

N°
Ordre/F.S.S.A/UAMOB/2022

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ DE BOUIRA



Faculté des Sciences et Sciences Appliquées
Département de Génie Civil

Mémoire de Fin d'Etude

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Hydraulique

Option : **Ressources Hydrauliques**

Thème

**Simulation de changement climatique via l'application du modèle régionale
CORDEX et prédiction de l'impact du réchauffement planétaire par le
moyen des réseaux neurones artificiels dans le bassin versant ISSER.**

Présenté par : M^{lle}.Kenza SLIMANI

Devant le jury composé de :

MERIDJA	Madani	MC	UAMOB	Président
KHALDI	Ramzi	MC	USMOB	Encadreur
GHERNAOUA	Redhouane	MC	UAMOB	Examineur

Année Universitaire 2021/2022

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

قال الله تعالى

يَرْفَعُ اللّٰهُ الَّذِیْنَ اٰمَنُوْا مِنْكُمْ

وَالَّذِیْنَ اٰتَوْا الْعِلْمَ دَرَجٰتٍ

وَاللّٰهُ بِمَا تَعْمَلُوْنَ خَبِیْرٌ

[المجادلة: 11]

CITATION

Chaque petit pas

T'amène vers ton

objectif.

Garde confiance

Garde espoir, protège

tes rêves et continue

d'avancer

Dédicaces

A chaque fois qu'on achève une étape importante dans notre vie, on fait une pose pour regarder en arrière et se rappeler toutes ces personnes qui ont partagé avec nous tous les bons moments de notre existence. Ces personnes qui nous ont aidés, soutenus sans réserve, aimé sans compter, ces personnes à qui notre bonheur devient directement le leur.

Je dédie ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance à :

A MES CHERS PARENTS

Aucun mot, aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération, et mon amour pour les sacrifices qu'ils ont consentis pour mon instruction et mon bien-être. Quisse Dieu, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

A MA GRAND MERE CHERIE

Qui m'a accompagné par ses prières, sa douceur, puisse Dieu lui prêter longue vie et beaucoup de santé et de bonheur dans les deux vies

A MES CHERS ET ADORABLE FRERES ET SOEURS

En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

A MES CHER NEVEUX ET NIECES

Aucune dédicace ne saurait exprimer tout l'amour que j'ai pour vous, Votre joie et votre gaieté me comblent de bonheur. Quisse Dieu vous garder, éclairer votre route et vous aider à réaliser à votre tour vos vœux les plus chers.

A TOUS MES AMIS QUE J'AIME TANT.

A MES COLLEGUES DE MA PROMOTION (2022)

Veillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.



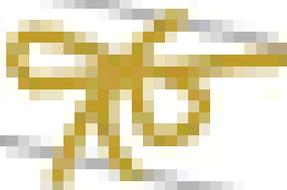
REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie DJGU qui a illuminé mon chemin et qui m'a armé de courage pour achever mes études.

Je tiens à présenter mes remerciements les plus sincères à mon promoteur, monsieur Ramzi KHALID, pour m'avoir encadré, je lui exprime ma reconnaissance pour ses précieux conseils qui m'ont guidé dans la réalisation de ce travail.

Je remercie également les membres de jury pour avoir accepté de jurer mon travail.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribués de près ou de loin, pour leurs soutiens moraux ou matériels, dans la réalisation de ce projet.



Liste des abréviations

- **ANRH:** Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, Algérie CCNUCC.
- **AGCM:** Atmospheric General Circulation Model.
- **CC:** Changement Climatique.
- **CI:** Condition Initiale.
- **CMIP:** Coupled Model Intercomparison Project.
- **CORDEX:** COordinated Regional climate Downscaling Experiment.
- **ECMWF:** European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.
- **ESGF:** Earth System Grid Federation.
- **FAO:** Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- **Ig :** Indice de pente global.
- **Im :** Indice de pente moyen.
- **GCM :** Global Climatic Model.
- **GES :** Gaz à Effet de Serre.
- **GIEC :** Groupement d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.
- **Kc :** Coefficient de Gravelius.
- **MSE:** L'erreur moyenne des carrés.
- **NSE :** Nash Sutcliffe Efficiency.
- **O.R.S.T.O.M :** Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-mer.
PGRI Plan de Gestion des Risques Inondation.
- **PMC :** Perceptron multicouche.
- **RCM :** Regional Climate Model.
- **RCP :** Representative Concentration Pathway.
- **RN:** Réseau de neurones.
- **RNA :** réseau de neurones artificiels.
- **SPI :** Indice standardisé des précipitations.

Liste des figures

Chapitre I : recherche bibliographique

Figure I.1: Représentation simplifiée du Système climatique	2
Figure I.2: les zones climatiques en Algérie	4
Figure I.3: Émissions mondiales de gaz à effet de serre	5
Figure I.4: Le changement des températures et des précipitations annuelles en Algérie	6
Figure I.5: Illustration des quatre familles de scénarios SRES	7
Figure I.6: les principales hypothèses faites pour les différents scénarios	8
Figure I.7: Changement de température en surface et de précipitations projetées pour la période 2081-2100 par rapport à la période 1980-1999	10
Figure I.8: Schéma montrant les interactions entre les différentes composantes du modèle .	17
Figure I.9: loi de Navier Stokes	18
Figure I.10: Guidage du modèle climatique régional par le modèle climatique global	20

Chapitre II : la zone d'étude

Figure II.1: Le bassin versant (Ministère de l'environnement de Quebec, 2001)	23
Figure II.2: Situation géographique du bassin Isser	24
Figure II.3: Courbe hypsométrique du bassin d'Isser	28
Figure II.4: Carte des altitudes de bassin Isser	29
Figure II.5: Carte des pentes de bassin Isser	31
Figure II.6: Carte de lithologie de bassin Isser.	33
Figure II.7: Carte géologique de bassin Isser	34
Figure II.8: Carte hydrogéologique de bassin Isser moyen.	35
Figure II.9: Réseau hydrographique de bassin Isser	36
Figure II.10: Interface de logiciel ArcGis 10.3	41

Chapitre III : analyses des données

Figure III.1: Histogramme des précipitations moyennes pour la période 1973-1998	48
Figure III.2: Évolution de la variable U du test de Pettitt pour les variations annuelles des précipitations de la station de El-Omaria (1974-2012)	50

Figure III.3: Ellipse de Bois pour les variations annuelles des précipitations de la station de El-Omaria (1973-20	50
Figure III.4: Évolution de la variable U du test de Pettitt pour les variations annuelles des précipitations de la station Beni Slimane (1970-1992)	51
Figure III.5: de Bois pour les variations annuelles des précipitations de la station de Beni Slimane (1969-1993).....	51
Figure II.6: Ellipse de Bois pour les variations annuelles des précipitations de la station de Dechmia (1974-1992) 14).....	51
Figure III.7: Ellipse de Bois pour les variations annuelles des précipitations de la station de Dechmia (1974-1992) 14).....	51
Figure III.8: Évolution de la variable U du test de Pettitt pour les variations annuelles des précipitations de la station de Souk Lakhmis(1969-1991).....	52
Figure II.9: Ellipse de Bois pour les variations annuelles des précipitations de la station de Souk Lakhmis (1969-1991).....	52
Figure II.10: Évolution de la variable U du test de Pettitt pour les variations annuelles des précipitations de la station de Djebahia (1968-2002)	53
Figure III.11: :Ellipse de Bois pour les variations annuelles des précipitations de la station de Souk Lakhmis (1967-2005).....	53
Figure III.12: Ellipse de Bois pour les variations annuelles des précipitations de la station de El-Omaria (1973-20.	53
Figure III.13: Ellipse de Bois pour les variations annuelles des précipitations de la station de Souk Lakhmis (1968-1996).....	53
Figure III.14: : Évolution de la variable U du test de Pettitt pour les variations annuelles des précipitations de la station de Chaabet El-ameur (1973-2003)	54
Figure III.15: Ellipse de Bois pour les variations annuelles des précipitations de la station de Chaabet El-ameur (1972-2004).....	54
Figure II.16: Évolution de la variable U du test de Pettitt pour les variations annuelles des précipitations de la station de Lakhdaria (1968-1990).....	55
Figure III.17: Ellipse de Bois pour les variations annuelles des précipitations de la station de Lakhdaria (1967-1991).....	55
Figure III.18 : Variabilité pluviométrique dans le bassin d'Esser.....	59
Figure III.19: Projection des précipitations au l'horizon de 2100.....	60

Chapitre IV : Application du modèle RNA dans la relation pluie-débit

Figure VI.1: Modélisation Pluit-débit	62
Figure IV.2: Schématisation de simulation entre la réalité et la modélisation.....	63
Figure IV.3: Mise en correspondance neurone biologique/neurone artificiel.....	67
Figure IV.4: Neurone formel.....	68
Figure IV.5: Perceptron multicouche	69
Figure IV.6: RNA avec une couche d'entrée, x couches cachées et une couche de sortie	70
Figure IV.7: Schéma générale de l'apprentissage supervisé.....	71
Figure IV.8: Schéma générale de l'apprentissage non-supervisé	71
Figure IV.9: Interface MATLAB principale	75
Figure IV.10: Schéma de réseau de Neurone.....	77
Figure IV.11: Représentation des débits liquides simules (Output) en fonction de débit liquide réel (Target) (apprentissage, validation, test et global).....	77

Chapitre V : Indice de sécheresse

Figure V. 1: La relation entre les types de sécheresse.....	81
Figure V. 2: L'interface de R Studio.....	87
Figure V. 1: Evolution du SPI pour des durées 3 mois	88
Figure V. 2: Evolution du SPI pour des durées 6 mois	89
Figure V. 3: Evolution du SPI pour des durées 12 mois	89

Liste des tableaux

Chapitre I : recherche bibliographique

Tableau I.1: Effets Possibles du changement climatique	15
Tableau I.2: les MCR avec les MCG.....	17

Chapitre II : la zone d'étude

Tableau II.1 : Tableau récapitulatif des paramètres de forme de bassin Isser	29
Tableau II.2: Répartition altimétrique du bassin versant d'Isser (ANRH Alger, 2014).....	30
Tableau II.3: Tableau récapitulatif des altitudes caractéristiques et les indices du pente de bassin Isser	33
Tableau II.4: classification du relief d'après O.R.S.T.O .M.00.....	34
Tableau II.5 : Sous bassin de l'ISSER (ANRH, 2008)	37
Tableau II.6: Tableau récapitulatif des caractéristiques du réseau hydrographique.....	39
Tableau II.7: Température moyennes des 6 stations climatologiques recueillies pour la période (1995-2008) (ONM Alger, 2016).....	40
Tableau II.8 : Vitesse moyennes Mensuelles des stations.....	41
Tableau II.9 : Humidité relative des différentes stations climatologiques	41
Tableau II.10: ETR au niveau du bassin Isser pour l'année 2002 (A.N.R.H, 2012).....	42

Chapitre III : analyses des données

Tableau III.1: Identification des stations pluviométriques du bassin versant d'Isser	47
Tableau III.2: Distribution moyenne mensuelle des pluies des cinq(05) stations pluviométriques	47

Chapitre IV : Application du modèle RNA dans la relation pluie-débit

Tableau IV. 1: Qualité des modèles en fonction des valeurs des différents critères (Ghezali, 2019)	73
Tableau IV.2: Tableau récapitulatif des Résultats (Nash ,RSR ,PBIAIS et R^2).....	78

Chapitre V : Indice de sécheresse

Tableau V.1 : Classification des sécheresses selon les valeurs de SPI..... 86

Table des matières

Citation

Dédicaces

Remerciements

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Résumé

Abstract

ملخص

Introduction générale..... 1

Chapitre I : Recherche bibliographique

I.1. Introduction 3

I.2. Le climat 3

I.2.1. Définition du climat 3

I.2.2. Météo..... 3

I.2.3. Climatologie 3

I.2.4. Météorologie 4

I.2.5. Le système climatique 4

I.2.6. La variabilité climatique..... 4

I.2.7. Le climat en Algérie 5

I.3. Le changement climatique..... 6

I.3.1. Définition du changement climatique 6

I.3.2. Les indicateurs du changement climatique 6

I.3.3. Les causes du changement climatique 7

I.3.3.1. L'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre 7

I.3.3.2. La déforestation 8

I.3.4. Le changement climatique en Algérie..... 8

I.4. Scénario climatique 9

I.4.1. Scénarios SRES..... 9

I.4.2. Représentative Concentration Pathways	10
I.4.3. Projections relatives aux changements climatiques à venir	11
I.4.3.1. Evolution mondiale du climat au XXIe siècle	11
I.4.3.2. Evolution régionale du climat au XXIe siècle	12
I.5. Incidence sur les systèmes et les secteurs	13
I.5.1. Eau	13
I.5.2. Biodiversité et écosystèmes	13
I.5.3. Alimentation	13
I.5.4. Côtes	14
I.5.5. Santé	14
I.5.6. Industrie, établissements humains et société	14
I.6. Utilisation des modèles	15
I.6.1. Historique du développement du modèle de changement climatique	15
I.6.3. Les modèles climatiques globaux	18
I.6.4. Modèles climatiques régionaux	22
I.7. Conclusion	23

Chapitre II: La zone d'étude

II.1. Introduction	25
II.2. Définition du bassin versant	25
II.3. Contexte géographique	25
II.4. Caractéristiques physiographiques du bassin de l'Isser	27
II.4.1. Paramètres géométriques	27
II.4.1.1. Le périmètre	27
II.4.1.2. La surface	27
II.4.2. Paramètres de forme	28
II.4.2.1. L'indice de compacité de Gravelius (KG)	28
II.4.2.2. Le Rectangle équivalent	28
II.4.3. Paramètres du relief	29
II.4.3.1. La courbe hypsométrique	29
II.4.3.3. Les indices de pente	32

II.5. Lithologie	34
II.6. Le cadre géologique.....	35
II.7. Hydrogéologie	36
II.8. Le réseau hydrographique	37
II.8.1. La densité de drainage	38
II.8.2. La densité hydrographique.....	38
II.8.3. Temps de concentration	38
II.9. La végétation.....	39
II.10. Le contexte climatique.....	39
II.10.1. Pluviométrie.....	39
II.10.2. Température	40
II.10.3. Vents	40
II.10.4. Humidité	41
II.10.5. Evapo-transpiration.....	42
II.11. Présentation d'arc gis 10.3	42
II.12. Conclusion.....	43

Chapitre III : Analyse des données

III.1. Introduction.....	44
III.2. Classification des zones climatiques	44
III.3. Climat actuel Tendances et changements significatifs par rapport à la variabilité naturelle	44
III.4. Changements climatiques en Algérie au l'horizon 2100	44
III.5. Projet d'inter comparaison des modèles couplés (CMIP)	45
III.6. Modèle climatique utilisé.....	45
III.7. Données utilisées.....	46
III.7.1. Les données de l'ANRH.....	46
III.7.1.1. Le choix des données	46
III.7.1.2. Répartition de la pluie moyenne	47
III.7.2. Détermination des ruptures dans les séries des précipitations.....	48

III.7.2.1. Présentation du logiciel Khronostat	48
III.7.2.2. Méthode d'analyse de série chronologique.....	49
III.7.2.3. Analyse des précipitations annuelles	50
III.7.3. Les données du modèle CMIP5	55
III.8. Impact des changements climatiques sur les débits	60
III.9. Conclusion	60

Chapitre IV : Application du modèle RNA dans la relation pluie-débit

IV.1. Introduction	61
IV.2. La modélisation en hydrologie.....	61
IV.3. L'objectif de la modélisation hydrologique	62
IV.4. Présentation des modèles	63
IV.4.1. Définition d'un modèle	63
IV.4.2. Etapes d'élaboration d'un modèle	64
IV.4.3. Propriétés du modèle	64
IV.4.4. Les domaines d'application des modèles Pluit-Débit	65
IV.5. Les modèles stochastiques.....	66
IV.6. Présentation des réseaux de neurones	66
IV.6.1. Définition des réseaux de neurones	66
IV.6.2. Les réseaux de neurones artificiels.....	67
IV.6.3. Neurone formel.....	67
IV.6.4. Les perceptrons multicouches (PMC)	68
IV.7. Apprentissage des réseaux de neurones.....	70
IV.7.1. L'apprentissage supervisé	70
IV.7.2. L'apprentissage non supervisé	71
IV.7.3. L'apprentissage renforcé.....	71
IV.8. Les critères d'évaluation des performances des modèles.....	72
IV.8.1. Le coefficient de corrélation.....	72
IV.8.2. Erreur quadratique moyenne	72

IV.8.3.Le critère de Nash-Sutcliffe (1970).....	72
IV.8.4.Percent Bias (PBIAS).....	73
IV.9.Mise en œuvre des R.N.A.....	73
IV.10.Les Réseaux de neurones et le langage MATLAB.....	74
IV.10.1.Description de langage MATLAB.....	74
IV.10.2. Implémentation d'un réseau neurones dans MATLAB.....	75
IV.11.Application du modèle.....	76
IV.12.Résultats et discussions.....	76
IV.13. Conclusion.....	78

Chapitre V : Indices de sécheresse

V.1.Introduction.....	79
V.2.Définition de la sécheresse.....	79
V.3.Les types de sécheresse.....	79
V.3.1. La sécheresse de type météorologique.....	80
V.3.2. La sécheresse de type agricole.....	80
V.3.3. La sécheresse de type hydrologique.....	80
V.3.4. La sécheresse socio-économique.....	80
V.4. Relation entre les différents types de sécheresse.....	80
V.5. Les causes de la sécheresse.....	81
V.6. Conséquences et impact de la sécheresse.....	82
V.7. Impact de la sécheresse.....	83
V.8. Sécheresse en Algérie.....	84
V.9. Méthode de caractérisation de la sécheresse.....	84
V.9.1. Indice standardisé de précipitations SPI.....	84
V.9.1.1.Définition.....	84
V.9.1.2.Formule de l'indice SPI.....	85
V.9.1.3. Échelle de temps.....	85

V.9.1.4. La méthode de calcul	85
V.9.1.5. Classification des valeurs SPI	85
V.9.1.6. Les avantages et les Inconvénients de SPI.....	86
V.10. Calcul automatique des indices de sécheresse	87
V.10.1 Logiciel utilisé	87
V.11. Résultats et discussions	88
V.12. Conclusion	90
Conclusion générale	91

Références Bibliographiques

Introduction générale

Introduction générale

Les ressources en eau sont d'une importance primordiale et leur besoin à l'avenir augmente en raison de la croissance démographique et le développement socio-économique des communautés. Comme nous le savons, la pluviométrie est un facteur très important dans le climat et l'hydrométéorologie, par conséquent, la variabilité pluviométrique peut provoquer des inondations, des sécheresses et une perte de biodiversité. Ces risques peuvent à la fois menacer l'approvisionnement en eau, l'irrigation et l'industrie, et modifier les stratégies des pays en causant des dommages catastrophiques, tant humains que matériels.

Le plus grand défi pour ces ressources en eau est le changement climatique qui est devenu un enjeu important depuis une vingtaine d'années pour plusieurs raisons.

Une évaluation constate que l'étude des précipitations, les tendances sont devenues un sujet de recherche de plus en plus actif pour une gestion régionale efficace des ressources en eau et risques associés.

Pour étudier la tendance pluviométrique, Est ce qu'elle augmente ou diminue ? Au niveau de bassin Isser, des approches statistiques ont été appliquées, qui nous permettent d'étudier la variabilité spatiale et temporelle.

Les modèles climatiques possèdent la capacité de prévision, de l'évolution du climat futur .la modélisation climatique est utilisée pour faire des projections allant d'une dizaine a une centaine d'années .ces projection aident à mettre en rapport les changements observés à des causes spécifiques et cela permettra de mettre des plans d'atténuation et d'adaptation aux effets des changements au sein du système climatique. A cet effet des prévisions pluviométriques d'ici l'an 2100 ont été faites grâce à un modèle climatique régionale CORDEX.

Le développement de l'informatique et des études sur les systèmes complexes naturels (à l'image des bassins versants), ont provoqué ces dernières décennies, une prolifération de modèles mathématiques en hydrologie, qui aident à comprendre, gérer et réduire la complexité des différents phénomènes hydrologiques. Pour l'utilisateur, l'intérêt d'un modèle réside dans sa capacité à apporter une réponse "satisfaisante" aux questions qu'il se pose à propos de l'objet modélisé. Le modèle pluie-débit est particulièrement intéressant puisqu'il peut permettre d'estimer la ressource disponible en vue d'un aménagement mais aussi prévoir l'évolution de cette ressource dans les années ou décennies à venir.

Pour ce faire, nous allons utiliser précisément les réseaux de neurones artificiels (RNA), que nous appliquons aux données disponibles (pluies et débits) de notre bassin versant ISSER dans le but d'apprécier les débits simulés pour la prévision et /ou la prédétermination.

L'effet du réchauffement climatique ne fait qu'augmenter par l'apparition des phénomènes météorologiques extrêmes (par exemple, les inondations, les sécheresses...). Le phénomène extrême auquel s'intéresse notre travail est celui de la sécheresse vue qu'il est exceptionnel par rapport aux autres phénomènes du fait qu'il s'installe lentement et se développe au cours des mois voire même des années ; de plus le phénomène de la sécheresse sévit ses dernières années, et ses impacts sociaux, économiques et environnementaux s'exacerbent d'avantage.

Notre mémoire s'articulera sur cinq chapitres essentielles dont l'objectif principal est de faire une synthèse sur notre thème .

- Le premier chapitre rassemblant des généralités sur le changement climatique et donner un aperçu des différents modèles climatiques et scénarios climatiques.
- Le deuxième chapitre porte sur l'étude du site qui est nécessaire pour connaître la caractéristique physique du lieu et les facteurs influençables sur la problématique étudiée. Dans cette partie nous avons présenté la zone de notre étude des points de vue géographique, géologique, hydrographique et climatique.
- Le troisième chapitre est consacré sur l'analyse des données pluviométrique de notre bassin versant, Ainsi que une projection pluviométrique au l'horizon de 2100.
- Le quatrième chapitre est réservé pour la modélisation pluie-débit par le modèle des réseaux neurones artificiels (PMC).
- Le dernier chapitre est destiné au calcul d'indices de sécheresse SPI avec le langage R.

A la fin notre travail est clôturé Une conclusion générale synthétise les résultats obtenus.

Chapitre I

Recherche bibliographique

I.1. Introduction

Aujourd'hui, le changement climatique est considéré comme l'une des plus grandes menaces pour l'environnement et le bien-être humain, il constitue le problème environnemental majeur qui domine notre époque, et le défi majeur que les êtres vivants doivent relever. Contrôles environnementaux dans le monde, notamment en Algérie.

L'objectif de ce chapitre est de donner un aperçu des enjeux du changement climatique et de leurs impacts, et de conclure par un aperçu des différents modèles climatiques et scénarios climatiques.

I.2. Le climat

I.2.1. Définition du climat

Le terme climat vient du mot grec « *Klima* », il est apparu au XII^{ème} siècle qui désigne l'inclinaison du soleil au-dessus d'un lieu donné. Emmanuel DE MARTONNE définit le climat en 1909 dans son traité de géographie physique comme : « l'ensemble des phénomènes qui associent étroitement température, vent, humidité, pluie, et donne un relief généralement reflété par la végétation de chaque pays » (ROCHARD J., 2006).

Le climat peut donc être considéré comme une synthèse des variations quotidiennes observées en un endroit particulier. Le climat d'une région donnée est obtenu par la collecte de données statistiques sur les conditions météorologiques d'une période donnée variant de quelques mois à des milliers, voire à des millions d'années (Gouaidia, 2008).

I.2.2. Météo

C'est les conditions de l'atmosphère dans un lieu et un moment donné et leurs conséquences sur le quotidien et les activités humaines (Kolling, 2017). On mesure la météo par les éléments suivants : la température, les précipitations, le vent, la visibilité, l'humidité, l'état du ciel (les nuages) et la pression atmosphérique.

I.2.3. Climatologie

C'est la science qui traite de divers états de l'atmosphère et de leur succession au-dessus de la terre. Elle s'appuie sur l'analyse de la distribution statistique de variables météorologiques d'une région donnée sur une période de trente ans (Nassri, 2018).

I.2.4. Météorologie

C'est la science qui étudie l'atmosphère terrestre en évaluant les éléments physique, tel le rayonnement solaire, l'humidité de l'air, le vent et les précipitations. La météorologie s'intéresse aussi aux facteurs qui règlent le climat.

I.2.5. Le système climatique

Le système climatique est l'ensemble Terre-atmosphère. Il évolue au cours du temps sous l'effet de processus internes et de contraintes externes, d'origine naturelle ou humaine (Solomon S., 2007).

Le système climatique, constitué de cinq composantes principales : l'atmosphère, l'hydrosphère, la cryosphère, la lithosphère et la biosphère (Figure 1.1).

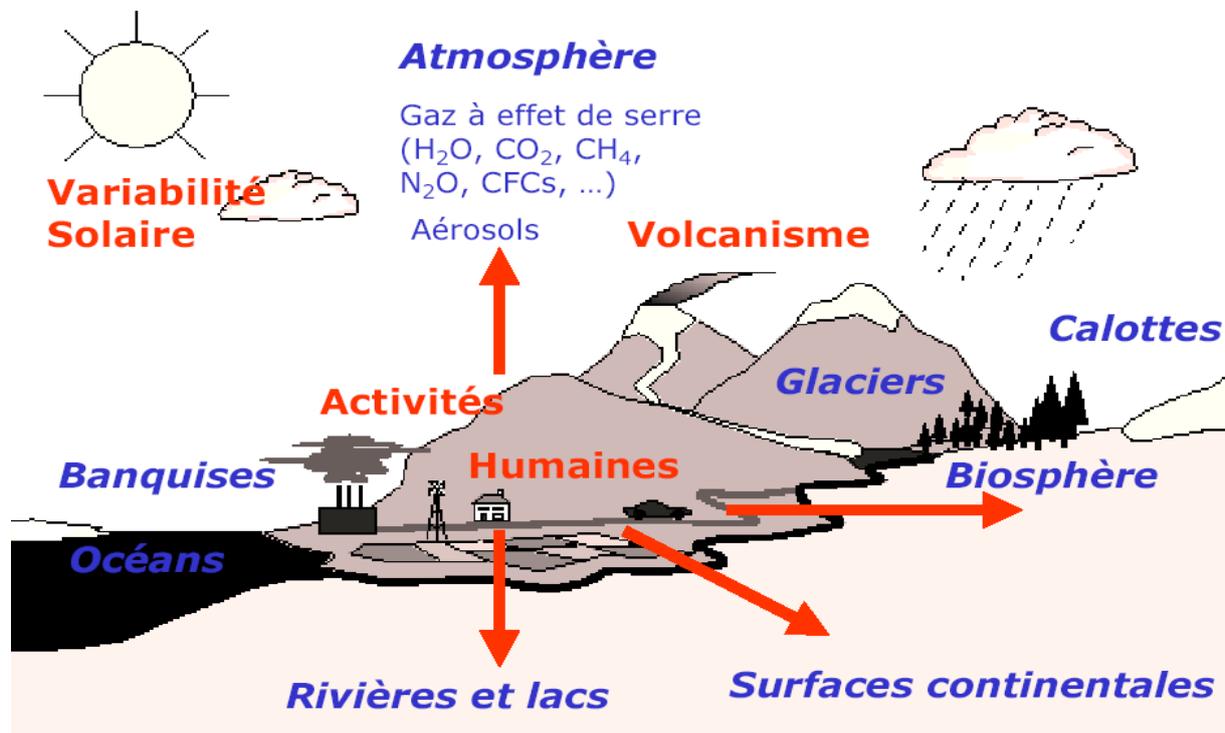


Figure 1.1: Représentation simplifiée du Système climatique (Solomon S., 2007)

I.2.6. La variabilité climatique

La variabilité climatique désigne des variations de l'état moyen et d'autres statistiques (écarts standards, phénomènes extrêmes, ect) du climat à toutes les échelles temporelles et spatiales au-delà des phénomènes climatiques individuels (Chourghal, 2016). La variabilité peut être due à des processus internes naturels au sein du système climatique (variabilité

interne), ou à des variations des forçages externes anthropiques ou naturels (variabilité externe) (*Salinger, 2000*).

I.2.7. Le climat en Algérie

L'Algérie est un pays de la zone subtropicale du Nord-africain. Son climat est très différent entre les régions (Nord-Sud, Est-Ouest). Il est de type méditerranéen sur toute la frange nord qui englobe le littoral et l'atlas tellien (étés chauds et secs, hivers humides et frais), semi-aride sur les hauts plateaux au centre du pays (entre l'Atlas tellien et l'atlas saharien), et désertique dès que l'on franchit la chaîne de l'atlas saharien (*Megherbi, 2015*). L'influence du nord-ouest apporte des courants froids et humides, et celle du sud est beaucoup plus liée à des courants chauds et secs.

On définit pour l'Algérie les régions climatiques suivantes (Figure 1.2):

Zone A: elle comprend le littoral et une partie du versant Nord des chaînes côtières (climat méditerranéen maritime).

Zone B: elle comprend la plaine et les vallées comprises entre les chaînes côtières et l'Atlas tellien, autre que celle de Chleff (climat méditerranéen continental).

Zone B1: c'est une sous-zone de la zone B. Elle comprend la vallée de Chleff, comprise entre la chaîne de l'Ouarsenis et les montagnes du Dahra ;

Zone C: elle comprend les hauts plateaux entre l'Atlas tellien et l'Atlas saharien, avec des altitudes supérieures à 500 m (climat méditerranéen de montagne) ;

Zone D1: elle comprend le Sahara au-delà de l'Atlas Saharien jusqu'à la latitude 31°, par exemple Touggourt est typique du climat nord-saharien, avec des maxima absolus voisins les 50°C ;

Zone D2 : elle comprend le Sahara au-delà de la latitude 31° jusqu'à la latitude 26°C ;

Zone D3 : elle comprend le Sahara au-delà de la latitude 26° jusqu'aux frontières Sud (*Yahiaoui, 2015*).

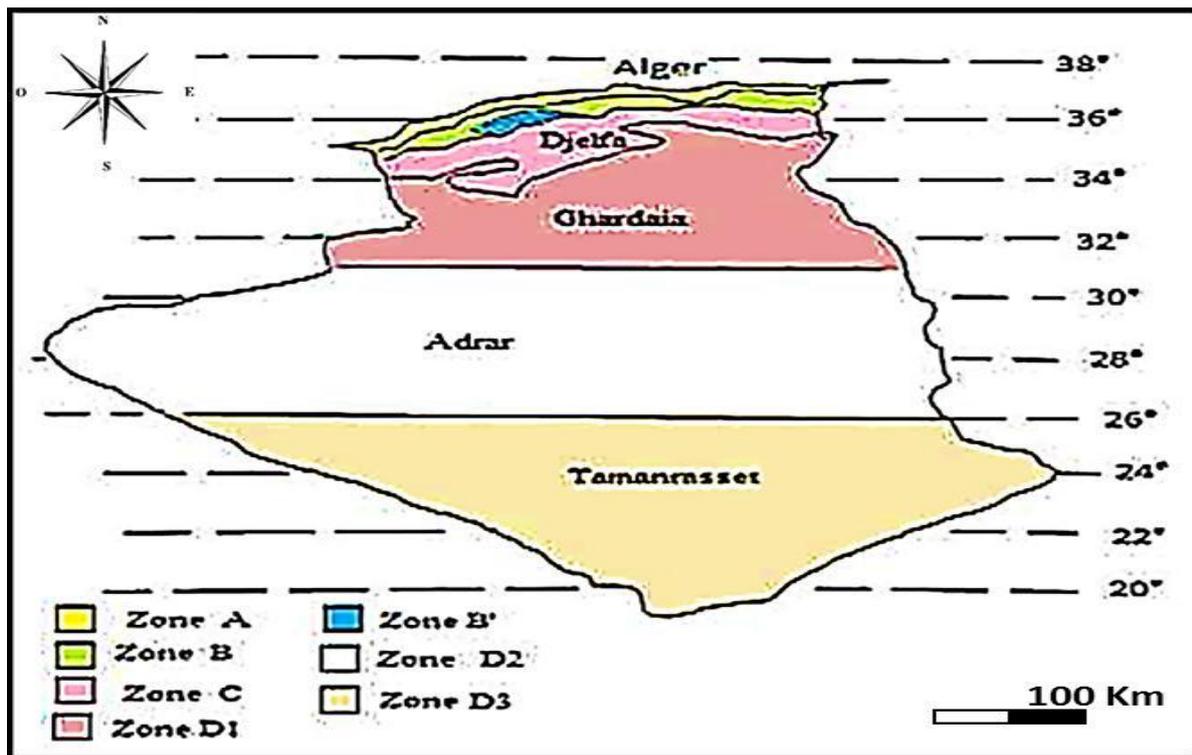


Figure I.2: les zones climatiques en Algérie (Megherbi, 2015)

I.3. Le changement climatique

I.3.1. Définition du changement climatique

Le changement climatique n'est pas un nouveau phénomène. C'est toute modification durable (de quelques décennies à des millénaires) des paramètres du climat, qu'elle soit due à la variabilité naturelle ou à l'activité humaine (GIEC, 2008). Selon le 5ème rapport du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC), la température moyenne de la Terre pourrait augmenter de 4°C à l'horizon 2100, selon le scénario le plus pessimiste (IPCC, 2014). Il est bien connu que l'homme a une influence sur le système climatique.

