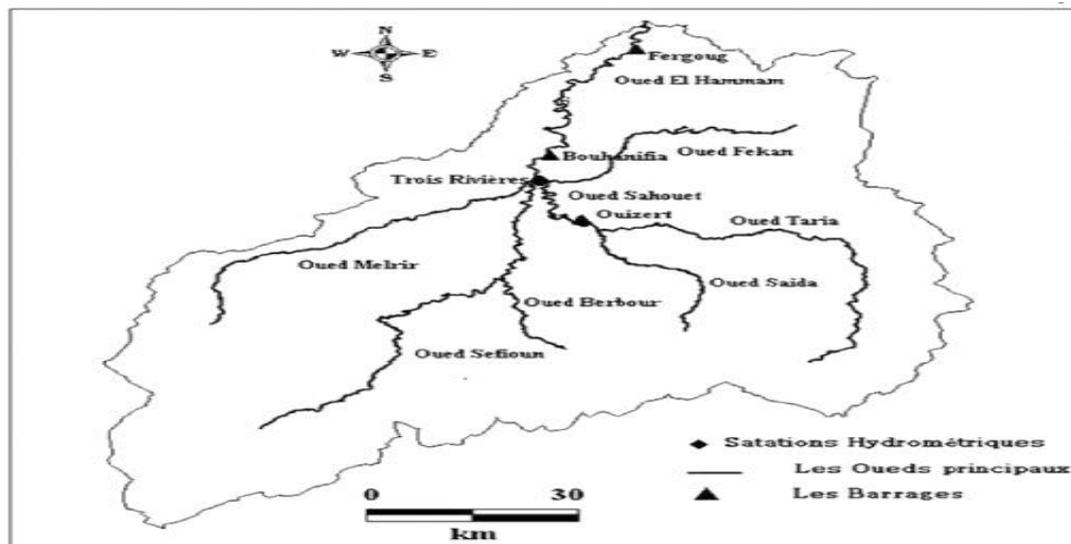


Figure II -1: Situation du bassin versant de l'Oued El Hammam dans l'ensemble des bassins versants de la Macta. (Jean-Paul Bravard ; 10 Oct 2012.)

2.2 Végétation :

La végétation naturelle constituée en grande partie par les pins d'Alep (forêts de Louza, de Belarbi, de Tenira). Au sud (forêts de Kouteidat et de Tassa) les thuyas se mêlent en minorité aux pins d'Alep. Dans la région du Djebel Kerroucha, seul le chêne vert a subsisté. Dans la plaine défrichée à partir de 1842, les cultures annuelles (production céréalière fourrage) et les jachères couvrent les deux tiers de la surface. La grande partie du sol est occupée par la vigne, principalement à raisin de cuve. De petites surfaces de plantations d'oliviers et d'arbres fruitiers sont distribuées dans toute la plaine. Des cultures irriguées

(environ 4 000 hectares), principalement le maraîchage, sont pratiquées par dérivation de l'Oued Mekerra et par pompage dans les régions riches en eau. L'extension des terres aptes à l'irrigation, environ 20000 hectares, nécessite d'énormes besoins en eau, dont l'exploitation se fera par des puits à galeries et des forages. (voir Figure II-1 et Photo 3)

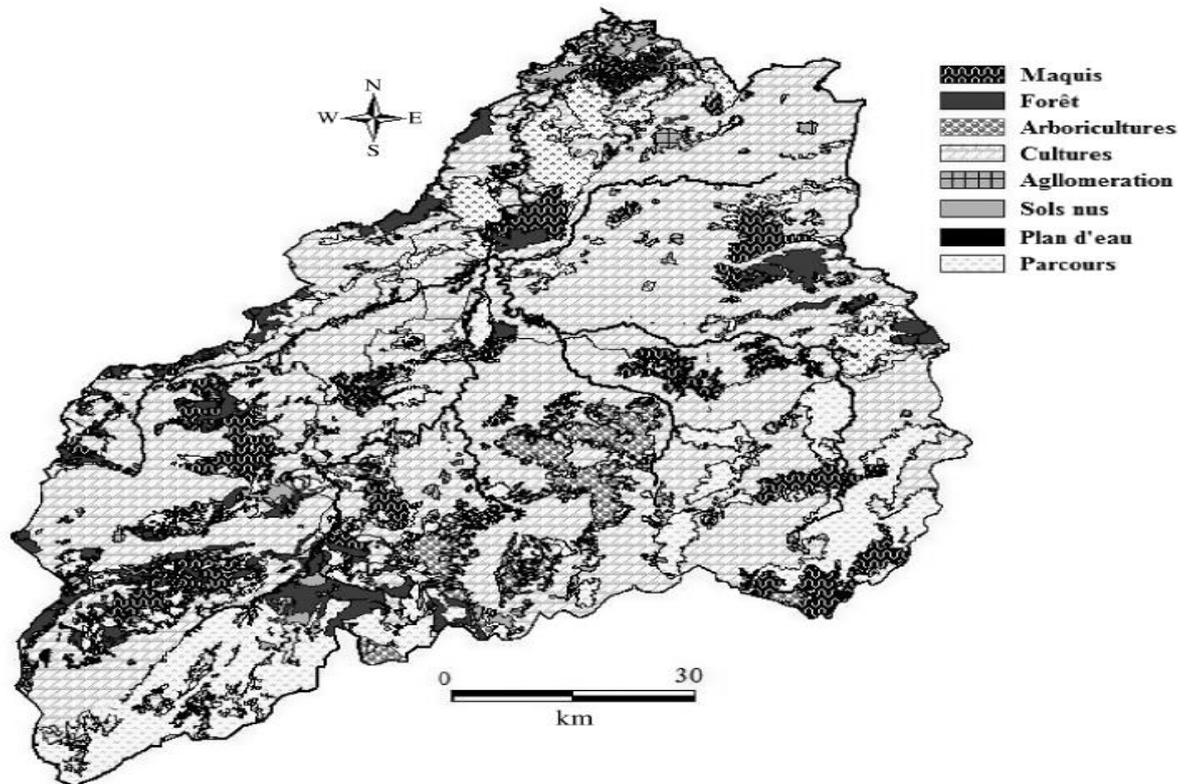


Figure II -2 : Occupation du sol *du bassin versant de l'Oued El Hammam*

(Jean-Paul Bravard ;10 Oct 2012.)

2.3 Pédologie :

Le déficit en eau dans le sol se trouve aggravé par une évaporation active dont l'intensité influence directement l'évolution du sol. La proportion de la croûte calcaire observée sur le bassin est importante. Elle joue un rôle important dans le phénomène de montée des crues.

Les plaines intérieures sont essentiellement constituées de formations détritiques, à prédominance marno-argileuse dans la région de l'Habra et sablo-argileuse avec des passages de graviers dans la région de Ghriss (J. BOROCCO, 1950 ; A. PERRODON, 1957). Les massifs sont armés par des roches carbonatées : calcaires du Crétacé dans les monts de Tessala et de Beni Chougrane , calcaires et/ou dolomies du Jurassique dans ceux de Tlemcen et de Dhaya. Sauf dans les monts de Tlemcen, la présence de roches tendres (marnes, argiles, grès) favorise les phénomènes d'érosion



Photo 3 : Une vue des monts de Beni Chougrane. (Cliché : H. AZZAZ)

3 Chapitre III : caractérisation du changement climatique sur la zone d'étude

3.1 Introduction :

Les MCG sont les meilleurs outils actuellement disponibles pour appréhender le probable changement climatique dû à l'augmentation anthropique des GES, les méthodes alternatives se limitant aux méthodes des analogues temporels ou spatiaux (Arnell, 1994). Les projections du changement climatique par les modèles climatiques présentent les avantages d'être quantifiées, spatialisées et de prendre en compte la physique du système climatique au mieux des connaissances actuelles. Ils sont donc largement utilisés pour étudier les impacts du changement climatique, notamment sur les hydro systèmes continentaux. Ces modèles, ainsi que leurs paramétrisations des processus physiques, sont cependant sujets à de nombreuses incertitudes, dont l'évaluation est problématique (Planton, 1999), et qui augmentent à l'échelle régionale (e.g. Kittel et al., 1998). Leurs projections du changement climatique sont aussi soumises aux incertitudes inhérentes aux scénarios d'émissions en GES. Il semble donc fondamental de disposer de plusieurs projections, dont les différences donnent une idée de la marge d'incertitude du changement climatique potentiel.

De manière générale, les projections futures ne peuvent être utilisées directement à des fins d'études d'impact à l'échelle locale, et ce en raison de deux problèmes principaux : elles sont biaisées par rapport aux observations et leur échelle spatiale est trop grossière pour certaines applications.

En effet si l'on compare sur une période donnée, sur une région donnée et pour un paramètre donné, la moyenne de simulations climatiques à celle d'observations, on constate de manière générale un assez bon accord. Cependant l'accord n'est pas parfait. Non seulement il existe des erreurs systématiques sur les moyennes, mais encore certains extrêmes sont assez mal reproduits.

Afin de combler cet écart entre les informations nécessaires aux experts d'impact et les données des modèles de climat disponibles, des méthodes de correction de biais et descente d'échelle statistique sont mises en œuvre pour corriger les variables du modèle, et rendre la distribution statistique des données quotidiennes identiques à la distribution observée en chaque point.

Il existe différentes sortes de techniques de correction de biais et de descente d'échelle statistiques, présentant des caractéristiques différentes pour répondre aux besoins différents d'utilisateurs finaux.

3.2 Le package Climate4R

Climate4R (M. Iturbide, 2019) est un ensemble de packages R pour l'accès transparent aux données climatiques, le post-traitement (y compris la correction des biais et la réduction d'échelle) et la visualisation. Climate4R s'appuie sur deux structures de données principales (grille et station, y compris les métadonnées) pour traiter les données maillées et ponctuelles issues d'observations, de ré-analyses, de prévisions saisonnières et de projections climatiques. Il considère les membres de l'ensemble comme une dimension de base des structures de données. La compatibilité avec certains packages externes a été obtenue en enveloppant des packages, améliorant ainsi Climate4R avec de nouvelles fonctionnalités : indices climatiques extrêmes, etc. De plus, Climate4R est connecté de manière transparente (et à distance) à l'User Data Gateway (UDG, un service du Santander Climate Data Service), offrant plusieurs ensembles de données de pointe pour l'analyse climatique.

Climate4R est formé de quatre packages principaux (`loader`, `transform`, `downscale` et `visualize`). Ces composants sont décrits ci-dessous :

loader est un package R pour l'accès aux données climatiques d'une manière transparente pour l'utilisateur en s'appuyant sur NetCDF Java. Il permet de charger des données locales ou distantes (à partir de serveurs OPeNDAP) et est entièrement intégré à l'User Data Gateway (UDG). Ce package a été conçu pour fonctionner dans le cadre des prévisions saisonnières et des études sur le changement climatique. Ainsi, il considère les membres de l'ensemble comme une dimension de base des deux principales structures de données (grille et station). De plus, `loader` est amélioré par le package `loader.ECOMS` qui permet d'accéder à distance aux données harmonisées de plusieurs ensembles de données de prévisions saisonnières de pointe stockées à l'ECOMS-UDG.

transform est un package R pour la manipulation et la transformation des données climatiques, y compris le sous-ensemble, le regridding et la conversion de données. Ce package est une dépendance pour `downscale` et `visualize` et comprend des ensembles de données illustratifs pour le Framework Climate4R.

downscale est un package R pour la réduction d'échelle empirique statistique se concentrant sur les données quotidiennes et couvrant les approches les plus courantes (correction de biais, statistiques de sortie du modèle, pronostic parfait) et techniques. Ce package a été conçu pour fonctionner dans le cadre des prévisions saisonnières et des études sur le changement climatique. Ainsi, il considère les membres de l'ensemble comme une dimension de base de la structure de données.

visualizeR est un package R pour la visualisation des données climatiques, avec un accent particulier sur la prévision d'ensemble et la communication des incertitudes. Il comprend des fonctions de visualisation des produits climatologiques, de prévision et d'évaluation, ainsi que leurs combinaisons.

Climate4R est également compatible avec un certain nombre de packages R pour les études d'impact (par exemple les modèles de niche écologique et le danger d'incendie), permettant ainsi l'utilisation transparente des données climatiques dans ces domaines.

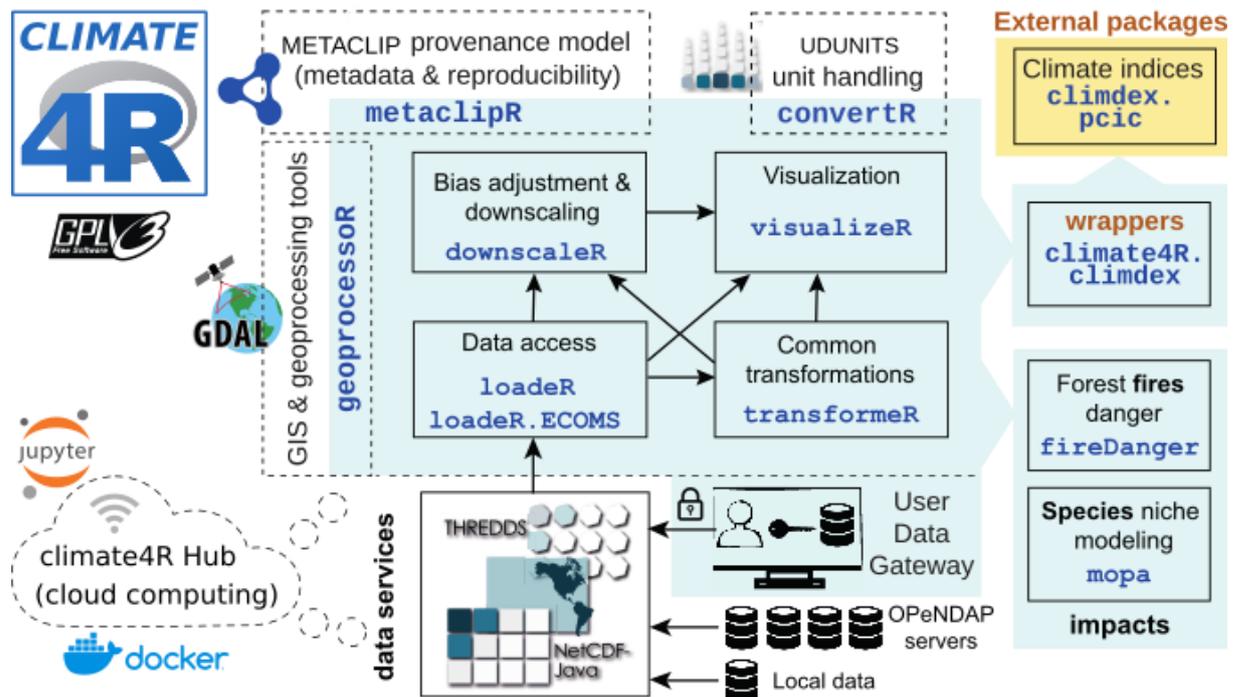


Figure III -1 : Organigramme climate4R M. Iturbide, al (2019)

3.3 Calage et validation des techniques de downscaling

Méthodes standard de correction de biais

Les méthodes disponibles sont "eqm", "delta", "scaling", "pqm", "gpqm", "loci", "ptr" (les quatre derniers utilisés uniquement pour les précipitations), "variance" (uniquement pour la température), "dqm" et "qdm".

Ceux-ci sont ensuite brièvement décrits :

Delta

Cette méthode consiste à ajouter aux observations le signal de changement moyen (méthode delta). Cette méthode est applicable à tout type de variable mais il est préférable de l'éviter pour les variables bornées (ex. Précipitations, vitesse du vent, etc.) car des valeurs hors de la plage variable pourraient être obtenues (ex. Vitesses de vent négatives ...). Cette méthode correspond au cas $g = 1$ et $f = 0$ dans Amengual et al. 2012.