I.3.2. Les indicateurs du changement climatique

- *L'augmentation de la température de surface sur la Terre* : L'augmentation de la température de surface sur la terre est de $0,8 \pm 0,2$ °C depuis 1870.
- *La température des océans* : une augmentation moyenne globale depuis quelques décennies.
- *La réduction de la surface des glaces océaniques arctiques* : la surface des glaces de mer a connu une décroissance très rapide jusqu'à 5,5 millions de km² en 2010.

- **Le recul des glaciers continentaux** : il est observé de façon quasi généralisée depuis 3 à 4 décennies, avec une nette augmentation au cours des 20 dernières années.
- **Le niveau moyen des océans** : une hausse du niveau moyen global de la mer est de l'ordre de 3,4 mm/an, mesurée par Satellites depuis 1992.
- **Les indicateurs biologiques** : tels que les déplacements de populations animales terrestres ou marines et l'évolution des dates d'activités agricoles saisonnières, montrent aussi la survenue d'un réchauffement climatique (*Beghdadi, 2014*).

I.3.3. Les causes du changement climatique

Les changements climatiques sont dus à la fois à la variabilité interne du système climatique et à des facteurs extérieurs (naturels et d'origine anthropique) (*Hufty, 2001*).

I.3.3.1. L'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre

En temps normal, la terre est capable d'absorber les surplus de gaz à effet de serre afin de garder un équilibre des températures dans l'atmosphère. Par exemple, les océans jouent un rôle tampon ; ils absorbent le CO₂ de l'atmosphère et le lui rendent si nécessaire (*GIEC, 2014*). Cependant, aujourd'hui la quantité de CO₂ est tellement importante que les océans ne sont plus capables d'appliquer ce mécanisme (Figure 1.3).

Les rejets de gaz à effet de serre d'origine anthropique sont responsables d'environ 75% du phénomène des changements climatiques.

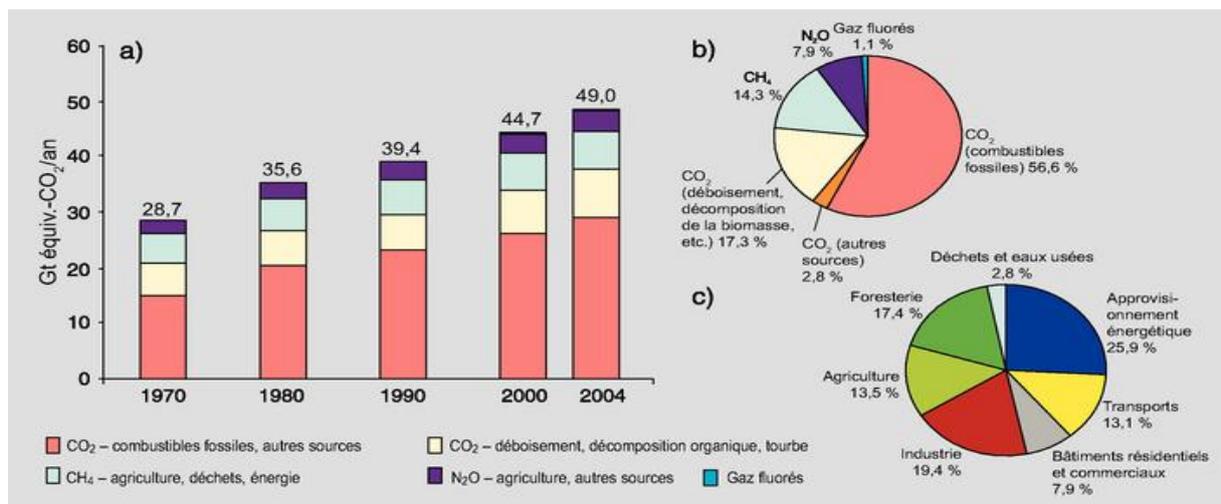


Figure 1.3: Émissions mondiales de gaz à effet de serre (*GIEC, 2014*).

I.3.3.2. La déforestation

La déforestation est responsable d'un quart du phénomène des changements climatiques. En effet, les zones forestières stockent beaucoup de carbone tant au-dessus du sol qu'en dessous, Une fois coupés, les arbres larguent le CO2 accumulé pendant des siècles.

I.3.4. Le changement climatique en Algérie

L'Algérie, premier plus grand pays d'Afrique, situé au Sud de la Méditerranée, se compose d'ensembles géographiques contrastés et subit sur le plan climatique une double influence des systèmes tempérés et tropicaux. Sa situation particulière l'expose à une grande vulnérabilité aux impacts du changement climatique global (*MATE, 2010*). Le climat a varié au cours du 20ème siècle et le signal du changement climatique apparait dans les ruptures des séries pluviométriques.

À partir de 1970, l'évolution des précipitations met en exergue une diminution de l'ordre de 13% dans l'Est, 13,6% dans le Centre et 16,1% dans l'Ouest. Les scénarios climatiques pour le siècle actuel indiquent un risque de réduction des pluies pouvant atteindre +20% dans toutes les régions (*Elmeddahi, 2016*) (Figure 1.4). Ainsi que les températures moyennes minimales et maximales sont en hausse sur l'ensemble du pays, et cette tendance se poursuit.

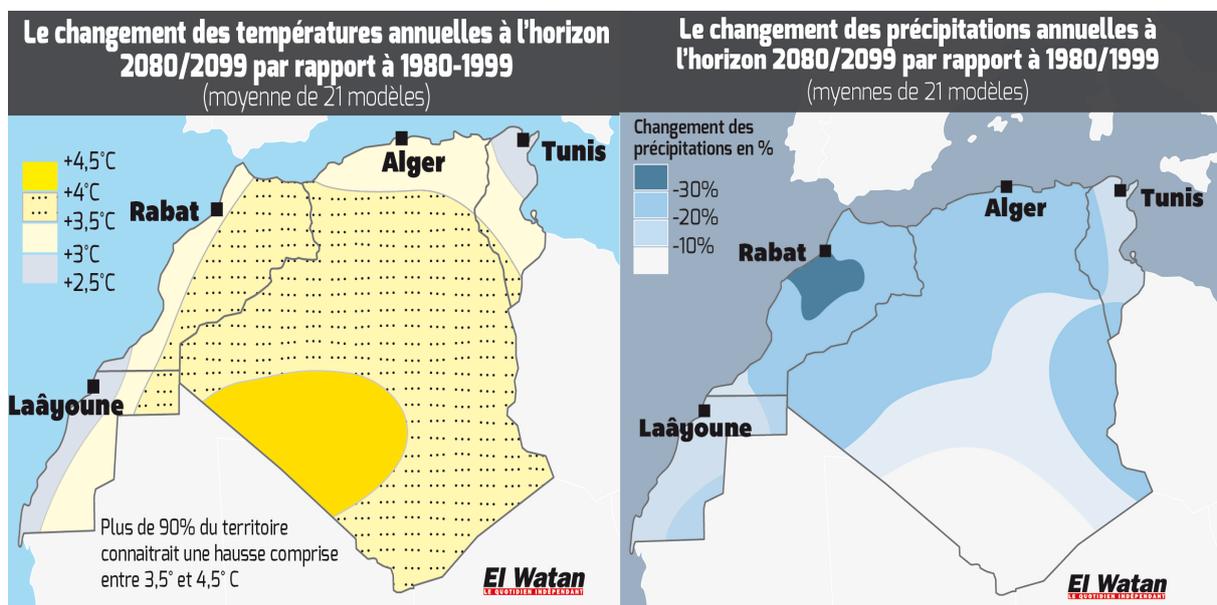


Figure 1.4: Le changement des températures et des précipitations annuelles en Algérie (*Elmeddahi, 2016*)

I.4. Scénario climatique

Les modèles climatiques sont comparés à des scénarios. Il y a 40 scénarios différents. Ces scénarios ont pour objectif de représenter de manière simple le monde futur sous différents aspects. Ils se fondent sur des hypothèses d'évolution pour aboutir à des projections dans différents domaines (*IPCC, 2000*).

Un scénario climatique fait référence à un climat futur plausible qui a été construit pour une utilisation explicite dans l'étude des conséquences potentielles du changement climatique anthropique.

I.4.1. Scénarios SRES

SRES (Special Report on Emissions Scenarios) est un rapport du GIEC publié en 2000. Les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre décrits dans le rapport sont utilisés pour projeter d'éventuels changements climatiques futurs.

Les scénarios SRES visent à améliorer certains aspects du scénario IS92 utilisé dans le deuxième rapport d'évaluation du GIEC de 1995. Ils s'agissent des scénarios "de base" (ou "de référence"), ce qui signifie qu'elles ne tiennent compte d'aucune mesure actuelle ou future visant à limiter les émissions de gaz à effet de serre (*IPCC, 2000*). Ces scénarios socio-économiques sont classés en quatre familles (A1, A2, B1 et B2) (Figure 1.5) et traduits en émissions de gaz à effet de serre pour le XXI^e siècle.

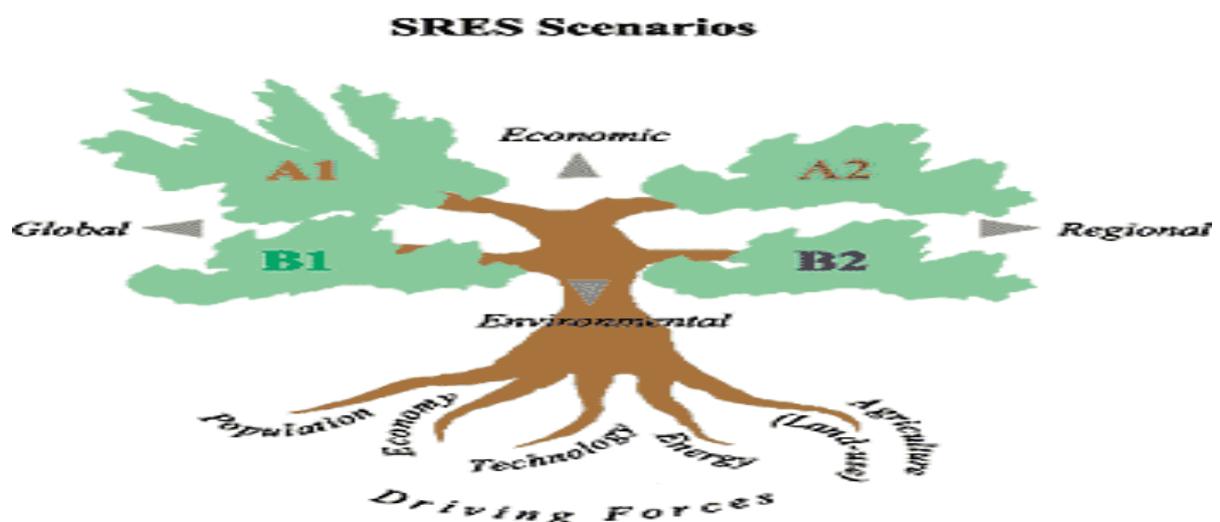


Figure I.5: Illustration des quatre familles de scénarios SRES (*IPCC, 2000*).

A1 : Un monde futur à croissance économique très rapide, à faible croissance démographique et à introduction rapide de technologies nouvelles et plus efficaces. Cette famille se divise en trois groupes liés à différentes hypothèses concernant l'évolution technologique du système énergétique :

- A1F1, basé sur un usage intensif de combustibles fossiles.
- A1T, lié à des sources d'énergie autres que fossiles.
- A1B, établi sur un équilibre entre toutes les sources d'énergie.

A2: Un monde très hétérogène. Une forte croissance de la population et moins de préoccupations pour le développement économique rapide.

B1: un monde convergent doté des mêmes caractéristiques démographiques, la population mondiale atteignant son maximum au milieu du siècle pour diminuer ensuite. L'accent est mis sur une recherche mondiale de viabilité économique, sociale et environnementale.

B2: un monde qui se caractérise par une population mondiale qui ne cesse d'augmenter, par un développement économique de niveau intermédiaire et par un progrès technologique moins rapide et plus divers que dans les autres canevas.

Scénario	Population	Economie	Environ.	Equité	Technologie	Mondial.
A1F1						
A1B						
A1T						
B1						
A2						
B2						

Figure I.6: les principales hypothèses faites pour les différents scénarios (IPCC, 2000).

I.4.2. Representative Concentration Pathways

RCP, "Representative Concentration Pathways", est un scénario d'évolution des concentrations d'aérosols à effet de serre et de gaz chimiquement réactifs dans l'atmosphère sur la période 2006-2100. Le mot "trajectoire" nous rappelle que ce n'est pas seulement le niveau de forçage radiatif à long terme qui compte, mais la trajectoire pour y arriver. Le RCP

a été développé comme base pour des expériences de modélisation à court et à long terme avec CMIP5 (*Elouissi A, 2016*).

Repère RCP basé sur le forçage radiatif réalisé en 2100 : 2,6 W/ m² Pour RCP 2.6, 4.5 W/ m² Pour RCP 4.5, 6 W/ m² Pour RCP 6.0 et 8.5 W/ m² pour RCP 8.5.

Chaque projection climatique réalisée à l'aide d'un modèle climatique et renforcée par un scénario RCP donne une variante du climat qui est considérée comme susceptible de résulter des niveaux d'émission sélectionnés (*Ittersum & all, 2011*).

I.4.3. Projections relatives aux changements climatiques à venir

I.4.3.1. Evolution mondiale du climat au XXI^e siècle

Selon la NASA et le GIEC, la température mondiale a augmenté de 1,4° depuis 1880, les niveaux de CO₂ ont atteint 400,71 parties par milliard, la perte du couvert forestier mondial entre 2000 et 2012 est de 1,5 million de km² (*NASA, 2015*). La réduction de la glace terrestre de 287 milliards de tonnes métriques par an, l'augmentation du niveau de la mer de 3,2 mm par an et celle de la glace arctique de 13,3% par décennie.

Le risque croissant de changements irréversibles dus à un changement à grande échelle du système climatique, tel que plusieurs espèces sensibles telles que les coraux océaniques, les oiseaux aquatiques, les reptiles tels que les tortues marines et les amphibiens est en voie d'extinction.

L'échec des cultures entraînant la famine dans de nombreux pays d'Afrique orientale, diminution de la quantité d'eau potable en Méditerranée et en Afrique australe et augmentation de l'intensité des phénomènes extrêmes, tels que les incendies de forêt (Australie et Indonésie), les inondations (Bangladesh), les tempêtes (tornades et ouragans aux États-Unis), les sécheresses (région du Sahara) et les vagues de chaleur mortelles enregistrées dans de nombreuses régions du monde (*Sivaramanan, 2015*).

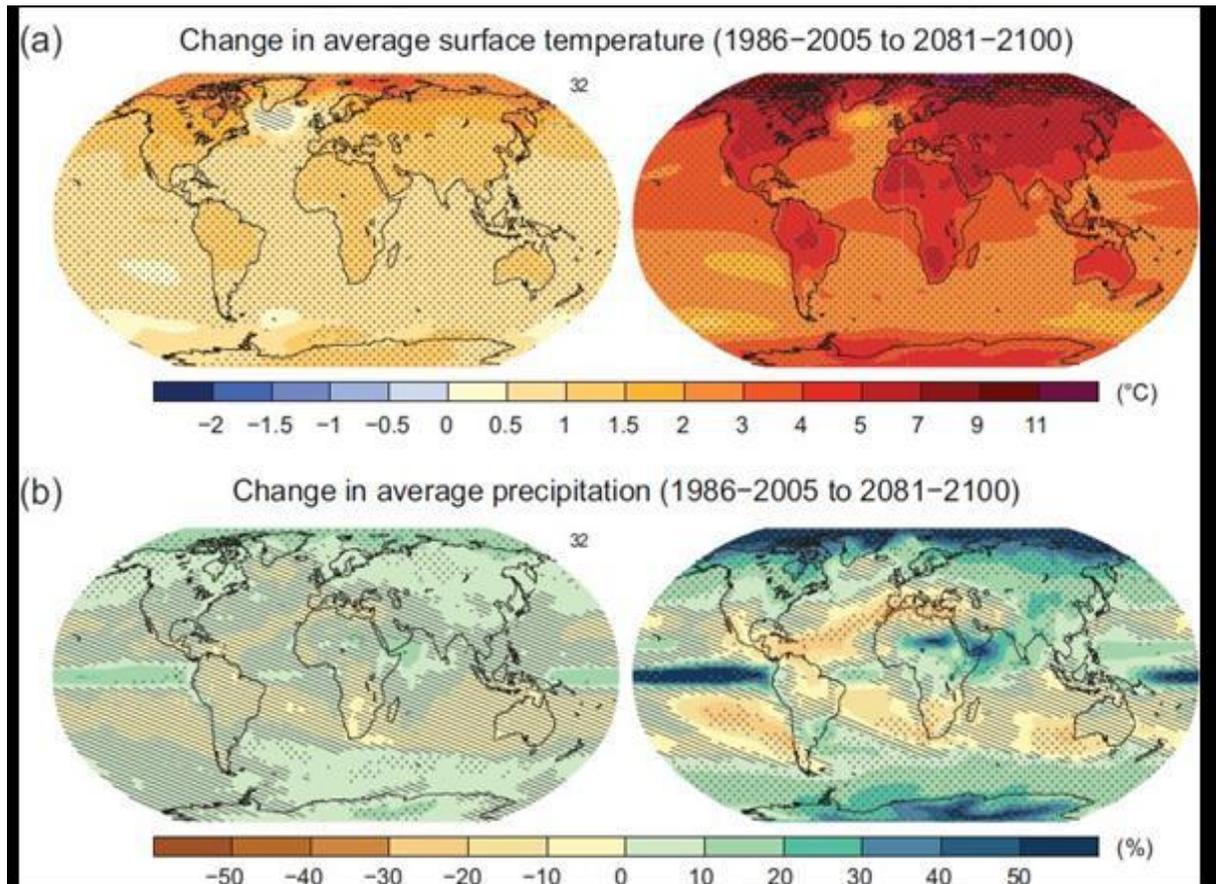


Figure I.7: Changement de température en surface et de précipitations projetées pour la période 2081-2100 par rapport à la période 1980-1999 (*GIEC, 2014*).

I.4.3.2. Evolution régionale du climat au XXI^e siècle

La quantification et la compréhension de changements climatiques à l'échelle régionale est l'une des préoccupations les plus importantes et les plus incertaines au sein des débats sur le changement global. Une étape importante vers la compréhension du changement climatique régional et ses impacts est l'évaluation des caractéristiques de la variabilité naturelle du climat et de la performance des AOGCM à reproduire le climat futur (*Crame & all, 2018*).

En général, dans la région méditerranéenne, les températures moyennes annuelles sont maintenant de 1,4°C supérieures à celles de la fin du XIX^e siècle, en particulier pendant les mois d'été. Les vagues de chaleur sont maintenant plus fréquentes et la fréquence et l'intensité des sécheresses ont augmenté depuis 1950. Au cours des deux dernières décennies, le niveau de la mer a augmenté d'environ 3 cm par décennie, ce qui est comparable aux tendances mondiales.

I.5. Incidence sur les systèmes et les secteurs

I.5.1. Eau

Le GIEC a conclu qu'il existe un consensus sur le fait que l'augmentation des GES dans l'atmosphère entraînera un changement climatique qui fera monter le niveau de la mer, une fréquence accrue d'événements climatiques extrêmes, notamment des tempêtes intenses, des pluies abondantes et des sécheresses. Cela augmentera la fréquence des risques liés au climat, causant des pertes en vies humaines, des perturbations sociales et des difficultés économiques. Il y a moins de consensus sur la magnitude du changement des variables climatiques, cependant de nombreuses études ont prouvé que le changement climatique aura un effet sur la disponibilité et la demande en eau (*Kusangaya S, 2014*).

I.5.2. Biodiversité et écosystèmes

L'augmentation des températures, les bouleversements des climats, des saisons, perturbent les écosystèmes, modifient les conditions et les cycles de reproduction des plantes.

La raréfaction des ressources et les changements climatiques modifient les habitudes de vie et les cycles migratoires des animaux, on assiste déjà à la disparition de très nombreuses espèces, notamment des espèces endémiques ou inversement, à l'intrusion d'espèces invasives qui menacent les cultures et les autres animaux (*OMS, 2011*). Le réchauffement climatique impacte donc la biodiversité. C'est l'équilibre des écosystèmes naturels qui s'en trouve modifié et menacé.

I.5.3. Alimentation

Selon les projections, si la température moyenne locale augmente d'au plus 1 à 3°C, selon les cultures considérées, les rendements agricoles aux moyennes et hautes latitudes augmenteront légèrement, puis chuteront au-delà de ces valeurs dans certaines régions. Aux latitudes plus basses, en particulier pendant la saison sèche ou sous les tropiques, même des augmentations modestes des températures locales (1 à 2 °C) devraient réduire les rendements agricoles, entraînant un risque accru de famine.

I.5.4. Côtes

Le changement climatique et l'élévation du niveau de la mer devraient augmenter les risques côtiers, y compris l'érosion. Ce phénomène sera amplifié par la pression croissante qu'exerceront les activités humaines sur les zones littorales.

I.5.5. Santé

Le changement climatique influe sur les déterminants sociaux et environnementaux de la santé : air pur, eau potable, nourriture en quantité suffisante, sécurité du logement. Entre 2030 et 2050, on s'attend à ce que le changement climatique entraîne près de 250 000 décès supplémentaires par an, dus à la malnutrition, au paludisme, à la diarrhée, au stress lié à la chaleur, à l'incidence d'allergies, aux maladies respiratoires et cardiovasculaires ; particulièrement chez les jeunes, les aînés, les personnes à la santé fragile et les malades chroniques (OMS, 2011).

On estime que le coût des dommages directs pour la santé (à l'exclusion des coûts dans des secteurs déterminants pour la santé tels que l'agriculture et l'eau et l'assainissement) se situe entre 2 et 4 milliards de dollars (US \$) par an d'ici 2030. Les zones n'ayant pas de bonnes infrastructures de santé, pour la plupart dans les pays en développement, seront les moins en mesure de se préparer et de faire face à la situation sans assistance.

I.5.6. Industrie, établissements humains et société

Parmi les industries, les établissements humains et les sociétés les plus vulnérables figurent ceux qui sont situés dans les plaines d'inondation côtières ou fluviales, ceux dont l'économie est étroitement liée aux ressources sensibles aux conditions climatiques et ceux qui sont situés dans des zones connaissant des phénomènes météorologiques extrêmes, en particulier en cas d'urbanisation rapide.

- ✚ Le tableau ci-dessus (Tableau 1.1) montre qu'avec des émissions croissantes et des températures plus élevées, les effets négatifs iront en s'intensifiant alors que les éventuels effets positifs s'estomperont.

Tableau I.1: Effets Possibles du changement climatique

Type d'impacts	Augmentation de la température par rapport aux niveaux préindustriels				
	1°C	2°C	3°C	4°C	5°C
Ressources d'eau douce	Disparition de glaciers de petite taille dans les Andes, menaçant les ressources en eau de 50 millions de personnes	Diminution potentielle des ressources en eau de 20 à 30% dans certaines régions (Sud de l'Afrique et bassin méditerranéen)	Graves sécheresses dans le Sud de l'Europe tous les 10 ans – de 1 à 4 milliards de personnes souffrent de restrictions d'eau	Diminution des ressources de 30 à 50% au Sud de l'Afrique et en méditerranée	Les larges glaciers de l'Himalaya disparaissent affectant un quart de la population chinoise
Agriculture et Alimentation	Légère augmentation des rendements dans les régions tempérées	Déclins des rendements agricoles dans les régions tropicales (3 à 10% en Afrique)	De 150 à 350 million de personnes supplémentaires en situation de malnutrition et de faim - les récoltes atteignent leur maximum dans les latitudes élevées	Les récoltes déclinent de 15 à 35% in Afrique et des régions entières ne sont plus capables de produire d'agriculture	Augmentation de l'acidité de l'océan réduit les ressources halieutiques
Santé publique	Au moins 300,000 personnes meurent chaque année de maladies liées au climat – dans les hautes altitudes, diminution de la mortalité liée au froid et à l'hiver	De 40 à 60 millions de personnes en plus sont exposées à la malaria en Afrique	De 1 à 3 million de personnes supplémentaires meurent chaque année de malnutrition	Jusqu'à 80 millions de personnes supplémentaires sont exposées à la malaria en Afrique	Accroissement des maladies - services de santé publique soumis à une pression croissante
Surfaces côtières	Inondations côtières causant des dommages croissants	Jusqu'à 10 millions de personnes supplémentaires sont exposées aux inondations côtières	Jusqu'à 170 millions de personnes supplémentaires sont exposées à des inondations côtières	Jusqu'à 300 millions de personnes supplémentaires sont exposées aux inondations côtières	La montée du niveau des océans menace des villes majeures telles que New York, Tokyo et Londres
Ecosystèmes	Au moins 10% des espèces terrestres sont menacées d'extinction – risques accrus de feux de forêts	15 à 40% des espèces sont potentiellement menacées d'extinction	20 à 50% des espèces sont potentiellement menacées d'extinction. Possibilité d'un effondrement de l'écosystème de la forêt amazonienne	Perte de la moitié de la Toundra Arctique – larges pertes des barrières de corail	Taux élevés d'extinction à travers le globe

I.6. Utilisation des modèles

I.6.1. Historique du développement du modèle de changement climatique

Les modèles climatiques numériques permettent d'estimer physiquement l'ampleur du changement climatique futur. Ces modèles sont basés sur des lois fondamentales de la physique et de la chimie (conservation de l'énergie, conservation de la masse, conservation de la quantité de mouvement, etc.) et sont précieux pour fournir des informations scientifiques pour la prise de décision politique et sociale (*Stoker, 2011*).

La prévision climatique a été développée dans les années 1950 et est l'une des premières applications informatiques. Presque immédiatement, il est devenu évident que les ordinateurs pouvaient être utilisés pour des simulations numériques afin d'étudier le climat. Norman Phillips l'a démontré pour la première fois en 1956. Les premiers modèles

météorologiques se sont concentrés sur la dynamique des fluides plutôt que sur le transfert radiatif et le bilan énergétique atmosphérique, qui sont essentiels pour simuler le climat (*White, 2013*).

Les premiers modèles de climat global (GCM) océaniques ont été développés par Bryan et Cox dans les années 1960 puis couplés à l'atmosphère par Manabe et Bryan dans les années 1970. Après les événements aux États-Unis, les années 1960 et 1970 sont aussi une période de développement avec l'émergence de grands centres en Europe et en Asie.

L'étude importante, "Inadvertent Climate Modification", soutient l'utilisation de modèles climatiques basés sur les MCG pour étudier la possibilité d'un changement climatique anthropique. À la fin des années 1980, plusieurs organisations nationales et internationales ont été créées pour évaluer et étendre la recherche scientifique liée au changement climatique mondial (*Ouzeau & all, 2014*).

Le Groupe de travail 1 du GIEC des Nations Unies, qui a débuté en 1988, s'est concentré sur l'étude scientifique des processus physiques qui régissent le changement climatique.

Le GIEC est chargé d'évaluer les informations scientifiques, techniques et socio-économiques disponibles sur le changement climatique de manière méthodique, claire et objective et sans préjugés, aussi il est chargé d'estimer les risques et les conséquences du changement climatique, d'envisager des stratégies d'adaptation aux impacts et d'atténuation des émissions de GES. L'une des principales activités du GIEC est l'évaluation périodique de l'état des connaissances (1990, 1995, 2001, 2007, 2014) (*Elouissi A, 2016*).

Le GIEC a proposé aux scientifiques du monde de se concentrer sur l'étude du climat futur. Actuellement, la communauté scientifique ne dispose que des modèles climatiques pour tenter de savoir ce qui peut se passer à l'avenir.

I.6.2. Description de Modèles climatiques

Les outils de simulations de la réponse du système climatique mondial les plus avancés actuellement sont les modèles climatiques (MC). Ces modèles sont des programmes qui calculent les paramètres climatiques et qui sont développés par une équipe de scientifiques.

Ces modèles utilisent un programme de calcul intègre les équations qui reproduisent les phénomènes atmosphériques et océaniques qui gèrent le climat et qui permettent de calculer les paramètres climatiques (température, humidité, précipitations, etc.) à un moment donné et à un endroit précis (*Charles A, 2015*).

En termes généraux, un modèle climatique pourrait être défini comme une représentation mathématique du système climatique basée sur des principes physiques, biologiques et chimiques (*Goosse H, 2010*).

Les équations dérivées de ces lois sont si complexes qu'elles doivent être résolues numériquement. Par conséquent, les MC fournissent une solution discrète dans l'espace et dans le temps, ce qui signifie que les résultats obtenus représentent des moyennes sur des régions, dont la taille dépend de la résolution du modèle, et pour des périodes spécifiques.

Un MC n'est rien d'autre qu'un logiciel très complexe, il s'agit donc d'un ensemble de programme construit de la manière suivante :

- On découpe la surface terrestre et une colonne d'atmosphère en petites boîtes de forme rectangulaires : les mailles du modèle.
- On sélectionne alors quelques paramètres considérés comme caractéristique pour le système dans son ensemble : la température moyenne, les précipitations saisonnières, etc.
- Le programme informatique du logiciel calcule la valeur du paramètre climatique demandé dans chaque maille, à intervalles de temps réguliers (en fonction de la puissance informatique dont on dispose) (*Elouissi A, 2016*).

Tableau I.2: Les modèles climatiques global et régionale (*Elouissi A, 2016*).

N	Modèle climatique régional (MCR)	Nom abrégé du modèle (MRC)	Modèle climatique global MCG
1	CLMcom COSMO-CLM (CCLM4)	CCLM4	MPI ICHEC CNRM
2	DMI HIRHAM5	HIRHAM5	ICHEC
3	SMHI Rossby Center Regional Atmospheric Model (RCA4)	RCA4	MPI ICHEC CNRM
4	KNIMI regional Atmospheric climate model, version 2.2 (RACMO2.2T)	RACMO22T	ICHEEC

I.6.3. Les modèles climatiques globaux

La méthode d'élaboration de scénarios la plus courante et la plus largement connue utilise l'information provenant des modèles climatiques planétaires (MCP). Sont des représentations mathématiques des processus physiques à grande échelle qui se produisent dans le système Terre-atmosphère océan, qui nous tracent un portrait complet des changements climatiques futurs (*Denoux E, 2003*).

Ces modèles représentent l'atmosphère, l'océan, la glace de mer et la surface continentale (hydrographie, végétation). L'une des limites de ce genre de modèles est leur résolution spatiale. En effet, l'échelle typique des variables en sortie est la centaine de kilomètres, cela implique que de vastes régions sont considérées comme uniformes par rapport à des variables comme la pluie, alors que la variabilité à l'échelle régionale et locale est forte (*Gaye, 2008*). D'un point de vue pratique, cela pose un problème quand on s'intéresse à l'impact des changements climatiques dans le futur. Ces modèles nécessitent des variables de forçage en entrée comme les concentrations en CO₂ et autres gaz à effet de serre dans le futur.

Il existe de nombreux MCG plus ou moins perfectionnés, donc complexes, et qui modélisent des compartiments spécifiques (*Mearns LO, 2003*). Les types majeurs sont les suivants :

a. CNRM-CM5 :

Le modèle de circulation générale CNRM-CM5 du CNRM (Centre National des Recherches Météorologiques), développé en collaboration avec le CERFACS (Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique) est dédié à la réalisation de scénarios climatiques. C'est un modèle qui constitue de plusieurs modèles développés indépendamment les uns des autres :

- ARPEGE-Climat pour l'atmosphère.
- NEMO pour l'océan.
- GELATO pour la glace de mer.
- SURFEX pour les surfaces continentales et les flux océan-atmosphère.
- TRIP pour simuler le transport de l'eau douce des fleuves vers les océans.