Scaling :

Cette méthode consiste à mettre à l'échelle la simulation avec la différence (additive) ou le quotient (multiplicatif) entre les moyennes observées et simulées dans la période du train. La correction additive ou multiplicative est définie par le paramètre scaling. Type (la valeur par défaut est additive). La version additive est de préférence applicable aux variables non bornées (par exemple la température) et la multiplicative aux variables avec une limite inférieure (par exemple les précipitations, car elle préserve également la fréquence).

Eqm :

Cartographie empirique des quantiles. Il s'agit d'une méthode de correction de biais très étendue qui consiste à calibrer la fonction de distribution cumulative simulée (CDF) en ajoutant aux quantiles observés à la fois le changement moyen delta et les changements delta individuels dans les quantiles correspondants. Cela équivaut à $f = g = 1$ dans Amengual et al. 2012. Cette méthode est applicable à tout type de variable.

Pqm :

Cartographie des quantiles paramétriques. Il est basé sur l'hypothèse initiale que les distributions d'intensité observées et simulées sont bien approximées par une distribution donnée (voir fitdistr pour vérifier les distributions disponibles), il s'agit donc d'une carte q-q paramétrique qui utilise la distribution théorique au lieu de la distribution empirique. Par exemple, la distribution gamma est décrite dans Piani et al. 2010 et s'applique aux précipitations. Un autre exemple est la distribution de weibull, qui est applicable aux données de vent correctes (Tie et al. 2014).

Gpqm :

La cartographie quantile généralisée (décrite dans Gutjahr et Heinemann 2013) est également une cartographie quantile paramétrique (voir méthode 'pqm') mais utilisant deux distributions éthiques, la distribution gamma et la distribution de Pareto généralisée (GPD). Par défaut, il applique une distribution gamma aux valeurs inférieures au seuil donné par le 95e centile (d'après Yang et al. 2010) et une distribution générale de Pareto (GPD) aux valeurs supérieures au seuil. Le seuil au-dessus duquel le GPD est ajusté est le 95e percentile de la distribution des jours de pluie observée et prévue, respectivement. Si `precip = FALSE`, les valeurs inférieures au 5e centile des distributions observées et prévues sont en outre ajustées en utilisant GPD et le reste des valeurs des distributions est ajusté en utilisant une distribution normale. L'utilisateur peut spécifier un ou des seuils différents en modifiant le paramètre `thêta`.

Mva :

Ajustement de la moyenne et de la variance.

Variance :

Mise à l'échelle de la variance de la température. Cette méthode est décrite dans Chen et al. 2011. Il ne s'applique qu'à la température. Il corrige la moyenne et la variance des séries chronologiques de température.

Loci :

Mise à l'échelle locale de l'intensité des précipitations. Cette méthode est décrite dans Schmidli et al. 2006. Il ajuste la moyenne ainsi que les fréquences des jours de pluie et les intensités des jours de pluie. Le seuil de précipitation est calculé de telle sorte que le nombre de jours simulés dépassant ce seuil correspond au nombre de jours observés avec des précipitations supérieures à 1 mm.

Ptr :

Transformation de puissance des précipitations. Cette méthode est décrite dans Leander et Buishand 2007 et n'est applicable qu'aux précipitations. Il ajuste les statistiques de variance des séries chronologiques de précipitations sous une forme exponentielle. Le paramètre de puissance est estimé sur une base mensuelle en utilisant une fenêtre de 90 jours centrée sur l'intervalle. La puissance est définie en faisant correspondre le coefficient de variation des précipitations simulées quotidiennes corrigées avec le coefficient de variation des précipitations quotidiennes observées. Il est calculé par un algorithme de recherche de racine utilisant la méthode de Brent.

Dqm :

Appariement quantile détendu avec extrapolation par méthode delta, décrit dans Cannon et al. 2015. Il consiste à (i) supprimer la tendance moyenne (linéaire) à long terme ; (ii) eqm est appliqué à la série détendue ; (iii) la tendance moyenne est ensuite réappliquée à la série corrigée du biais. Il préserve le signal de changement moyen dans un contexte de changement climatique. Il permet des corrections relatives (multiplicatives) et additives.

Qdm :

Cartographie du delta quantiles, décrite dans Cannon et al. 2015. Il consiste à (i) détendre les quantiles individuels ; (ii) QM est appliqué à la série détendue ; (iii) les tendances projetées sont ensuite réappliquées aux quantiles corrigés du biais. Il préserve

explicitement le signal de changement dans tous les quantiles. Il permet des corrections relatives (multiplicatives) et additives.

On a choisi la méthode eqm car après le teste de plusieurs méthodes, « eqm » est le plus fiable et le plus logique concernant les résultats.

3.4 Bases de données

E obs :

Les méthodes E-OBS se présente sous la forme d'un ensemble de données et est disponible sur une grille régulière de 0,1 et 0,25 degrés pour les éléments température moyenne quotidienne T_G , température minimale quotidienne T_n , température maximale quotidienne T_x , somme des précipitations quotidiennes RR, pression moyenne quotidienne au niveau de la mer PP et globale rayonnement QQ. Ils couvrent la zone: 25N-71.5N x 25W-45E. Les fichiers de données sont au format NetCDF-4. Le Global 30 Arc-Second Elevation Data Set (GTOPO30), un modèle numérique d'élévation (DEM) global raster avec un espacement de grille horizontal de 30 secondes d'arc (environ 1 kilomètre) développé par l'USGS est également utilisé pour le fichier d'altitude.

L'ensemble de données d'ensemble est construit au moyen d'une procédure de simulation conditionnelle. Pour chacun des membres de l'ensemble, un champ aléatoire spatialement corrélé est produit à l'aide d'une fonction de corrélation spatiale pré-calculée. La moyenne à travers les membres est calculée et est fournie sous forme de champs de «meilleure estimation». L'écart est calculé comme la différence entre les 5e et 95e centiles sur l'ensemble pour fournir une mesure indiquant la plage d'incertitude de 90%. L'ensemble de données de rayonnement global a un ensemble de 10 membres, tandis que les autres éléments ont un ensemble de 100 membres (Cornes et al., (2018))

Pour utiliser la méthodologie des anomalies, nous avons utilisé des données quotidiennes, interpolées, de la base de données E-obs, s'étalant du 1999 à 2006 « série de référence »

Ainsi que des sorties de modèle climatique régional du projet CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment; Giorgi et al.2009, Jones et al. 2011), pour la réalisation d'une descente d'échelle des changements futurs projetés, horizon 2030, pour les variables climatiques, en comparant avec celles de la période de référence.

Les données utilisées dans la simulation sont issues de la simulation réalisée par plusieurs modèles sur les scénarios futurs RCP 4.5 et RCP 8.5 (les seuls à avoir été retenu pour les simulations de Downscaling environnementale).

Alors que les données hydrologiques, sont les données des débits au pas de temps journalier des trois stations (barrage Bou Hanifia, Hacine, , Trois Rivieres) du réseau l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrique) de septembre 1999 à aout 2006.

L'évapotranspiration a été calculée avec la formule d'Oudin (Oudin L., 2004) du package AirGR ver 1.2.13.16 (GR Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling)

Définition des model utilisés

GCM	RCM	RCP
CCCma-CanESM2 r1i1p1	SMHI- RCA4	4.5 8.5
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 r1i1p1		4.5 8.5

Table III-1 : description des modèles climatiques utilisés dans le travail

CCCma :

Le Centre canadien de modélisation et d'analyse du climat (CCCma), une section de la Division de la recherche climatique, développe et applique des modèles informatiques du système climatique pour simuler le climat mondial et canadien, et pour prédire les changements sur des échelles de temps saisonnières à centennale. L'analyse de ces simulations, ainsi que les observations, sont utilisées pour fournir des informations quantitatives scientifiques pour éclairer l'adaptation et l'atténuation des changements climatiques au Canada et à l'échelle internationale, et pour améliorer notre compréhension du système climatique. Notamment, le CCCma développe le système de modélisation utilisé pour produire des prévisions saisonnières de manière opérationnelle par Environnement et Changement climatique Canada, et réalise des expériences de modèles climatiques coordonnées par le Programme mondial de recherche sur le climat (PMRC) à l'appui du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).

CNRM-CERFACS-CNRM-CM5:

CNRM-CM5 est un modèle du « système-Terre » dédié principalement à la réalisation de scénarios climatiques. Un tel modèle est constitué de plusieurs modèles développés indépendamment les uns des autres et couplés via le coupleur OASIS3. CNRM-CM5 est développé en collaboration avec l'équipe GLOBE du CERFACS.

Les composantes qui constituent CNRM-CM5 lui confèrent la capacité de reproduire l'état moyen du climat actuel et la variabilité climatique à des échelles de temps du mois au siècle. CNRM-CM5 participe ainsi à l'exercice d'inter comparaison CMIP5 sur lequel repose une partie importante des travaux du GIEC. Il est possible d'accéder à la base de données rassemblant les résultats des simulations climatiques réalisées par CNRM-CM5 à

partir du portail CMIP5 du CNRM-GAME.

CNRM-CM5 est un outil essentiel

- ▶ pour étudier et améliorer notre compréhension du système climatique
- ▶ pour simuler les siècles passés et faire des études d'attribution du changement climatique
- ▶ pour réaliser des simulations du climat futur (à l'échelle du siècle) suivant les scénarios d'émission de gaz à effet de serre
- ▶ pour simuler des paléoclimats
- ▶ pour effectuer des prévisions saisonnières

3.5 Méthodologie d'analyses d'impacts du changement climatique

3.5.1 Utilisation des scénarios du changement climatique

Les modèles climatiques ont typiquement une résolution horizontale comprise entre 12 km (pour les RCM) et 50 Km (pour les GCM), leur résolution est donc très grossière pour le contexte d'étude d'impacts. Ceci signifie que la représentation de la surface de la terre dans le modèle est très lissée par rapport à la réalité, avec des conséquences évidentes sur la véracité de la simulation du climat (Christian, 2005).

L'obtention des données climatiques à plus haute résolution repose sur l'établissement des relations significatives entre les climats locaux et ceux à grande échelle, ce qui permet l'obtention de données utiles à l'échelle du site précis. Ces relations demeureront valides dans les conditions climatiques futures (Semenov et Brooks, 1999).

Le passage d'une grande échelle à une échelle locale, ou descente d'échelle, a été réalisé de manière :

- D'une part, la réalisation d'une descente d'échelle statistique basée sur la relation entre la variable climatique et son environnement (Martin, 2013). En croisant des variables prédictives décrivant au mieux l'environnement physique avec la variable....
- D'autre part, l'utilisation d'un générateur stochastique de données climatiques LARS-WG (Semenov, 1997) (Semenov, 1998).

3.5.2 Descente d'échelle statistique environnementale avec QGIS

Les méthodes de descente d'échelle statistique sous-tendent que le climat régional ou local dépend de deux facteurs : le climat à échelle continentale et les caractéristiques locales ou régionales comme la topographie, la répartition terre/mer ou l'occupation du sol (Von Storch, 1995 et 1999). Cependant, dans la quasi-totalité des travaux réalisés à l'aide d'une méthode de downscaling statistique, les auteurs considèrent que les caractéristiques locales ou régionales se limitent uniquement aux variables météorologiques et ils ne prennent pas en

compte d'autres variables environnementales telles que celles citées ci-dessus (Mullan et al., 2012 ; Khalili et al., 2013). Le point commun à la grande majorité de ces études réside dans le fait qu'en fin de traitement, les prévisions climatiques ne sont établies que pour des points précis de l'espace. En règle générale, ces points sont les stations météorologiques qui ont fourni les variables locales pour établir les relations statistiques avec les sorties de modèles climatiques.

Dans la bibliographie, un grand nombre d'articles traite cette question de descente d'échelle statistique. Il s'agit fréquemment d'améliorer la précision spatiale des projections climatiques concernant les précipitations journalières (Haylock et al., 2006 ; Wilby et Wigley, 2000 ; Yin et al., 2011 ; Lutz et al., 2012 ; Liu et Fan, 2013). En effet, cette variable alimente de nombreux modèles environnementaux comme des modèles hydrologiques par exemple (Boé et al., 2007 ; Chen et al., 2010 ; Sachindra et al., 2013).

Dans le détail, plusieurs techniques sont employées pour améliorer la résolution spatiale des sorties de modèles climatiques : classifications de types de temps et modèles de régression pour les plus usitées, avec très fréquemment des combinaisons ou des comparaisons entre les méthodes suivies (Wetterhall et al., 2006 ; Liu et al., 2012). Les modèles de régression représentent des relations linéaires ou non-linéaires entre des variables locales et des sorties de modèles globaux ou régionaux : la régression linéaire multiple (Gachon et Dibike, 2007 ; Souvignet et Heinrich, 2011 ; Nojarov, 2012 ; Goyal et Ojha, 2012), l'analyse de corrélation canonique (Khan et al., 2006) ou les réseaux de neurones artificiels (Goyal et Ojha, 2012).

Le modèle retenu pour subir la descente d'échelle, à 1Km, est le modèle climatique régional Canadien CCCMa.

Le modèle canadien du système terrestre de deuxième génération (CanESM2) se compose du modèle océanique-océan couplé physique (MCCam4) couplé à un modèle du carbone terrestre (CTEM) et un modèle du carbone océanique (MCCO) (Christian, J. R. et al., 2010).

Nous commençons par la mise en œuvre d'un SIG (Système d'information géographique) avec QGIS (version 3.6), pour le calcul des données environnementales, ces dernières sont exportées vers des formats utilisables sur logiciels R.

Mise en œuvre du SIG :

La première étape du travail consiste à concevoir un SIG pour l'extraction des données environnementales. A partir de couches (données géo-référencées) de base : les frontières administratives de l'Algérie, la carte d'élévation 30 '' d'arc sur l'Afrique, la ligne de la côte

méditerranéenne, les fichiers « netcdf » des températures $T^{\circ}\text{max}$, $T^{\circ}\text{min}$ et Précipitation (CCCMC), cartes des stations météorologique ONM(office nationale de la météorologie)

Ces couches sont couplées à des couches intermédiaires de découpe, de transformation et de calculs : grille régulière de points (0.22° d'arc) ($30''$ d'arc), polygone de coupe (lat 35.88° lon -1.5°), couche des zones tampon (5, 10, 20 et 30 km), pour aboutir à la couche des résultats avec une résolution de 1 km) contenant plus de 55 attributs (latitude, longitude ,altitude, longue distance mer, élévation moyenne à 5 ,10, 20 et 30 km,...)

Nous sélectionnons le point de grille le plus proche de notre station météorologique, que nous préparons pour générer un scénario supplémentaire.

Ce dernier est utilisé dans LARS-WG afin de produire des séries journalières.

3.6 Données hydro-climatiques (avec Lars-WG)

Lars-WG est utilisé comme modèle de base pour représenter sa catégorie de générateur de climat. Lars-WG est un générateur stochastique de climat utilisant une approche basée sur les séries pour la génération des variables climatiques. Il a été développé en Grande-Bretagne au «Long Ashton Research Station» pour reproduire diverses catégories de climats à travers l'Europe. Lars-WG est fondé sur le générateur de climat décrit en détail par Racsko et al. (1991) et Semenov et Barrow (1997). Les variables climatiques analysées et produites par Lars-WG sont les précipitations, les températures maximales et minimales, et les radiations solaires. Les générateurs de type Lars-WG utilisent une distribution semi-empirique pour la génération des séries de jours secs et pluvieux, des quantités de précipitations pour les jours pluvieux et des radiations solaires. Il utilise des données observées pour un site spécifique comme données d'entrée pour définir les paramètres de distribution des différentes variables climatiques ainsi que les corrélations entre ces variables. Par la Reproduced with permission of the copyright owner. Further reproduction prohibited without permission.

Le générateur procède à la production de données climatiques synthétiques, basées sur la sélection de valeurs appartenant à la bonne distribution, en utilisant un générateur de nombre aléatoire. La génération des variables climatiques par Lars-WG est maintenant décrite en détail. Ce type de modèle statistique peut :

- Générer de longues séries chronologiques de données météorologiques (précipitations, températures maximales et minimales et rayonnement solaire) qui permettent l'évaluation des risques agricoles et hydrologiques.
- Offrir un moyen pour simuler les données météorologiques là où les relevés d'observation sont très courts.

- Servir d'outil moins coûteux en terme de temps de calcul et capable de produire des informations sur les scénarios de changements climatiques à haute résolution.

Génération des précipitations:

Ce qui distingue Lars-WG de l'approche de Richardson est la façon dont il procède pour la génération des occurrences de précipitations. Lars-WG se base sur une fonction de distribution semi-empirique pour déterminer la durée des séries de jours secs ou pluvieux. Une fois l'état de la journée déterminé, il procède à la génération de la quantité de pluie pour les jours dont l'état est déterminé comme pluvieux.

Génération des occurrences de précipitations :

Les séries de jours pluvieux et de jours secs sont déterminées selon une fonction de distribution semi-empirique. Les séries pluvieuses et sèches sont alternées et le nombre de jours dans chaque série est calculé de façon empirique. Lorsqu'une série se termine, une nouvelle valeur est sélectionnée à partir de la distribution semi-empirique pour le mois concerné. Une journée considérée comme pluvieuse est une journée avec des précipitations supérieures ou égales à 0.1 mm (dernière version de Lars-WG). Les fonctions de distribution des séries de jours secs et pluvieux et des quantités de précipitations pour les jours pluvieux sont définies mensuellement à l'intérieur du mois dans lequel la série débute. Une distribution semi-empirique $Emp = \{e_0, e_i ; h_i, i=1, \dots, 10\}$ est un histogramme possédant dix intervalles, $[e_{i-1} ; e_i]$, où $e_{i-1} < e_i$ et h_i représente le nombre d'évènements observés compris dans le $i^{\text{ème}}$ intervalle. Dans le cas d'un jour avec précipitations, $e_0=0$. L'histogramme a pour effet de légèrement adoucir la distribution exacte des valeurs empiriques. Les dimensions des intervalles varient proportionnellement à la valeur de e_i . Comme il y a, de façon générale pour ce type de distribution, beaucoup plus de petites valeurs que de grandes, la dimension des intervalles augmentent en même temps que la valeur de i augmente. C'est-à-dire que plus le nombre de jours consécutifs secs ou pluvieux est grand, plus la dimension de l'intervalle sera grande. Une telle distribution est flexible et permet de modéliser une grande variété de distribution en ajustant simplement les intervalles $[e_{i-1} ; e_i]$, par contre pour permettre une telle flexibilité, cette façon de procéder requiert 21 paramètres comparativement à d'autres distributions comme la distribution exponentielle, la distribution gamma et la distribution exponentielle mixte qui ne requièrent respectivement qu'un, deux et trois paramètres.

Génération des quantités de précipitations :

Dans les premières versions de Lars-WG, les précipitations étaient générées à partir d'une fonction de distribution exponentielle mixte à 3 paramètres. Maintenant, la valeur des précipitations est générée, de la même façon que les occurrences, à partir de la distribution semi-empirique des précipitations pour un mois spécifique indépendamment de la durée de la série de jours pluvieux ou de la quantité de précipitations du jour précédent. Cette nouvelle façon de procéder permet de mieux reproduire la variabilité des données de précipitations observées.

Génération des températures minimales et maximales :

Contrairement à la génération des occurrences, des précipitations, la génération des températures maximales et minimales est considérée comme un processus stochastique avec une moyenne et un écart-type journaliers conditionnés sur l'état du jour. Les cycles saisonniers des moyennes et des écart-types sont modélisés par une série de Fourier d'ordre 3 et les valeurs résiduelles sont estimées à partir d'une distribution normale. Les séries de Fourier des moyennes sont ajustées aux valeurs moyennes observées de façon mensuelle. Avant d'ajuster les séries de Fourier des écart-types, les écart-types observés pour chaque mois sont ajustés pour donner une estimation moyenne journalière de l'écart-type en soustrayant l'effet estimé des changements de la moyenne à l'intérieur du mois. L'ajustement est calculé en utilisant les séries de Fourier ajustées obtenue préalablement pour la moyenne. Les valeurs résiduelles observées, obtenues par la soustraction des valeurs moyennes ajustées à partir des données observées, sont utilisées pour l'analyse d'une autocorrélation temporelle pour chacune des variables de température maximale et de température minimale. Pour simplifier l'analyse, les autocorrélations sont considérées constantes tout au long de l'année pour les jours secs et pluvieux et les valeurs moyennes provenant des données observées sont utilisées. Les valeurs résiduelles des températures minimales et maximales ont aussi une corrélation croisée préétablie de 0,6. Il arrive parfois que la température minimale générée pour une journée soit supérieure à la température maximale générée pour cette même journée. Dans ces cas, la valeur de la température minimale générée est remplacée par la valeur de la température maximale générée moins 0,1 °C.

3.7 Méthode d'application des données de GCM dans l'étude d'impact

La méthode des anomalies appliquées dans le générateur climatique LARS-WG (Semenov et Barrow, 1998), permet de calculer des anomalies mensuelles pour chaque variable climatique, comme le rapport (pour la pluie) ou la différence (pour la température) entre le climat mensuel moyen simulé sous les effets du changement climatique. Cette

anomalie est calculée par rapport à la série de référence des trois stations pluviométriques (de Oued El Hammam) du réseau ANRH, allant de 1999 à 2006.

Pour ce travail, les récapitulatifs des anomalies sont présentés sous deux formes figures, pour les trois paramètres sélectionnés du scénario du RCP 4.5 et RCP 8.5 de l'IPCC à l'horizon 2030 avec quelques modèles :

Ensuite, elles sont appliquées sur la distribution statistique des données physiques réelles : ce sont les valeurs moyennes ainsi que leurs variabilités qui peuvent être modifiées. LARS-WG est capable de prendre en compte les modifications sur les moyennes et les écart-type des paramètres climatiques observées. Les simulations du climat futur sont injectées dans un modèle d'impact, pour l'hydrologie c'est le modèle Génie Rurale GR4J.

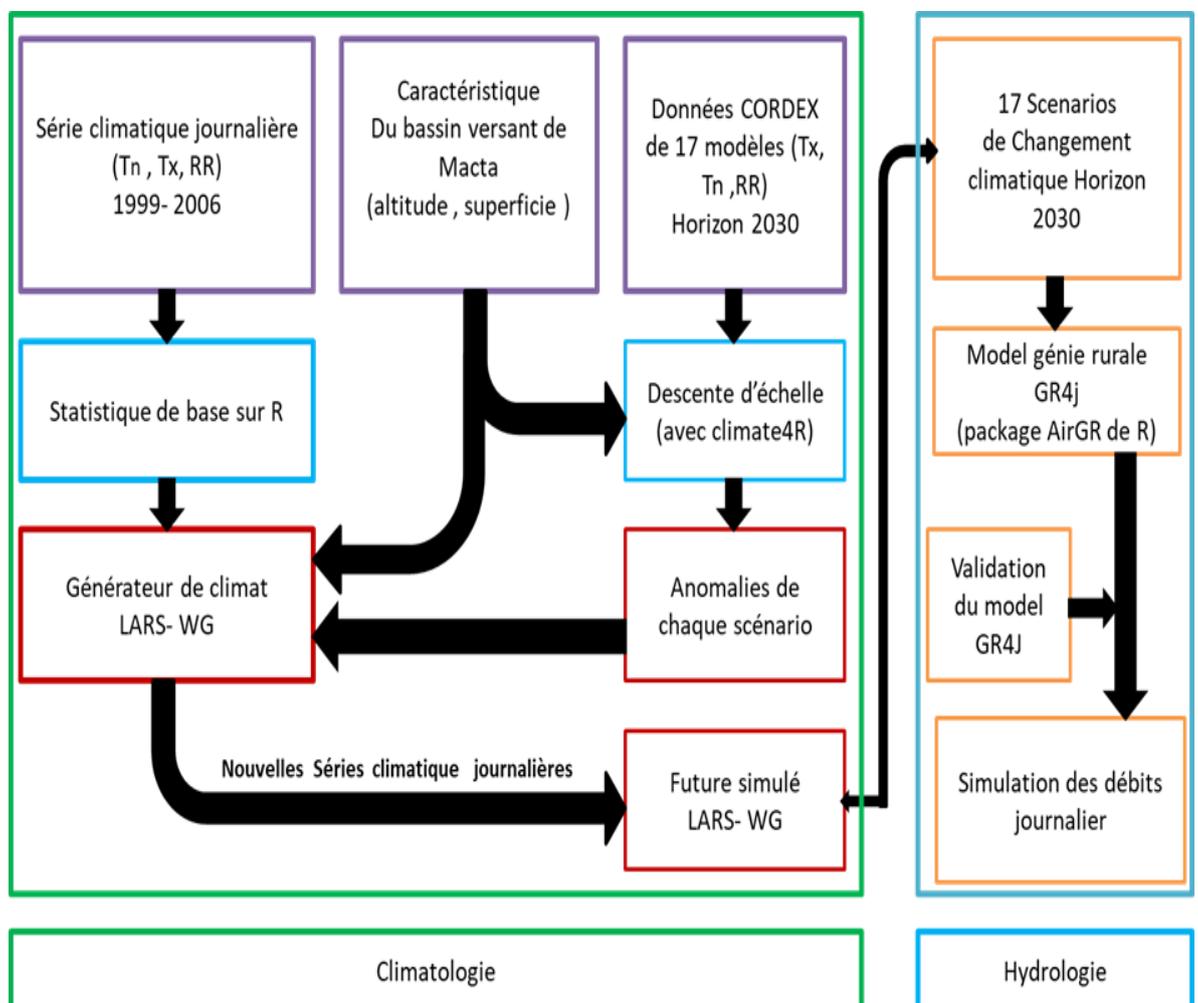


Figure III -2 : Schéma qui décrit la méthode des anomalies appliquées dans un générateur climatique LARS-WG

3.8 RESULTATS

3.8.1 Températures minimales :

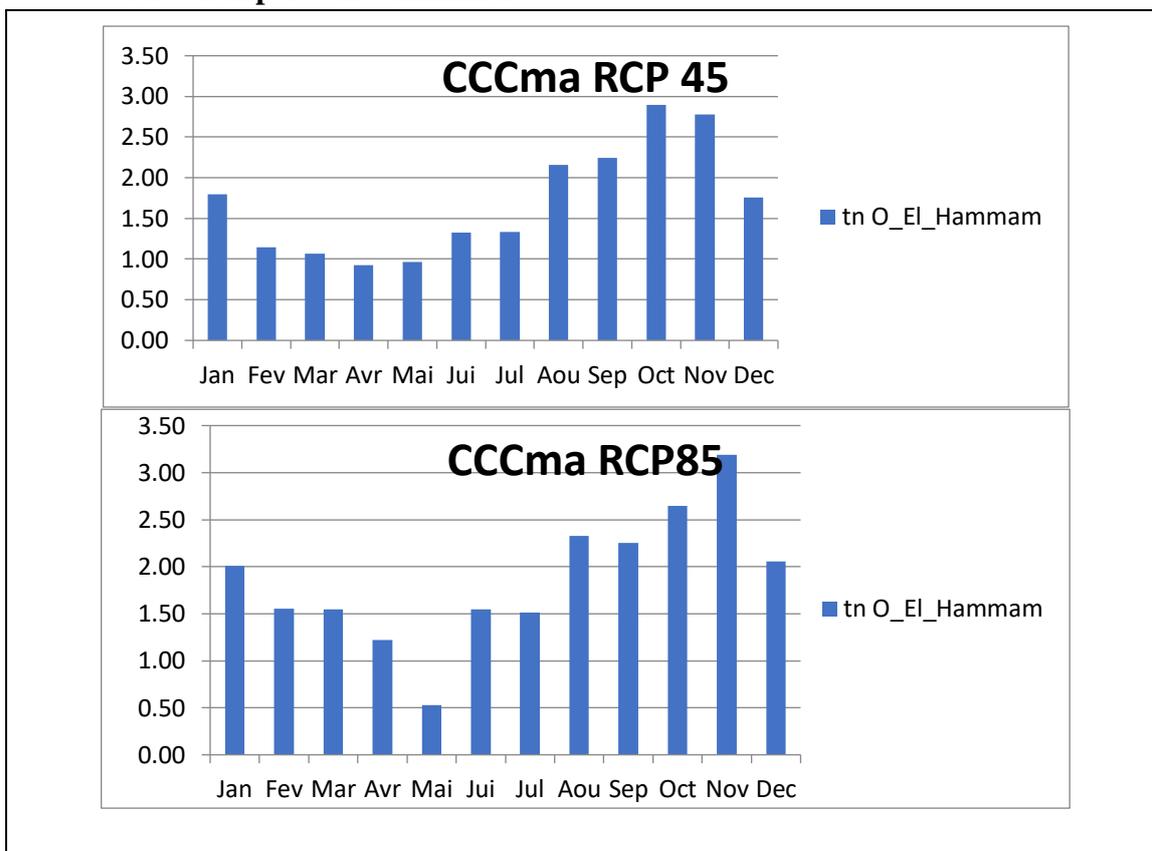


Figure III -3 : Les anomalies mensuelles de T_n pour CCCma RCP 4.5/85 resp(haut bas)

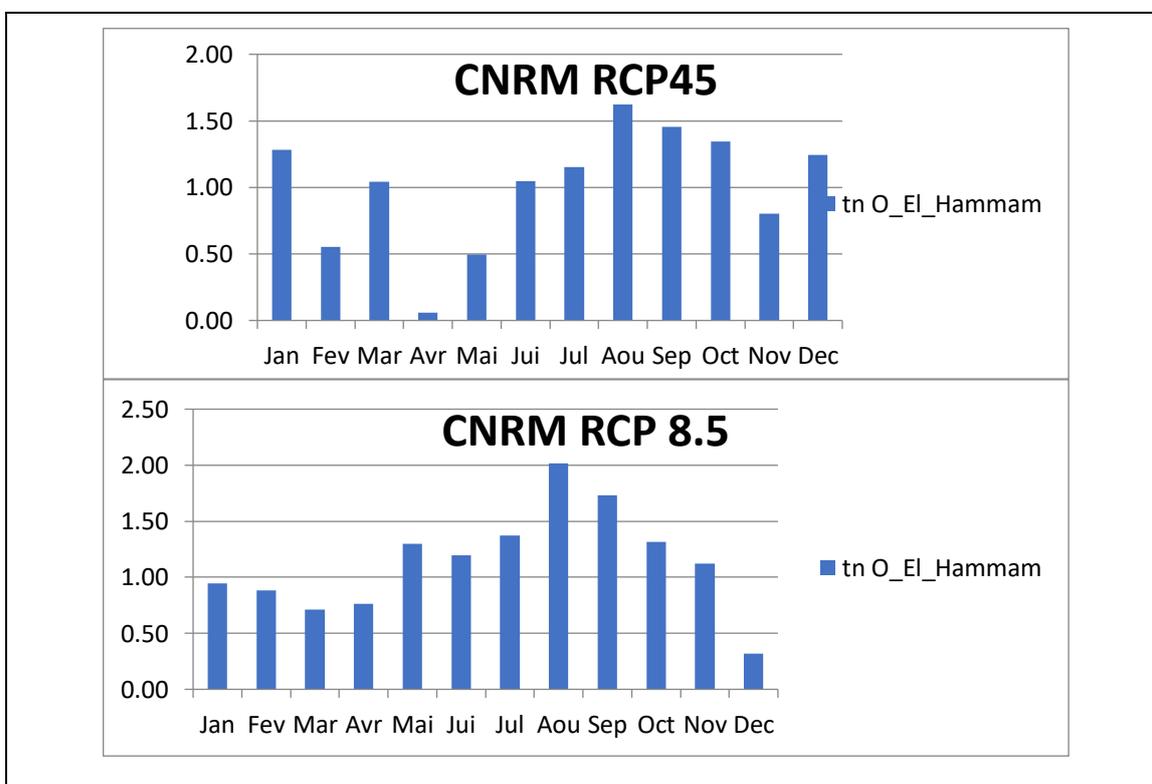


Figure III -4 : Les anomalies mensuelles de T_n pour CNRM RCP 4.5/85 resp (haut /bas)