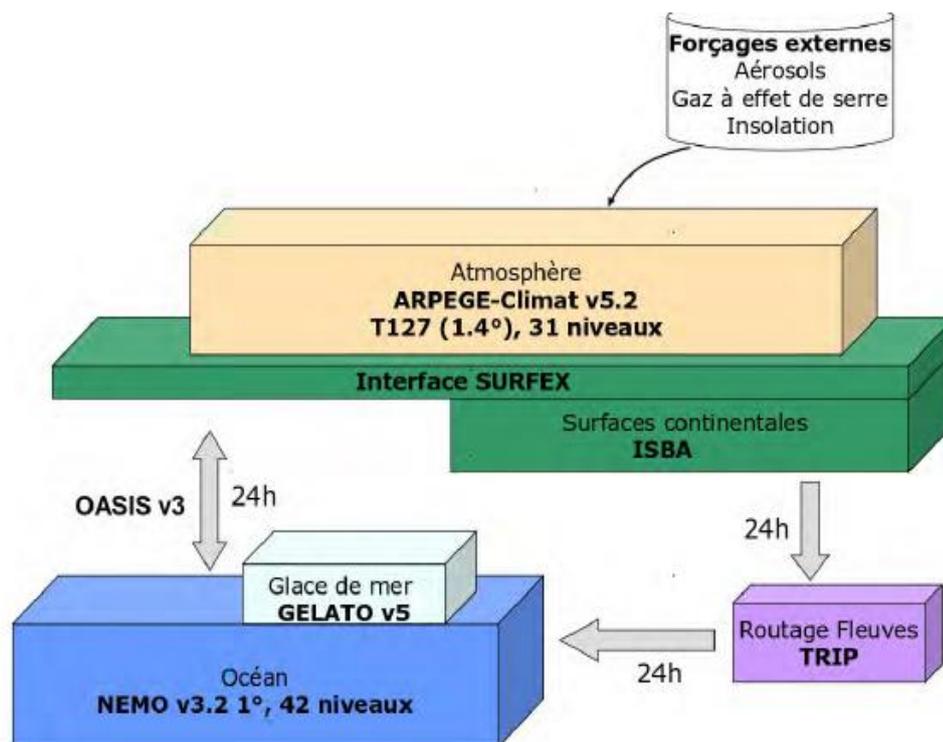


Figure I.8: Schéma montrant les interactions entre les différentes composantes du modèle global couplé atmosphérique CNRM-CM5 (*Mearns LO, 2003*)

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, sa résolution horizontale est de 150 km.

Ce modèle est basé sur les lois de la mécanique des fluides en milieu tournant et fait appel aux équations de NAVIER-STOKES auxquelles on applique quelques hypothèses simplificatrices comme le fait que la Terre est ronde et le niveau d'hypothèse dépend un petit peu des différents modèles de Navier-Stokes de la mécanique des fluides, et les lois de la thermodynamique.

Conservation of momentum:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} - \frac{1}{\rho} \nabla p - \vec{g} - 2\vec{\Omega} \times \vec{V} + \nabla \cdot (k_a \nabla \vec{V}) - \vec{F}_d$$

Conservation of energy:

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = -\rho c_v (\vec{V} \cdot \nabla) T - \nabla \cdot \vec{R} + \nabla \cdot (k_r \nabla T) + C + S$$

Conservation of mass:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) \rho - \rho (\nabla \cdot \vec{V})$$

Conservation of H₂O (vapor, liquid, solid):

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) q + \nabla \cdot (k_s \nabla q) + S_q + E$$

Equation of state:

$$p = \rho R_d T$$

Figure I.9: La loi de Navier Stokes

b. IPSL-CM5

Le modèle IPSL-CM5 développé à l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL) en France Couplé par OASIS, comprend 5 modèles représentant le climat du système terrestre et son cycle du carbone:

- LMDz pour atmosphère.
- NEMO pour les océan, bio géochimie océanique et glace de mer.
- ORCHIDEE pour les surfaces continentales et végétation.
- INCA pour la chimie atmosphérique.

C. BCC_CSM1.1

BCC_CSM1.1 est la version 1.1 du modèle de système climatique du Centre climatique de Beijing (BCC_CSM1.1) développé au Centre climatique de Beijing (BCC) de l'Administration météorologique de Chine (CMA). Il s'agit d'un modèle climatique-carbone global couplé, comprenant une végétation interactive et un cycle global du carbone.

- BCC_AGCM2.1 composante atmosphérique.

- MOM4-L40 la composante océanique.
- BCC_AVIM1.0 la composante terrestre.
- SIS la composante de glace.

Ils sont entièrement couplés et interagissent avec l'autre à travers les flux d'impulsion, d'énergie, d'eau et de carbone à leurs interfaces.

d. BNU-ESM

Un modèle de système terrestre a été mis au point à l'Université normale de Beijing ; le modèle est basé sur plusieurs composantes du modèle climatique largement évaluées et est utilisé pour étudier les mécanismes des interactions océan-atmosphère, la variabilité naturelle du climat et les rétroactions carbone-climat à des échelles de temps interannuelles à inter-décennales.

Il est illustré que le BNU-ESM peut simuler de nombreuses caractéristiques observées du système climatique terrestre, telles que le cycle climatologique annuel de la température et des précipitations, le cycle annuel de la température de surface de la mer tropicale du Pacifique, les schémas généraux et les positions des cellules dans la circulation océanique méridionale océanique.

e. MRI-CGCM3

MRI-CGCM3 est développé à l'Institut de Recherche Météorologique (MRI), qui compose de modèles atmosphère-terre, aérosol et océan-glace, et est un sous-ensemble du modèle de système de terre de MRI MRI-ESM1. Ce modèle est couplé de manière interactive avec un modèle d'aérosol pour représenter les effets directs et indirects des aérosols avec un nouveau schéma de microphysique des nuages.

f. NorESM

Le modèle du système terrestre norvégien (NorESM) est l'un des modèles climatiques sur les 20 qui ont produit des résultats pour le CMIP5. Il est constitué des modèles suivant :

- CAM-OSLO pour l'atmosphère.
- CLM pour la terre.
- CICE pour la glace de mer.
- MICOM-HAMMOCK pour l'océan.

Il existe deux versions :

- NorESM1-M : Système terrestre norvégien Model résolution moyenne
- NorESM1-ME : Système terrestre norvégien résolution moyenne avec possibilité d'être entièrement axé sur les émissions.

k. CCSM4

Le modèle de système climatique communautaire (CCSM) est un modèle climatique couplé pour simuler le système climatique de la Terre. Composé de cinq modèles simulant simultanément l'atmosphère terrestre, l'océan, la terre, la glace terrestre et la glace de mer, ainsi qu'un coupleur central. Le CCSM permet aux chercheurs de mener des recherches fondamentales sur les états climatiques passés, présents et futurs de la Terre.

I.6.4. Modèles climatiques régionaux

L'élaboration de modèles climatiques régionaux (MCR) à beaucoup progressé, leurs données ont une résolution spatiale plus élevée que celle des MCG, elles s'appuient sur les données du MCG, de sorte qu'elles peuvent comporter les mêmes erreurs systématiques. Un de leurs avantages par contre, réside dans le fait qu'ils fournissent de l'information plus spatialement détaillée. Il s'agit de modèles atmosphériques exécutés sur une zone géographique limitée en utilisant des conditions aux limites issues des MCG (*Giorgi, 2004*).

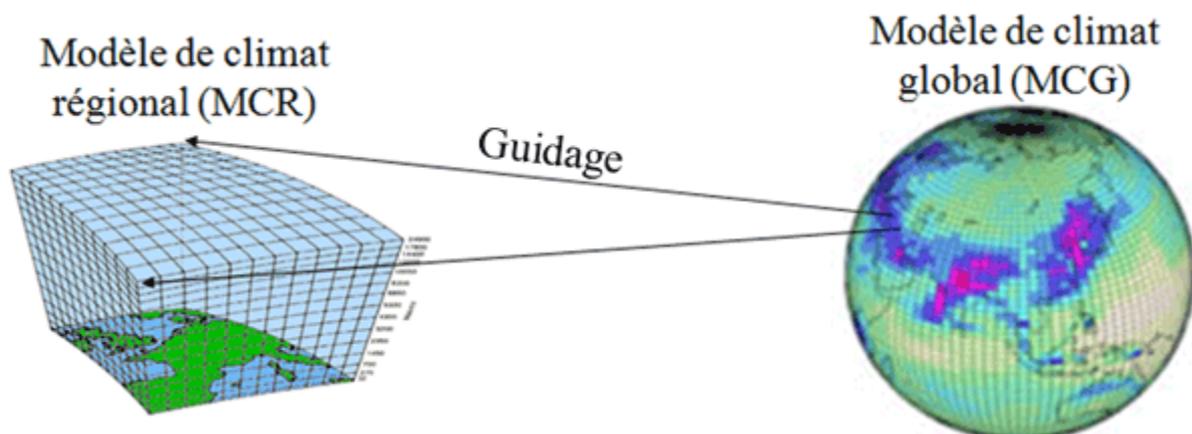


Figure I.10: Guidage du modèle climatique régional par le modèle climatique global

Des programmes internationaux impliquant plusieurs centres de recherche ont été entrepris pour produire des scénarios de CC dans le cadre d'expériences coordonnées utilisant plusieurs MCR.

Ces modèles régionaux sont résolus dans un domaine très réduit permettant d'atteindre des résolutions allant jusqu'à 12 kilomètres, en conservant des coûts de calculs numériques accessibles. Les MCR ont donné naissance à de nombreux projets de modélisation régionale comme : PRUDENCE (prediction of regional scenarios and uncertainties for defining european climate change risks and effects) en Europe et CORDEX à l'échelle internationale (*Mearns, 2013*).

Le programme CORDEX (Coordinated Regional climate Downscaling EXperiment) a été mis en place afin de produire des scénarios de CC fiables à des fins d'étude d'impact sur la plupart des terres émergées en utilisant des MCR de dernière génération et aussi de comprendre et analyser les incertitudes.

Il existe de nombreux MCR, les trois types majeurs sont les suivants :

a. RCA4

Une nouvelle version du modèle atmosphérique régional du Centre Rossby sera utilisée pour la réduction d'échelle à venir pour CORDEX en utilisant les MCG CMIP5 comme conditions aux limites.

b. HIRHAM

HIRHAM est un modèle climatique atmosphérique régional (RCM) basé sur un sous-ensemble des modèles HIRLAM et ECHAM, combinant la dynamique du premier modèle avec les schémas de paramétrisation physique de ce dernier.

c. CCLM4

CCLM est un modèle climatique régional non hydrostatique développé à partir du Modèle Local (LM) du Service Météorologique Allemand par la Communauté CLM. Depuis 2005, c'est le modèle communautaire de la recherche climatique allemande. Le modèle a été utilisé pour des simulations sur des échelles de temps allant jusqu'à des siècles et des résolutions spatiales entre 1 et 50 km.

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les scénarios et les différents modèles climatiques existants, ainsi que leurs caractéristiques et usages. Ce chapitre nous a également appris que les modèles climatiques

régionaux ont une résolution spatiale plus précise et sont plus efficaces pour prédire les événements extrêmes dans une région que les autres modèles.

Chapitre II

La zone d'étude

II.1. Introduction

Afin d'aboutir à une étude de changement climatique la présentation de site d'étude est indispensable. Donc l'objet de ce chapitre est d'accéder à une connaissance générale des principales caractéristiques du bassin versant d'oued Isser, sa situation géographique, son climat et sa géologie.

II.2. Définition du bassin versant

Le bassin versant est la surface réceptrice des eaux précipitées qui alimentent une nappe souterraine, un lac, une rivière ou un réseau complexe (Figure II.1) ; on le définit par sa morphométrie, ses caractères climatiques, sa géologie, sa végétation et ses sols

Le bassin versant est donc un espace drainé par un cours d'eau et ses affluents, toutes les eaux dans cet espace s'écoulent vers un même point appelé l'exutoire, il est limité par la ligne de partage des eaux (LOUP, 1974)



Figure II.1: Le bassin versant (Ministère de l'environnement de Québec, 2001)

II.3. Contexte géographique

Notre zone d'étude comporte Oued Isser (Figure II.2), se situe au centre nord de l'Algérie, entre les longitudes 1°20'31'' W et 0°52'28''W et les latitudes 34°41'22'' N et 35°9'37'' N. Il se trouve à l'amont du barrage de Bni Amrane et présente une forme allongée sur l'axe sud-ouest (Ain Boucif / Beni Slimane) à nord-est (mer Méditerranée). Il couvre une

superficie de 4119.0 Km², soit 8.72% de la superficie totale du bassin Algérois Honda Soummam (AHS). Il présente sensiblement la forme d'un quadrilatère d'orientation Sud-Ouest /Nord-Est.

Il est limité :

- A l'Est, par le bassin de la Soummam.
- Au Sud, par le bassin du Honda.
- A l'Ouest, et au Nord par le bassin du Côtier Algérois.
- A l'Ouest le bassin de Cheliff.

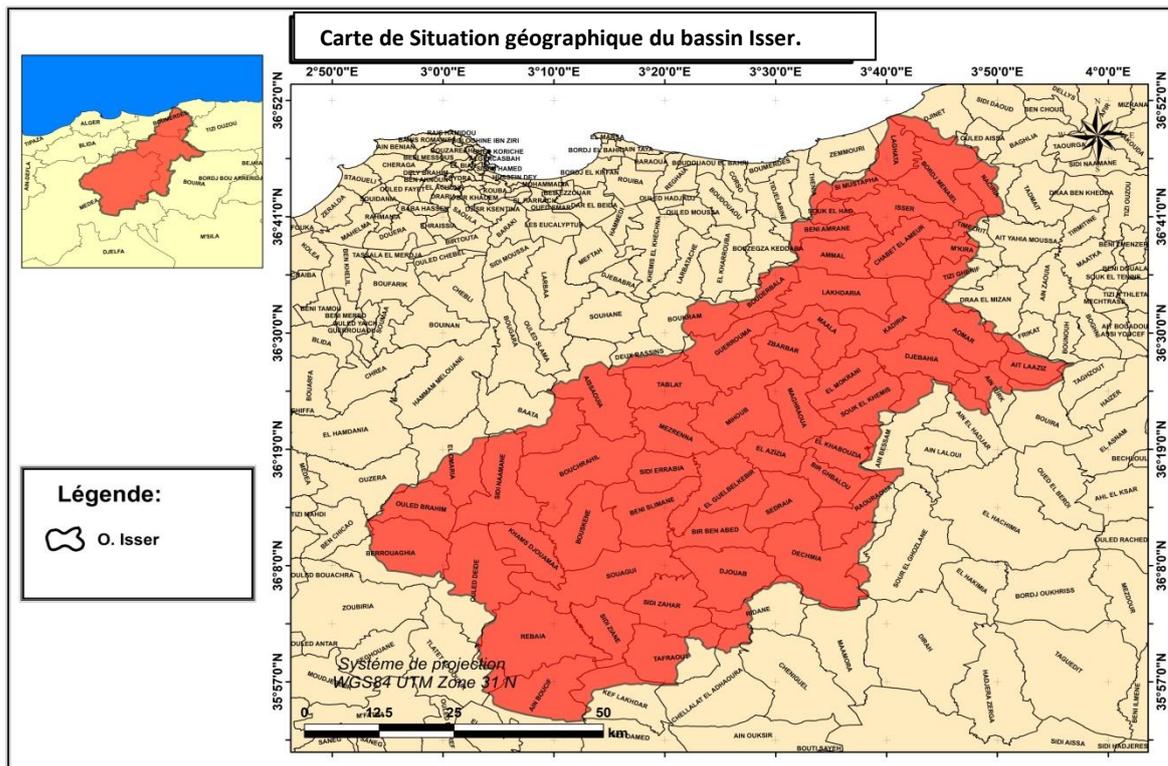


Figure II.2: Situation géographique du bassin Isser.

Le cadre géographique dans lequel se développe le bassin versant est constitué de l'atlas Tellien algérois au nord qui culmine à 1130 m au Djebel Tamesguida et de la chaîne des Bibans au Sud qui culmine à 1810 m au Djebel Dira. Ces deux chaînes sont séparées par la plaine des Ariba d'altitude 550 m.

Le bassin de l'Isser Couvre en partie quatre wilayas : Médéa, Bouira, Boumerdes et TiziOuzou et comptabilise 50 communes et 114 agglomérations avec une population totale estimée, en l'an 2030, à 812291 habitants.

II.4. Caractéristiques physiographiques du bassin de l'Isser

Le bassin versant d'Isser est formé essentiellement des cinq sous-bassins. Afin de mieux étudier la particularité du relief du bassin et pour mieux comprendre le comportement hydrologique du bassin versant, il est impératif de connaître ses caractéristiques physiographiques (forme, altitude, pente...) qui explique le cycle de transformation des pluies en écoulement. Ils ont l'avantage de se prêter à une analyse quantifiée qu'il convient de préciser autant que possible, dès le début de toute étude.

II.4.1. Paramètres géométriques

Les bassins versants ont des propriétés géométriques variées qui dépendent du contexte géologique, géomorphologique et climatique de la région étudiée. (OULDFAH, 2015)

II.4.1.1. Le périmètre

Il est exprimé en Km, peut être mesuré à l'aide d'un curvimètre et n'est généralement pas utilisé directement, mais à travers des valeurs qui en dérive. Comme la longueur du rectangle équivalent « L ». Il est donné par la formule :

$$P=2 (L+l).....(Eq. II-1)$$

Avec :

L: longueur du rectangle équivalent.

l : largeur du rectangle équivalent.

Le périmètre du bassin versant de Isser est de : 416,15 Km

II.4.1.2. La surface

Elle correspond à l'aire délimitée par l'ensemble des points les plus hauts qui constituent la ligne de partage des eaux. Elle mesurée à l'aide d'un planimètre, son unité est le Km² . Pour le bassin versant considéré on a :

$$S = 4119,08 \text{ Km}^2$$

II.4.2. Paramètres de forme

La forme du bassin versant a une influence certaine sur l'écoulement : Un bassin compact, de forme quasi-circulaire a une réponse hydrologique beaucoup plus rapide pour une même averse qu'un bassin allongé, parce que la plupart des points du bassin sont à peu près à la même distance de l'exutoire. Les différentes grandeurs déterminantes de la forme d'un bassin versant sont les suivantes :

II.4.2.1. L'indice de compacité de Gravelius (KG)

C'est le rapport entre le périmètre du bassin versant et la circonférence du cercle ayant la même superficie que le bassin versant.

Il est établi en comparant le périmètre stylisé du bassin considéré à celui d'un cercle ayant la même surface.

L'indice de Gravelius est donné par la formule :

$$K = 0,28 \frac{p}{\sqrt{A}} \dots\dots\dots (\text{Eq. II-2})$$

Avec :

P= périmètre du bassin versant en (Km)

A= superficie en (Km²)

On a K= 1 pour un carré

K= 1,28 pour un rectangle latéral

K= 1,12 pour un rectangle dont la longueur est 5 fois supérieure à la largeur
(*BENNABI, 1985*)

Dans notre cas, K= 1,816 Ce qui veut dire que notre bassin a une forme Allongée.

II.4.2.2. Le Rectangle équivalent

La notion de rectangle équivalent permet de ramener la forme quelconque d'un bassin versant à une forme rectangulaire ayant la même superficie, le même périmètre et le même indice de compacité (*BECHROUNE, 2011*).

Les dimensions de ce rectangle se calculent à l'aide des relations suivantes :

$$L = \frac{k\sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K}\right)^2} \right] \dots\dots\dots(\text{Eq. II-3})$$

$$l = \frac{k\sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K}\right)^2} \right] \dots\dots\dots(\text{Eq. II-4})$$

avec :

L : longueur du rectangle équivalent (Km).

l : largeur du rectangle équivalent (Km).

Pour notre bassin on obtient :

$$L = 185,97 \text{ m}$$

$$l = 22,14 \text{ m}$$

Tableau II.1 : Tableau récapitulatif des paramètres de forme de bassin Isser

Le bassin versant	La superficie A (Km ²)	Le périmètre P (Km)	L'indice de gravilus KC	La forme	L (Km)	l (Km)
BV.Isser	4119.08	416.15	1.816	Allongée	185.97	22.14

II.4.3. Paramètres du relief

Le relief joue un rôle indéniable sur le comportement hydrologique d'un bassin versant, il détermine en grande partie l'aptitude des terrains au ruissellement, l'infiltration et l'évaporation. Le relief du BV Isser présente une forme assez irrégulière ; se détermine lui aussi au moyen d'indice ou de caractéristiques suivants :

II.4.3.1. La courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique donne la répartition des altitudes des sous bassins en fonction des surfaces correspondantes. Elle est obtenue en portant sur l'axe des abscisses les surfaces cumulées des surfaces partielles comprises entre deux courbes de niveau successives (Ii, Ii+1) et les altitudes correspondantes sur l'axe des coordonnées.

La courbe hypsométrique reste un outil pratique pour comparer plusieurs bassins entre eux ou les divers sections d'un seul bassin (BECHROUNE, 2011).

Tableau II.2: Répartition altimétrique du bassin versant d'Isser (ANRH Alger, 2014)

Tranches d'Altitudes (m)	Moyennes (m)	Superficies partielles		
		km2	%	% cumulés
1600-1800	1700	2,63	0,06	0
1400-1600	1500	6,38	0,16	0,06
1200-1400	1300	80,02	1,94	0,22
1000-1200	1100	270,18	6,56	2,16
800-1000	900	823,2	20	8,73
600-800	700	1267,2	30,79	28,73
400-600	500	910,2	22,11	59,51
200-400	300	370,15	8,99	81,63
0-200	100	386,04	9,38	90,62
Totaux	4116	100	100	Totaux

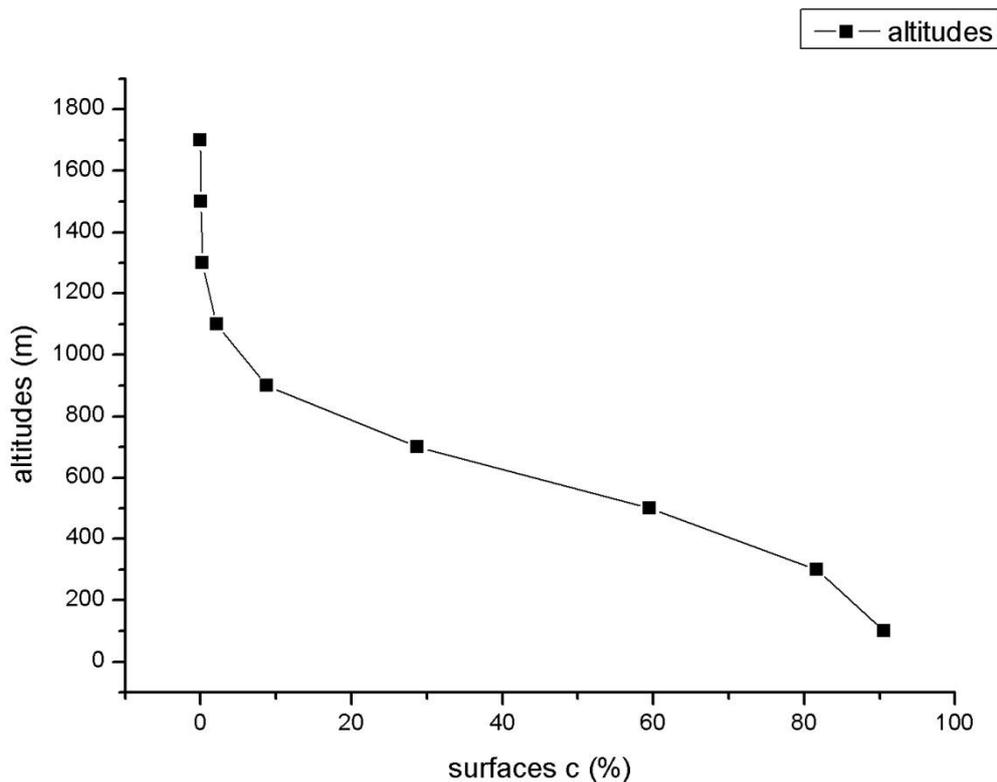


Figure II.3: Courbe hypsométrique du bassin d'Isser

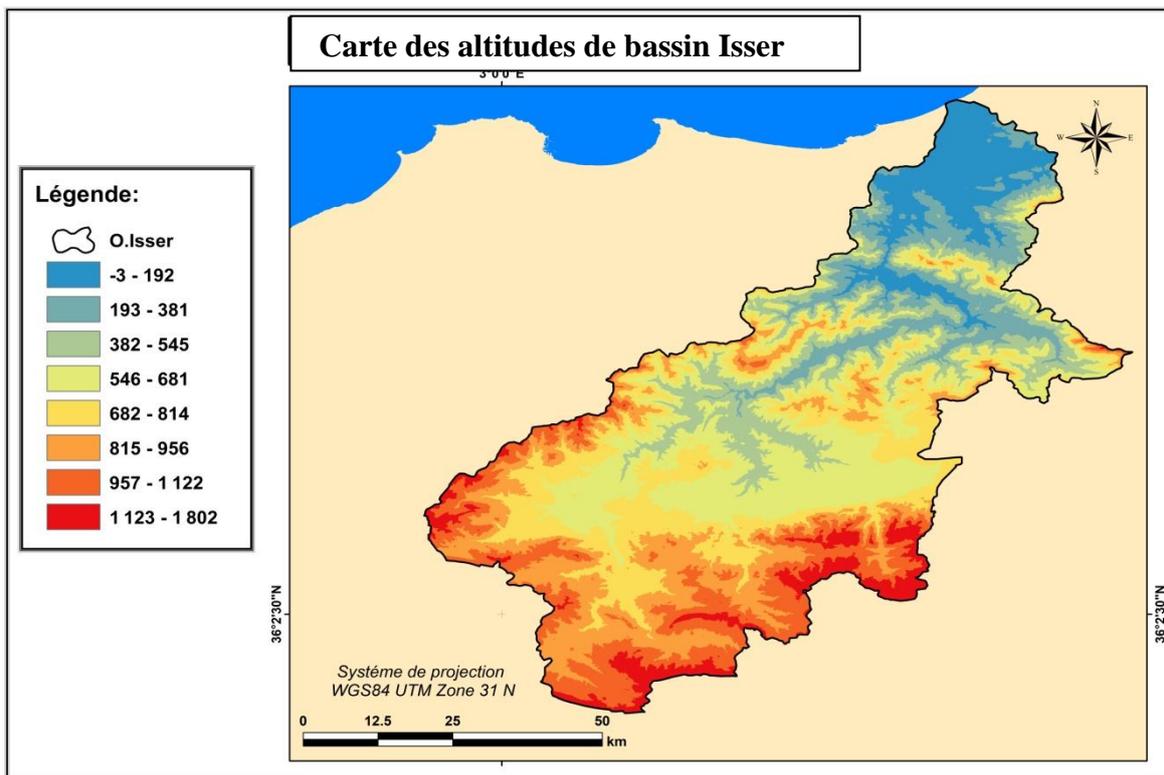


Figure 4: Carte des altitudes de bassin Isser

II.3.3.2. Les altitudes caractéristiques

Il existe quatre types d'altitudes caractéristiques qu'on peut calculer à partir de la courbe hypsométrique.

- a. **Altitudes minimale et maximale** : Les altitudes minimale et maximale du notre bassin sont lues directement à partir de la carte. L'altitude minimale (Hmin) est celle qui correspond à l'exutoire près de la mer ; tandis que l'altitude maximale (Hmax) représente le point le plus élevé du bassin (*MUSY, 2004*) dans notre cas en obtient :

Hmin= 0 m

Hmax= 1802 m

- b. **Altitude moyenne** : L'altitude moyenne se déduit directement de la courbe hypsométrique, elle est définie comme suit :

$$H_{moy} = \frac{1}{A} \sum H_i \cdot A_i \dots\dots\dots (Eq. II-5)$$

Tel que :

Hmoy : altitude moyenne du bassin versant en (m).

Ai : aire comprise entre deux courbes de niveaux.

Hi : altitude moyenne entre deux courbes de niveaux.

Hmoy = 659,9 m

- c. **Altitude médiane** : Elle correspond à l'altitude lue à 50 % de la surface totale sur la courbe hypsométrique.

Elle se rapproche de l'altitude moyenne dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin considéré représente une pente régulière (LANGBIN, 1947).

Hmed = H50%

II.4.3.3. Les indices de pente

a. Indice de pente moyenne (Imoy)

La pente moyenne apporte des renseignements importants sur la topographie du bassin versant, sur le ruissellement et influence directement sur le débit de pointe lors d'une averse. Elle est définie comme le rapport entre la dénivellée totale de rectangle équivalent et sa longueur

$$Imoy = \frac{D}{L} \dots\dots\dots (Eq. II-6)$$

Avec :

Imoy : la pente moyenne en (m)

D : la dénivellée totale (Hmax – Hmin)

L : la longueur en (Km)

b. Indice de pente globale (Ig)

Il est d'application simple et il est donné par la relation :

$$Ig = \frac{d}{L}; \text{ elle est donnée en \%}$$

Avec :

d: dénivellée entre les altitudes en (m)

L : longueur du rectangle équivalent en (Km)

d est déterminé à partir de la courbe hypsométrique tel que :

$$d = H_{5\%} - H_{95\%}$$

H (5% et 95 %) sont les altitudes entre les quelles s'inscrit 95 % de la surface du bassin versant.

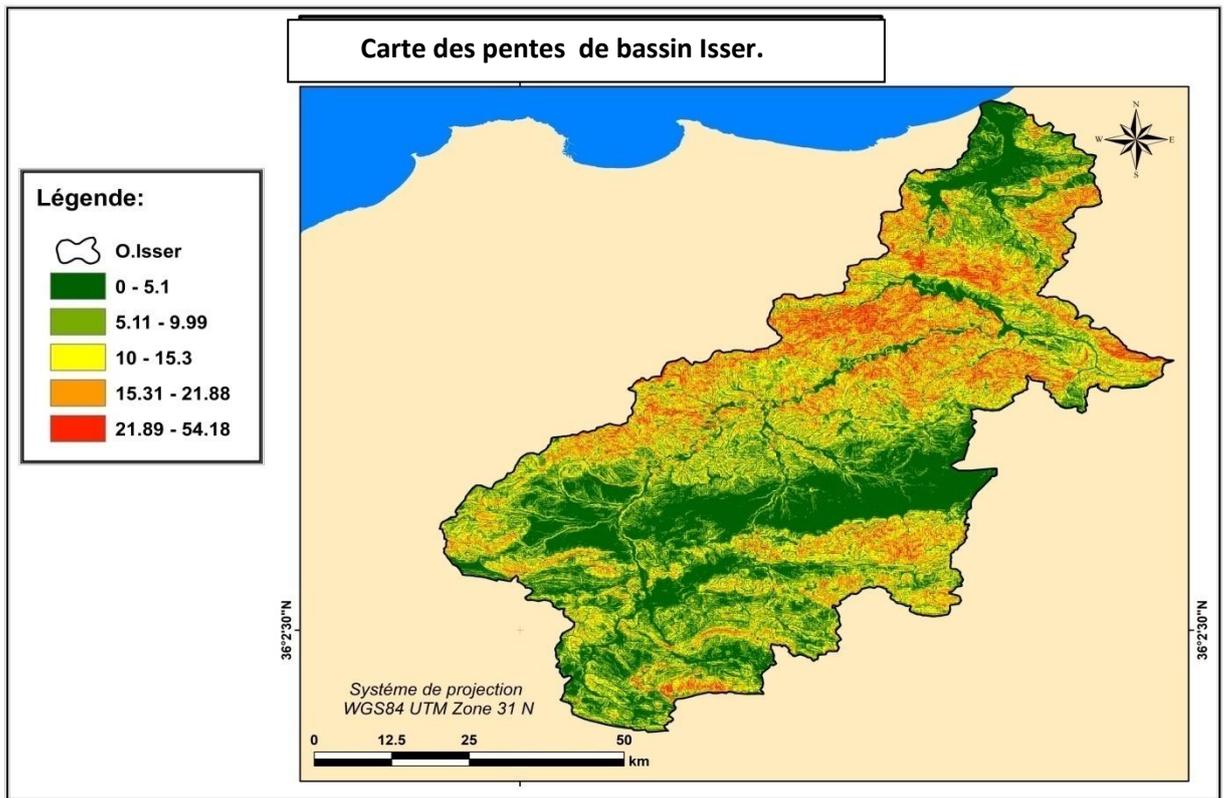


Figure II.5: Carte des pentes de bassin Isser.