3.8.2 Températures maximales :

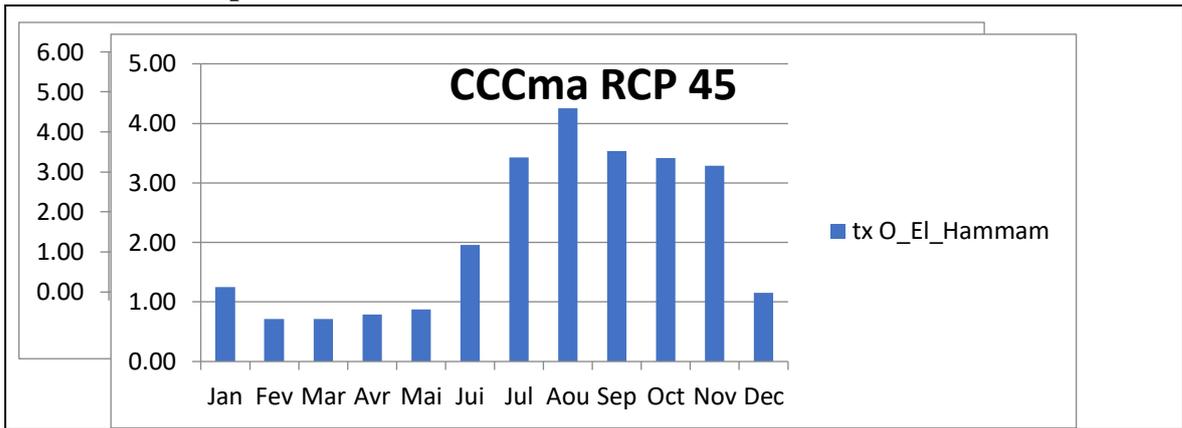


Figure III -5 : Les anomalies mensuelles de Tx pour CCCma RCP 4.5/85 resp (haut /bas)

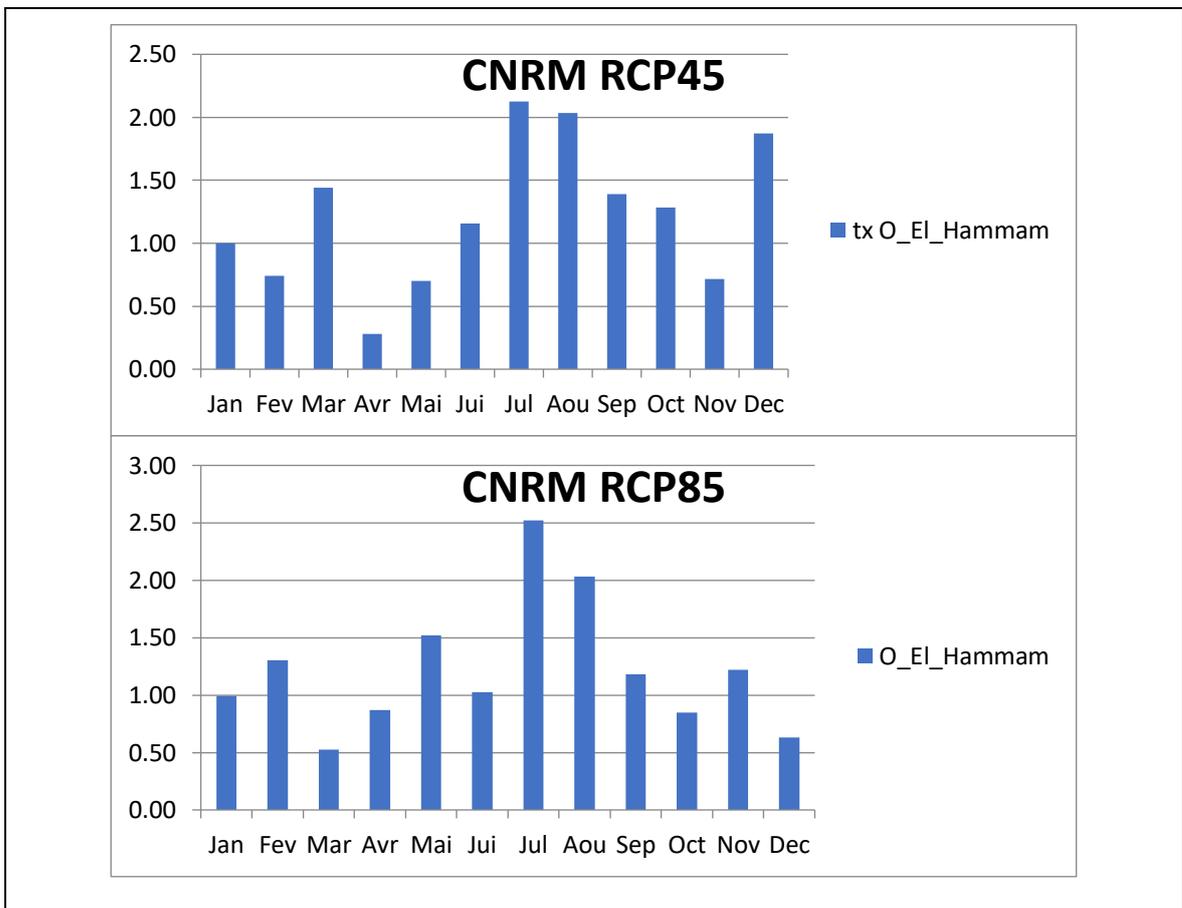


Figure III -6 : Les anomalies mensuelles de Tx pour CNRM RCP 4.5/85 resp (haut /bas)

3.8.3 Précipitations :

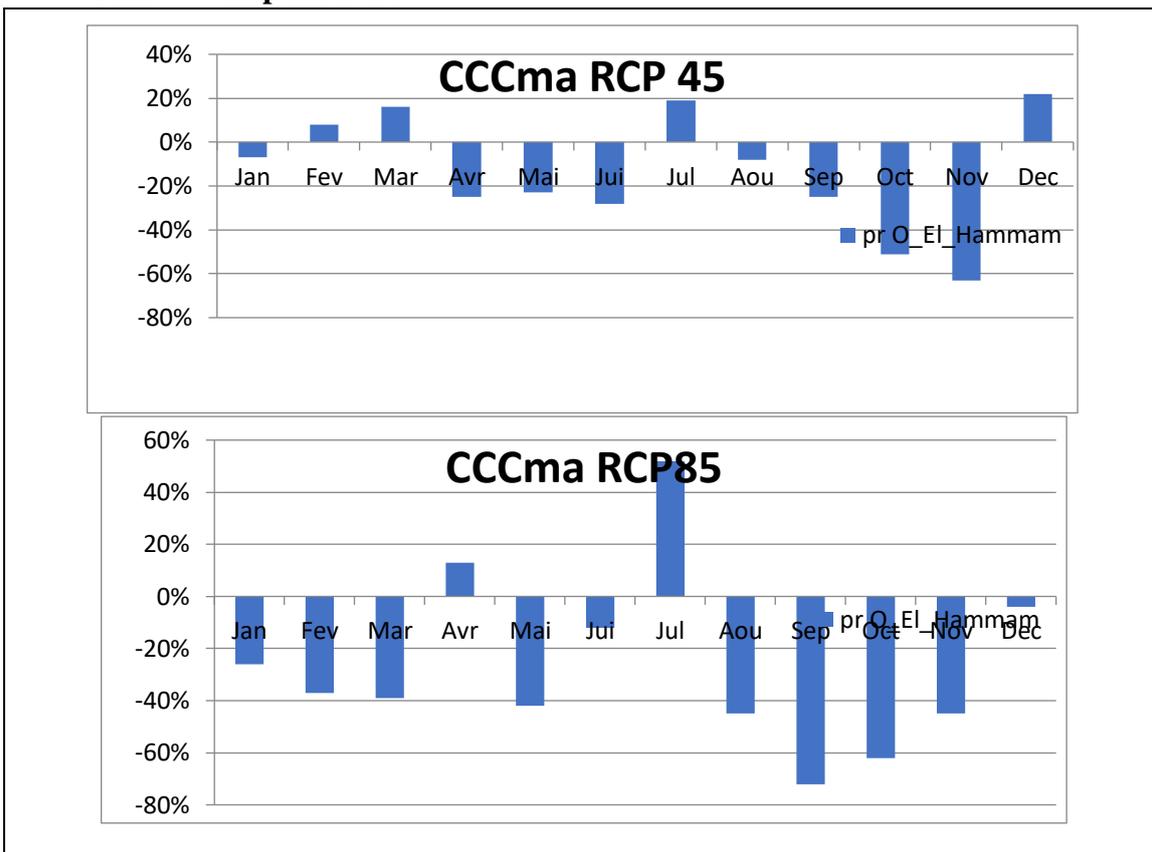


Figure III -7 : Les anomalies mensuelles de RR pour CCCma RCP 4.5/85 resp (haut /bas)

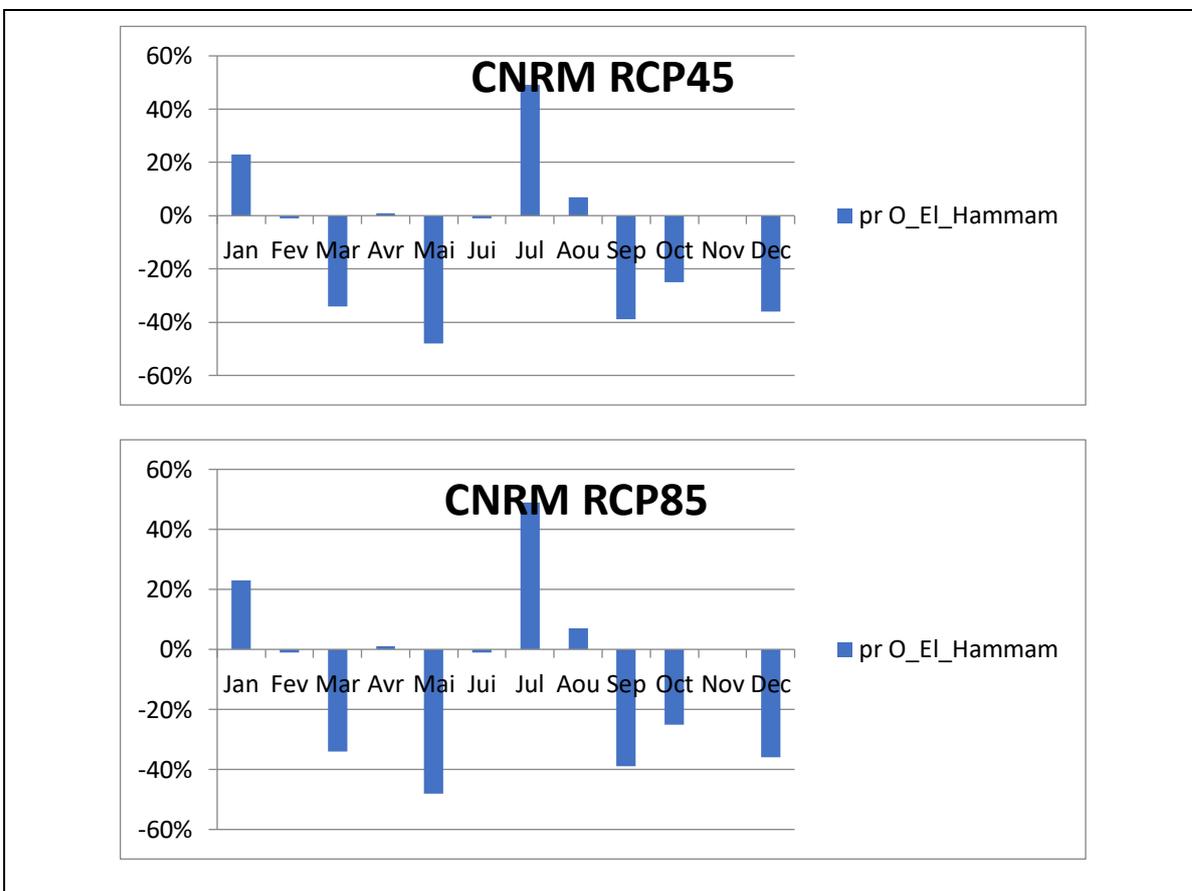


Figure III -8 : Les anomalies mensuelles de RR pour CNRM RCP 4.5/85 resp (haut /bas)

Les changements relatifs des précipitations mensuelles (%) pour l'horizon 2030 aux scénarios RCP4.5 et RCP8.5 pour chaque modèle. et pour la moyenne d'ensemble, par rapport à la période de référence. On peut voir que selon l'ensemble RCP4.5 et RCP8.5 pour cet horizon, il y a une diminution des précipitations pour l'ensemble des stations, cette diminution est plus marquée pour RCP8.5.

4 Chapitre IV Simulations des impacts du Changement Climatique sur les régimes hydrologiques de bassin versant El Hammam à l'horizon 2030

4.1 Les impacts du Changement Climatique sur les écosystèmes montagneux :

Les zones de montagnes font l'objet d'un intérêt croissant de la part des pouvoirs publics depuis une décennie. L'importance et le rôle de la montagne dans le développement durable ont été consacrés par une loi portant sur la protection des zones de montagnes dans le cadre du développement durable en 2004 (loi n°04-03 du 23 juin 2004). Les écosystèmes montagneux ont été, en outre, intégrés dans le processus général d'élaboration et de mise en oeuvre des instruments d'aménagement du territoire (SNAT et SRATs).

L'ensemble des massifs, monts, et piémonts tels qu'identifiés et délimités dans le cadre de l'étude du schéma directeur des zones de montagnes menée par le BNEDER, occupe une superficie de 8 719 077 ha, soit 3,66 % du territoire national. Cet espace couvre près de 3 millions d'hectares de forêts et de maquis et une superficie agricole utile de 3,5 millions ha, représentant 43% de la SAU nationale totale.

Les massifs montagneux du Nord du pays sont affectés par la double contrainte que leur imposent la dégradation accentuée des forêts (incendies, vieillissement...) et la crise de l'économie traditionnelle des montagnes.

Par ailleurs, l'accroissement de la population a entraîné la nécessité de défricher et de labourer de nouvelles terres. Ce défrichement se fait très souvent au détriment de formations forestières déjà dégradées. Néanmoins, ce phénomène reste très limité. Le milieu montagneux est soumis à une forte pression pastorale évaluée à 5 500 000 têtes qui risque d'aggraver la dégradation de ces zones déjà fortement fragilisées. Des études montrent que la charge pastorale est au moins quatre fois supérieure aux capacités d'équilibre.

La pression sur les ressources (défrichements, exploitation abusive et peu préservatrice des ressources) a conduit à la généralisation de l'érosion qui affecte l'ensemble des terres avec pour résultat la fragilité de nombreuses zones de montagne, la dégradation des terres et la diminution des terres de cultures et des surfaces boisées. La superficie des terres sujettes à l'érosion (zones instable à très instable) étant de 3 423 866 hectares, soit 40% de l'espace montagneux. Les effets de l'érosion se traduisent par des menaces de désertification susceptibles de modifier profondément l'écosystème 25. Il est important de mentionner que les écosystèmes enregistrent une stabilité relative sur le plan de la biodiversité du fait de la faiblesse de l'action anthropique .

- Ecosystèmes montagneux : Tendances générales de la biodiversité Écosystème (Niveau de perturbation) Tendances générales en termes de Biodiversité Implications des changements sur les moyens de subsistance et le développement social et économique Ecosystèmes des montagnes (Moyen). Une certaine stabilité Du fait de la faiblesse relative de la pression anthropique. Tendances vers la déforestation et changement du milieu.
- Baisse de la productivité pastorale des parcours forestiers (montagneux).
- Déclin et faible productivité des élevages (Bovins local, caprins).