Tableau II.3: Tableau récapitulatif des altitudes caractéristiques et les indices du pente de bassin Isser

	Hmax(m)	Hmin (m)	Hmoy (m)	Hmed (m)	H5% (m)	H95% (m)	d(m)	Ig	D (m)	Imoy
BV.Isser	1802	0	659,9	590	1000	25	975	5.24	1802	9.69

Tableau II.4: classification du relief d'après O.R.S.T.O .M.00

Relief tres faible	$I_g < 0.002$
Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$
Relief assez faible	$0.005 < I_g < 0.01$
Relief modéré	$0.01 < I_g < 0.02$
Relief assez fort	$0.02 < I_g < 0.05$
Relief fort	$0.05 < I_g < 0.5$
Relief très fort	$I_g > 0.5$

D'après le Tableau de la classification du relief d'après O.R.S.T.O .M.00 on déduit que le bassin Isser se caractérise par un relief très fort.

II.5. Lithologie

Nous avons divisé le bassin en trois entités différentes en se focalisant sur une description lithologique du bassin versant afin de connaître le degré de dégradation (figure II.6).

Le haut Isser : Le haut Isser est constitué à 60% de formation marneuse et marno-calcaire appartenant au crétacé inférieur, moyen et supérieur. Les argiles et sable rouge de l'aquitainien continental occupent 13 % du bassin.

Le moyen Isser : La description lithologique du bas Isser et moyen Isser est extraite de la carte lithologique. Les schistes argileux, les marnes grises et schisteuses avec des couches de grés occupent 70 % du moyen Isser. Les alluvions du quaternaire continentales occupent 6,90% de la superficie totale.

Le bas Isser : Le bas Isser est constitué de 43.15% des formations marneuses des grés et des conglomérats, appartenant à l'oligocène marin. On y trouve des granites formant 1.93 % de la superficie totale. Ces formations dures conglomérats et granites donnent au bas Isser, la caractéristique du moins érodable en comparaison avec le haut Isser (*Binnie, 1984*)

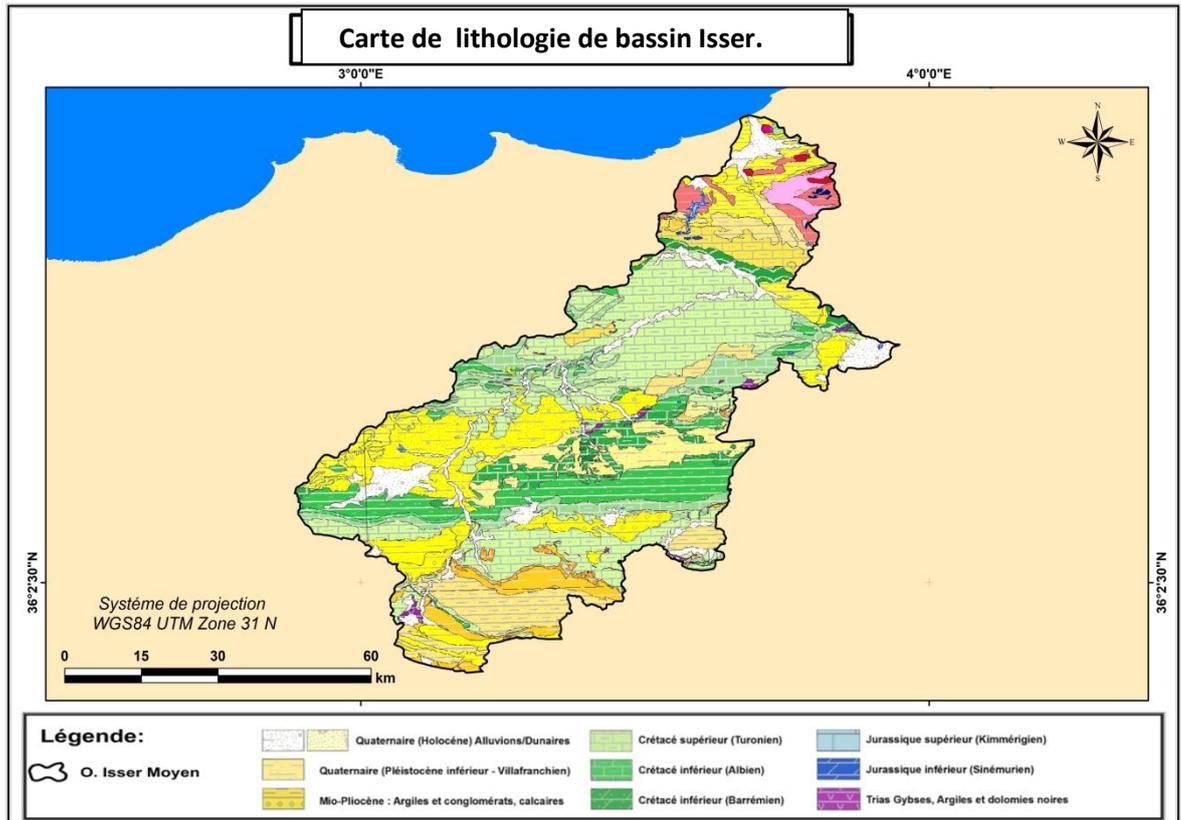


Figure II.6: Carte de lithologie de bassin Isser.

II.6. Le cadre géologique

Du point de vue géologie, cette zone est constituée de plusieurs structures tectoniques, qui se répartissent du nord au Sud (figure II.7) comme suit :

- Au Nord, dans le massif Kabyle, les époinements de roches du socle métamorphique recouverts par une nappe allochtone de flyschs crétacés et paléogènes.
- Au Sud dans les limites des sous- zones de la chaîne calcaire et des nappes de flysch.

La structure géologique de la région d'étude est marquée par la présence de terrains métamorphiques précambriens.

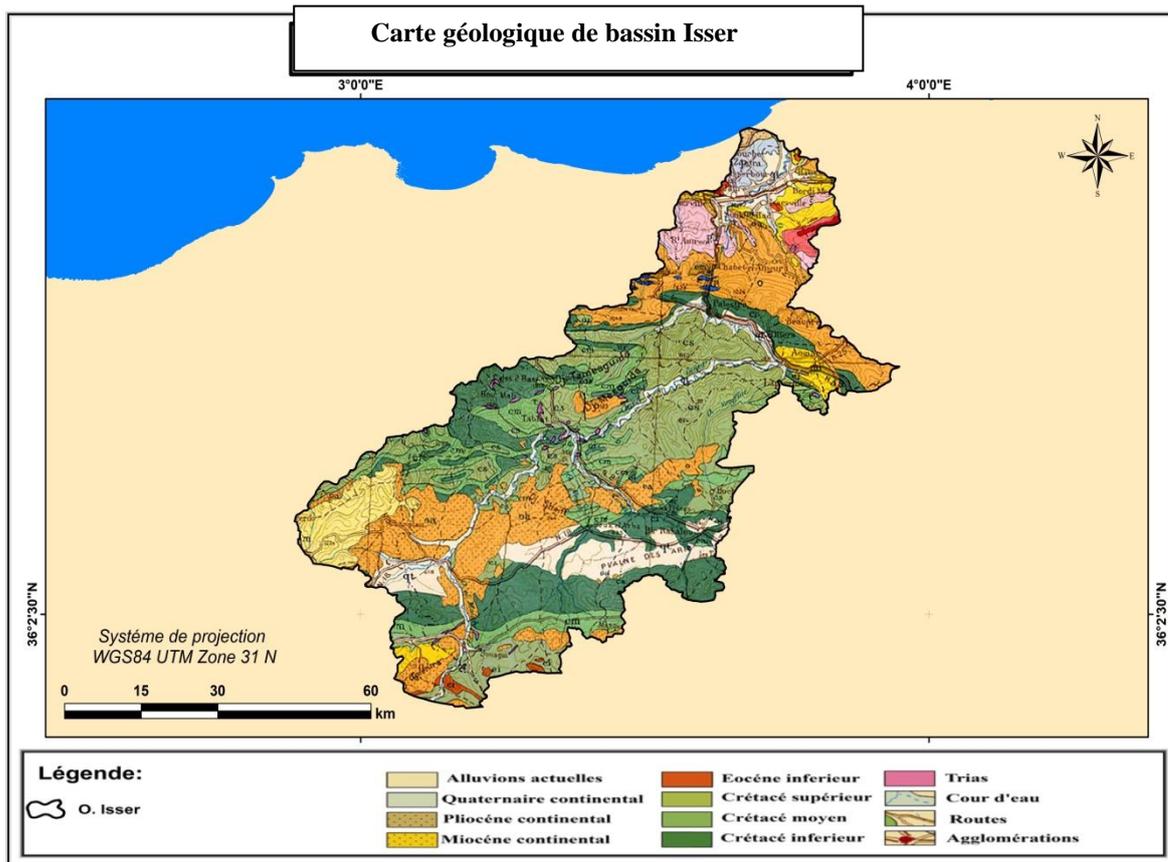


Figure II.7: Carte géologique de bassin Isser

II.7. Hydrogéologie

Le Quaternaire est constitué essentiellement par des graviers, galets, sables et argiles, du fait de son épaisseur assez importante du réservoir utile, ces formations constituent le milieu le plus favorable pour l'accumulation des eaux souterraines (A.N.R.H, 2012). Elle est représentée par :

Terrasses marines : Elles comprennent les plages actuelles affleurant aux plateaux de Beni kous, rive gauche de l'Oued Isser et Cap Djenat, et les dunes anciennes développées parallèlement au littoral.

Terrasses alluviales : Ce sont les terrains les plus abondants dans la vallée du Bas-Isser (environ 100 km²).

Dans le Bas Isser le comportement hydrogéologique est très différencié selon la litho structure encaissante, les formations aquifères sont localisées dans les terrains quaternaires de la

vallée de l'Oued Isser. Le fond et les bordures de la vallée sont constitués par des terrains anti-quaternaires (schiste, poudingue, grès, conglomérat, roche éruptives) (AREZKI, 2012)

II.8. Le réseau hydrographique

L'hydrographie c'est l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels ; permanents ou temporaires qui participent à l'écoulement. Notre zone d'étude possède un réseau hydrographique très développé (figure II.9). Il draine les apports de 05 sous bassins présentés dans le tableau II.5.

Tableau II.5 : Sous bassin de l'ISSER (ANRH, 2008)

Code	Sous bassin	Superficie (km2)
0901	OUED MELAH KHERZA	666
0902	OUED MELAH YAGOUR	774
0903	OUED ZEROUA	1132
0904	OUED ISSER MOYEN	1031
0905	OUED ISSER MARITIME	546

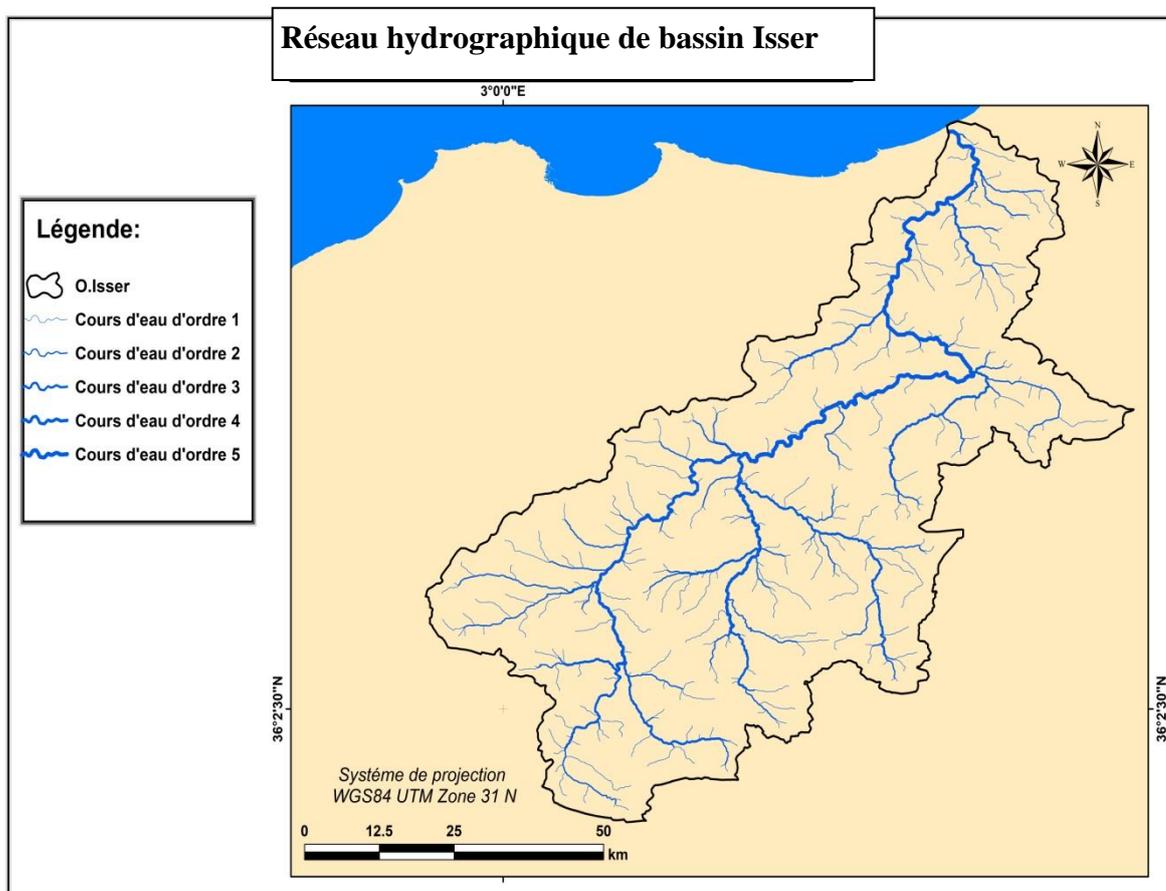


Figure II.8: Réseau hydrographique de bassin Isser

Pour mesure le degré de développement de notre réseau hydrographique y'a quelque paramètre à déterminer.

II.8.1. La densité de drainage

La densité de drainage est définie comme le rapport entre la longueur des canaux d'écoulement et la superficie de bassin. Elle est donnée par la relation suivante

$$Dd = \frac{\sum Li}{A} \dots\dots\dots (Eq. II-7)$$

Avec :

Dd : densité de drainage (km/km²).

$\sum Li$: somme des longueurs des cours d'eau (km).

II.8.2. La densité hydrographique

La densité hydrographique appelée aussi la fréquence de drainage est définie comme le nombre de drains du bassin par unité de surface, elle donnée par la relation suivante :

$$F = \frac{Ni}{A} \dots\dots\dots (Eq. II-8)$$

Avec :

F : densité hydrographique (1/Km²).

Ni : nombre de cours d'eau.

A : superficie du bassin versant (Km²).

II.8.3. Temps de concentration

C'est le temps que met une goutte de pluie la plus éloignée pour arriver à l'exutoire ; il est convient particulièrement prudent par les déférentes formules empiriques (formule d'Izzard Meunir, formule de Bramby Williams ;Basso...) nous donne la formule de Giandotti car elle donne des valeurs acceptables par rapport les autres formules (**BOUANANI, 2004**).

$$Tc = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{Hmoy - Hmin}} \dots\dots\dots (Eq. II-9)$$

Avec :

Tc : le temps de concentration en (h)

Tableau II.6: Tableau récapitulatif des caractéristiques du réseau hydrographique

	Dd (Km/Km ²)	F (l/Km ²)	Tc (h)
BV. Isser	0,64	0.014	26,06

II.9. La végétation

La végétation du bassin versant d'Isser est de type Méditerranéen et est très variée.

Le haut Isser : La caractéristique la plus apparente en étudiant le bassin est l'absence d'une couverture végétale arbustive dense, ce qui favorise le phénomène de l'érosion.

Le moyen Isser : Les cultures annuelles occupent la quasi-totalité des terres agricoles de moyen Isser. Les plaines, tout en long d'Oued Isser sont couvertes des cultures maraîchères et d'arboricultures fruitières. Les collines sont occupées par la céréaliculture et l'arboriculture.

Le bas Isser : Le même problème de végétation arbustive se rencontre dans le bas ISSER. Les cultures annuelles dominent la majeure partie basse du bassin à savoir l'arboriculture fruitière, fourragère et aussi céréalicultures qui occupent les plaines.

II.10. Le contexte climatique

L'étude de la caractéristique climatologique joue un rôle primordial dans la connaissance des comportements des cours d'eaux, les variations des réserves, la compréhension des mécanismes d'alimentation et de circulation des eaux naturelles. (BOUTOUGA, 2012).

Le bassin Isser est soumis à un climat méditerranéen intermédiaire, entre le climat tellien de montagne pluvieux et à l'amplitude thermique faible, avec des chutes de neiges et le climat tellien de plaine plus sec relativement chaud et présentant des forts écarts de température. Il est caractérisé par :

II.10.1. Pluviométrie

On peut distinguer deux principaux régimes pluvieux :

➤ Le régime méditerranéen est le régime le plus important, il s'étale d'octobre à mai. Son efficacité se fait sentir entre octobre et mars. Les précipitations d'origine cyclonique représentent 60% environ du total annuel dont une partie non négligeable provient des pluies orageuses (dues à la proximité de la mer) ou de l'effet orographique.

➤ Le régime subtropical se caractérise par des pluies qui se manifestent le plus souvent en été ou à la fin du printemps.

II.10.2. Température

Le Bassin versant de l'oued ISSER est caractérisé par une température relativement douce d'octobre au mois d'avril et chaude de Mai à Septembre. Les températures moyennes dans les différentes stations climatologiques sur leurs périodes d'observation (1995-2008) sont présentées dans le tableau (II.7).

Tableau II.7: Température moyennes des 6 stations climatologiques recueillies pour la période (1995-2008) (ONM Alger, 2016).

Mois ST	J	F	M	A	MA	J	JU	AO	S	O	N	D	Annuel
Médéa	6.9	7.9	10.4	12.6	17.1	23.1	26.4	26	21.2	17.2	10.4	7.2	15.5
Déllys	13.1	13	14.1	15.6	18.2	21.6	24.2	25.7	23.2	20.9	16.5	14.1	17.8
Dar el beida	11.7	11.5	13.5	15.2	18.7	22.8	25.2	26.5	23.7	20.4	15.4	12.7	18.1
Tiziouzou	10.6	11	14.5	16	19.8	25.6	29.1	29.2	25.1	21.3	15.5	12	19.1
Bouira	8.9	12.3	12.4	14.1	18.8	24.4	27.5	27.7	23.4	19.2	13.5	9.9	16.7

D'après le tableau ci dessus, la température moyenne annuelle pour la période 1995-2008 oscille entre 17 à 19°C pour les stations qui se trouvent à l'intérieur et aux périphéries du BV de ISSER. Il n'y a pas eu de grande variation de températures qui dépassent les 1°C.

II.10.3. Vents

Les données des vitesses moyenne mensuelle des vents pour la station Médéa pour la période 1996-2008, et les stations Dar el Beida et Dellys pour les périodes d'observation 1995-2004 les données sont mises dans le tableau II.8.

Tableau II.8 : Vitesse moyennes Mensuelles des stations

ST \ Mois	J	F	M	A	MA	J	JU	AO	S	O	N	D	Annuel
Médéa	3.3	3.2	3.4	3.7	3.2	3.2	2.8	2.7	3	3	3.5	3.5	3.2
Dar el Beida	2.5	2.1	2.2	2.7	2.7	2.7	2.4	2.4	2.4	1.9	2.5	2.6	2.4
Dellys	3.4	3.4	3	3.5	2.9	2.7	2.7	2.6	2.8	2.6	3.5	4.1	3.1

D'après le tableau ci-dessus, Nous remarquons que c'est très peu fréquent que les vitesses dépassent les 4 m/s. Et moyenne annuelle tourne autour de 2.5 à 4 m/s.

II.10.4. Humidité

L'examen de l'humidité relative pour les données obtenues montre que celle-ci ne descend pas au-dessous de 45%. Ces valeurs peuvent être légèrement différentes d'une station à une autre.

Les plus fortes valeurs de l'humidité s'expliquent par l'effet de température qui est plus élevé durant cette saison, à partir d'une coupe allant de Bousmail-Blida-Chréa-Médéa et Djelfa, nous confirmons que l'humidité relative ne descend jamais en dessous de 50% (en moyenne annuelle) (tableau II.9).

Tableau II.9 : Humidité relative des différentes stations climatologiques

ST \ Mois	J	F	M	A	MA	J	JU	AO	S	O	N	D	Annuel
Médéa	80	78	72	71	67	54	47	51	63	69	80	83	68
Dar el Beida	78	80.5	76.4	75	76.1	70.7	69.9	69.6	71.7	74.3	77.6	78	74.9
Dellys	72.2	74.2	74.7	72	76	78.6	77.1	76	75	74	72.2	69.5	74.5
Tizi-ouzou	80.3	77.7	77.3	72.3	71	58.1	53	53	62.4	67.4	75	79	68.9

D'après le tableau ci-dessus, on a remarqué que les stations qui se trouvent dans la périphérie du BV de Isser ont une l'humidité relative moyenne annuelle varie entre 68 et 75%, ce qui peut nous amener à dire que l'humidité relative est assez élevée dans cette région.

II.10.5. Evapo-transpiration

Elle est calculée à l'aide de la formule suivante

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \dots \dots \dots (Eq. II-10)$$

Avec : $L=300+25T+0.05T^3$.

P : précipitations interannuelles (mm).

T : température interannuelle 14°c.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau (II.10).

Tableau II.10: ETR au niveau du bassin Isser pour l'année 2002 (A.N.R.H, 2012).

Bassin Isser	ETR (mm)
Haut Isser	418
Moyen Isser	445.7
Bas Isser	523.9

Une forte évapotranspiration potentielle est enregistrée surtout pour le bas d'Isser.

II.11. Présentation d'arc gis 10.3

ArcGIS est une c'est une suite de logiciels d'information géographique (ou logiciels SIG) développés par la société américaine Esri (Environmental Systems Research Institute.). Une version avancée, arc gis 10.3, offre quelques fonctionnalités en plus.

L'ArcGIS 10.3 permet de :

- Créer, partager et utiliser des cartes intelligentes.
- Rassembler les informations géographiques.
- Créer et gérer des bases de données géographiques.
- Résoudre des problèmes avec l'analyse spatiale.
- Créer des applications basées sur la carte.
- Communiquer et partager des informations grâce à la puissance de la géographie et de la visualisation.

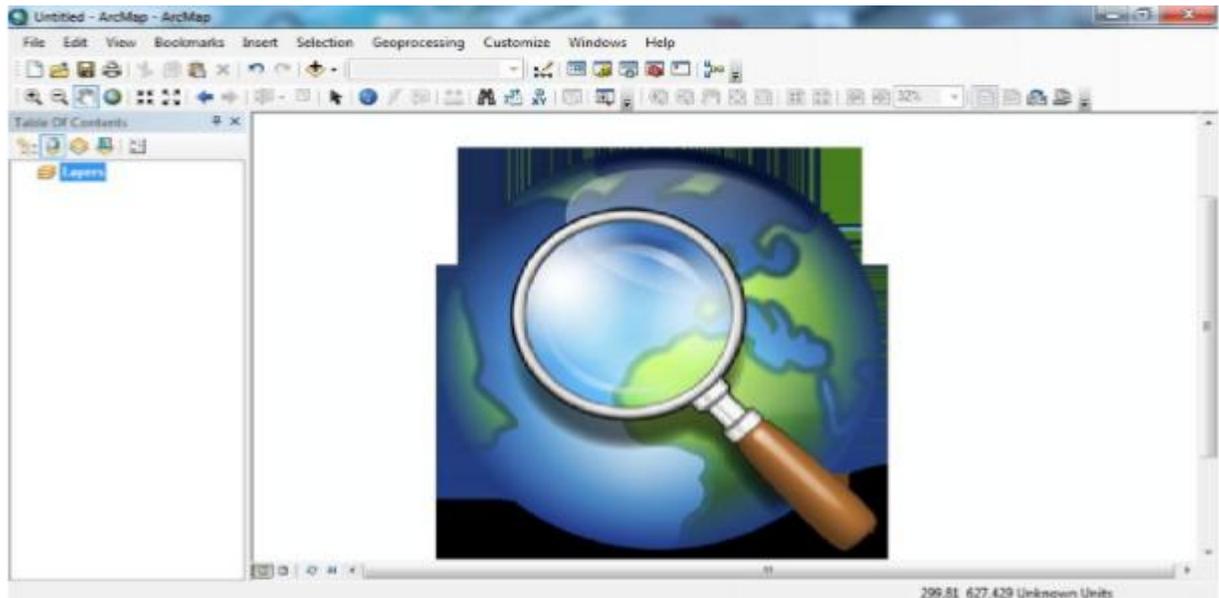


Figure II.9: Interface de logiciel ArcGis 10.3

II.12. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons pu présenter notre zone d'études et les différentes données relatives au BV de Isser nécessaires pour notre travail, les différentes caractéristiques que nous avons déterminés, nous a donnés les synthèses suivantes :

- Le bassin de Isser est assez homogène sur le plan climatique.
- La valeur de l'indice de compacité montre que notre bassin est de forme allongé qui influence sur le temps de concentration.
- Le bassin possède un réseau hydrographique très développé (ordre 5).
- Notre site d'étude caractérise par un relief très fort.

On a utilisé le logiciel Arcgis 10.3 pour la délimitation du bassin et la cartographie (les différentes cartes présentées dans ce chapitre).

Chapitre III

Analyse des données

III.1. Introduction

Les modèles hydrologiques pluie-débit ne peuvent être testés ni fonctionnés sans l'apport de données hydrométéorologiques, à savoir les données pluviométriques comme entrées du modèle et les données hydrométriques comme sorties de ce dernier (pour la période de calage et celle de validation).

Dans ce présent chapitre nous nous allons présenter les données pluviométriques nécessaires à la construction du modèle, pour notre étude nous avons choisit le bassin versant de l'Oued ISSER codé (09).

III.2. Classification des zones climatiques

Les classifications des zones climatiques sont dérivées du système de classification climatique de Köppen-Geiger, qui divise les climats en cinq principaux groupes climatiques divisés en fonction des précipitations saisonnières et des modèles de température. Les cinq groupes principaux sont A (tropical), B (sec), C (tempéré), D (continental) et E (polaire).

III.3. Climat actuel Tendances et changements significatifs par rapport à la variabilité naturelle

Les tendances climatiques passées, présentes et futures doivent toujours être comprises dans le contexte de la variabilité naturelle. Variabilité climatique ici, fait référence à la manière dont les conditions climatiques (par exemple, la température et les précipitations) « oscillent » d'une année à l'autre dans leur « plage de variabilité » typique respective. La cause de cette variabilité naturelle peut être due à une variabilité interne quasi aléatoire du système couplé atmosphère-océan-terre-glace (car la variabilité météorologique s'étale sur de nombreuses années).

III.4. Changements climatiques en Algérie au l'horizon 2100

Plusieurs manifestations climatiques récentes de grande ampleur ont poussé la communauté scientifique à s'intéresser aux changements climatiques et leurs conséquences socio-économiques. Parmi ces manifestations, la sécheresse qui a touché des grandes zones de notre planète, notamment les pays Africains (*Ardoin.Baedin, 2004*). En Algérie, le

changement des principaux facteurs climatiques (Température, Evapotranspiration potentielle et pluie) a été particulièrement remarquable depuis 1975, la sécheresse a dramatiquement perturbé les usages de l'eau sur le plan domestique, agricole et industriel (*Meddi, 2010*). Pour une prévision hydrologique nécessaire à une gestion intégrée et une utilisation rationnelle des ressources en eau, nous avons fait une combinaison entre les résultats d'un modèle climatique régional (CMIP5) et un autre de transformation pluie débit afin de simuler le comportement hydrologique de bassin Isser aux horizons 2100. Dans le but d'étudier l'impact des changements climatiques sur le déficit hydrique.

III.5. Projet d'inter comparaison des modèles couplés (CMIP)

Il existe plusieurs centres de modélisation du climat dans le monde, chacun développant son propre modèle climatique global. Il existe aussi actuellement quatre scénarios d'émissions plausibles à considérer lors de la production de simulations climatiques.

L'obtention d'une telle simulation, c'est-à-dire l'exécution d'un modèle avec un RCP, requiert un temps de calcul important et même avec les ordinateurs à haute performance d'aujourd'hui, cela peut prendre jusqu'à plusieurs mois pour exécuter un modèle global sur l'ensemble du globe pour une période de simulation significative,

Par conséquent, il serait difficile, voire impossible, pour chaque centre de modélisation climatique d'exécuter tous les modèles disponibles avec tous les RCP disponibles. Donc, pour obtenir un cadre commun de simulations et le plus grand ensemble possible, les centres de modélisation ont convenu d'exécuter leurs propres modèles avec les différents RCP et de rendre les simulations obtenues disponibles à l'ensemble de la communauté climatique. Cette collaboration se fait par le biais d'une initiative appelée le *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP).

III.6. Modèle climatique utilisé

Un ensemble de plusieurs modèles climatiques a permis de générer les projections futures et les simulations historiques pour les variables climatiques étudiées. Il s'agit des sorties de simulations des modèles climatiques CMIP5 qui ont été produites par 20 groupes de modélisation climatique de part le monde en vue de contribuer au 5ème rapport du GIEC (*GIEC, 2013*).

Le nombre de modèles utilisés pour les projections futures (17 à 28) varie en fonction des scénarios et des variables. En effet, la capacité à réaliser des projections climatiques par RCP/série temporelle/variable diffère entre les modèles, et le format des données issues de certains modèles demandait un travail de manipulation informatique fastidieux qui n'a pas pu être réalisé dans le temps imparti pour le travail sur les données climatiques. Les données issues des modèles CMIP5 sont disponibles sur des grilles régulières d'environ 2 à 3 degrés carrés selon les modèles. On résume ci-dessous les différentes données climatiques étudiées.

III.7. Données utilisées

La précipitation est la source principale de notre approvisionnement en eau, les relevés de précipitation sont donc à la base de nombreuses études et projets qui ont trait aux approvisionnements en eau, aux inondations, à la sécheresse, à l'irrigation et aux structures de contrôle ainsi qu'aux études de modélisation hydrologique (*Chérifi, 2001*).

Notre travail de modélisation, est confronté au souci d'obtenir de l'information, et donc tributaire de la disponibilité d'un ensemble de données nécessaire à notre recherche.

Les données pluviométriques disponibles ont été recueillies au niveau de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) d'Alger et par le modèle climatique CMIP5.

III.7.1. Les données de l'ANRH

Les données sont des totaux annuelles et mensuelles de précipitations proviennent de l'ANRH d'Alger. Elles sont de qualité et de durée variables. Cela a nécessité un choix des stations basé sur trois critères :

- ✓ La taille de l'échantillon.
- ✓ Leur position géographique par rapport au bassin.
- ✓ La qualité des données (faiblesse des lacunes dans les séries observées).

III.7.1.1. Le choix des données

Le réseau pluviométrique du bassin versant de l'Isser comporte 21 stations Pluviométriques. Seules 08 stations sont prises en considération. Leurs identifications sont données dans le (tableau. III.1).

Tableau III.1: Identification des stations pluviométriques du bassin versant d'Isser

N°	Station	code	X	Y	Z
1	EL-Omaria	090201	530.2	329.2	790
2	Lakhdaria gorges	090502	579.3	370	50
3	Oulad Bouhadada	090503	574.5	372.3	400
4	Chabet El Aneur	090512	589.3	371.3	235
5	Beni Slimane	090302	557.2	322.65	600
6	Dechmya	090314	578.5	316.35	850
7	Djebahia	090403	594.8	353.45	320
8	Souk El Khemis	090402	584	343.4	782

Pour notre étude, on prend les données de la station de Lakhdaria gorges codé 090502; on a prendre la série des données fiables sans lacunes.

III.7.1.2. Répartition de la pluie moyenne

Le tableau (III.2) reproduit les valeurs des pluies moyennes mensuelles pour notre durée historique d'étude qui est entre (1973-1998). C'est une série de vingt-cinq ans, ainsi que leur répartition dans l'année.

Tableau III.2: Distribution moyenne mensuelle des pluies de la station pluviométrique Lakhdaria

	Oct	Nov	déc	janv	fév	mars	avril	mai	juin	juil	août	Sept
moyenne	55,856	80,128	93,572	85,152	91,172	85,968	67,888	48,1	13,104	3,42	5,728	31,012
%	8,45	12,12	14,15	12,88	13,79	13,00	10,27	7,28	1,98	0,52	0,87	4,69

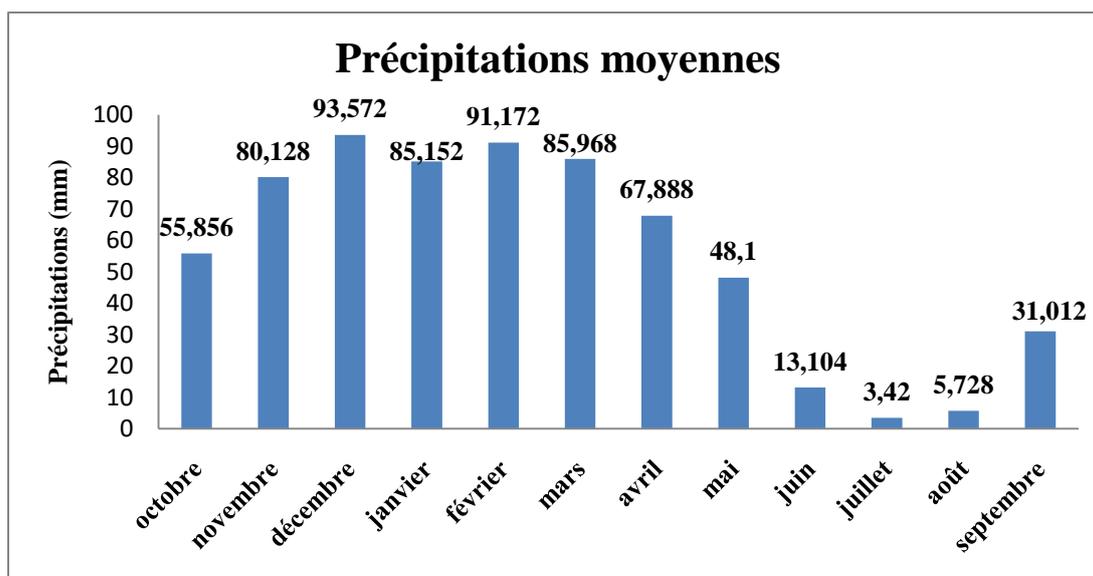


Figure III.2 Histogramme des précipitations moyennes pour la période 1973-1998

Nous remarquerons que les lames précipitées durant les mois de Novembre à Avril sont presque de même ordre de grandeur et représente environ 75 % du total pluviométrique annuel néanmoins, on note une hauteur maximale enregistré en mois de décembre.

III.7.2. Détermination des ruptures dans les séries des précipitations

III.7.2.1. Présentation du logiciel Khronostat

Khronostat est un modèle statistique développé par l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) à la Maison des Sciences de l'Eau (MSE) de Montpellier. Il a été développé dans le cadre d'une étude sur la variabilité climatique en Afrique de l'Ouest et du Centre et est orienté sur l'analyse des séries hydroclimatiques (*Boukhaly T.V., 2017*)

C'est un logiciel simple, facile et très pratique. Il nous permet de détecter les ruptures qui peuvent être présentes dans des séries statistiques, à savoir des séries de données pluviométriques, de température, de débit, etc. Il peut être utilisé dans le contexte des variations climatiques ou changements climatiques.

Le logiciel Khronostat regroupe différents tests statistiques. Ces tests sont spécifiques d'un changement de comportement de la variable dans la série temporelle. pour notre étude nous avons intéressés au test de Pettitt, statistique de Buishand et ellipse Les tests les plus utilisés, les mieux argumentés dans la littérature et, surtout, les plus robustes ont été choisis.

III.7.2.2. Méthode d’analyse de série chronologique

La détection des oscillations au sein d’une série pluviométrique consiste à vérifier auparavant si cette série est formée de variables aléatoires ou organisées. Or, on appelle série purement aléatoire, ou bien encore série au hasard, toute série statistique dans laquelle la probabilité pour que la variable (X) prenne une valeur (Xi+1) est indépendante de la valeur immédiatement précédente (Xi). En climatologie une série pluviométrique est considérée comme aléatoire si les valeurs qui la composent se succèdent dans le temps d’une manière fortuite (*Sebbar, 2013*).

III.7.2.2.1. Test de Buishand et ellipse de Bois

La procédure Buishand se réfère au même modèle et aux mêmes hypothèses que l’approche Lee et Heghinian. Si l’hypothèse est qu’il existe une distribution uniforme pour la position du point de rupture t, la statistique U de Buishand est définie par l’équation suivante :

$$U = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} (S_k / \sigma_x)^2}{N(N+1)} \dots \dots \dots \text{(Eq. III-1)}$$

Où les termes S_k et σ_x sont respectivement la somme partielle et l’écart-type donnés respectivement par les équations suivantes :

$$S_k = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}) \dots \dots \dots \text{(Eq. III-2)}$$

$$\sigma_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \dots \dots \dots \text{(Eq. III-3)}$$

L’hypothèse nulle du test statistique est l’absence de rupture dans la série. En cas de rejet de l’hypothèse nulle, aucune estimation de la date de la rupture n’est proposée par ce test.

III.7.2.2.2. Méthode non paramétrique de Pettitt

L’approche Pettitt est non-paramétrique et est dérivée du test de Mann-Whitney. L’absence de rupture dans la série (xi) de taille N est l’hypothèse nulle. L’utilisation du test suppose que pour tout temps t ayant une valeur comprise entre 1 et N, les deux séries temporelles (Xi) pour i = 1 à t et pour i = t + 1 à N appartiennent à la même population. La variable à tester est KN, le maximum en termes absolus de la variable $U_{t,N}$ défini par la relation suivante:

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{i,j} \dots \dots \dots (\text{Eq. III-4})$$

III.7.2.3. Analyse des précipitations annuelles

Les résultats du test de Buishand et la méthode non paramétrique de Pettitt sur les séries des précipitations annuelles enregistrées au niveau des 8 stations mentionnées dans le tableau (III.1) durant les différentes périodes sont présenter ci-dessous.

Station EL-Omaria

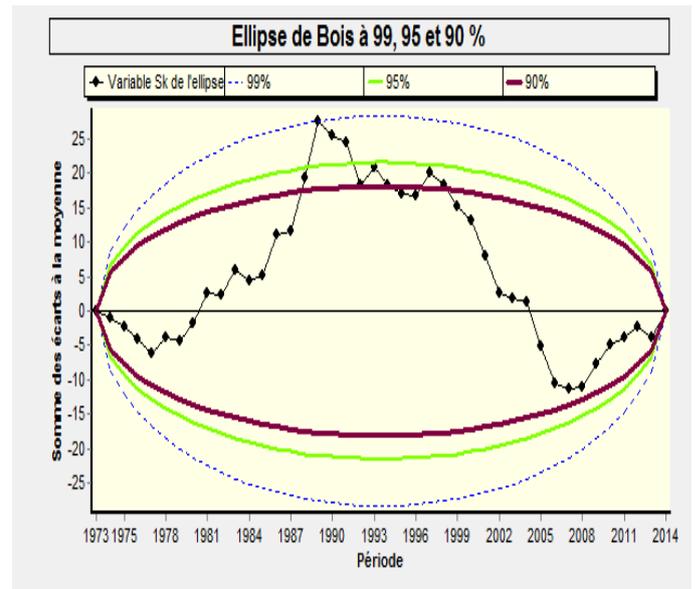
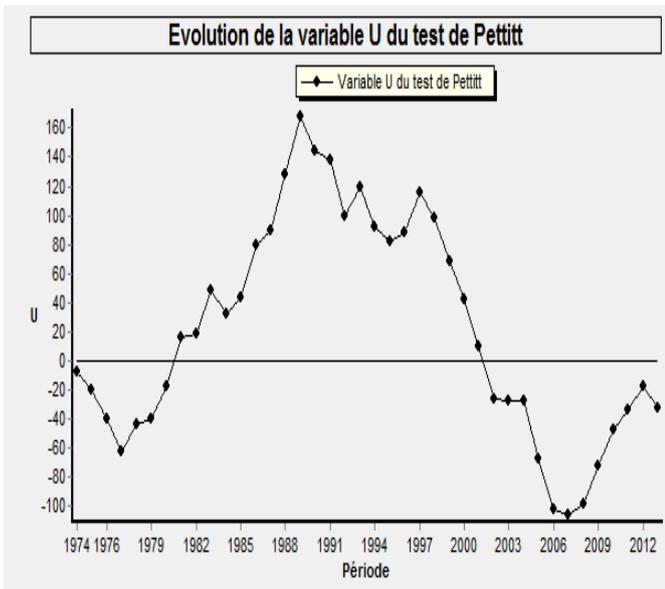


Figure III.2 : Évolution de la variable U du test de Pettitt pour les variations annuelles des précipitations de la station de El-Omaria (1974-2012)

Figure III.3: Ellipse de Bois pour les variations annuelles des précipitations de la station de El-Omaria (1973-2014)

Les figures (III.3 et III.4) montrent que l’hypothèse d’absence de rupture est acceptée au seuil de confiance de 99%, et rejetée au seuil de confiance de 95% et de 90%.

D’après l’ellipse de Bois (fig III.3), la série étudiée présente une rupture en 2007, les résultats de test de pettitt obtenus (fig III.4) sont identiques aux résultats du test de Buishand s’agissant de l’hypothèse d’absence de rupture.

Station de Beni slimane

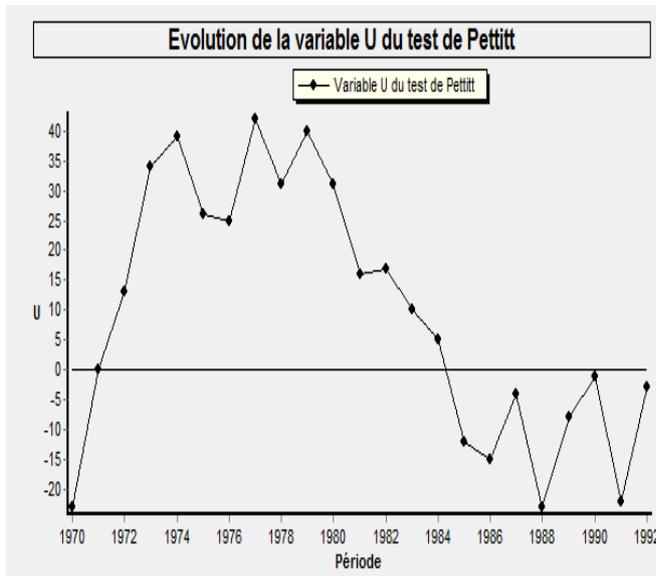


Figure III.4: Évolution de la variable U du test de Pettitt pour les variations annuelles des précipitations de la station Beni Slimane (1970-1992)

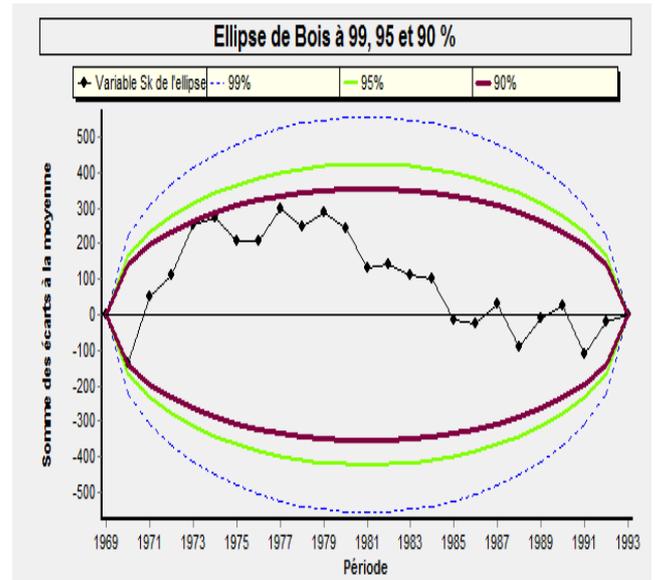


Figure III.5: Ellipse de Bois pour les variations annuelles des précipitations de la station de Beni Slimane (1969-1993)

D'après les figures III.5 et III.6 nous remarquons que l'hypothèse d'absence de rupture est acceptée au seuil de confiance de 99%, 95% et de 90%. Les résultats du test de Pettitt obtenus, sont identiques aux résultats du test de Buishand.

La rupture a été détectée en 1988 et 1991 donc la région a connu une chute rapide des précipitations.

Station Dechmia

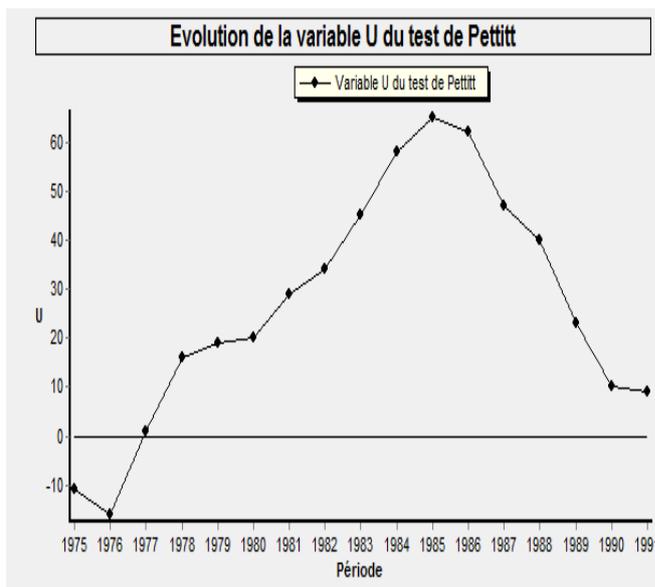


Figure III.6: Évolution de la variable U du test de Pettitt pour les variations annuelles des précipitations de la station Dechmia (1975-1991)

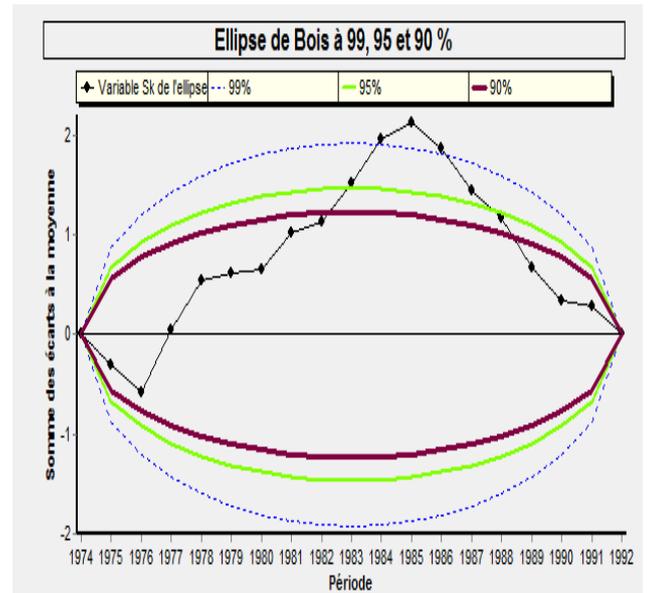


Figure III.7: Ellipse de Bois pour les variations annuelles des précipitations de la station de Dechmia (1974-1992)

D'après l'ellipse de bois pour les variations annuelles des précipitations de station de Dechmia en remarque que l'hypothèse d'absence de rupture est rejetée pour tous les seuils de confiance de 99%, 95% et de 90%.

✚ Station de Souk lakhmiss

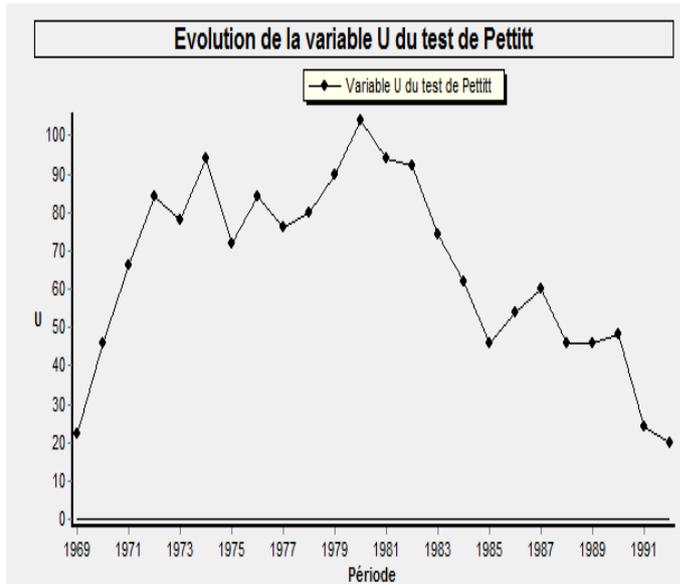


Figure III.8 : Évolution de la variable U du test de Pettitt pour les variations annuelles des précipitations de la station de Souk Lakhmis (1969-1991)

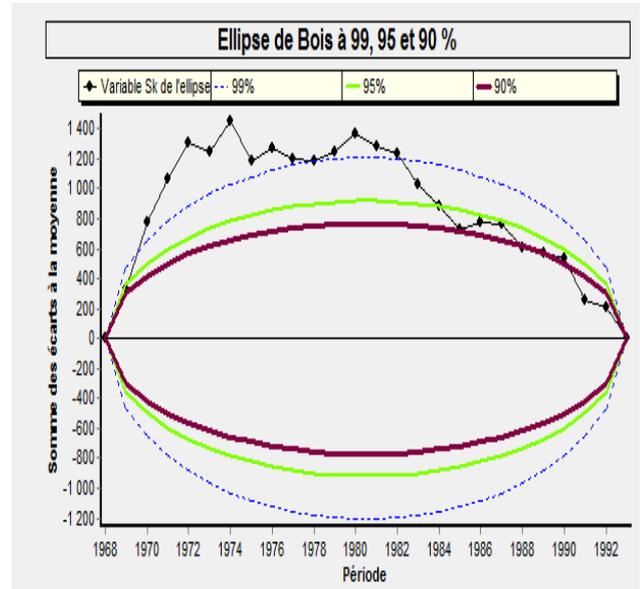


Figure III.9: Ellipse de Bois pour les variations annuelles des précipitations de la station de Souk Lakhmis (1969-1991)

D'après la fiure (III.9) on remarque que l'hypothèse d'absence de rupture est rejetée pour tous les seuils de confiance de 99%, 95% et de 90%.

Station de Djebahia

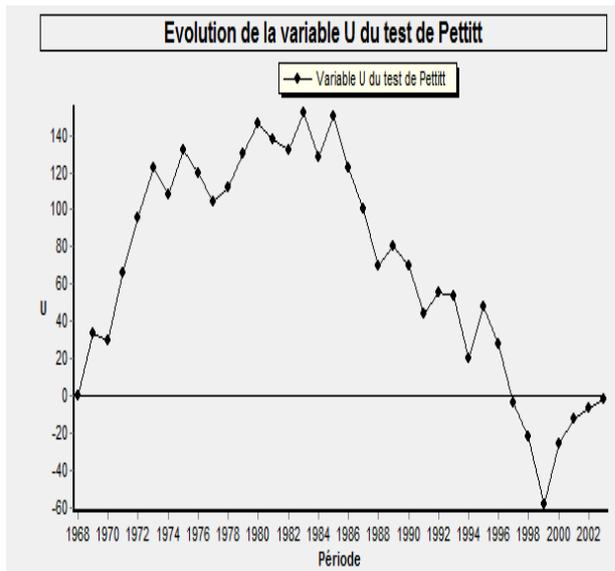


Figure III.10: Évolution de la variable U du test de Pettitt pour les variations annuelles des précipitations de la station de Djebahia (1968-2002)

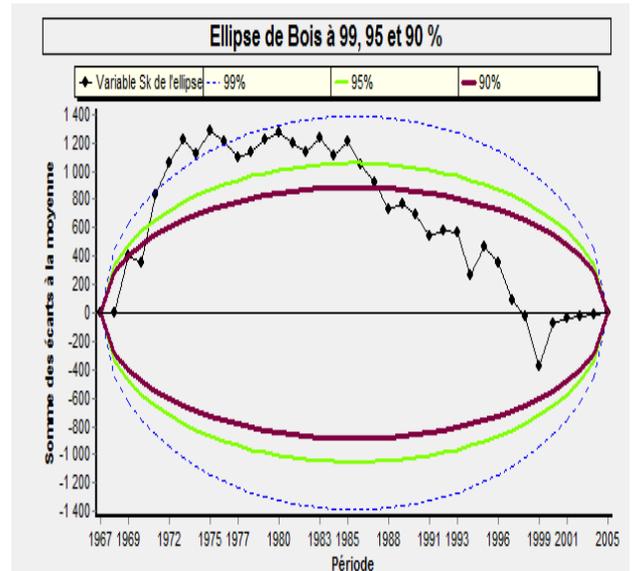


Figure III.11 : Ellipse de Bois pour les variations annuelles des précipitations de la station de Souk Lakhmis (1967-2005)

D'après l'ellipse de Bois (fig III.11), la série étudiée présente une rupture en 1999 jusqu'en traduite par une diminuassions de la pluviométrie jusqu'à une valeur de -400 mm.

Station d'Ouled Hadad

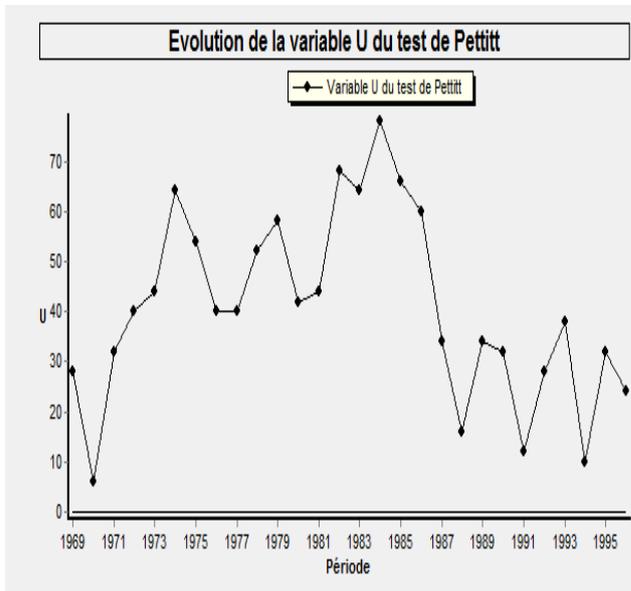


Figure III.12: Évolution de la variable U du test de Pettitt pour les variations annuelles des précipitations de la station de Ouled Hadad (1969-1995)

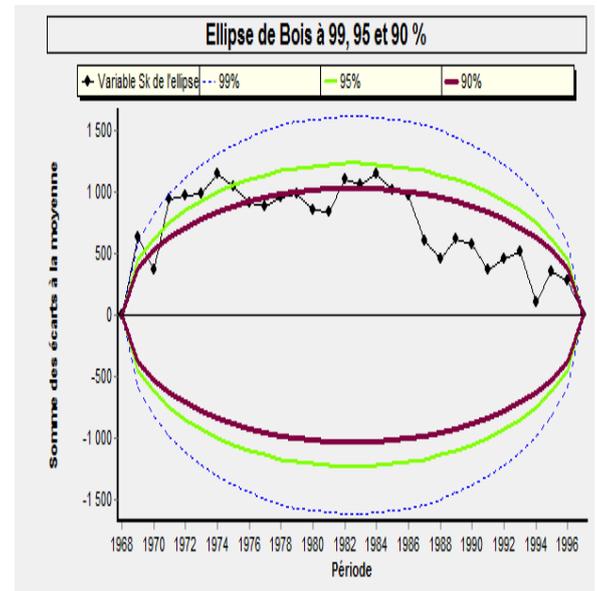


Figure III.13: Ellipse de Bois pour les variations annuelles des précipitations de la station de Souk Lakhmis (1968-1996)

Les résultats du test de Buishand et ellipse de bois sur la série des précipitations annuelles enregistrées au niveau de la station de O uled Hedad durant la période (1968-1996)

(fig.III.13), montrent que l'hypothèse d'absence de rupture est acceptée pour tous les seuils de confiance de 99%, 95% et de 90%.

Station de Chaabet El-ameur

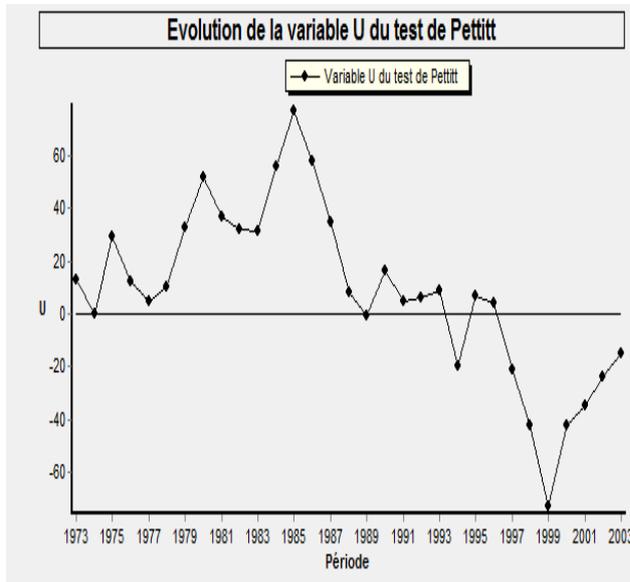


Figure III.14: Évolution de la variable U du test de Pettitt pour les variations annuelles des précipitations de la station de Chaabet El-ameur (1973-2003)

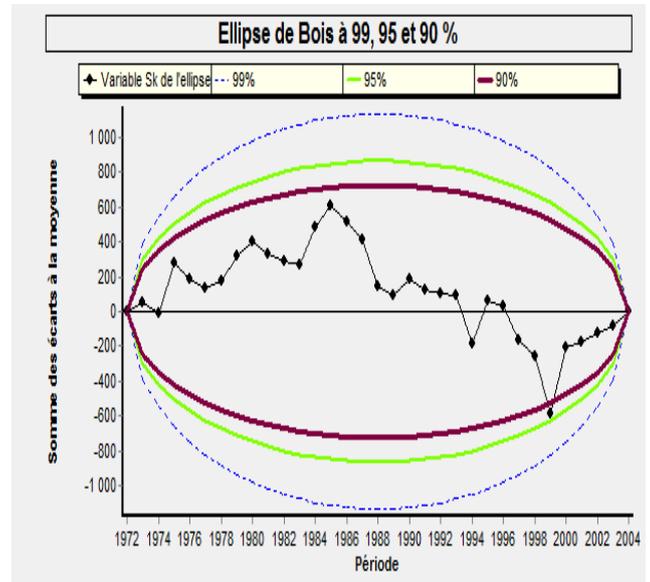


Figure III.15 : Ellipse de Bois pour les variations annuelles des précipitations de la station de Chaabet El-ameur (1972-2004)

D'après les résultats obtenus pour la station de Chaabeet El-ameur , on remarque que l'hypothèse d'absence de rupture est acceptée au seuil de confiance de 99% et 95% , et rejetée au seuil de confiance de 90%.

D'après les figures III.14 et III.15, les résultats du test de Pettitt sont identiques aux résultats d'ellipse de bois. La rupture a été détectée en 1999 la région a connu une chute rapide des précipitations et a enregistré la plus faible valeur (minimum de -600 mm)

Station de Lakhdaria

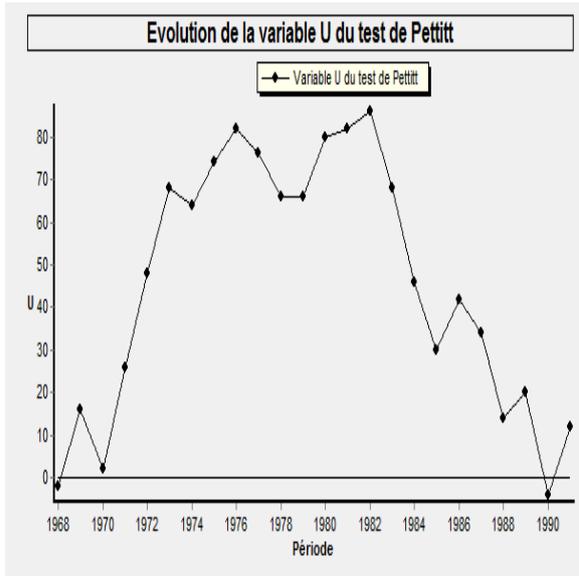


Figure III.16: Évolution de la variable U du test de Pettitt pour les variations annuelles des précipitations de la station de Lakhdaria (1968-1990)

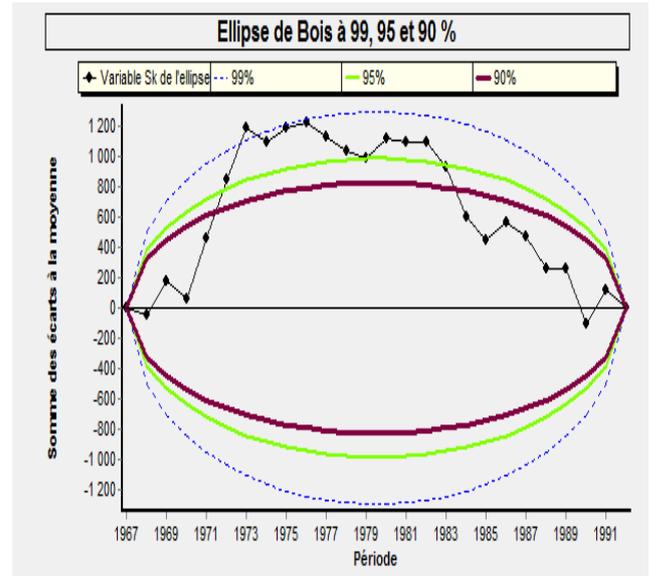


Figure III.17: Ellipse de Bois pour les variations annuelles des précipitations de la station de Lakhdaria (1967-1991)

D’après les figures (III.16 et III.17) les résultats de la série des précipitations annuelles enregistrées au niveau de la station de Lakhdaria durant la période (1967 -1991), montrent que l’hypothèse d’absence de rupture est acceptée au seuil de confiance de 99%, et rejetée au seuil de confiance de 95% et de 90%.

D’après le test de pettitt (fig III.16) une rupture a été marquée en 1990, Il ressort que la rupture est ici traduite par un changement brutal dans l’allure d’évolution de la courbe.

III.7.3. Les données du modèle CMIP5

Le tableau III.4 présente les totaux annuels et mensuelles des précipitations obtenues auprès du modèle climatique CMIP5 pour la période projeté au l’horizon de 2100.

Tableau III. 3:les totaux annuels et mensuelles des précipitations du modèle climatique CMIP5 pour la période projeté au l’horizon de 2100.