Pour la montagne, elle constitue la zone d'action privilégiée des programmes forestiers et elle bénéficie d'un programme spécifique d'emploi rural (pour sept wilayas) qui permet, en particulier, la réalisation de travaux d'aménagement, de restauration et de défense des sols.

En référence à la loi n°04/ 03 du 23 juin 2004, relative à la protection des zones de montagne dans le cadre du développement durable, et le décret exécutif n°05/469 du 10/12/2005 fixant les études et les consultations préalables requises ainsi que l'ensemble des conditions, des modalités et des procédures devant permettre la détermination et le classement des zones de montagnes ainsi que leur regroupement en massifs montagneux , des études de détermination et de classification de 10 massifs montagneux ont été lancés par le MATET dans une première étape. Il s'agit de :

- 1- Massif de Tlemcen de Tellagh de Saida et de Daia ;
- 2- Massif des Traras de Sbaa Chioukh et de Tessala ;
- 3- Massif des Beni Chougrane ;
- 4- Massif du Dahra du Zaccar et du Chenoua ;
- 5- Massif de l'Ouarsenis ;
- 6- Massif Blidéen et de Médéa ;
- 7- Massif du Djurdjura ;
- 8- Massif des Bibans
- 9- Massif du Hodna;
- 10- Massif des Ouled Nail.

Le but de ces études consiste à fournir une analyse approfondie du massif montagneux, décompiler les informations statistiques et géographiques nécessaires à la description et à l'analyse de la situation des zones de montagne Par ailleurs, dans le cadre de préservation des

écosystèmes montagneux, il y a lieu de mentionner le programme quinquennal 2010/2014 portant sur la réalisation de plusieurs études.

4.2 Données et méthodologie

L'évaluation de l'impact du changement climatique sur le débit des cours d'eau nécessite l'utilisation de modèles pluie-débits, c'est-à-dire des modèles transformant les séries chronologiques climatiques en séries temporelles de débit. Dans cette étude, le modèle conceptuel GR4J journalier a été utilisé. Il a été choisi en raison de sa capacité à reproduire des débits aussi bien élevés que faibles (Pushpalatha et al., 2011). Le modèle GR4J est un modèle de type stockage qui a quatre paramètres. Le GR4J nécessite en entrée des séries chronologiques des précipitations quotidiennes et d'évapotranspiration potentielles. cettedernière a été calculée à l'aide de la formulation d'Oudin(Oudin et al., 2005). Le modèle GR4J et l'évapotranspiration potentielle d'Oudin ont été traitées avec le package airGRde R(Coron et al., 2017a ,b).

La robustesse des modèles hydrologiques, c'est-à-dire leur capacité à s'appliquer à différentes périodes ou bassins, est cruciale pour des applications à des conditions changeantes (Thirel et al., 2015). Dans ce travail, un exercice d'étalonnage-validation a été entrepris : un algorithme d'étalonnage automatique a été utilisé pour trouver la combinaison de paramètres qui conduisent aux meilleures simulations de débit (c'est-à-dire le débit simulé le plus proche du débit observé).

L'étalonnage a été effectué sur la période 2000-2006 et une validation a été effectuée sur la même période. Pour cet exercice, nous avons utilisé le forçage météorologique observé des stations pluviométriques du réseau ANRH sur la zone d'intérêt (des stations avec un ensemble complet de données quotidiennes de précipitations. L'étalonnage du modèle a été effectué en fonction des données de débit journalier observées.

Une caractéristique attendue du modèle pluie-ruissellement est de fournir des simulations de bonne qualité sur la période de validation. En effet, cela montre la robustesse du modèle, c'est-à-dire sa transférabilité temporelle, qui est une qualité nécessaire en particulier pour les applications d'impact du changement climatique (Klemeš, 1986 ; Thirel et al., 2015).

Pour évaluer la qualité des simulations, nous avons utilisé à la fois des critères numériques et une inspection visuelle. Afin d'évaluer la robustesse de ce calage avons gardé la chronique de débit entière. L'initialisation des taux de remplissage des deux compartiments production et routage a été faite en utilisant les valeurs obtenues au bout d'une année de fonctionnement, réinjectées en début de simulation. Nous évitons ainsi de supprimer une période de mise en route d'un an, et la validité de cette méthode est confirmée par le très bon Nash obtenu dès la première année (Nash de 0,86). Dans la suite de l'étude, les calages ont été réalisés en calant

Sur toute la période. L'étape suivante après l'exécution du modèle pour les périodes d'étalonnage et de validation avec l'ensemble de données météorologiques observées a été de produire des projections hydrologiques pour les périodes 2000-2006 et 2021-2040 en utilisant des projections climatiques différentes pour RCP4.5 et RCP8.5 utilisées du traitement du chapitre précédent, et une projection dite ensemble ou moyenne.

Les régimes des débits quotidiens dans le bassin de El Hammam ont été calculés pour chaque simulation, ainsi que pour l'ensemble dans les deux scénarios RCP.

Des analyses de l'écoulement simulé ont été effectuées à la fois pour la période de contrôle 2001-2006 et pour les périodes futures 2021-2040.

Calage des paramètres

Les valeurs du coefficient de Nash obtenues peuvent sembler assez faibles par rapport aux valeurs habituellement rencontrées dans des études de ce type. Il faut toutefois garder à l'esprit que le coefficient de Nash dépend de la capacité intrinsèque du modèle à reproduire les processus hydrologiques, mais aussi de la qualité des données utilisées. La qualité des mesures de débit est également sujette à caution dans la mesure où il s'agit d'un écoulement de type torrentiel, avec un débit calculé sur la base d'observations manuelles de hauteurs et de courbes de tarage pas toujours très fiables du fait des crues fréquentes [Chaponnière., 2005 et Simonneaux., 2015].

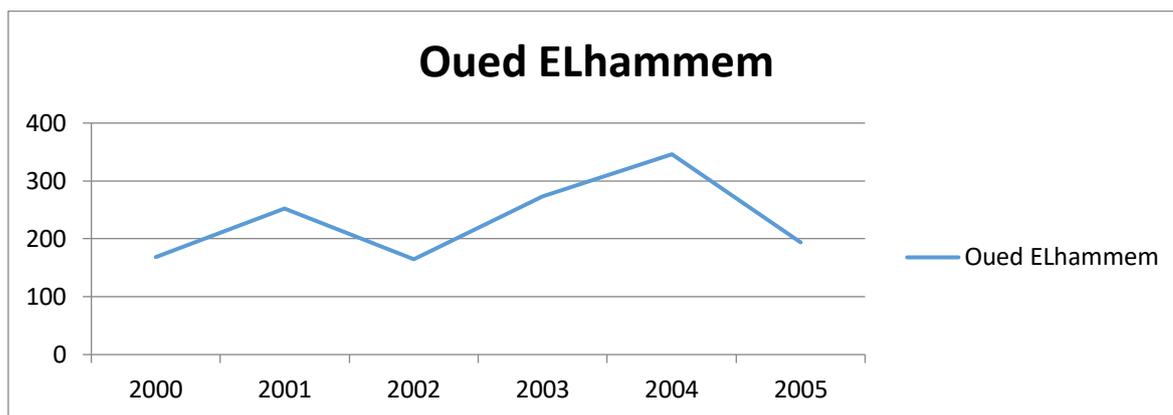
4.3 Etude de la variation de paramètres hydro-climatiques pour la période de référence

4.3.1 Etude des précipitations.

4.3.1.1 Etude des variations interannuelles.

Pour cette étude, nous avons pris en considérations les valeurs annuelles et mensuelles des précipitations de Oued El Hammam

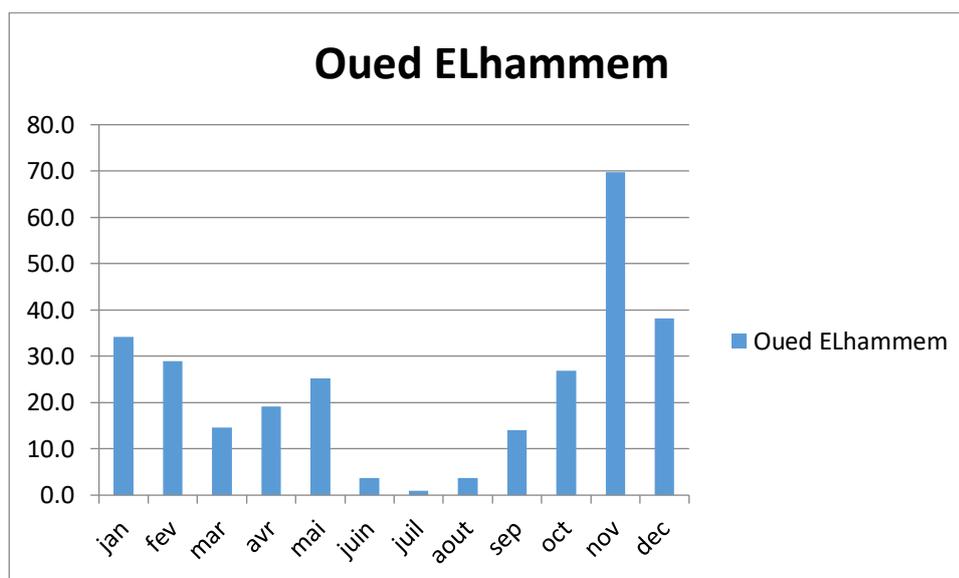
La moyenne des précipitations annuelles au niveau de la station de El Hammam est de 233,3 mm pour la période 2000 à 2006. La variation temporelle de ces précipitations annuelles, montre que le régime annuel est très irrégulier d'une année à l'autre, on a constaté que 3 années sur 6 dépassent la moyenne avec un maximum de 346,1 mm en 2004 et un minimum en de 164,7 mm en 2004.



FigureIV-1 La moyenne des précipitations annuelles du bassin El Hammam

4.3.1.2 Etude des variations mensuelles

Les variations moyennes mensuelles des précipitations varient au cours de l'année, la période pluvieuse s'étend de Septembre à Mai et on a un maximum de précipitation en mois de novembre 418,8 mm, les mois de Juin, Juillet et Août présentent des pluies faibles à nulles en juillet.



FigureIV-2 : Les variations moyennes mensuelles des précipitations du bassin El Hammam

4.3.1.3 Etude des Variations saisonnières

La distribution saisonnière des précipitations, montre que l'automne est la saison la plus humide ; avec une sécheresse en période d'Eté. Et on remarque, une période pluvieuse regroupant les saisons d'Automne, d'Hiver et de printemps une saison sèche représentée par l'Eté.

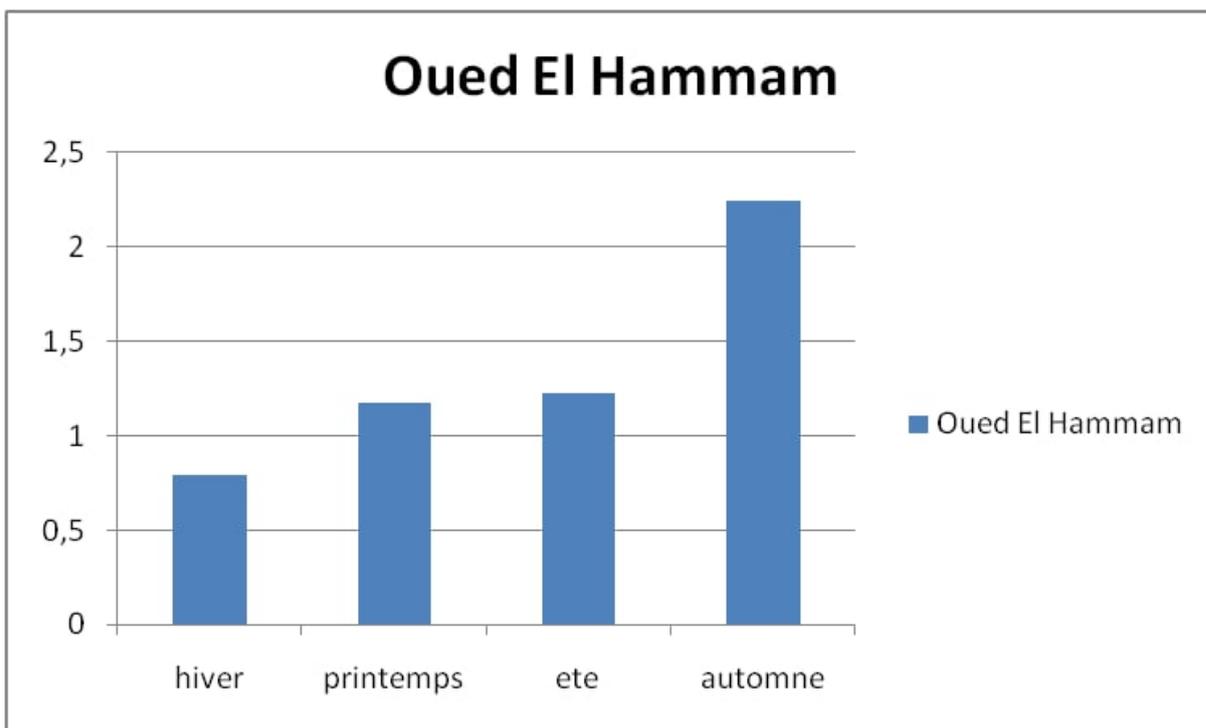


Figure IV-3: La distribution saisonnière des précipitations du bassin El Hammam

Etude des débits (ou les lames d'eaux écoulées)

Pour cette étude, nous avons pris en considération les valeurs annuelles et mensuelles des débits.

Nous disposons d'une série de données hydrométriques représentant 6 ans d'observation (sep 2000-aout 2006).

4.3.1.4 Etude des débits annuels

Les variations interannuelles des débits , montrent une importante lame d'eau écoulée, enregistrée au niveau de la station en 2000, 2001 et 2003 des années où la région a connu d'importantes précipitations entre 252 mm et 273,7 mm

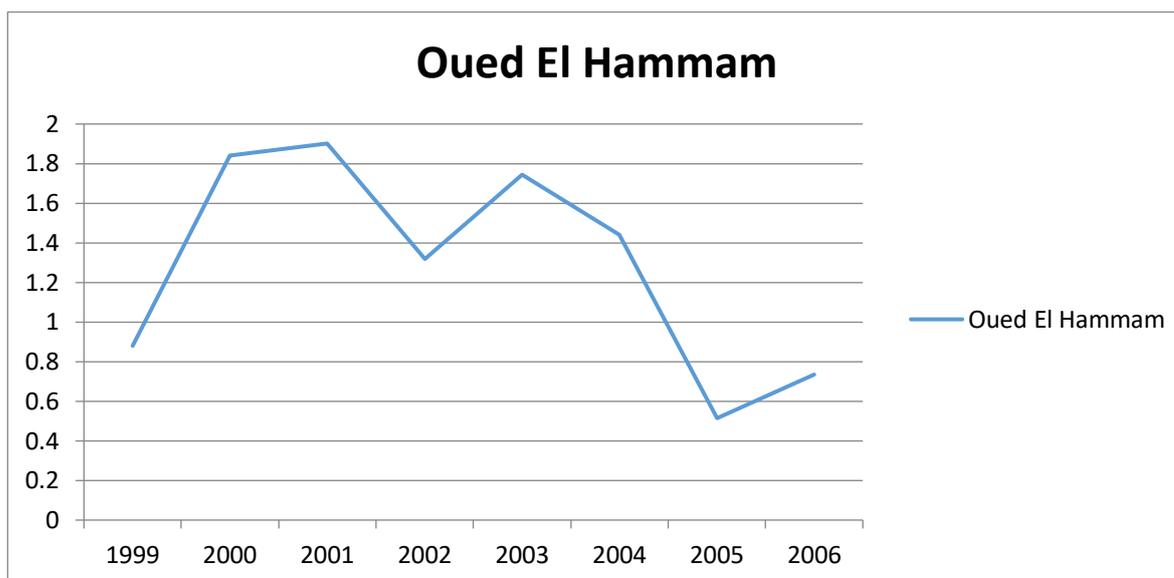


Figure IV-4 : Les variations interannuelles des débits du bassin El Hammam.