Année	p,annl	Octobre	novembre	décembre	Janvier	février	mars	avril	mai	Juin	juillet	août	septembre
2025	298,40	25,21	36,17	42,24	38,43	41,15	38,80	30,64	21,71	5,91	1,54	2,59	14,00
2026	309,13	26,12	37,47	43,75	39,82	42,63	40,20	31,74	22,49	6,13	1,60	2,68	14,50
2027	213,13	18,01	25,83	30,17	27,45	29,39	27,71	21,89	15,51	4,22	1,10	1,85	10,00
2028	290,4	24,54	35,20	41,10	37,40	40,05	37,76	29,82	21,13	5,76	1,50	2,52	13,62
2029	265,32	22,42	32,16	37,55	34,17	36,59	34,50	27,25	19,30	5,26	1,37	2,30	12,45
2030	240,38	20,31	29,14	34,02	30,96	33,15	31,26	24,68	17,49	4,76	1,24	2,08	11,28
2031	299,83	25,33	36,34	42,44	38,62	41,35	38,99	30,79	21,81	5,94	1,55	2,60	14,06
2032	309,67	26,16	37,53	43,83	39,89	42,71	40,27	31,80	22,53	6,14	1,60	2,68	14,53
2033	283,68	23,97	34,38	40,15	36,54	39,12	36,89	29,13	20,64	5,62	1,47	2,46	13,31
2034	277,35	23,43	33,62	39,26	35,72	38,25	36,07	28,48	20,18	5,50	1,43	2,40	13,01
2035	277,7	23,46	33,66	39,31	35,77	38,30	36,11	28,52	20,20	5,50	1,44	2,41	13,03
2036	245,64	20,75	29,77	34,77	31,64	33,88	31,94	25,22	17,87	4,87	1,27	2,13	11,52
2037	317,31	26,81	38,46	44,91	40,87	43,76	41,26	32,58	23,09	6,29	1,64	2,75	14,88
2038	272,55	23,03	33,03	38,58	35,11	37,59	35,44	27,99	19,83	5,40	1,41	2,36	12,79
2039	311,83	26,35	37,80	44,14	40,16	43,00	40,55	32,02	22,69	6,18	1,61	2,70	14,63
2040	248,14	20,97	30,08	35,12	31,96	34,22	32,27	25,48	18,05	4,92	1,28	2,15	11,64
2041	251,2	21,22	30,45	35,55	32,36	34,64	32,67	25,80	18,28	4,98	1,30	2,18	11,78
2042	269,91	22,80	32,71	38,20	34,77	37,22	35,10	27,72	19,64	5,35	1,40	2,34	12,66
2043	321,89	27,20	39,01	45,56	41,46	44,39	41,86	33,05	23,42	6,38	1,67	2,79	15,10
2044	314,6	26,58	38,13	44,53	40,52	43,39	40,91	32,31	22,89	6,24	1,63	2,73	14,76
2045	265,12	22,40	32,13	37,53	34,15	36,56	34,48	27,23	19,29	5,26	1,37	2,30	12,44
2046	283,53	23,96	34,36	40,13	36,52	39,10	36,87	29,12	20,63	5,62	1,47	2,46	13,30
2047	252,47	21,33	30,60	35,73	32,52	34,82	32,83	25,93	18,37	5,00	1,31	2,19	11,84
2048	313,35	26,47	37,98	44,35	40,36	43,21	40,75	32,18	22,80	6,21	1,62	2,71	14,70
2049	297,13	25,10	36,01	42,06	38,27	40,98	38,64	30,51	21,62	5,89	1,54	2,57	13,94
2050	280,37	23,69	33,98	39,68	36,11	38,67	36,46	28,79	20,40	5,56	1,45	2,43	13,15
2051	285	24,08	34,54	40,34	36,71	39,30	37,06	29,27	20,74	5,65	1,47	2,47	13,37
2052	256,42	21,66	31,08	36,29	33,03	35,36	33,34	26,33	18,66	5,08	1,33	2,22	12,03

2053	275,19	23,25	33,35	38,95	35,45	37,95	35,79	28,26	20,02	5,45	1,42	2,38	12,91
2054	279,05	23,58	33,82	39,50	35,94	38,48	36,29	28,66	20,30	5,53	1,44	2,42	13,09
2055	304,07	25,69	36,85	43,04	39,17	41,93	39,54	31,22	22,12	6,03	1,57	2,63	14,26
2056	298,35	25,21	36,16	42,23	38,43	41,15	38,80	30,64	21,71	5,91	1,54	2,59	14,00
2057	321,98	27,20	39,03	45,57	41,47	44,40	41,87	33,06	23,43	6,38	1,67	2,79	15,10
2058	297,98	25,18	36,12	42,18	38,38	41,09	38,75	30,60	21,68	5,91	1,54	2,58	13,98
2059	282,65	23,88	34,26	40,01	36,41	38,98	36,76	29,03	20,56	5,60	1,46	2,45	13,26
2060	272,38	23,01	33,01	38,55	35,08	37,56	35,42	27,97	19,82	5,40	1,41	2,36	12,78
2061	258,28	21,82	31,30	36,56	33,27	35,62	33,59	26,52	18,79	5,12	1,34	2,24	12,12
2062	295,42	24,96	35,81	41,81	38,05	40,74	38,42	30,34	21,49	5,86	1,53	2,56	13,86
2063	286,92	24,24	34,78	40,61	36,96	39,57	37,31	29,46	20,88	5,69	1,48	2,49	13,46
2064	251,91	21,28	30,53	35,66	32,45	34,74	32,76	25,87	18,33	4,99	1,30	2,18	11,82
2065	274,11	23,16	33,22	38,80	35,31	37,80	35,64	28,15	19,94	5,43	1,42	2,37	12,86
2066	360,33	30,44	43,67	51,00	46,41	49,69	46,86	37,00	26,22	7,14	1,86	3,12	16,90
2067	292,43	24,71	35,44	41,39	37,67	40,33	38,03	30,03	21,28	5,80	1,51	2,53	13,72
2068	272,5	23,02	33,03	38,57	35,10	37,58	35,44	27,98	19,83	5,40	1,41	2,36	12,78
2069	331,07	27,97	40,13	46,86	42,64	45,66	43,05	34,00	24,09	6,56	1,71	2,87	15,53
2070	284,46	24,03	34,48	40,26	36,64	39,23	36,99	29,21	20,70	5,64	1,47	2,46	13,34
2071	248,3	20,98	30,09	35,14	31,98	34,24	32,29	25,50	18,07	4,92	1,28	2,15	11,65
2072	256,8	21,70	31,13	36,35	33,08	35,42	33,39	26,37	18,68	5,09	1,33	2,23	12,05
2073	280,13	23,67	33,95	39,65	36,08	38,63	36,43	28,77	20,38	5,55	1,45	2,43	13,14
2074	295,18	24,94	35,78	41,78	38,02	40,71	38,38	30,31	21,48	5,85	1,53	2,56	13,85
2075	257,85	21,79	31,25	36,50	33,21	35,56	33,53	26,48	18,76	5,11	1,33	2,23	12,10
2076	311,36	26,31	37,74	44,07	40,10	42,94	40,49	31,97	22,65	6,17	1,61	2,70	14,61
2077	309,66	26,16	37,53	43,83	39,89	42,71	40,27	31,80	22,53	6,14	1,60	2,68	14,53
2078	269,97	22,81	32,72	38,21	34,77	37,23	35,11	27,72	19,64	5,35	1,40	2,34	12,66
2079	271,31	22,92	32,88	38,40	34,95	37,42	35,28	27,86	19,74	5,38	1,40	2,35	12,73
2080	277,57	23,45	33,64	39,29	35,75	38,28	36,09	28,50	20,20	5,50	1,44	2,40	13,02
2081	258,52	21,84	31,33	36,59	33,30	35,65	33,62	26,55	18,81	5,12	1,34	2,24	12,13

2082	255,73	21,61	31,00	36,20	32,94	35,27	33,25	26,26	18,61	5,07	1,32	2,22	12,00
2083	326,83	27,61	39,61	46,26	42,10	45,07	42,50	33,56	23,78	6,48	1,69	2,83	15,33
2084	282,05	23,83	34,19	39,92	36,33	38,90	36,68	28,96	20,52	5,59	1,46	2,44	13,23
2085	275,22	23,25	33,36	38,95	35,45	37,96	35,79	28,26	20,02	5,46	1,42	2,38	12,91
2086	302,18	25,53	36,63	42,77	38,92	41,67	39,29	31,03	21,99	5,99	1,56	2,62	14,18
2087	297,77	25,16	36,09	42,15	38,35	41,07	38,72	30,58	21,67	5,90	1,54	2,58	13,97
2088	270,23	22,83	32,75	38,25	34,81	37,27	35,14	27,75	19,66	5,36	1,40	2,34	12,68
2089	327,37	27,66	39,68	46,34	42,17	45,15	42,57	33,62	23,82	6,49	1,69	2,84	15,36
2090	289,3	24,44	35,06	40,95	37,26	39,90	37,62	29,71	21,05	5,73	1,50	2,51	13,57
2091	305,26	25,79	37,00	43,21	39,32	42,10	39,70	31,35	22,21	6,05	1,58	2,64	14,32
2092	265,03	22,39	32,12	37,51	34,14	36,55	34,46	27,22	19,28	5,25	1,37	2,30	12,43
2093	302,4	25,55	36,65	42,80	38,95	41,70	39,32	31,05	22,00	5,99	1,56	2,62	14,19
2094	276,63	23,37	33,53	39,15	35,63	38,15	35,97	28,41	20,13	5,48	1,43	2,40	12,98
2095	294,32	24,87	35,67	41,66	37,91	40,59	38,27	30,22	21,41	5,83	1,52	2,55	13,81
2096	265,22	22,41	32,15	37,54	34,16	36,58	34,49	27,24	19,30	5,26	1,37	2,30	12,44
2097	271,63	22,95	32,92	38,45	34,99	37,46	35,32	27,89	19,76	5,38	1,41	2,35	12,74
2098	295,23	24,94	35,78	41,79	38,03	40,72	38,39	30,32	21,48	5,85	1,53	2,56	13,85
2099	299,96	25,34	36,36	42,46	38,64	41,37	39,01	30,80	21,82	5,95	1,55	2,60	14,07
2100	326,78	27,61	39,61	46,25	42,09	45,07	42,49	33,56	23,78	6,48	1,69	2,83	15,33
%	/	8,45	12,12	14,15	12,88	13,79	13,00	10,27	7,28	1,98	0,52	0,87	4,69

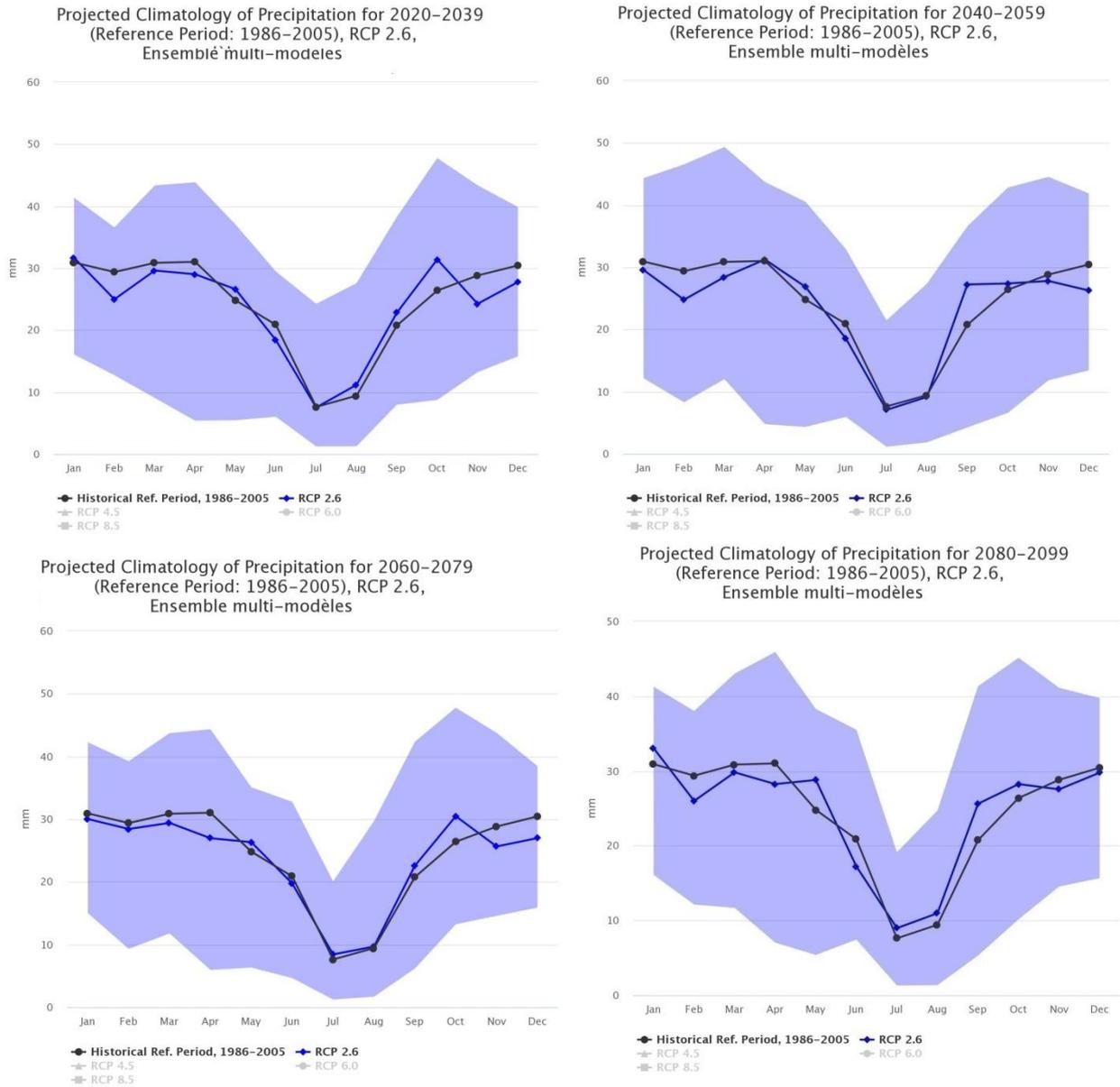


Figure III.18: Variabilité pluviométrique dans le bassin d’Isser (période 2020-2099)

La figure (III.2) représente un échantillon caractéristique d’un paramètre si important dans la détermination des bilans hydrologique, elle fait bien ressortir, les traits essentiels de la répartition des précipitations moyennes annuelles dans le bassin d’Isser pour les différents horizons.

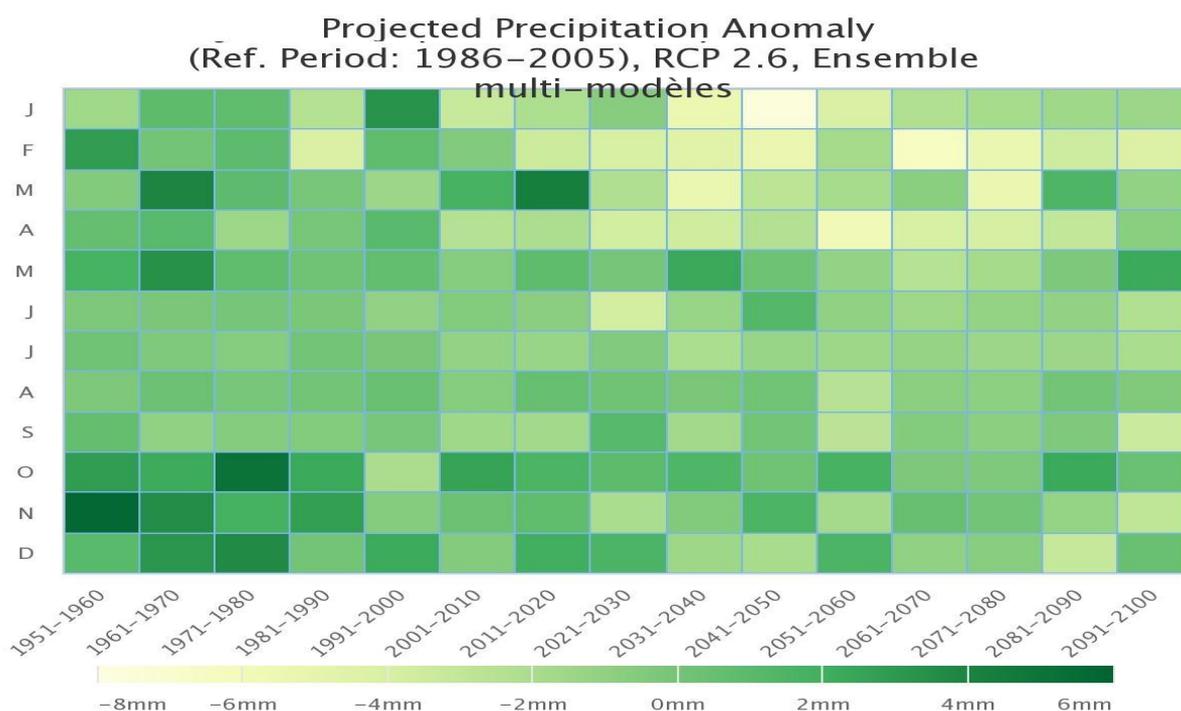


Figure III.19: Projection des précipitations au l’horizon de 2100.

D’après la figure ci-dessous les résultats obtenus par le modèle climatique CMIP5 montrent une diminution des précipitations dans le futur par rapport à la période de référence.

III.8. Impact des changements climatiques sur les débits

Le modèle hydrologique sera utilisé pour la traduction du fonctionnement hydrologique d’Isser. Le modèle sera calé et validé sur certaines périodes d’observations de références, et cela pour montrer que les simulations des débits futurs sont dépendantes de la période utilisé comme référence.

III.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentés les données pluviométriques nécessaires du bassin Isser. En suite, une analyse statistiques des précipitations a été appliquée, les tests de détection de rupture (le test de Pettitt et l’ellipse de bois) ont mis en évidence une forte rupture dans les années 1988,1990 et 1999, donc une baisse de pluviométrie. Puis une prédiction des précipitations au l’horizon de 2100 a été réalisé par le modèle régional CMIP5, les résultats de ce dernier sont satisfaisants.

Chapitre IV

Application du modèle RNA dans la relation pluie-débit

IV.1. Introduction

Malgré l'évolution des techniques de mesures (télédétection, méthodes géophysiques,..) notre connaissance du système bassin versant reste limitée. La majorité des processus hydrologiques sont des processus complexes, souvent non linéaires, et couplés entre eux. Les propriétés et facteurs contrôlant ces processus présentent une grande variabilité spatio-temporelle. La caractérisation d'un milieu naturel et la compréhension de son fonctionnement par la mesure seule est donc très difficile.

De ce fait, Les progrès informatiques ont permis un développement important de la modélisation en hydrologie, la simulation de la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant par des modèles mathématiques a connu un fort essor. Il existe aujourd'hui un très grand nombre de modèles représentent le lien entre la pluie et le débit qui dépendent de l'utilisateur et des questions auxquelles ils cherchent à répondre (prédiction de changement climatique, simulation d'ouvrage, gestion de la ressource en eau, aménagement des bassins versants...)

Dans notre étude du bassin versant d'Isser fait la modélisation pluie – débit par les réseaux de neurones artificiels.

IV.2. La modélisation en hydrologie

Les processus mis en jeu pour prévoir les faibles débits sont plus complexes que ceux qui se manifestent lors d'événements pluvieux. En effet, lors des périodes d'étiage, les sols ne sont pas saturés et les processus d'infiltration et d'écoulement sont plus complexes. Les conditions météorologiques sont différentes. Cela implique une prise en compte de paramètres supplémentaires et d'autres manières de modéliser les processus (*Payraudeau, 2002*) Les modèles simples ont des difficultés à estimer de manière fiable les faibles débits à moyen et surtout à long terme.

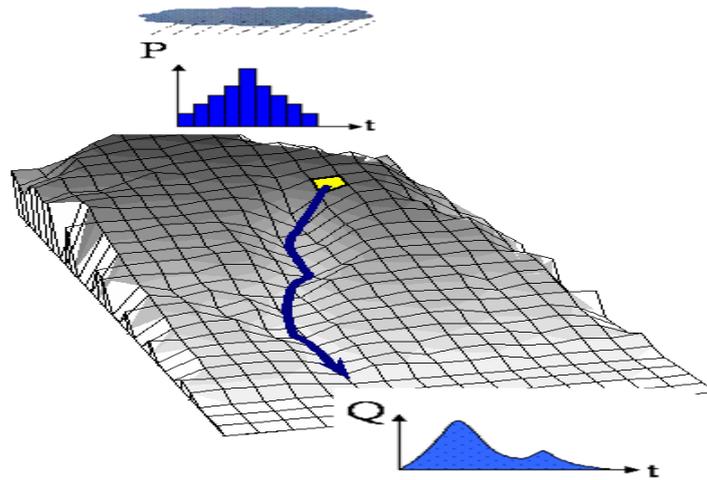


Figure VI.1: Modélisation Pluit-débit

La mise au point d'un modèle hydrologique répond généralement à un objectif ou à un besoin précis.

On peut classer les modèles hydrologiques en deux grandes catégories :

- **Les modèles conceptuels déterministes, explicatifs** : ces modèles sont fondés sur des équations différentielles. Divisés en compartiments, ils permettent de reproduire de manière simplifiée les différents processus mis en jeu. Ils peuvent avoir de 0 à 3 dimensions.
- **Les modèles stochastiques** : considérés comme des boîtes noires, ils sont basés sur des relations statistiques entre les observations et la réponse du système. Plus simples que ceux du premier type, ces modèles ne réclament pas une connaissance précise des processus mis en jeu.

IV.3. L'objectif de la modélisation hydrologique

La modélisation de la transformation pluie-débit intègre dans son contexte les différents éléments du cycle hydrologique. Certains types de modèles nécessitent le passage par la modélisation de chaque élément avant de construire le modèle finale pluie-débit. L'unité de l'étude est généralement le bassin versant limité topographiquement, sauf dans le cas où des formations géologiques drainent des surfaces situées hors limites topographiques du bassin. La modélisation pluie-débit peut donner la réponse aux nombreuses questions, relatives à l'eau, axée sur la gestion des ressources et de risque. Parmi ces questions, on note :

- La reconstitution des séries de débit par le comblement de lacunes dans les séries historiques afin de permettre les traitements statistiques utilisés notamment dans les études de faisabilité des ouvrages et de détermination des valeurs de projet.
- Préviation des fréquences avec lesquelles les débits extrêmes (crue et étiage) peuvent se produire.
- Prédétermination de la réponse hydrologique d'un bassin versant avec un pas de temps, afin de permettre l'élaboration d'un système de prévention et d'alarme.
- L'étude de l'impact du changement climatique sur la réponse hydrologique (Gherissi, 2012).

IV.4. Présentation des modèles

IV.4.1. Définition d'un modèle

Il semble important, avant de rentrer dans l'étude de façon approfondie, de définir ce qu'est un modèle afin d'expliquer les choix de l'outil de modélisation utilisé dans notre étude.

Un modèle permet donc d'approcher de façon figurative des systèmes hydrologiques complexes. Le plus souvent basé sur la représentation mathématique ou physique des processus, il intègre les différentes phases du cycle de l'eau, en tentant de s'approcher au maximum de ce qui se passe dans la réalité.

Le modèle hydrologique parfait, pouvant s'appliquer à toutes les échelles de temps et d'espace, n'existe pas, mais les efforts accomplis dans l'amélioration et le perfectionnement des outils de modélisation permettent aujourd'hui, de mieux cerner les différentes phases du cycle hydrologique et ainsi de mieux les modéliser.

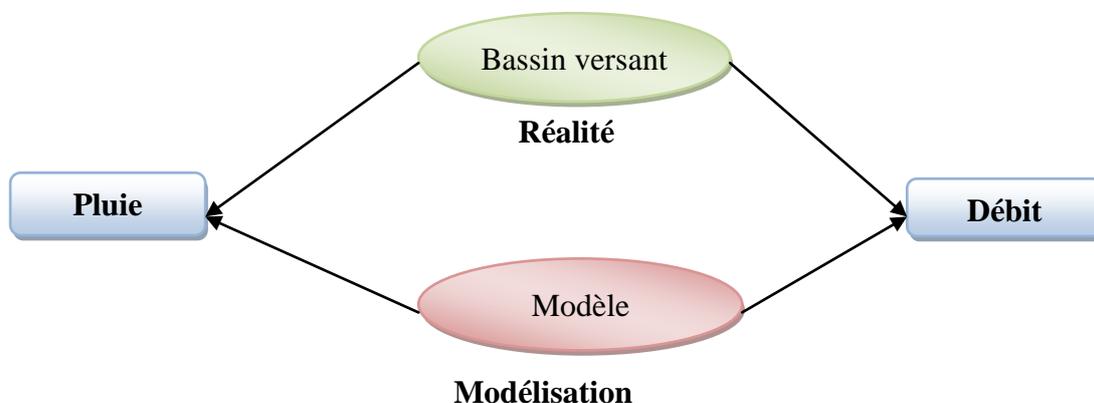


Figure IV.2: Schématisation de simulation entre la réalité et la modélisation

IV.4.2. Etapes d'élaboration d'un modèle

L'élaboration d'un modèle hydrologique comporte certaines étapes essentielles

- **Définir le modèle** et ses objectifs en termes de précision. Cette définition permettra de déterminer les choix à faire par la suite et donc de préciser les chemins à suivre dans l'élaboration des étapes suivantes (*Ambroise, 1998*).
- **Identifier le modèle**, pour pouvoir définir et caractériser le système, ses frontières et sa structure ; définir l'événement, les variables et les paramètres ; et émettre les hypothèses et le choix des échelles de temps et d'espace caractéristiques des processus de base.
- **Elaborer** l'algorithme à incorporer dans un outil informatique capable de procéder aux instructions. Cet algorithme doit être suivi de la vérification du logiciel lui-même (*Ambroise, 1998*)
- **Caler le modèle**, par estimation des paramètres du modèle, non mesurables, selon des critères déductifs ou des observations des entrées et des sorties. Il existe deux façons d'estimer les paramètres à partir d'un échantillon : la méthode passive (on prend tous les couples entrées-sorties disponibles, et par des méthodes statistiques, on évalue les coefficients des équations) et la méthode active (en donnant un poids spécifique plus grand à certaines observations ou groupe d'observations). Le calage peut être manuel ou automatique.
- **Evaluer le modèle**, en comparant la réponse simulée par le modèle à une sollicitation expérimentale et la réponse réelle, à partir de données différentes de celle utilisées pour le calage.
- **Définir le domaine de validité du modèle élaboré** la formulation mathématique du modèle est basée sur des équations simplifiées, selon certaines hypothèses concernant les conditions initiales et aux limites (*Ambroise, 1998*)

IV.4.3. Propriétés du modèle

En 1986 Kelmès, a défini les qualités considérées des modèles hydrologiques, qui sont principalement :

- **Cohérence rationnelle** : c'est la première étape de la modélisation, la rationalité scientifique est une exigence de toute recherche scientifique.
- **Précision du modèle** : elle concerne le fonctionnement de ce dernier après ajustement aux données expérimentales.
- **Simplicité** : qualité essentielle de tout modèle, la simplicité concerne l'économie de moyens utilisés, c'est à dire un nombre réduit de variables et de paramètres. Elle concerne de toute évidence la réduction de toute complexité de la structure interne du modèle.
- **Robustesse** : c'est la capacité du modèle à garder une certaine précision, même dans les conditions extrêmes, cette qualité reflète le pouvoir de reproduire les différents cycles hydrologiques, et de simuler certaines valeurs caractéristiques.
- **Falsifiabilité** : concerne la possibilité d'introduire des hypothèses dans un modèle, en le modifiant, et en l'adaptant à de nouvelles exigences, sans altérer sa cohérence hydrologique.
- **Accessibilité et fiabilité** : l'acquisition des données calculées en temps réel, est parfois une nécessité pour l'étude d'un phénomène hydrologique. Dans ce cas, l'accessibilité des données mais aussi leur fiabilité, sont jugées comme critères de comparaison entre divers modèles.
- **Pouvoir de prévision** : objectif principal du modélisateur. Le pouvoir de prévision est lié à l'extension du domaine de validité d'un modèle. Le modèle apparaît d'autant mieux justifié, que son champ d'applicabilité s'avère à posteriori plus large (*Dahmani, 2019*).

IV.4.4. Les domaines d'application des modèles Pluit-Débit

La modélisation pluie-débit a de nombreuses applications, parmi lesquelles on peut citer :

- ✓ Estimation des débits de rivières pour des sites non jaugés.
- ✓ Dimensionnement des ouvrages d'art (barrages, ponts, déversoirs de sécurité...).
- ✓ Délimitation des zones inondables.
- ✓ Simulation des débits pour des reconstitutions historiques.
- ✓ Prévision des crues.

- ✓ Détection de l'influence des changements d'occupation du sol.
- ✓ Simulation de l'impact du changement climatique (*Perrin, 2002*) (le cas de notre étude).

IV.5. Les modèles stochastiques

Les modèles dits boîtes noires sont des modèles proposés un schéma sans lien direct avec la réalité. Ils ne font appel qu'aux seules variables d'entrée et de sortie d'un bassin sans faire intervenir de données sur sa nature physique. Ils fournissent une description purement mathématique basée sur les statistiques et qui fonctionnent par l'intermédiaire d'une fonction de transfert avec bruit. Le bruit est introduit par un ensemble de variables aléatoires (généralement gaussiennes) (*Bouguerne, 2017*).

La fonction de transfert est donnée par la combinaison linéaire des différentes variables explicatives. Ces modèles sont dits stochastiques.

Son objectif est uniquement d'obtenir des sorties les plus proches possibles des débits d'un bassin versant réel. Il en existe de nombreux types, nous allons présenter ci-dessous le modèle neurones artificiels qui va être utilisé par dans ce présent travail.

IV.6. Présentation des réseaux de neurones

IV.6.1. Définition des réseaux de neurones

Les réseaux de neurones font partie de la catégorie des modèles « boîtes noires ». Ils ont été bâtis en s'inspirant de systèmes nerveux biologiques (*Coulibaly, 2000*) mais c'est en s'éloignant de cette inspiration biologique pour prendre une tournure purement mathématique que les réseaux de neurones ont connu un essor.

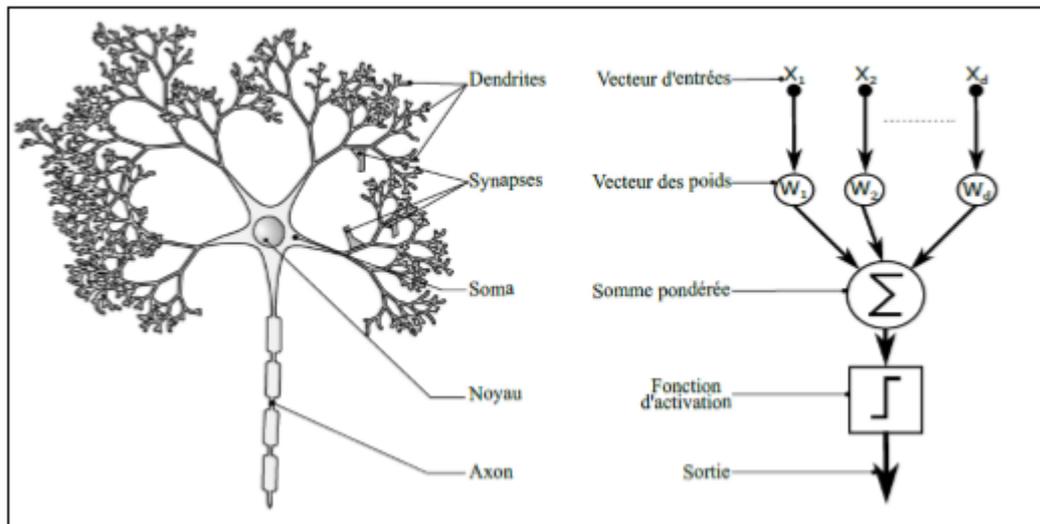


Figure IV.3: Mise en correspondance neurone biologique/neurone artificiel

IV.6.2. Les réseaux de neurones artificiels

Les réseaux de neurones artificiels ou réseaux connexionnistes leur utilisation dans le domaine d'hydrologie devient de plus en plus importante. Cette technique a été appliquée dans la modélisation hydrologique avec succès et a montré un pouvoir de calcul important dans plusieurs travaux: modélisation Pluit-débit (*Khorchani, 2005*), et surtout dans le domaine de prévision des débits (*Coulibaly, 2000*).

L'application des RNA dans la modélisation hydrologique a été discutée par American Society of Civil Engineers (ASCE) en comité de travail sur l'application du RNA en Hydrologie (ASCE, 2000). Les avantages majeurs de la modélisation RNA sont sa nature non paramétrique et sa simple adaptation à des données de types différents. Cependant, une application réussie des RNA dans la modélisation hydrologique dépend de la détermination de la structure optimale du RNA, de la phase de calage et des procédures de la prise de décision.

IV.6.3. Neurone formel

Par définition un neurone formel (figure IV. 4) est une fonction algébrique non linéaire, paramétrée, à valeurs bornées. Il peut être caractérisé par :

a) **La nature de ses entrées** ($x_1, x_2, \dots, x_i, x_n$), qui peuvent être les entrées du réseau ou les sorties d'autres neurones du même réseau.

b) *La fonction d'entrée totale* définissant le prétraitement (combinaison linéaire) effectué sur les entrées comme $\sum W_i \cdot X_i + b$, dont W_i est le poids synaptique attaché à l'entrée i et le b désigne le seuil d'activation (biais).

c) *Sa fonction d'activation*, ou d'état f , définissant l'état interne du neurone en fonction de son entrée totale. Cette fonction peut prendre plusieurs.

d) *Sa fonction de sortie* calculant la sortie du neurone en fonction de son état d'activation (**DREYFUS, 2002**).

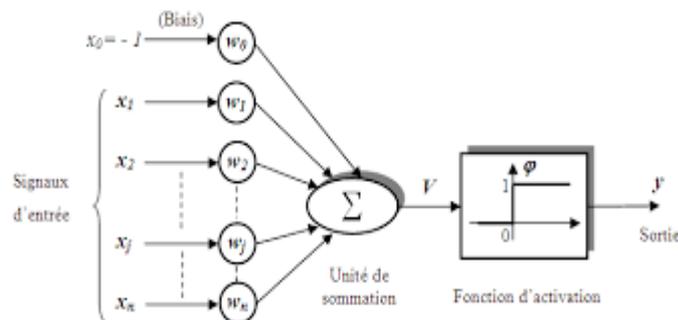


Figure IV.4: Neurone formel

IV.6.4. Les perceptrons multicouches (PMC)

Les perceptrons multicouches (PMC) sont l'un des types de RNA les plus appliqués dans le domaine de la prévision hydrologique. Ils permettent une transformation des seuils d'activation en réponse de type non-linéaire reflétant donc la complexité de la relation pluie-débit. Ces réseaux, avec un seul type de liaison « inter-couches », réduisent la propagation des erreurs entre les neurones ainsi que le temps de calcul (**Lek, 1996**). En effet, les PMC englobent successivement une couche d'entrée, une ou plusieurs couches cachées et une couche de sortie, ces couches sont interconnectées au travers des poids W_{ij} de leurs neurones (des éléments de calculs) (**Najjar, 2000**). Les neurones de la même couche ne sont pas connectés.

L'information dans le réseau se propage d'une couche à l'autre, on dit qu'ils sont de type « feed-forward ». Nous distinguons trois types de couches :

- **Couche d'entrée** : les neurones de cette couche reçoivent les valeurs d'entrée du réseau et les transmettent aux neurones cachés. Chaque neurone reçoit une valeur, il ne fait pas donc de sommation.

- **Couches cachées** : chaque neurone de cette couche reçoit l'information de plusieurs couches précédentes, effectue la sommation pondérée par les poids, puis la transforme selon sa fonction d'activation qui est en général une fonction sigmoïde, c'est la plus adapté au modèle hydrologique. Par la suite, il envoie cette réponse aux neurones de la couche suivante.
- **Couche de sortie** : elle joue le même rôle que les couches cachées, la seule différence entre ces deux types de couches est que la sortie des neurones de la couche de sortie n'est liée à aucun autre neurone.

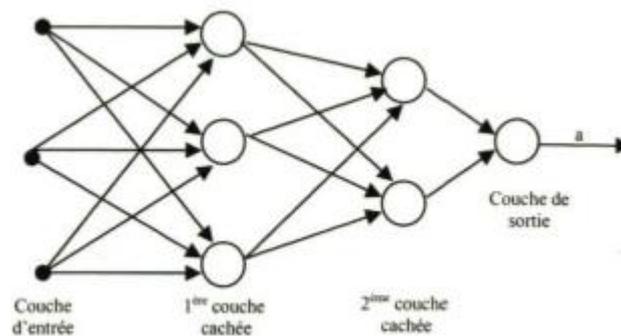


Figure IV.5: Perceptron multicouche

Les neurones des couches cachées transforment les entrées en sorties et cela en deux étapes (*Benkaci, 2006*):

- Pour chaque neurone, chaque entrée (dans notre cas, le débit) est multipliée par son poids correspondant.
- L'entrée du neurone est transformée en sortie (concentration simulée) : chaque neurone reçoit des entrées sous forme vectorielle (\mathbf{X}_i), effectue une somme pondérée (a), et génère à l'aide d'une fonction de transfert (\mathbf{S}_j) un résultat réel (\mathbf{Y}): $Y = S(WX + b)$. $W = (w_n, w_{i2} \dots, w_{in})$ représente les poids du neurone (ou matrice des poids) ; $X = (x_n, x_{i2} \dots, x_{in})$ sont les entrées du neurone i (ou vecteur d'entrée), b est le biais du neurone ou valeur seuil.

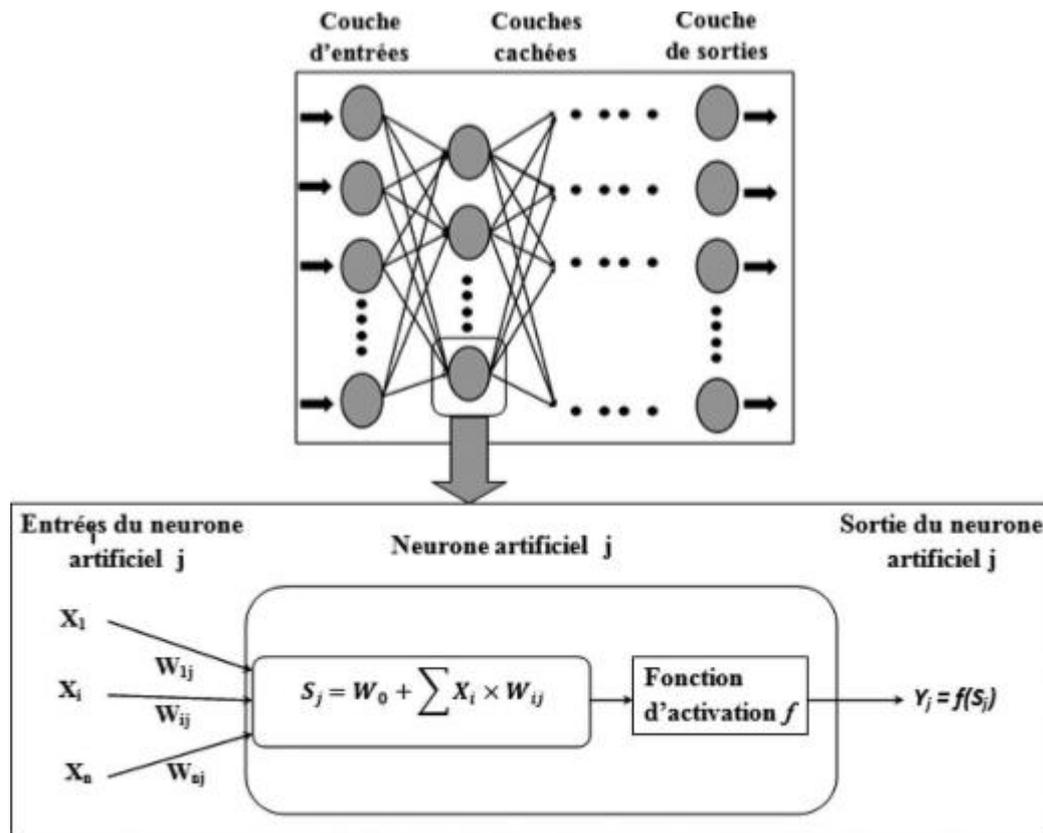


Figure IV.6: RNA avec une couche d'entrée, x couches cachées et une couche de sortie

IV.7. Apprentissage des réseaux de neurones

L'apprentissage est la caractéristique principale des réseaux de neurones ; c'est le processus d'adaptation des paramètres d'un système pour remplir au mieux la tâche pour laquelle le réseau est destiné. Le type d'apprentissage est déterminé par la manière dont les paramètres sont adaptés, et il existe plusieurs méthodes et algorithmes pour adapter ces paramètres.

IV.7.1.L'apprentissage supervisé

Pour les réseaux à apprentissage supervisé, on présente au réseau des entrées, et au même temps les sorties désirées pour cette entrée. Le réseau doit ajuster ses poids de façon à réduire l'écart entre la réponse désirée et la sortie du réseau. Cette procédure est répétée jusqu'à ce qu'un critère de performance soit satisfait. L'algorithme le plus utilisé est celui de la rétro propagation de l'erreur (*Merzoukan, 2009*).

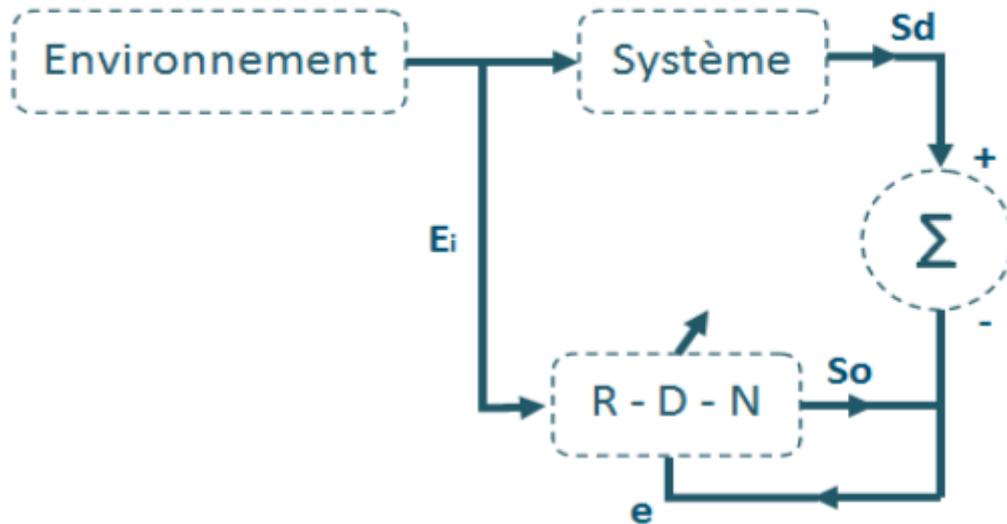


Figure IV.7: Schéma générale de l'apprentissage supervisé

IV.7.2. L'apprentissage non supervisé

Pour les réseaux à apprentissage non supervisé, aucune information sur la réponse désirée n'est fournie au réseau (*Rirkalla, 2005*). On présente une entrée au réseau et on le laisse évoluer librement jusqu'à ce qu'il se stabilise. Ce comportement est connu sous le nom "auto organisation" (*Merzoukan, 2009*)



Figure IV.8: Schéma générale de l'apprentissage non-supervisé

IV.7.3.L'apprentissage renforcé

Représente une technique nouvelle, qui a en commun avec l'apprentissage supervisé, la présence d'un superviseur régi par une mesure de degrés de performance (un grade ou score) qui juge l'évolution de l'apprentissage du réseau après quelques itérations, et une similitude

avec l'apprentissage non supervisé, puisqu'il nécessite que des variables d'entrées, sans définir les variables à la sortie du réseau.

IV.8. Les critères d'évaluation des performances des modèles

IV.8.1. Le coefficient de corrélation

Le coefficient de corrélation lui-même est utilisé pour mesurer la corrélation linéaire entre la consommation réelle ou mesurée et la consommation calculée. Sa formule est :

$$R^2 = \frac{(xi - x)}{\sqrt{\sum(xi - x)^2 * \sum(yi - y)^2}}$$

Avec

x_i : consommation mesurée.

y_i : consommation calculée.

x : moyenne des consommations mesurées.

y : moyenne des consommations calculées.

IV.8.2. Erreur quadratique moyenne

La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne est utilisée comme la mesure de la performance globale du modèle. Cet indice permet une évaluation combinée de la variance et du Biais. Le modèle est bien optimisé si la valeur de RMSE est proche de zéro, ce qui tend vers une parfaite prévision (*Koffi, 2007*). Sa formulation mathématique est donnée par la relation suivante

$$RMSE = \frac{\sqrt{(\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2)}}{\sqrt{(\sum(Q_{obs} - Q_{moy})^2)}}$$

IV.8.3. Le critère de Nash-Sutcliffe (1970)

Ce critère, permet d'évaluer la variance expliquée d'un modèle par rapport à la moyenne de toute la série de données. Il varie entre $-\infty$ et 100 (exprimé en pourcentage). Une

valeur du critère négative indique que le modèle donne des résultats moins bons que l'utilisation de la moyenne de l'échantillon (Nash, 1970). Il est donné par la formule suivante:

$$Nash = \left(1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - Q_{moy})^2} \right) \cdot 100$$

On considère généralement qu'un modèle hydrologique donne des résultats acceptables si la valeur du critère de Nash est supérieure à 80%.

IV.8.4.Percent Bias (PBIAS)

Mesure la tendance moyenne des valeurs simulées (plus grande ou plus petite) par rapport aux valeurs observées, donc estime la sous/surestimation de la simulation. Sa valeur optimale est de « 0 ». Des valeurs positives de ce critère indiquent qu'il y a sous-estimation du biais et des valeurs négatives indiquent qu'il y a surestimation du biais.

$$PBAIS = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i sim - Q_i obs}{\sum_{i=1}^n Q_i obs}$$

En fonction des valeurs de différents critères, on peut définir des performances des modèles pluie-débit aux différents pas de temps dans le tableau suivant :

Tableau IV. 1: Qualité des modèles en fonction des valeurs des différents critères (Ghezali, 2019)

Critères	Échelle temporelle	Très bon	Bon	Suffisant	Insuffisant
R ²	Jour	R ² > 0.85	0.75 < R ² ≤ 0.85	0.60 < R ² ≤ 0.75	R ² ≤ 0.60
RSR	Mois	0 ≤ RSR ≤ 0.5	0.5 < RSR ≤ 0.6	0.6 < RSR ≤ 0.7	RSR > 0.7
PBIAS	Année	PBIAS < ±5	±5 ≤ PBIAS < ±10	±10 ≤ PBIAS < ±15	PBIAS ≥ ±15

IV.9.Mise en œuvre des R.N.A

La mise en œuvre des R.N.A est tributaire de l'objectif fixé, savoir le nombre d'entrée et de sortie est primordial avant toute manœuvre, vient ensuite le problème que redoute tout les utilisateurs, à savoir la détermination du nombre de couches cachées et du nombre de neurones dans chacune d'entre elles, car au jour d'aujourd'hui, il n'y'a pas de règle générale pour en choisir, seuls quelques hypothèses et approches ont été conçues, et parmi elles on trouve la méthode Shepard (1990), de Venugopal et Baets (1994), Mendelson (2001), on

developpera ici comme exemple la démarche appliquée par Wierenga et Kluytmans en 1994 qui ont divisé leur méthode en 04 étapes :

1ère étape : consiste en la détermination du nombre de couches cachée :

- 1 couche cachée permet d'approximer une fonction continue.
- 2 couche cachée prend en compte les discontinuité.

2ème étape : déterminer la taille de la couche cachée doit être, c.à.d. choisir le nombre de neurones contenus dans la couche cachée :

- D'après Wierenga et Kluytmans le nombre neurones doit être égale à celle de la couche d'entrée .
- D'après Venugopal et Baets, il faut qu'il soit égal à 75% de celle-ci.
- Shepard prétend que ce nombre est égal à la racine carrée du produit du nombre de neurones dans la couche d'entrée et de sortie.

Mais en réalité, les analystes ne sont nullement convaincus, et estiment qu'il est préférable d'essayer le plus de taille possible, c.à.d. changer la taille régulièrement jusqu'à l'obtention de la meilleure performance.

3ème étape : choisir la fonction d'activation des neurones contenus dans le réseau.

4ème étape: choisir la fonction d'apprentissage qui s'adapte mieux au système étudié : Levenberg-Marquardt (LM), Resilient Backpropagation (RP), Variable Learning Rate Backpropagation ... etc.

IV.10.Les Réseaux de neurones et le langage MATLAB

IV.10.1.Description de langage MATLAB

MATLAB est un langage de programmation utilisé à des fins de calcul numérique, développé par la société The MathWorks. MATLAB permet d'effectuer des opérations sur des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes. C'est le logiciel le plus utilisé dans le monde de l'ingénierie et la science. Il touche plusieurs domaines tels que les systèmes automobiles, les dispositifs de surveillance de la santé, les réseaux électriques intelligents, l'apprentissage automatique et bien plus encore. MATLAB peut s'utiliser tout seul ou avec des boites à outils (généralement connues sous le nom de 'toolbox') et à chaque domaine est associé une ou plusieurs boites à outils spécifiques, par exemple

dans le domaine des Mathématiques, Statistiques, et d'Optimisation on trouve la Partial Differential Equation Toolbox (boîte à outils pour la résolution des équations différentiels), ou la : Curve Fitting Toolbox (boîte à outils pour l'ajustement des courbe), ou encore la : Neural Network Toolbox (boîte à outils pour l'utilisation des réseaux de neurones) qu'on aura l'opportunité d'expliquer ultérieurement.

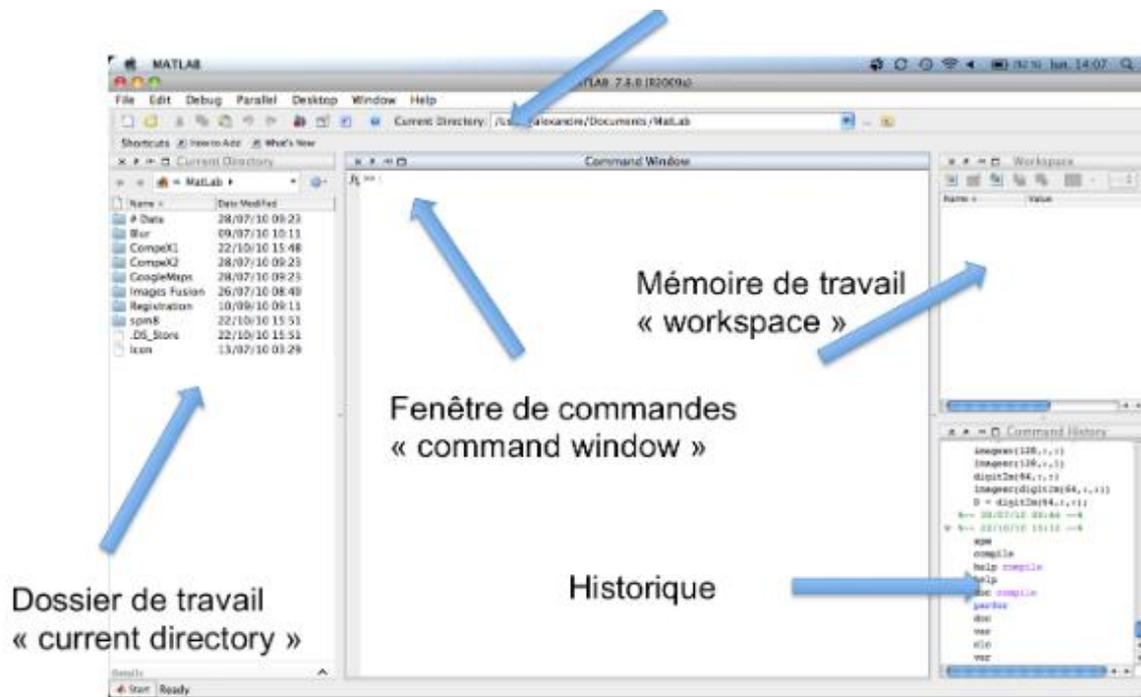


Figure IV.9: Interface MATLAB principale

IV.10.2. Implémentation d'un réseau neurones dans MATLAB

Avant d'aller plus loin, on se doit de préciser que la simulation des réseaux de neurones dans MATLAB peut se faire en deux principales méthodes :

a- La Neural Network Toolbox

Avec cette toolbox défini précédemment, on a plus besoin de parler d'implémentation, tout est déjà prêt, on n'en a qu'a introduire nos paramètres et la toolbox se charge du reste,

b- Programmation manuelle du réseau de neurone

Le principe ici est le même que le précédent, sauf que dans cette partie, on aura à écrire tout le programme nous même. On commencera par introduire nos paramètres principaux, à savoir : le nombre d'échantillons, le nombre d'entrées du réseau et leurs valeurs, le nombre de

couche cachées, leurs poids respectives, et le nombre de sortie, par contre, la suite est bien plus compliquée; alors qu'avec la ANN toolbox, il suffisait seulement de taper et d'exécuter la fonction pour avoir notre solution, là on est obligé de développer cette fonction manuellement en saisissant plusieurs lignes de codes tout en essayant de garder une bonne ossature de la forme du programme.

IV.11.Application du modèle

- Pour cette étude, la boîte à outils de réseau neurologique de MATLAB est utilisée.
- Les variables d'entrée du modèle correspondent aux valeurs des précipitations mensuelles. La sortie du réseau est représentée par les débits mensuels.
- Dans ce cas, la structure du modèle de réseau de neurones peut être exprimée comme suit :

$$Q = [P]$$

- Il est à noter, que nous standardisons d'abord les vecteurs d'entrée et de sortie, donc les données sont centrées et réduites.
- Le modèle neuronale testé s'appuie sur un apprentissage de type supervisé, l'algorithme de back propagation, qui possède une meilleure robustesse vis-à-vis de l'initialisation aléatoire des paramètres des réseaux, et assure la meilleure convergence vers un minimum de l'erreur quadratique MSE, pour les problèmes d'approximation des fonctions (ou régression) où le nombre des poids du réseau est restreint.
- La base des données a été subdivisée en deux ensembles : un pour le calage du modèle (l'apprentissage) et l'autre pour le test.

IV.12.Résultats et discussions

Dans cette étude, pour prédire le débit on a travaillé à base du modèle PMC et on a utilisé à l'entrée du modèle des valeurs de pluies mensuelles (mm).

La répartition des données pour (apprentissage, test et validation) a été choisie par le logiciel de calcul (MATLAB). Les résultats sont montrés dans les figures IV.(10 et11).

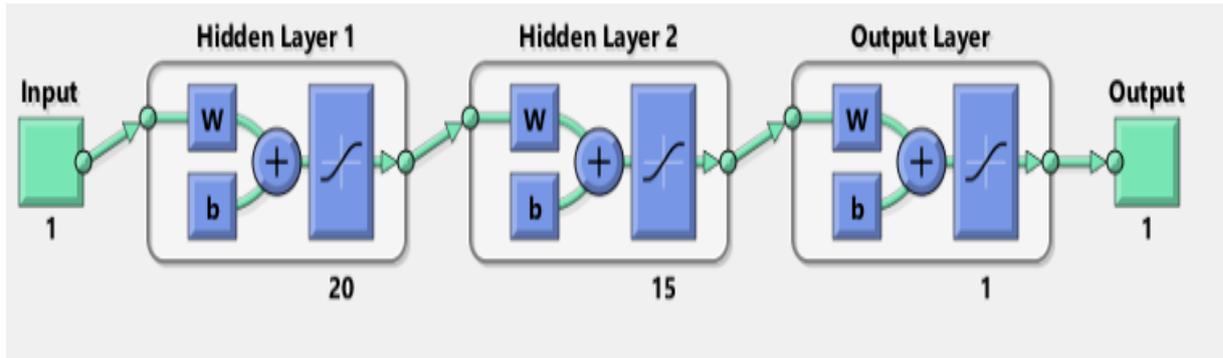


Figure IV.10: Schéma de réseau de Neurone

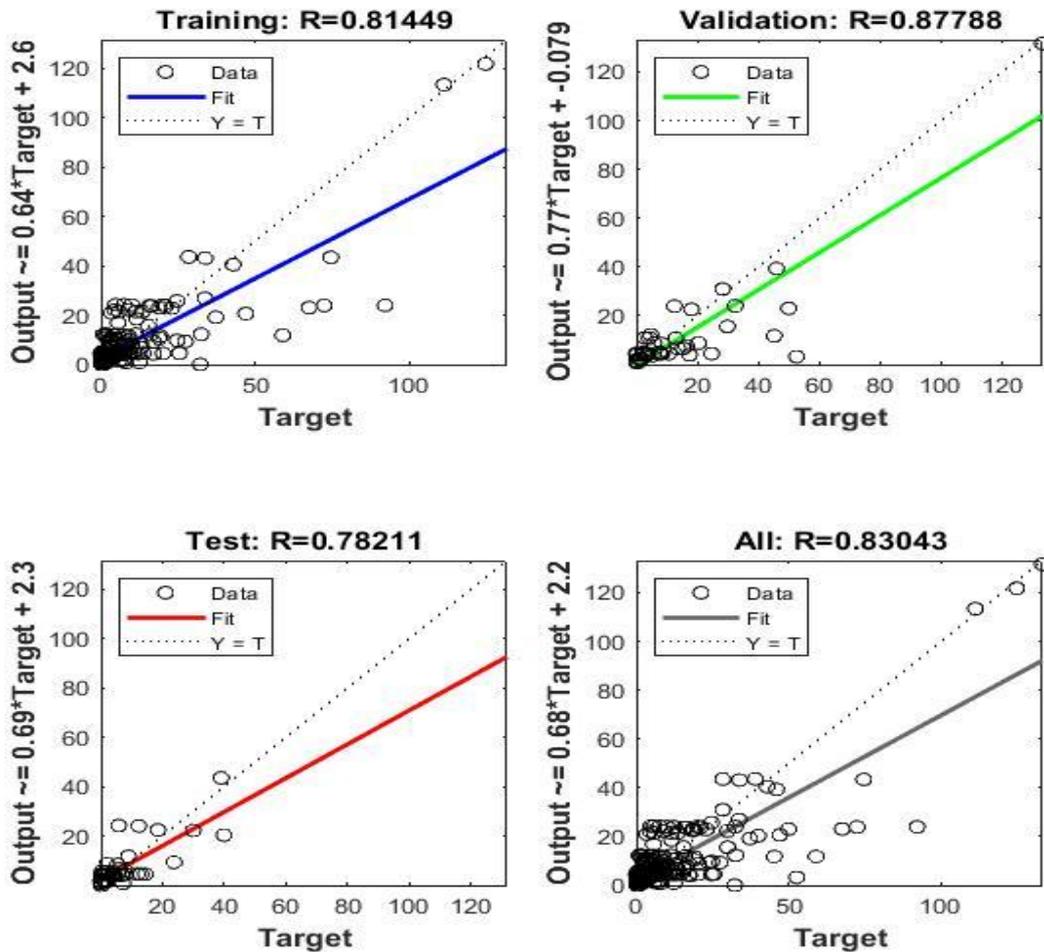


Figure IV. 11: Représentation des débits liquides simulés (Output) en fonction de débit liquide réel (Target) (apprentissage, validation, test et global)

Le tableau suivant résume les résultats obtenus des modèles RNA en fonction critères de performance (Nash, PBIAIS, RSR, R^2)

Tableau IV.2: Tableau récapitulatif des Résultats (Nash ,RSR ,PBIAIS et R^2)

Critères	Nash(%)	PBIAIS (%)	RSR	R^2
Valeur	99	-6	0.1	0.83043
Etat	Excellent	Très bon	Très bon	Suffisant

Le modèle de réseau de neurones retenu est appliqué dans une station du bassin ISSER est un réseau de (03) couches. Le modèle représente dans l'ensemble une régression (R) élevée de 0.83 et On ce qui le modèle global de notre bassin versant l'efficacité de Nash est de 99%, les résultats de PBIAIS et RSR obtenus (tableau IV.2) sont très bonnes, ce qui montre la performance du modèle obtenus.

IV.13. Conclusion

La modélisation pluie-débit est considérée actuellement comme un des moyens les mieux adaptés pour décrire de façon assez sommaire une réalité complexe du fonctionnement d'un bassin versant. Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation pluie-débit et les réseaux de neurone artificiel ainsi que le modèle PMC et le type d'apprentissage ont été choisis pour notre étude.

Dans le cadre de la modélisation du ruissellement des précipitations et la capacité prédictive des modèles, le modèle RNA obtenu à donner un très bon résultat avec un critère de Nash de l'ordre de 99%. Preuve à la fiabilité et l'efficacité de cette modèle.

Chapitre V

iIndice de sécheresse

V.1.Introduction

La sécheresse touche de nombreuses personnes dans le monde et entraîne d'énormes pertes économiques, destruction environnementale et dommage sociale. Cependant, la sécheresse est de loin le phénomène le moins compris. Toutefois il est important de pouvoir la détecter et la surveiller. De nombreuses organisations ont recommandé la caractérisation des sécheresses. Pour cela les scientifiques ont élaboré divers indices pour surveiller la sécheresse, tels que l'indice de précipitations standardisé (SPI), Ce dernier est utile pour une évaluation claire, simple et quantitative des principaux facteurs caractéristiques de la sécheresse : intensité, durée et étendue spatiale.

Le présent chapitre est le fruit de notre travail, vue qu'il présente le degré de sécheresse dans notre zone d'étude, et il illustre les différents résultats obtenues, afin de déterminer l'impact du réchauffement planétaire sur le déficit hydrique.

V.2.Définition de la sécheresse

Une sécheresse peut être définie comme une période de précipitations prolongées, normalement une ou plusieurs saisons, qui causent un déficit d'eau dans certains secteurs de l'économie d'un pays. La sécheresse doit être considérée par rapport :

- A certaines conditions à long terme du bilan final des précipitations et de l'évapotranspiration dans une région particulière.
- A l'échelle temporelle.
- A l'efficacité des précipitations.

Evidemment la combinaison avec d'autres facteurs climatiques comme des facteurs élevés de température et de vent, et des valeurs peu élevées de l'humidité relative pourrait rendre le facteur sécheresse plus grave (*FAO, 1996*).

V.3.Les types de sécheresse

Selon les définitions opérationnelles d'après (Wilhite et Glantz, 1985), La sécheresse est aussi définie selon les différents secteurs qui interagissent avec ses effets.

Il existe quatre grands types de sécheresse : météorologique, hydrologique, agricole et socio-économique

V.3.1. La sécheresse de type météorologique

Événement climatique extrême caractérisé par des précipitations inférieures à la normale sur une période qui peut varier du mois à l'année, voire dans certain cas, à plusieurs années. Les sécheresses météorologiques sont souvent déclenchées par des anomalies persistantes de grande échelle des températures de surface de la mer. En effet, l'océan représente une composante lente du système climatique pouvant influencer l'atmosphère à des échelles plus ou moins longues.

V.3.2. La sécheresse de type agricole

Elle se définit plus volontiers par la présence dans le sol d'une quantité d'eau suffisante pour assurer la croissance des cultures et du fourrage que par l'écart des précipitations par rapport à la normale sur une période de temps déterminée. Il n'y a pas de relation directe entre la hauteur de précipitation et l'infiltration des précipitations dans le sol (*OMM, 2006*).

Elle est caractérisée par une période où les sols sont secs. Ce qui peut être causé par des précipitations moyennes inférieures à la normale, ou moins fréquentes mais plus intenses, une évapotranspiration plus élevée, ou encore par des ruissellements plus importants.

V.3.3. La sécheresse de type hydrologique

Elle correspond à une diminution des réserves d'eau dans les cours d'eau, les réservoirs de surface et la nappe phréatique. La sécheresse hydrologique est causée par un manque de précipitations accompagné d'une évaporation massive. Cependant, des facteurs non météorologiques, comme la demande en eau, la disponibilité de réservoirs de surface et le forage de puits artésiens, en aggravent l'effet (*OMM, 2006*).

V.3.4. La sécheresse socio-économique

Elle diffère fortement des autres types de sécheresse du fait qu'elle reflète la relation entre l'offre et la demande de certaines denrées ou de certains biens économiques (i.e. grains, fourrage, énergie hydro-électrique...,etc.) qui sont tributaires des précipitations (*OMM, 2006*).

V.4. Relation entre les différents types de sécheresse

Les types de sécheresse sont évidemment liés. Les sécheresses météorologiques déclenchent souvent des sécheresses agronomiques et qui peuvent être suivies par des sécheresses hydrologiques. Cependant d'autres facteurs comme des précipitations moins

intenses mais plus fréquentes, une érosion importante, une mauvaise gestion des ressources en eau peuvent aussi causer ou amplifier ces sécheresses (Dai, 2011).

Les relations entre ces différents types de sécheresse sont illustrées par la figure (V.1).