4.3.1.5 Etude des débits mensuels

Les débits moyens mensuels observés au niveau de la station d'El Hammam montrent avec un maximum enregistré au mois d'octobre de 3.41 m³/s.

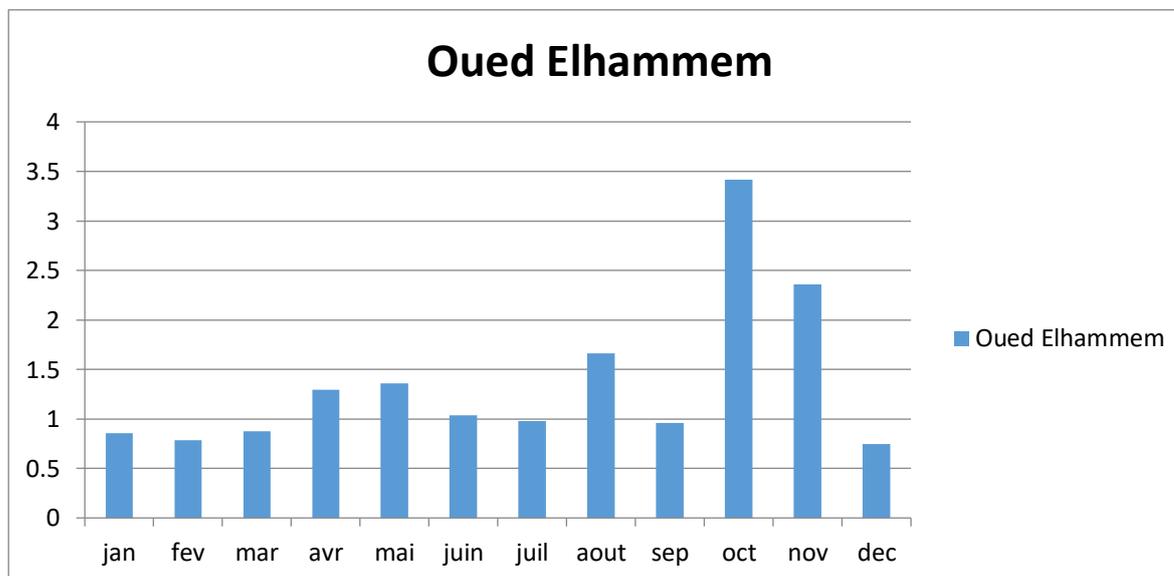


Figure IV-5 : Les débits moyens mensuels du bassin El Hammam

Variations saisonnières des débits

La distribution saisonnière des débits montre que c'est en Automne que s'effectue l'essentiel des écoulements.

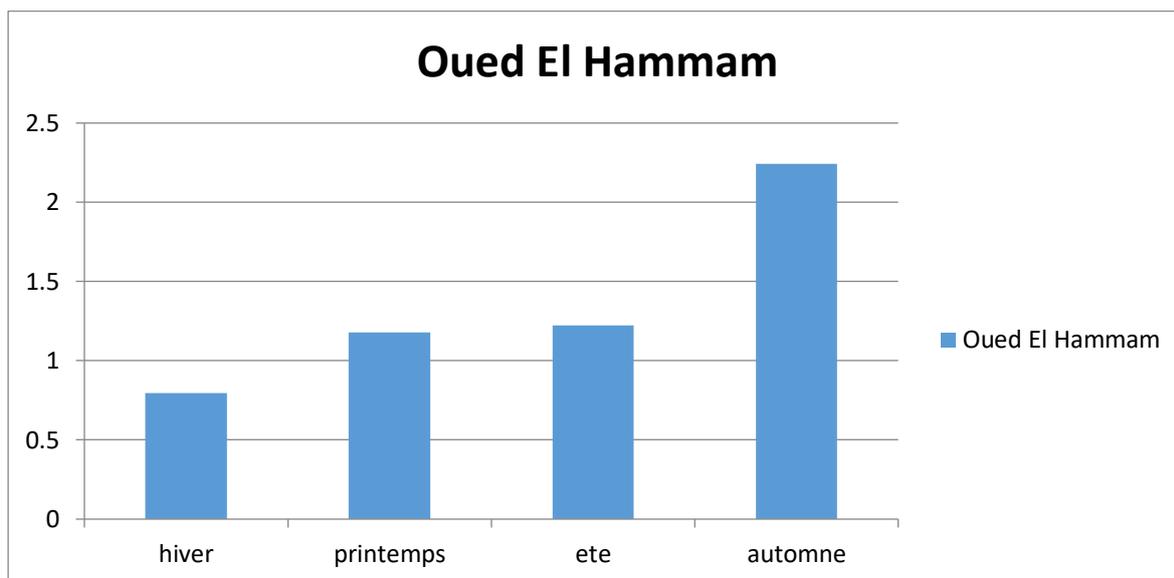


Figure IV-6 : La distribution saisonnière des débits du bassin El Hammam

4.4 Modèle journalier GR4J

4.4.1 Résultat pour la période de référence 1999-2006.

4.4.1.1 Graphiques pluie-débit simulés et observés

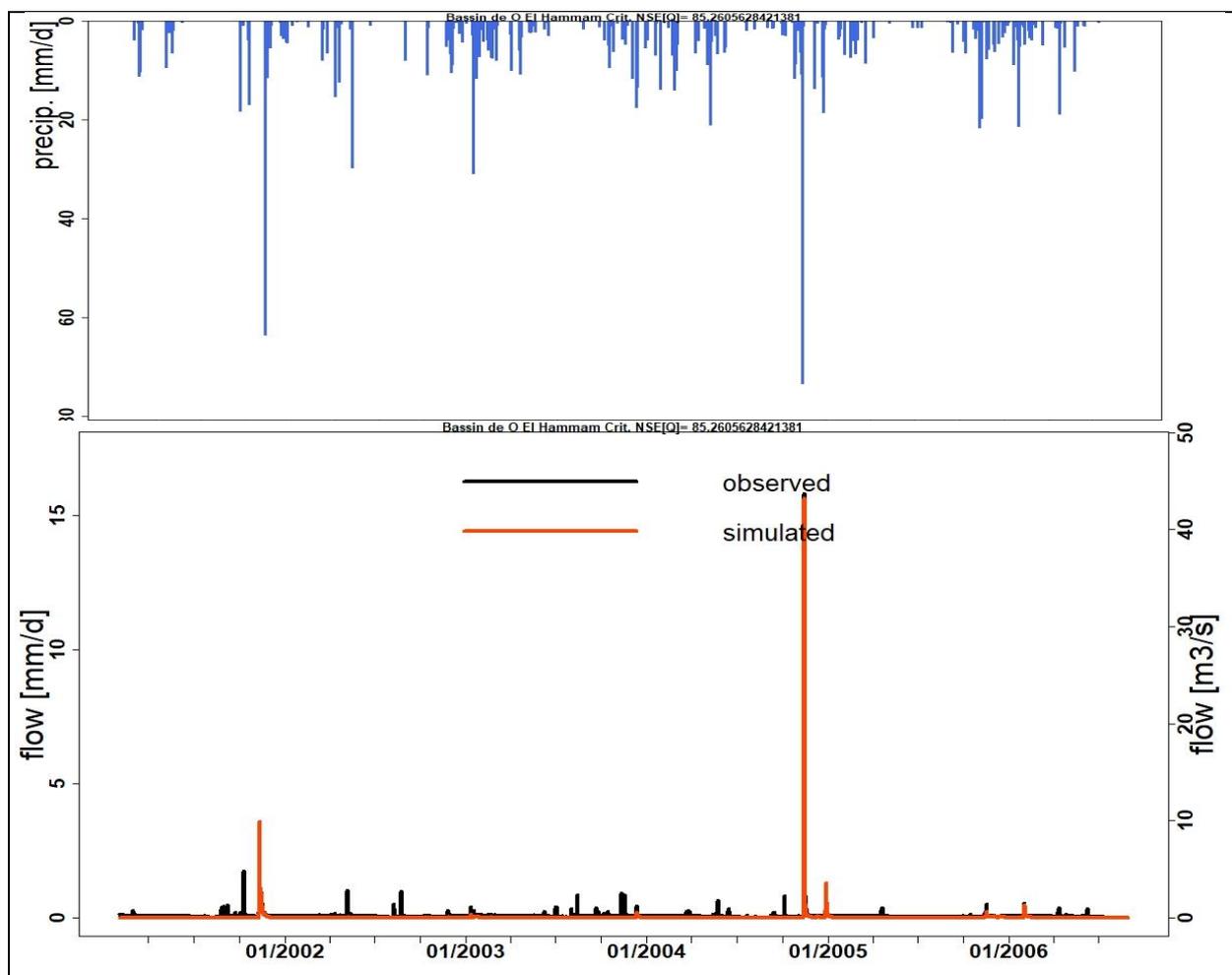


Figure IV -7 :Résultat des simulations pluie et débit quotidien de GR4J, pour la période de référence 2002-2006 d'Oued El Hammam.

Les variations moyennes dans la Figure IV-7 montre les débits journaliers observés et simulés à la station hydrométrique du El Hammam, pour la période d'étalonnage 2001-2006 en utilisant le modèle GR4J

Les précipitations observées dans le bassin du El Hammam sont indiquées dans le panneau supérieur de la figure. On peut observer une légère sous-estimation des faibles débits par le modèle alors que les débits élevés sont généralement bien reproduits. Les résultats pour la période d'étalonnage montrent $NSE = 85\%$. Les résultats pour la période de validation de 2001-2006 sont plus faibles mais restent relativement bien en accord avec le flux observé. On peut voir dans le modèle que bien qu'il existe un accord global entre les débits observés et simulés, le modèle sous-estime les débits élevés (inondations) et surestime les faibles débits pendant la saison sèche (juin-septembre) sauf dans quelques cas. Le régime d'écoulement interannuel est globalement bien reproduit.

Les courbes de cette figure présentent une grande concordance entre les débits simulés et les débits observés sur la période septembre 2001 à aout 2006 :

12-10-2004 débit simulé 16.5 mm et débit observé 17.6 mm, c'est le débit maximal enregistré pour la période.

La présence de certaines différences, mais puisque l'importance relative des débits mesurés n'est pas justifiée, les précipitations en ces phases sont présentes donc, la réponse du modèle semble plus correcte.

Pour cette période le modèle semble minimiser l'effet de l'absence des précipitations pendant l'été. Les valeurs nulles des débits observés seraient plus réalistes que celles simulées par notre model.

Ces résultats indiquent que le GR4J est robuste pour le bassin du El Hammam, c'est-à-dire que les performances du modèle ne chutent pas trop sur une période de validation indépendante. Par conséquent, l'application du GR4J pour la présente étude de cas sur le changement climatique peut être effectuée avec une confiance raisonnable quant à la fiabilité des résultats.

4.4.1.2 Graphique des régimes saisonniers simulés et observés

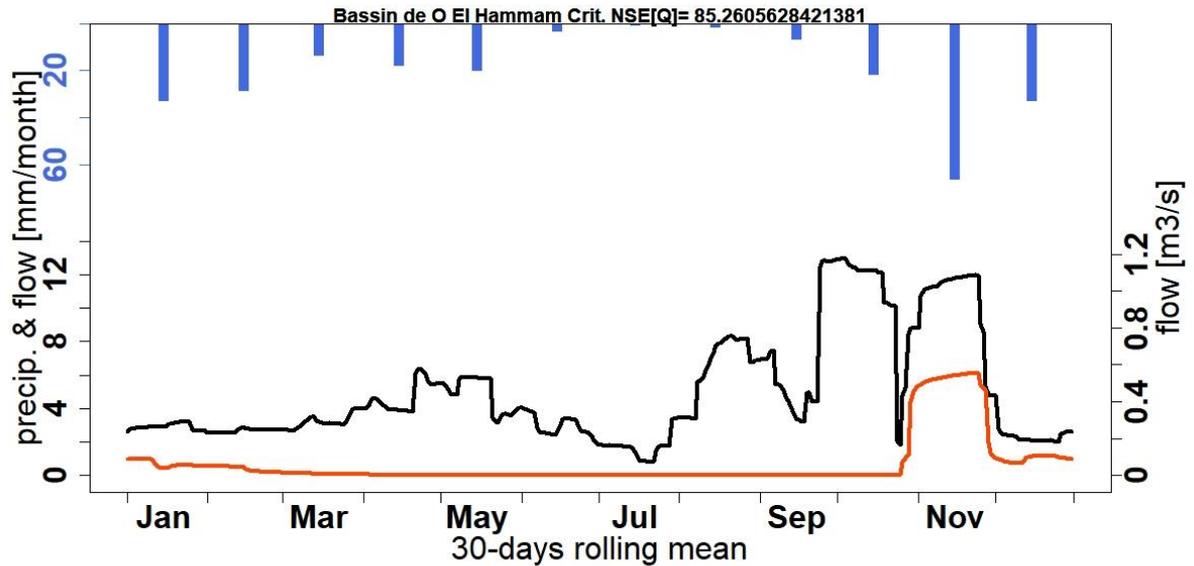


Figure IV-8 : Résultat des simulations régimes de GR4J, pour la période de référence 2002-2006

Le régime des débits mensuels simulés et observés possèdent la même allure, sur tous les débits simulés en automne, on distingue une légère différence cela est dû à la sécheresse dans la région qui a conduit à des infiltrations d'eau dans le sol.

Malgré ces handicaps concernant les données utilisées, le modèle est capable de reproduire la variabilité saisonnière et le cycle hydrologique du bassin du El Hammam. On observe également une bonne reproduction des variations interannuelles des débits. Ces éléments permettent de penser que le modèle est adapté à l'environnement étudié et qu'il est correctement paramétré. On observe en revanche pour GR4J, par rapport aux intervalles fournis par Perrin, des valeurs X_1 plus faibles et des valeurs X_3 plus fortes. Ces écarts sont peu surprenants étant donné que les domaines fournis par Perrin [2003] concernent des bassins français ayant donc un fonctionnement a priori très différent de notre bassin. Bien que les paramètres d'un modèle conceptuel puissent difficilement être reliés à des caractéristiques physiques. Cette première partie de la calibration de GR4J sur les données de références du bassin versant sélectionné, nous a encouragés à utiliser ce modèle pour les simulations des impacts du changement climatique future sur l'hydrologie des bassins, que nous illustrons les résultats dans ce qui suit

4.4.2 Résultats des simulations pour l'horizon 2030

Dans cette partie nous présentons les résultats des différentes simulations des débits pour l'horizon 2030 ; de l'ensemble des modèles

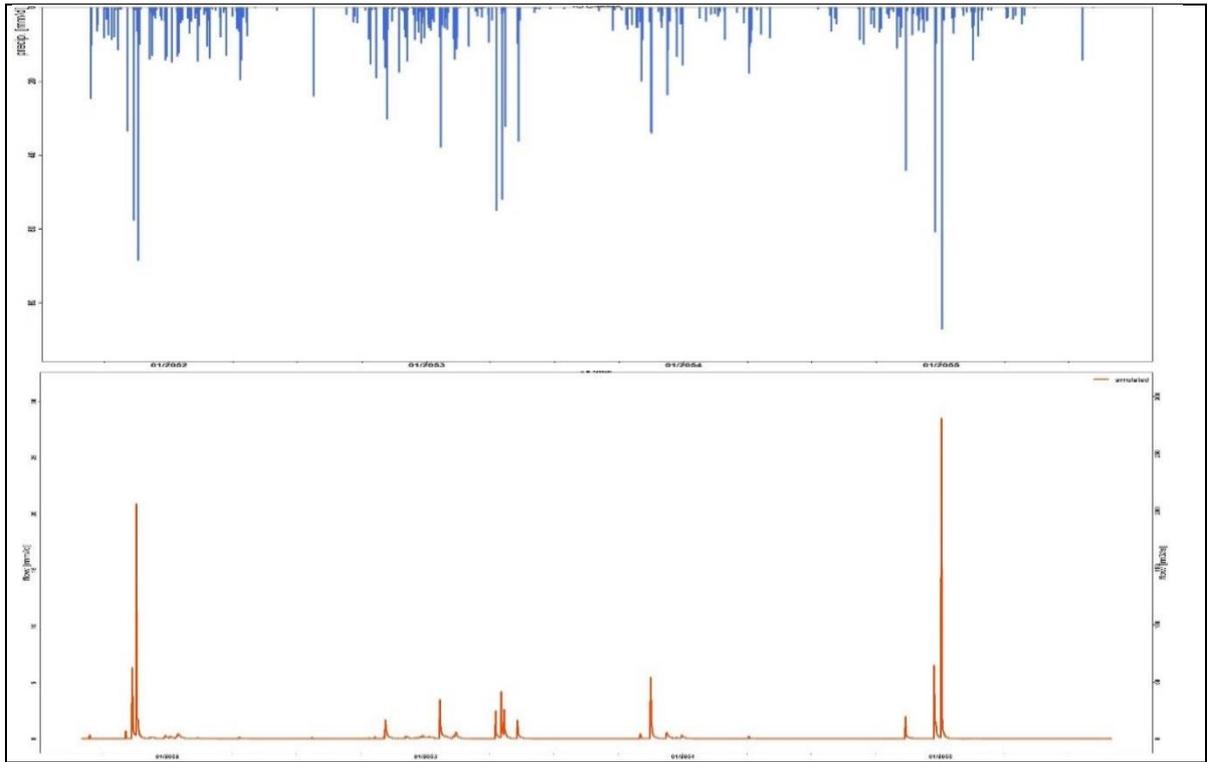


Figure IV-9 : Résultat des simulations des débits journaliers, de l'Oued El Hammam GR4, horizon 2030,ensemble RCP 4.5

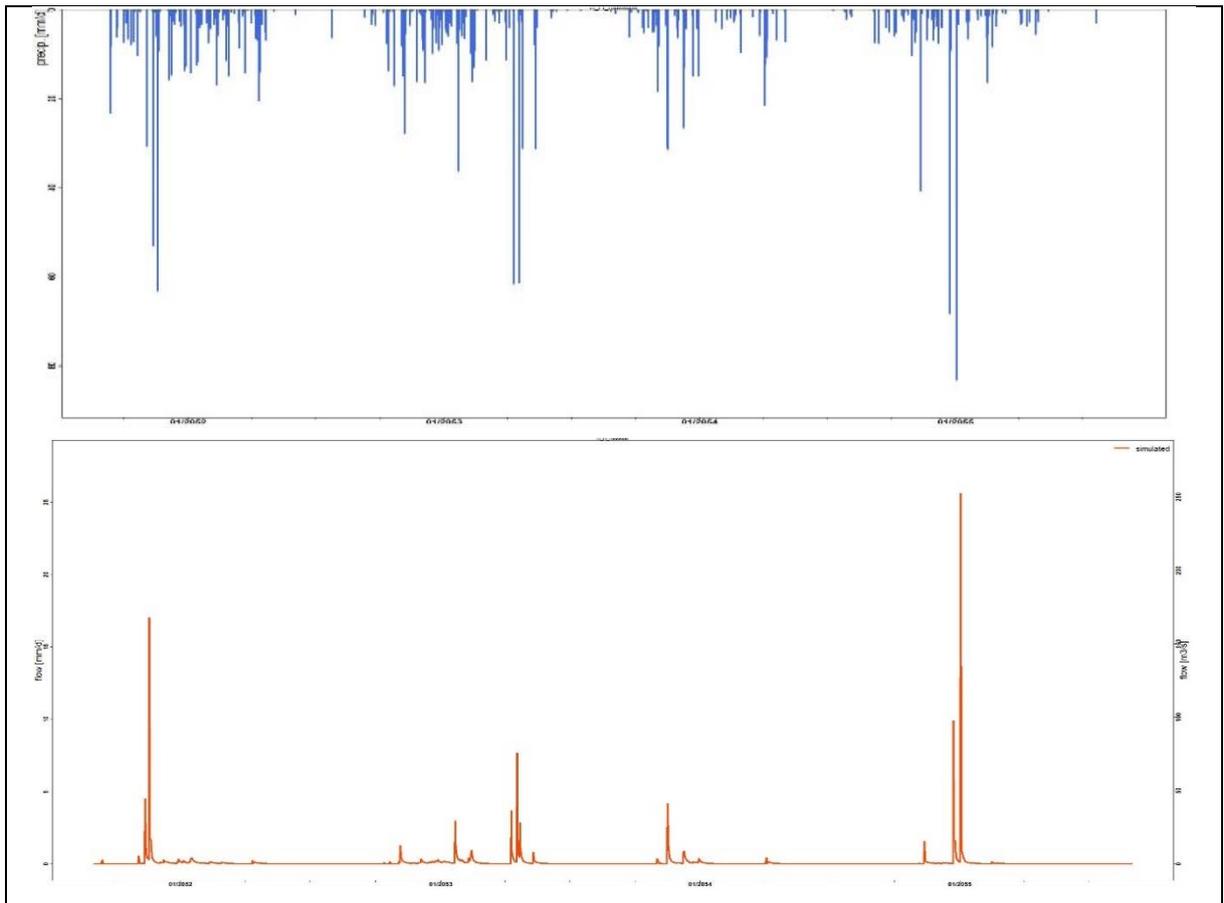


Figure IV-10 : Résultat des simulations des débits journaliers, de l'Oued El Hammam GR4, horizon 2030 ,ensembleRCP 8.5

Chapitre IV : Simulations des impacts du Changement Climatique sur les régimes hydrologiques de bassin versant El Hammam à l'horizon 2030

Les figures présentent le résultat de la simulation des débits qui correspond à une série de 4 années de données à l'horizon 2030, on remarque qu'il y a une réponse des débits par rapport aux séries des précipitations.

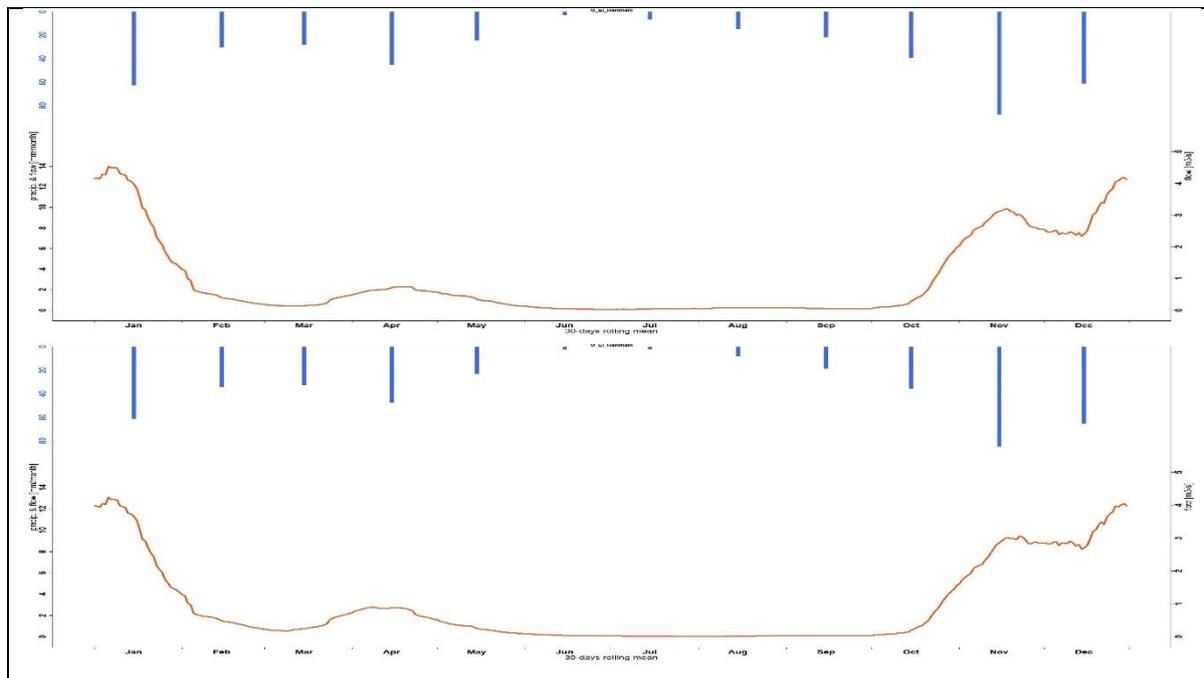
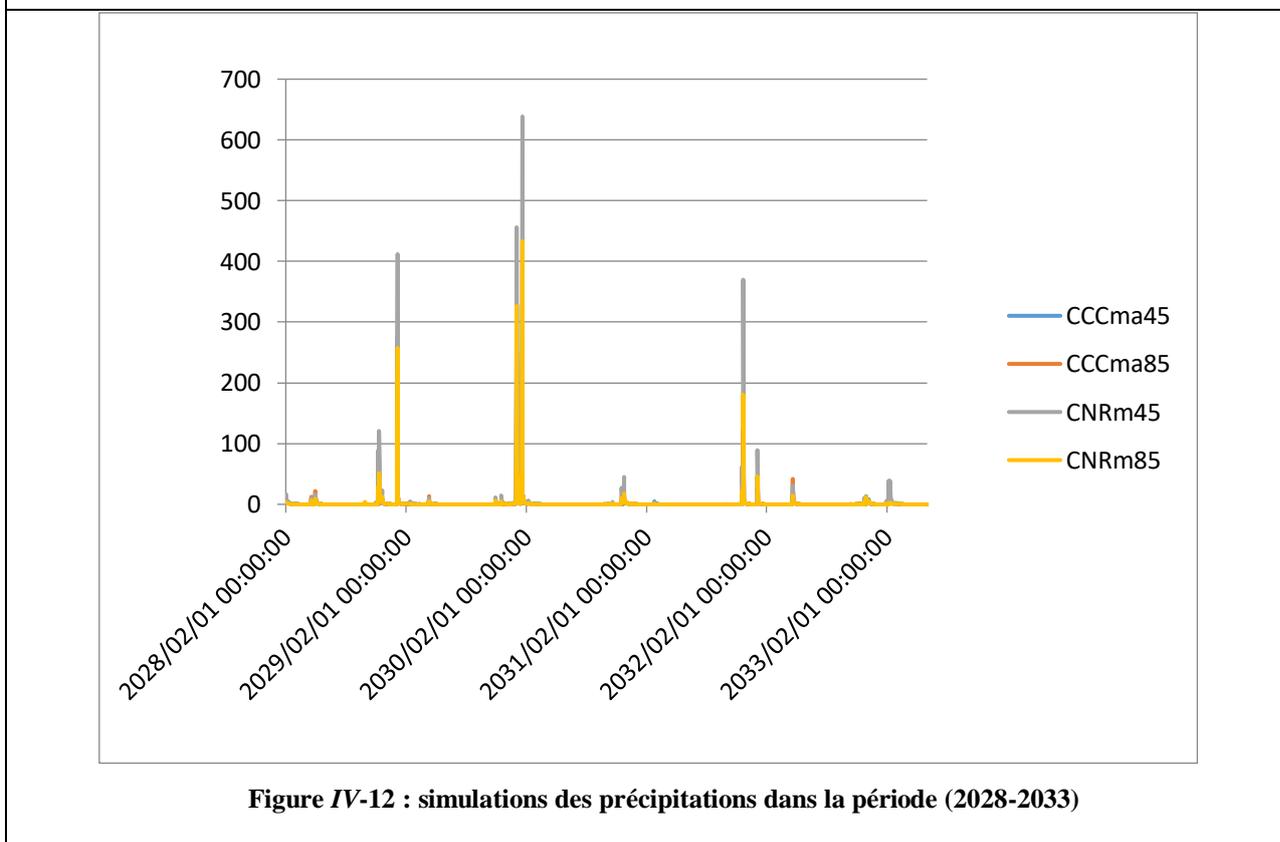
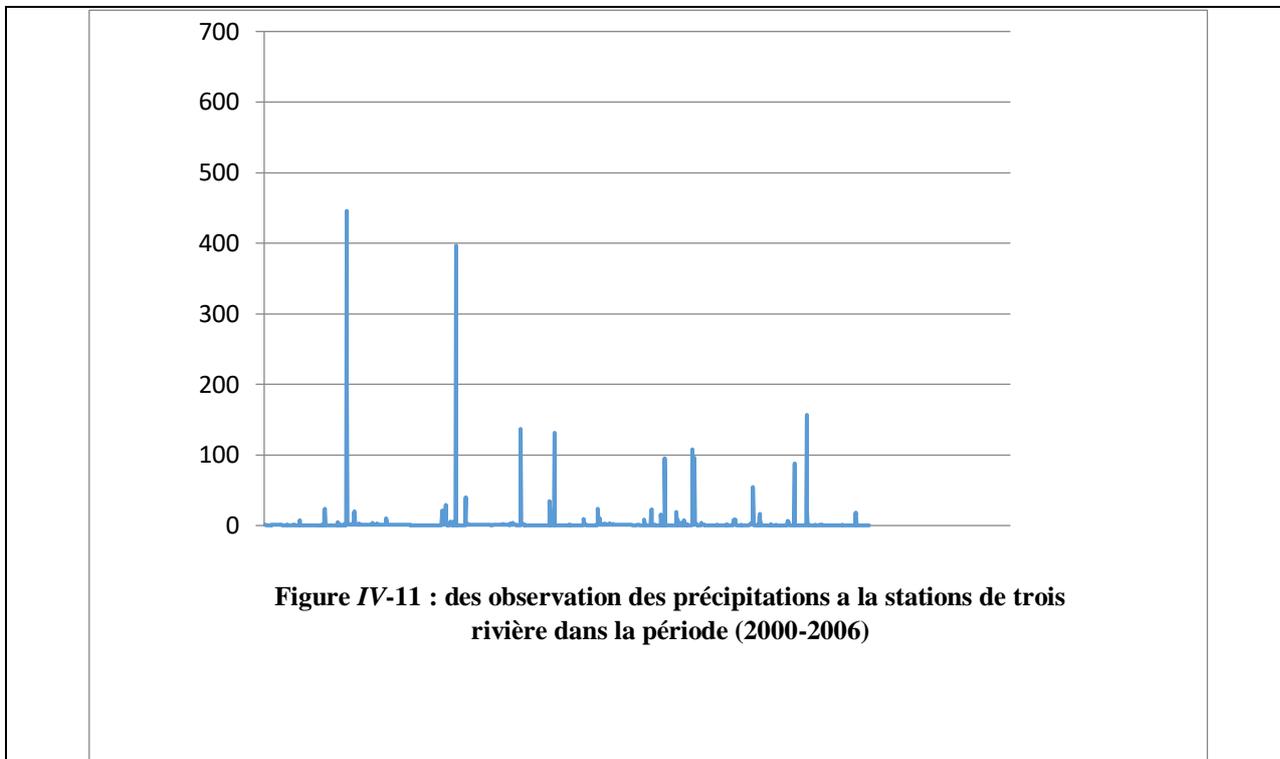


Figure IV-11 : Résultat des simulations des débits mensuels Oued El Hammam Régime simulation GR4 2030 ensemble RCP 4.5/ RCP 8.5 (resp. haut et bas)

Le régime des débits mensuels simulés possèdent la même allure presque pour RCP 4.5 et RCP 8.5

Nous notons que nous avons des résultats cohérents et similaires entre RCP 4.5 et RCP 8.5 à toutes les stations d'oued El Hammam et que ces résultats étaient logiques étant donné le type du climat dans cette zone.

Précipitations



Chapitre IV : Simulations des impacts du Changement Climatique sur les régimes hydrologiques de bassin versant El Hammam à l'horizon 2030

	Modèles	Min	Max	Moyenn e	Ecart-type	Coef.var	Période de retour
El Hammam	CCCma_RCP 4.5	0	93,3	1,144	5,47	4,78	2,14
	CCCma_RCP 8.5	0	78,1	1,034	4,93	4,77	4,04
	CNRM_RCP 4.5	0	117	1,252	6,09	4,87	2,02
	CNRM_RCP 8.5	0	94,1	1,163	5,47	4,71	2,14
	Observation	0	73.5	0.65	3.27	5.03	

Table IV- 1 : Résumé des statistiques sur des séries de précipitations simulées à l'horizon 2030 et observées dans la période (2000-2005)

on remarque une augmentation de la moyenne des précipitations annuelles qui peut atteindre 1,252 mm donner par le modèle CNRM_RCP 4.5 dans les scenarios futurs générés par les 4 modèles par rapport à notre période de référence qui est une moyenne de 0,65 cette augmentation est causé par les valeurs extrêmes simulées car on remarque qu'on a des valeurs supérieures à la valeur maximale dans la période d'observation générées par les 4 modèles qui peut arriver à 117mm dans le modèle CNRM_RCP 4.5.

Comme on a observé période de retour assez courte des valeurs supérieures à la valeur maximale dans la période d'observation qui est de 73,5 mm, qui est à peu près égale à 2ans dans 3 modèles.

Débit

	Modèles	Min	Max	Moyenne	Ecart- type	Coef.var %	Période de retour
Oued El hammam	CCCma_RCP 4.5	0,0024	532,016	1,0966	12,82968	12	50.5
	CCCma_RCP 8.5	0,002	360,749	0,8188	8,200409	10,0151	/
	CNRM_RCP 4.5	0,0023	638,48	1,4227	16,87051	11,858	6.73
	CNRM_RCP 8.5	0,0025	433,153	1,0821	12,0862	11,1692	/
	Observation	0	445,819	2,064	16,144	7.8215	

Table IV- 2 : Résumé des statistiques sur des séries de débits simulées à l'horizon 2030 et observées dans la période (2000-2005)

On remarque une baisse de la moyenne des débits annuelles qui a diminuer jusqu'à 360,749 mm du modèle CCCma_RCP 8.5 une diminution remarquable par rapport à la période de référence qui est égale à 445,819 mm , et on remarque aussi que la valeur maximale de la période d'observation a été dépasser que dans 2 modèles qui peut atteindre 532,016 mm/d dans le

modèle CCCma_RCP 4.5 avec une période de retour assez grande (d'une quantité de débit supérieur à 445,819 mm) égale à 50,5 ans et qui peut atteindre 638,48 mm dans le modèle CNRM_RCP 4.5 avec une période de retour assez grande (d'une quantité de débit supérieur à 445,819 mm) égale à 6,73 ans

Conclusion

Dans l'optique de réaliser une étude d'impact du changement climatique, il est envisagé ici d'utiliser des précipitations simulées par un modèle climatique pour forcer le modèle GR4J. L'enjeu de cette étude est la calibration pour ensuite modéliser les débits grâce à GR4J, à partir des données de précipitations simulées et spatialisées. Des calibrations du modèle ont donc été réalisées à partir des chroniques de débits observées, des précipitations et de l'ETP calculé par la formule d'Oudin. Notons que ces précipitations sont des sorties qui ont subi une correction des biais et une décente d'échelle spatiale. Le premier constat : les calibrations effectuées sur des précipitations observées ont présenté de très bonnes robustesse et performance, et ont permis la modélisation de débits très proche du débit observé. Les chercheurs ont tenté de mettre au point des nouvelles approches aussi bien des méthodes quantitatives que qualitative pour pouvoir évaluer l'impact des changements climatiques, en tenant compte des intérêts des gestionnaires du territoire en les associant à toutes les phases de projet concernant l'adaptation avec les changements climatiques.

Conclusion et perspective

Quelques analyses préliminaires de l'échantillon des observations ont montré un comportement problématique d'un nombre limité de quelques séries de données. En effet, on assiste parfois à des valeurs de débit plus élevées que les pluies correspondantes. Ceci peut être imputé à une surestimation ou sous-estimation de ces variables ou encore à la différence entre la délimitation de notre bassin hydrogéologique et topographique ou encore à un apport ou perte non détectés.

Nous avons choisi de garder la totalité de l'échantillon de données sans aucune sorte de traitement a priori, en l'absence d'outils rigoureux et systématiques de discrimination. Dans ce contexte, on a utilisé un modèle global de type GR, et on a étudié son architecture, son fonctionnement et les différentes versions développées par le CEMAGREF. Ensuite on a proposé l'utilisation d'un modèle GR4J. Nous avons choisi cette version du modèle car il s'agit d'une version facilement modifiable.

La simulation faite sur les débits du bassin est satisfaisante. Cette performance du modèle nous permet de conclure qu'on a réussi à modéliser de manière cohérente des écoulements à l'exutoire et que le schéma du modèle proposé est satisfaisant. Bien que la modélisation présente de nombreuses imprécisions, les concepts développés semblent prometteurs et l'amélioration de la modélisation passe par une étude plus fine de la génération des écoulements non glaciers (liés aux précipitations), et aussi par l'amélioration du modèle de fonte glaciaire (pas de temps plus fins). On a réussi avec un modèle très simple et avec un minimum de variables d'entrées (Pr, T, ETP) à modéliser de manière cohérente les débits observés à l'exutoire du bassin versant.

Il est important de noter que notre objectif n'est pas là de tendre vers une projection réaliste du devenir du bassin. Tout au plus, nous pourrions prétendre avoir défini et produit des représentations raisonnables des projections climatiques, en réalisant une correction des biais et une descente d'échelle statistique, garantissant une fiabilité optimale. Mais ce qui nous intéresse particulièrement à travers ces travaux, c'est de pouvoir cerner l'importance qualitative et quantitative du changement climatique, en plaçant son impact en perspective de celui d'autres changements attendus dans le bassin.

Cette étude montre de nouvelles découvertes hydro climatiques pour le bassin. L'Algérie et les pays voisins connaissent déjà une baisse importante de la disponibilité de l'eau. Les tendances projetées pour les précipitations, l'évapotranspiration et le débit présentées dans cette étude auront des effets majeurs pour la région. Dans cette étude, nous avons utilisé un ensemble

de 4 RCM, certains d'entre eux ayant une très bonne résolution (le domaine AfiCordex). Nous avons évalué leurs tendances par rapport aux observations.

Bien qu'il y ait un écart important entre les différents modèles, une tendance à la baisse des précipitations peuvent être observées dans la majorité des modèles pour l'horizon 2030 et surtout pour le scénario RCP8.5. Les résultats présentés dans cette étude montrent les effets du changement climatique sur les régimes des débits dbassin. Ces tendances sont dramatiques pour la région en termes de disponibilité future d'eau et de pénurie d'eau. Nous suggérons également que la modification de la relation pluie-ruissellement pourrait conduire à un impact accru des effets combinés de la diminution des précipitations et de l'augmentation de l'évaporation sur la disponibilité des ressources en eau.

L'utilisation de modèles hydrologiques plus détaillés qui combinent également les effets des changements d'utilisation des terres sur le cycle hydrologique et les obstructions de l'eau sur le débit en aval peut affiner nos connaissances et notre connaissance du débit futur. Les décideurs devront décider comment adapter la gestion de leur secteur de l'eau sur la base de tels scénarios climatiques et projections hydrologiques. Les résultats ici présentent l'écart entre les meilleurs et les pires scénarios et la moyenne d'ensemble. Ils fournissent également quelques indices concernant la qualité de chaque combinaison GCM / RCM pour la période de contrôle. Les résultats présentés ici peuvent aider les décideurs à mieux planifier la gestion de l'eau en fonction des changements climatiques prévus.

Le modèle GR4J donne des résultats honorables avec notamment une bonne reproduction de la forte variabilité saisonnière et interannuelle. Les valeurs obtenues pour le Nash ne sont pas très hautes comparées à d'autres études mais elles demeurent néanmoins satisfaisantes surtout dans notre contexte caractérisé par une représentativité limitée des données d'entrée en termes de précipitations et de températures ainsi que la longueur des séries chronologiques. Malgré ces incertitudes, le modèle a été capable de reproduire la variabilité saisonnière et le cycle hydrologique du bassin.

Nous encourageons donc à poursuivre l'évaluation des modèles conceptuels pluie-débit dans les zones semi-arides car ces modèles qui peuvent être facilement appliqués avec peu de paramètres ont vocation à être exploités pour gérer la ressource en eau disponible ou bien pour tester des scénarios climatiques. Compte tenu des changements climatiques importants attendus dans les prochaines décennies, et du fait que le manteau neigeux est très sensible aux changements de température, on doit s'attendre au cours du XXI^e siècle à une modification importante du régime hydrologique.

5 Bibliographie

- Abbott, R. e. (1996).
- Abdelguerfi. (2003).
- Abdelguerfi et Laouar. (2000).
- al., C. e. (1975).
- Austin et al. (1975).
- Boé, J. (2007.). Changement global et cycle hydrologique : Une étude de régionalisation sur la France. *Ph.D. dissertation, Université Paul Sabatier - Toulouse III, Ecole doctorale "Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace".* .
- Boé, J. (2012). *Journée «Les méthodes de désagrégation spatio-temporelle des précipitations.*
- Bouanani A. (2004). Hydrologie, transport solide et Modélisation : étude de quelques sous-bassins de la Tafna (NW-Algérie) . *Thèse doctorat d'état, université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 250.*
- Boufenar- Zaghouan et Zaghouan. (2006). Guide des principales variétés de céréales à paille en Algérie (blé dur, blé tendre, orge et avoine). *1er édition, ITGC, Alger, 154.*
- Boulal et Zaghoun O., El Mouradi M. . (2007). *Guide pratique de la conduite des céréales d'automne (blé et orge) dans le Maghreb (Algérie, Maroc, Tunisie).*
- CARROGET A., P. C. (2017). Explore 2070 : quelle utilisation d'un exercice prospectif sur les impacts des changements climatiques à l'échelle nationale pour définir des stratégies d'adaptation ? *Sciences Eaux et Territoires, 22, 4-11.*
- Cherfia . (2010).
- Christian, J. R. et al. . (2010). The global carbon cycle in the CCCma earth system model CanESM1: preindustrial control simulation. *J. Geophy. Res. (Biogeosciences), 115.*
- Drouiech. (2010).
- Edijatno, Nascimento, N.O., Yang, X., Makhlof, Z. et Michel, C. . (1999). GR3J: a dailywatershed model with three free parameters. *Hydrological Sciences Journal 44, 263-277.*
- Ellouze. (2008).
- Estupina Borrell V. (2004). Vers une modélisation hydrologique adaptée à la prévision opérationnelle des crues éclair : Application à de petits bassins versants du sud de la France. . *Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 254.*
- Feillet. (2000).
- Gate. (1995).
- GAUME E. . (2002). Hydrologie de versant et de bassins versants et modelisation pluie-debit-Cours . *DEA en Sciences et Techniques de l'environnement,Ecole Nationale des Ponts et Chaussées france.*
- Gaume. (2000). Hydrologie: Cycle de l'eau et modélisation pluie-débit,. *ENPCCEREVE.*

- GNOUMA. (2006). Aide a la calibration d'un rnodele hydrologique distribue au moyen d'une analyse des processus hydrologiqucs : application au bassin versant de l'Yzeron. *These de Doctoral, I 'Unite de Recherche en Hydrologie-Hydraulique Cemagref de Lyon* , 329.
- Guardia ,P. (1975). Geodynamique de la marge alpine du continent africain d'apres l'etude de l'Oranie nord occidentale. *These .Doct. Nice*, 256 p.
- Hamadache. (2013). Grande cultures : principaux itinéraires techniques des principales espèces de grandes cultures pluviales cultivées en Algérie et en Afrique du nord (agriculture conventionnelle), le blé,. *TOME 1* , 256.
- IPCC. (2007).
- IPCC. (2013).
- IPCC. (2014). Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on. *Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Iturbide M, B. J.-M.-M. (2018). The R-based climate4R open framework for reproducible climate data access. *Environmental Modelling & Software*.
- Jensen. (1992).
- kellou. (2005).
- Knippertz. (2003).
- M. Iturbide, J. B.-M.-M. (2019). The R-based climate4R open framework for reproducible climate data access and post-processing. *Environmental Modelling & Software*. DOI: /10.1016/j.envsoft.2018.09.009, 111, 42-54.
- M. VAUCLIN & G. VACHAUD,. (1991). Modélisation des écoulements d'eau dans le milieu naturel : approche déterministe ou stochastique ? . *Institut de mécanique de Grenoble*.
- Madr. (2011).
- Madsen H. (2000). Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. *Journal of Hydrology* 235, 276-288.
- MAFTAI. (2002). Etudes concernant les écoulements superficiels modélisation spatialisée de l'écoulement sur le bassin versant de Voinesti-Roumanie.
- Makhlouf Z., Michel C. (1992). Relation entre les paramètres d'un mode le globale Pluie-Debit et les caracteristiques physiques d'un bassin versant Breton. *CEMAGREF journal hydrologiques; Orstom*, 17.
- Marc j. (2013). Orge, avoine, blé, seigle, comment les reconnaître Disponible sur. petanielle.org/public/Ble_orge_avoine_seigle_octobre_2013.pdf.
- Martin. (2013). *Downscaling à fine résolution spatiale des températures actuelles et futures par modélisation statistique des sorties ALADIN-climat sur les Alpes-Maritimes (France)* .
- Mathevet . T. (2005). Quels modèles Pluie-Débit globaux au pas de temps horaire? Développèrent empiriques et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants. *Thèse de Doctoral, Cemagref Ecole Nationale du Génie Rural*.

- Mazoyer et al. (2002). La rousse agricole : le monde agricole au XXI .
- Meddi M. & Sadouk BenEN Abbes A. (2013). Analyse statistique et prévision des débits de crues dans le bassin versant de l'Oued Mekerra (Ouest de l'Algérie). *Rev. Nat.Tech.*, n°10, 21-31.
- Meddi M., Assani A.A., Meddi H. (2010). Temporal variability of annual rainfall in the Macta and Tafna catchments, Northwestern Algeria. *Water Resources Management. Vol. 24. No. 14*, 3817–3833.
- Michel. (1989). *Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul.* La Houille Blanche(1).
- Michel C. (1983). Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre ? *La Houille Blanche(1)*, 39-44.
- Morin . G. (1991). Le modèle hydrologique CEQUEAU, exemple d'utilisation. *INRSEAU ,Université du Québec.*
- Mouelhi S. (2003). Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. *Thèse de Doctorat, Cemagref. Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts*, 323.
- Mouelhi S., Michel, C., Perrin, C. et Andréassian, V. (2006b). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology 318(1-4)*, 200-214.
- Mouelhi S., Michel, C., Perrin, C. et Andréassian, V.. (2006a.). Linking stream flow to rainfall at the annual time step: the Manabe bucket model revisited. *Journal of Hydrology 328*, 283-296.
- Nascimento N.O. (1995). Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'action anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. *Thèse de Doctorat, CERGRENE/ENPC, Paris*, 550.
- Nash, J.E. et Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. . *Journal of Hydrology*, 27, 282-290.
- Oudin L. (2004). Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global.
- Perrin C. (2000). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. *Thèse de Doctorat, Cemagref. Antony, Institut National Polytechnique de Grenoble.*, 530.
- Semenov. (1997).
- Semenov. (1998).
- Soltner. (1999). Les grandes productions végétales, 19 éditions, sciences et techniques agricoles. 464.
- Soltner. (2005). Les grandes productions végétales, 19 éditions, sciences et techniques.
- Taibi. (2013).
- Ykhlef et Djekoun. (2000).