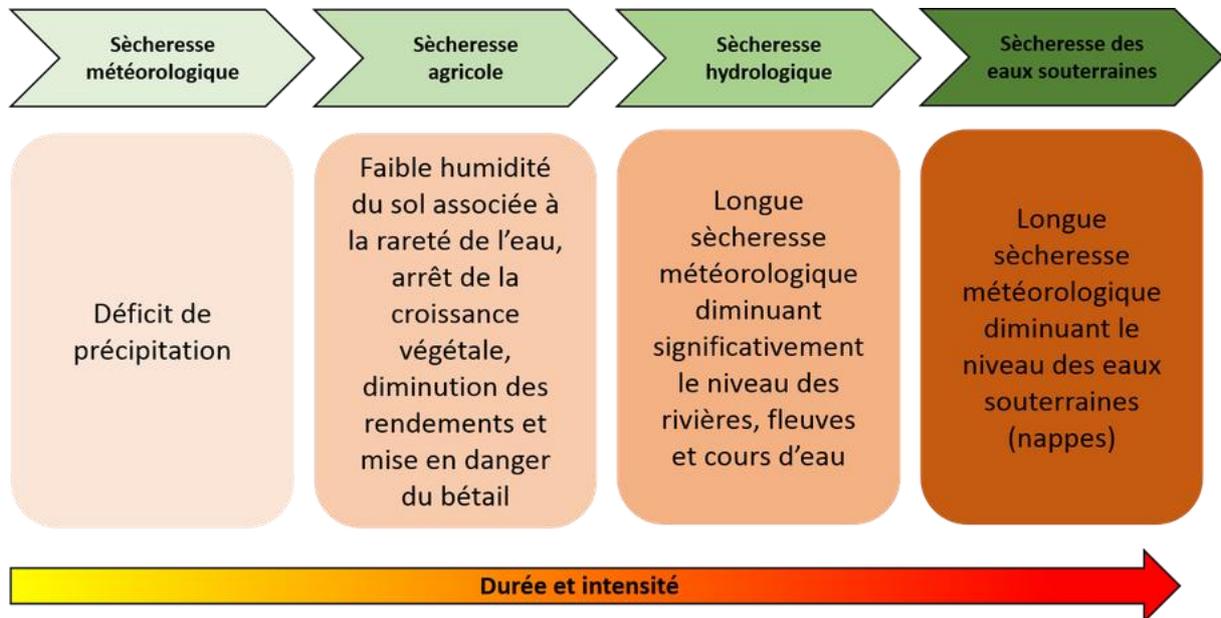


Figure V.1: La relation entre les types de sécheresse

V.5. Les causes de la sécheresse

a) L'insuffisance des précipitations

Dans les régions arides et semi arides la sécheresse est annoncée lorsqu'une région traverse de longues périodes sans pluie, surtout pendant plus d'une saison.

b) Les Causes humaines

Les activités humaines jouent un rôle relativement important dans la gestion du cycle de l'eau, telles que la déforestation, la construction et l'agriculture qui ont un impact négatif sur le cycle de l'eau. Les arbres et la couverture végétale sont essentiels au cycle de l'eau car ils aident à limiter l'évaporation, stockent l'eau et attirent les précipitations.

c) Assèchement du flux d'eau de surface

Les lacs, les rivières et les ruisseaux sont les principaux fournisseurs d'eaux de surface en aval dans diverses régions géographiques du Monde. Pendant les saisons extrêmement

chaudes ou en raison de certaines activités humaines, les surfaces d'eau libres peuvent s'assécher en aval, ce qui contribue à la sécheresse significative ainsi que la demande en eau devient supérieure à l'eau disponible. Les systèmes d'irrigation et les barrages hydroélectriques font partie des activités humaines susceptibles de réduire considérablement la quantité d'eau s'écoulant en aval vers d'autres zones.

d) Le réchauffement climatique

Les actions humaines sont contribuéées à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, entraînant ainsi une augmentation continue des températures moyennes de la planète. En conséquence, les niveaux d'évaporation et d'évapotranspiration ont augmenté et les températures plus élevées ont entraîné des incendies de forêt et prolongé les périodes de sécheresse.

V.6. Conséquences et impact de la sécheresse

a) Conséquence sur la qualité de la ressource

- **Risque accru de la pollution** : La moindre capacité de dilution des rejets ponctuels (qui peuvent être importants dans les zones touristiques) ou accidentels par la faiblesse des débits augmente l'impact des rejets dans le milieu.
- **Augmentation des températures de l'eau** : Dégradation de la qualité physicochimique des milieux et diminution de l'oxygène dissous, nécessaire à la vie aquatique.
- **Aggravation des conséquences de l'eutrophisation des plans d'eau** : Le manque d'oxygène entraîne une libération de phosphore et d'azote contenus dans le sédiment, ce qui amène la prolifération de nouvelles algues. L'eutrophisation altère les conditions de reproduction et d'alimentation des poissons, favorise le développement des algues filamenteuses qui dégrade la qualité des herbiers (lieux d'abri) et engendre une diminution de la transparence. La baignade peut alors être interdite pour raison de sécurité.

b) Conséquences économiques

- **Irrigation** : Pertes économiques importantes (rendements en forte baisse si apport d'eau insuffisant).
- **Elevage** : Crise fourragère, augmentation des prix des aliments pour le cheptel. Certains éleveurs réduisent le nombre de bêtes pour pouvoir les nourrir. Problème d'alimentation en eau du bétail possible dans certaines zones.

- **Tourisme** : Altération de la qualité des eaux de baignade (turbidité, développement d'algues, de cyanobactéries), côtes des plans d'eau insuffisantes avec problème d'accès aux plages, réduction des activités nautiques et annulation de manifestations de sport d'eau vive (Kayak).
- **Industrie** : Arrêt partiel ou total d'activité, en particulier pour les entreprises utilisatrices d'eau implantées sur des ressources déficitaires.
- **Activités aquacoles et halieutiques** : Les activités de pêche sont réduites et l'équilibre des milieux littoraux supports des productions conchylicoles est fragilisé. Le risque de mortalités s'accroît et peut entraîner des pertes de production.

c) Conséquences sociales

La limitation des usages (arrosage des jardins, lavage des voitures, arrosage des terrains de sport) peut engendrer des conflits d'usage importants sur les secteurs les plus touchés : actes de malveillance, manifestations, voire des différends pour l'accès à l'eau qui se règlent « à coup de fusil » comme pendant la sécheresse de 1989-1990.

d) Conséquences sur la santé

Risque de rupture d'approvisionnement pour les prélèvements en eaux superficielles. Ce point fait l'objet d'une vigilance particulière de la part des préfetures qui peuvent demander une limitation de la consommation de la part des collectivités et des usagers.

V.7. Impact de la sécheresse

La sécheresse assèche les sols et altère le bon développement de la faune et de la flore. Ainsi, les incendies sont souvent nombreux en période de sécheresse, et vont émettre des gaz nocifs qui vont polluer l'atmosphère et accentuer l'effet de serre. Avec le changement climatique planétaire, les phénomènes de sécheresse sont de plus en plus récurrents, il est donc important de savoir comment gérer les réserves dans ce cas et surtout, comment s'adapter à un climat qui change extrêmement vite. De plus, elle a un impact majeur sur la sécurité alimentaire, la santé, les déplacements de population et les migrations selon les estimations, les épisodes de sécheresse seraient les catastrophes les plus coûteuses qui soient : les dommages qu'ils causent oscillent chaque année entre 6 et 8 milliards de dollars, et aucune autre calamité naturelle ne touche autant de personnes. Depuis 1900, ils ont fait plus de 11 millions de victimes, et 2 milliards de personnes en ont subi les conséquences (*OMM, 2020*).

V.8. Sécheresse en Algérie

Le Nord-ouest de l'Algérie a connu de nombreuses sécheresses au cours de son histoire, de tailles différentes. Certaines ont parfois un impact significatif sur les conditions, la vie de la population, mais les plus graves et durables sont ces deux dernières décennies. Les précipitations au cours des dernières décennies ont été inférieures à environ 12% dans la région centrale, 13% dans la région orientale et 20% dans la région occidentale. Ces valeurs montrent que l'Ouest de l'Algérie est la zone la plus gravement touchée. Cette sécheresse a eu un impact négatif sur le débit du lit des oueds, le niveau des eaux souterraines et le volume d'eau au niveau des barrages.

V.9. Méthode de caractérisation de la sécheresse

Les sécheresses sont des phénomènes complexes pour lesquels il existe plusieurs façons, pour les définir. Dans cette optique, dans notre étude nous allons discuter de deux méthodes importantes qui peuvent être utilisées pour leur suivi.

V.9.1. Indice standardisé de précipitations SPI

V.9.1.1. Définition

L'indice standardisé des précipitations (SPI) est basé sur des calculs statistiques des précipitations pendant une longue période (30 ans au moins). Il est possible d'exécuter le programme si de telles séries présentent des données manquantes, mais le degré de confiance à accorder aux résultats s'en trouve, alors affecté en fonction de la distribution des données manquantes par rapport à la durée de la période de relevés. Le SPI est développé en 1993 par McKEE, N.J. DOESKEN & J. KLEIST de l'université de l'État du Colorado, pour la détermination des déficits pluviométriques (*Mckee T. & all, 1995*).

C'est un indice très important, puissant et simple à calculer. Les données sur les précipitations constituent en fait le seul paramètre requis. En outre, l'indice SPI se révèle tout aussi efficace pour analyser les périodes des cycles humides que les périodes des cycles secs (*OMM, 2012*).

V.9.1.2. Formule de l'indice SPI

L'expression est donnée par la formule suivante :

$$SPI_{12} = \frac{P_i - P_m}{\delta}$$

P_i : Pluie de l'année i

P_m : Pluie moyenne de la série sur l'échelle temporelle considérée.

δ : Ecart-type de la série sur l'échelle temporelle considérée.

V.9.1.3. Échelle de temps

Le SPI est un indicateur qui peut être calculé à différents pas de temps. Le nombre de mois à prendre en compte est fonction des besoins de l'utilisateur. Des durées courtes seront importantes pour des études agronomiques alors que des durées plus longues seront plus adaptées à des problématiques hydrologiques (*Guttman, 1999*).

V.9.1.4. La méthode de calcul

La méthode de calcul consiste à transformer une distribution de fréquence (gamma, par exemple) en une autre distribution de fréquence (normale ou gaussienne). La première étape du calcul de SPI consiste à choisir adéquatement une distribution de probabilité particulière (p. ex., la distribution gamma, la distribution bêta incomplète et la distribution Pearson III (*Guttman, 1999*) qui correspond de façon fiable à la distribution à long terme. Les séries chronologiques des précipitations à terme et la conduite adaptée à cette distribution. La distribution gamma a été largement utilisée, car la distribution gamma a été considérée comme l'ajustement fiable à la distribution des précipitations.

V.9.1.5. Classification des valeurs SPI

McKee et al (1993) ont développé cet indicateur afin de faire ressortir l'impact de la période étudiée (ex. 1, 2, 3 mois) sur les différentes ressources en eau. Comme les réserves souterraines, les réservoirs, les dépôts neigeux où les cours d'eau ne réagissent pas aux variations pluviométriques avec la même rapidité, la période de calcul du SPI fait ressortir l'effet de cette variation sur chacun de ces systèmes hydrologiques. À l'échelle temporelle d'une semaine, par exemple, la réponse du SPI est très variable (*McKee T. & all, 1993*).

La classification adoptée par l'organisation mondiale de la météorologie, où six classes de sécheresse sont distinguées, variant de l'extrêmement sèche à l'extrêmement humide, peuvent être distinguées (tableau.V.1).

Tableau V.1 : Classification des sécheresses selon les valeurs de SPI

Valeur SPI	Séquence de sécheresse
2,0 et plus	Extrêmement humide
de 1,5 à 1,99	Très humide
de 1,0 à 1,49	Modérément humide
de -0,99 à 0,99	Proche de la normale
de -1,0 à -1,49	Modérément sec
de -1,5 à -1,99	Très sec
-2.0 et moins	Extrêmement sec

V.9.1.6. Les avantages et les Inconvénients de SPI

a) Avantages de méthode SPI

- L'indice SPI offre une bonne souplesse d'utilisation: il est possible de le calculer pour de multiples échelles de temps.
- Quand il porte sur un laps de temps relativement court, entre 1 et 3 mois par exemple, l'indice SPI permet de détecter rapidement les situations de sécheresse et d'en évaluer la gravité.
- L'indice SPI présente une bonne cohérence spatiale, ce qui permet d'établir des comparaisons entre des zones différentes soumises à des climats différents.
- Sa nature probabiliste le place dans un contexte historique, ce qui convient bien à la prise de décision.

b) Inconvénients de méthode SPI

- L'indice SPI ne repose que sur les relevés de précipitations.
- Le bilan hydrique du sol n'étant pas pris en compte, l'indice ne permet pas le calcul du rapport évapotranspiration/évapotranspiration potentielle (ET/ETP).

V.10. Calcul automatique des indices de sécheresse

V.10.1 Logiciel utilisé

R est un environnement intégré de manipulation de données, de calcul et de préparation de graphiques. Toutefois, ce n'est pas seulement un « autre » environnement statistique (comme SPSS ou SAS, par exemple), mais aussi un langage de programmation complet et autonome. Tel que mentionné précédemment, le R est un langage principalement inspiré du S et de Scheme (Abelson et collab., 1996). Il est disponible pour PC sous Windows gratuitement.

Utilisation de R est facilitée par l'installation d'un IDE (integrated development environment) ou "environnement de développement intégré.

RStudio est une application permettant de travailler en R dans un environnement de développement riche et complet que nous allons utiliser dans la suite de ce cours. Il comprend une console, un éditeur de coloration syntaxique prenant en charge l'exécution directe du code, ainsi que de nombreux outils robustes pour tracer, afficher l'historique, déboguer et gérer l'espace de travail. Cet outil est disponible gratuitement sur le net aussi.

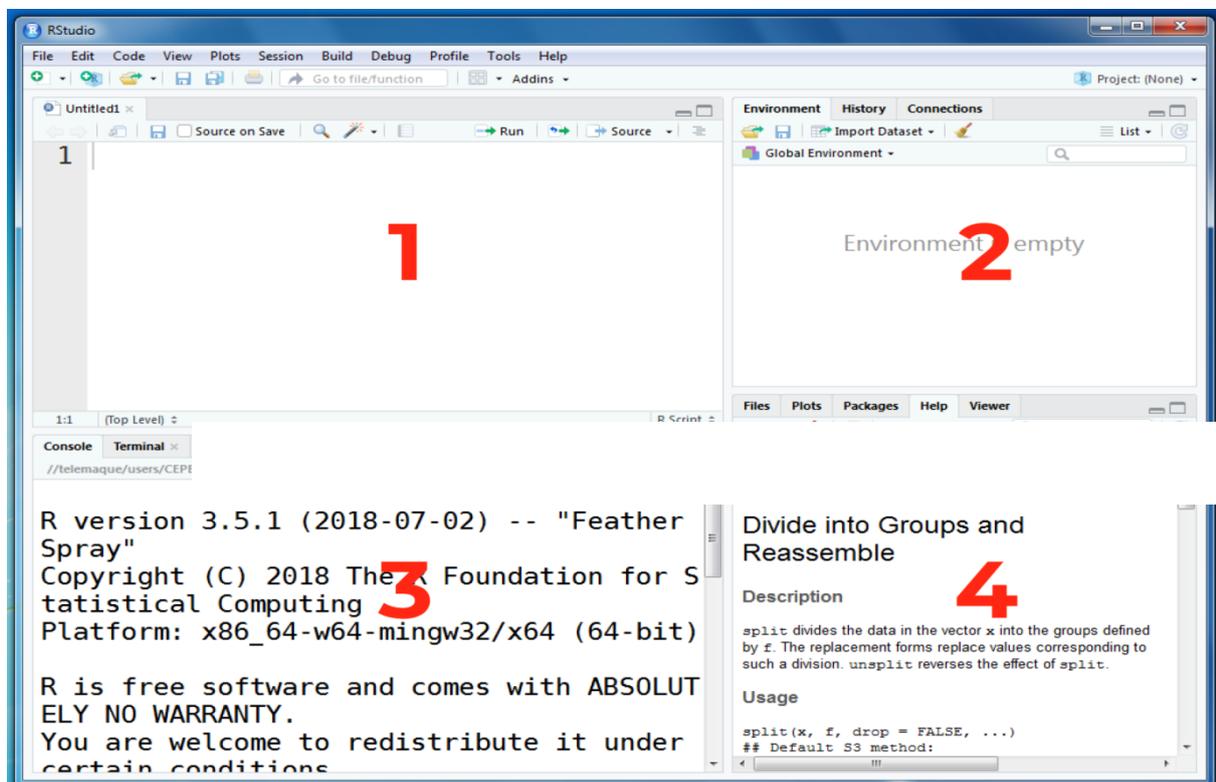


Figure V.2: L'interface de R Studio.

1. Éditeur de texte, de codes, etc.
2. Espace de travail, historique, importation, etc.
3. Console
4. Visualisations, aide

Toutes les fonctions et les ensembles de données R sont stockés dans des packages. Seulement quand un paquet est chargé, son contenu est disponible. Pour le calcul des indices de sécheresse il faut ajouter des nouveaux packages. Pour notre cas on a ajouter le package SPEI.

- **SPEI package** Ce package permet de calculer les indices SPI, SPEI et le calcul de l'évapotranspiration potentielle avec trois méthodes (Thornthwaite 1948, Penman-Monteith 1965 et Hargreaves 1985). Une fois le téléchargement est terminé, on ajoute le package dans le logiciel R en suivant les étapes suivantes :

1. Cliquer sur «package» «install package(s) from local files».
2. sélectionner le fichier SPEI.
3. Cliquer sur « packages ».
4. Créer le nom de package souhaitable, dans ce cas « SPI »
5. Cocher la cellule« SPI ».
6. Cliquer sur « ImportDataset », plusieurs options de format apparaissent (texte, Excel..).

V.11. Résultats et discussions

Le calcul de SPI était fait avec une échelle saisonnière et annuelle pour des données de précipitation de bassin ISSER pour la période de 2025 à 2100.

🚩 SPI à l'échelle de 3 mois

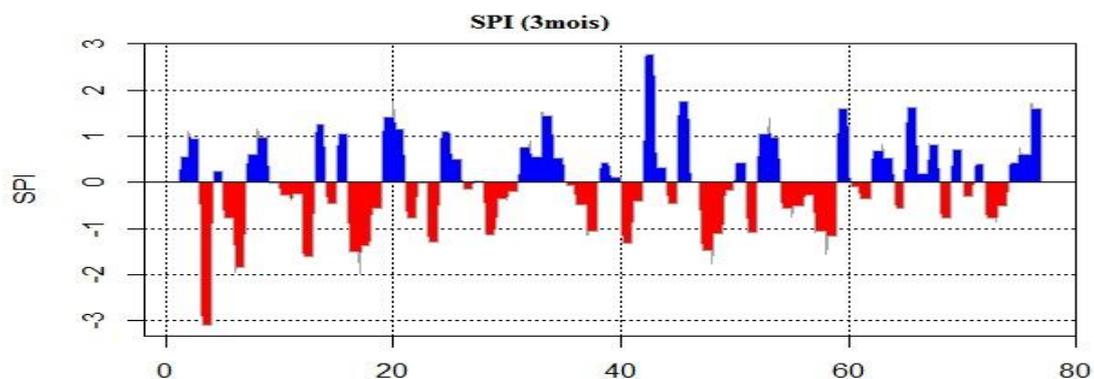
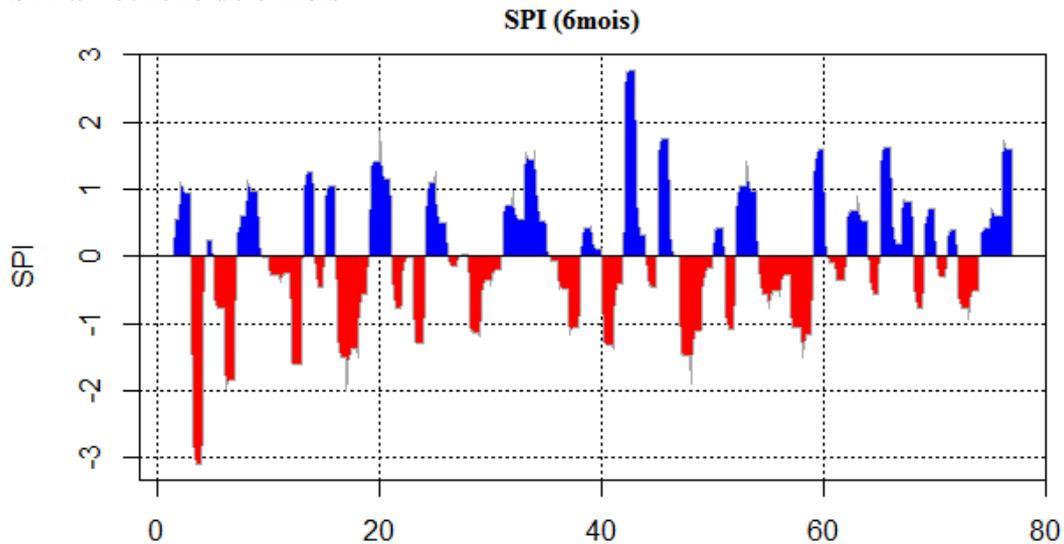
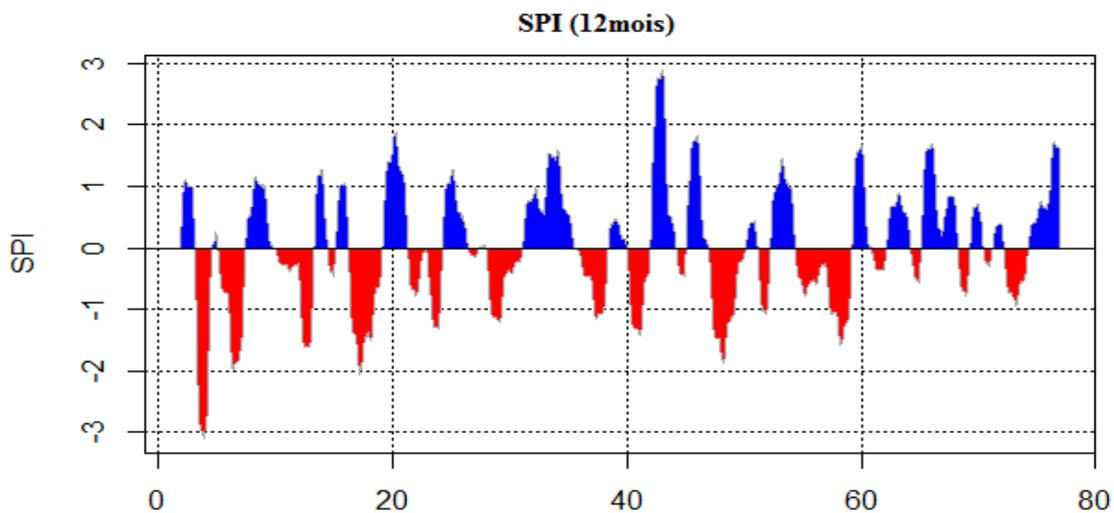


Figure V.3: Evolution du SPI pour des durées 3 mois

+ SPI à l'échelle de 6 mois

**Figure V.4:** Evolution du SPI pour des durées 6 mois

+ SPI à l'échelle de 12 mois

**Figure V.5:** Evolution du SPI pour des durées 12 mois

- On remarque que les résultats de SPI obtenus sont presque les mêmes pour les différentes échelles de 3 mois, 6 mois et 12 mois.
- L'évolution de l'indice SPI pour le bassin d'ISSER pour la période (2025-2100), (figure V.3, V.4 et V.5) montre que notre série est caractérisée par une alternance d'épisodes secs et humides, nous observons aussi que la valeur maximale du SPI qui

définit l'humidité la plus élevée atteint 2,8 en 2067/2068, et la sécheresse la plus sévère définit par la valeur minimale du SPI atteint -3.1 en 2027/2028.

V.12. Conclusion

L'identification de l'indice de sécheresse a été effectuée pour prévoir et évaluer la sévérité de cette dernière à un moment approprié (court et long terme), l'état de l'indice à un temps (t) peut être déterminé par l'un des trois cas : sec, humide (non sec) ou normale.

Sur les données de précipitations de 75ans mis en étude, l'application de SPI à différentes échelles de temps a permis de détecter plusieurs séquences de sécheresses qui ont touché la région, les pics s'alternent entre les années sèche et humide. La sécheresse a longtemps sévi au cours des décennies 2025 et 2035 quelques années. Pour l'humidité, elle est souvent enregistrée dans les années entre 2060 et 2070.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les changements climatiques induits par l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre auront des conséquences multiples et encore difficiles à cerner dans le futur. Cependant, ils devraient causer des modifications de la température, des précipitations et d'autres variables du climat, ce qui se traduit par des changements dans l'humidité du sol, par d'épisodes plus graves de fortes chaleurs, d'inondations et de sécheresses. Devant ces changements, l'Algérie a fourni d'importance efforts de mobilisation de son potentiel hydrique limité par l'établissement des plans directeurs de développement des ressources en eau dans le futur. Les plans de gestion établie ont été basés sur les modèles globaux. La résolution de ces modèles, de 100 à 200 km, ne permet pasd'avoir suffisamment de détail régional. Utiliser des modèles régionaux du climat permetd'augmenter la résolution. Ceux-ci représentent plus finement une sous-partie du globe, en utilisant les simulations globales notamment pour décrire les conditions aux bords de cette sous-partie.

Dans le cadre de ce travail, en premier lieu on s'est intéressé l'étude d'évaluation de la performance de modèle climatique régional CMIP5 de l'expérience CORDEX dans la simulation des précipitations futures au niveau de bassin ISSER, où des observations de stations réelles sont utilisées pour évaluer les MRC.

En suite, une étude de détection de rupture a permis de trouver des changements des précipitations au niveau des différentes stations de bassin ISSER cours des années 1988,1990 et 1999 par différents tests (le test de Pettitt et l'ellipse de bois), Les résultats des précipitations projeter au l'horizon de 2100 par le modèle climatique CMIP5 montrent une diminution des précipitations dans le futur par rapport à la période de référence.

Par ailleurs nous avons procéder a la modélisation pluie-débit par l'application du modèle neuronal PMC, les résultats obtenus par ce dernier sont très satisfaisants, avec un critère de Nash de l'ordre de 99%. Preuve à la fiabilité et l'efficacité de cette modèle.

D'autre part, L'étude de la sécheresse aide à prendre une bonne décision pour mieux gérer les ressources en eau, pour cela l'indice standardisé des précipitations est un outil très intéressant pour caractériser les années humides et les années sèches. Les résultats obtenus par ce dernier pour différentes échelles de temps montrent que notre série est caractérisée par une alternance d'épisodes secs et humides.

Enfin, nous suggérons ce document comme un outils d'alertes aux autorités concernés pour planifier les mesures d'adaptation nécessaires devant les changements climatiques inéluctables, la lute contre ces changements climatiques est une affaire mondiale qui nécessite l'implication des gouvernements, elle ne peut être gagnée que si la responsabilité soient partagées entre les nations développées et en développement.

Références Bibliographiques

Bibliographie

A

- A.N.R.H. (2012).** Rapport Interne de L'A.N.R.H, Alger.
- AMBROISE. (1998).** Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : 1-processus et facteurs. Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science.
- ARDOIN.BAEDIN, S. (2004).** Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat en Sciences de l'Eau. Université Montpellier II,255P.
- AREZKI, L. (2012).** Utilisation d'un sig et d'un modele mathematique pour la gestion integree des ressources en eau a l'echelle du bassin cotier algerois 02a. Mémoire magister N° d'ordre : .34/ 2012-M/GC, universite des sciences et de la technologie « houari boumediene ».
- ASCE. (2000).** (*American Society of Civil Engineers*) *Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology.* .
- BECHROUNE, A. (2011).** Elaboration d'une base de données Hydrologique du Bassin Versant de la Soummam via le modèle hydrologique HEC-HMS. Thèse de Magister.Département d'Hydraulique,Université Abderrahmane Mira de Bejaia.

B

- BEGHDADI. (2014).** L'influence du changement climatique sur les ressources en eaux du Meffrouch mémoire , universite abou bekr belkaid – tlemcen 89p.
- BENKACI, T. (2006).** *Modélisation des débits mensuels par les modèles conceptuels et les systèmes neuro-flous*vol. 19, no 3, p. 247-257.
- BENNABI, M. (1985).** Contribution à l'étude hydrogéologique de la vallée de l'Oued Sahel-Soummam (Algérie). Hydrologie. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, Français.
- BINNIE, P. E. (1984).** Schéma d'aménagements des ressources en eaux dans la région“, Rapport N° B1 d'Alger-Sebaou.
- BOUANANI, A. (2004).** Hydrogéologique par prospection géophysique dans la région de Bouira et dans la vallée de l'oued Sahel . DHW,Bouira.
- BOUGUERNE, A. (2017).** *Relation pluie-débit et concentration des polluants dans les oueds Boussalem et Rhumel est algérien ; These de doctorat.*
- BOUKHALY T.V., N. M. (2017).** « Khronostat Model as Statistical Analysis Tools in Low Casamance River Basin, Senegal » [en ligne], World Environment. DOI : 10.5923/j.env.20170701.02, p. 10-22.

BOUTOUGA, F. (2012). Ressources et essai de gestion des eaux dans le Zeb Est de Biskra. Thèse de Magister en ingénierie des ressources en eau. Université Badji Mokhtar Annaba Algérie.

C

CHARLES A, S. D. (2015). Modèles climatiques et impacts du réchauffement climatique en France, portail Drias les futurs du climat, ENS-Lyon/Ifé. .

CHERIFI, S. (2001). Application de modèle GR2M sur le bassin de la Soummam et de l'Isser, these de Magister, ENP, Alger.

CHOURGHAL, N. (2016). Impacts des changements climatiques sur la culture du blé dur en Algérie, thèse de doctorat en Sciences Agronomiques, Ecole Nationale Supérieure Agronomique Alger.

COULIBALY, P. A. (2000). . *Daily reservoir inflow forecasting using artificial neural networks with stopped training approach. Journal of Hydrology.* doi:10.1016/S00221694(00)00214-6 .

CRAME, W., & ALL. (2018). Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. Nature Climate Change, Nature Publishing Group, v. 8, n. 11, pp. 972 – 980. Doi: 10.1038/s41558-018-0299-2.

D

DAHMANI, S. (2019). *Modélisation du transport solide par les deux modèles réseaux neurone et le neuro-floue cas du bassin versant KébirRhumel. OEB.*

DAI, A. (2011). Drought under global warming: A review, WIREs Clim.Change : 2, 45–65 .

DENOUX E, C. C. (2003). Les modèles de circulation générale. Les enjeux de l'environnement .Outils et Ressources.

DREYFUS, G. J.-M. (2002). *Réseaux de neurones Méthodologie et applications .*

E

ELMEDDAHI. (2016). Les changements climatiques et leurs impacts sur les ressources en eau, cas du bassin du Cheliff. These de doctorat. Univ Hassiba Ben Bouli-Chlef 199p.

ELOUISSI A, Ş. Z. (2016). Algerian rainfall innovative trend analysis and its implications to Macta watershed. Arabian Journal of Geosciences. Arab J Geosci, p. 1-12. DOI 10.1007/s12517-016-2325-x.

F

FAO. (1996). La planification des stratégies contre les effets de la sécheresse. .

G

GAYE, A. T. (2008). « Scénarios climatiques au Sénégal ». Laboratoire de Physique de L'Atmosphère et de l'Océan SF (LPAO-SF), École Supérieure Polytechnique, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal .

GHERISSI, R. (2012). Hydrologie et modelisation pluie-debit : Cas du bassin versant de l'oued lakhdar (ex : Chouly) tafna-nw algerien.

GHEZALI, S. (2019). *Modélisation de la relation pluie-débit par les modèles conceptuels et neuroflows (Application au bassin versant de Zardezas). OEB .*

GIEC. (2013). Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Groupe de travail I).

GIEC. (2008). Résumé à l'intention des décideurs. In: Bilan 2007 des changements climatiques : Les bases scientifiques physiques. Contribution du Groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

GIORGI, F. B. (2004). interannual variability and trends in a regional climate change experiment over Europe. I. Present-day climate (1961–1990), *Climate Dynamics*, 22(6–7). .

GOOSSE H, B. W. (2010). Introduction to climate dynamics and climate modelling, online textbook <http://www.climate.be/textbook>.

GOUAIDIA, I. (2008). influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico –chimiques des eaux d'une nappe en zone semi aride, cas de la nappe de meskiana nord-est algérien. thèse de doctorat. univ.

GUTTMAN, N. B. (1999). Accepting the Standardized Precipitation Index : A calculation Algorithm. *Journal of American Water Ressources Association* 35:311-322.

H

HUFTY, A. (2001). Introduction à la climatologie, Les presses de l'Université de Laval, De Böeck Université, 545 p.

I

IPCC. (2014). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, et al).

ITTERSUM, V & ALL. (2011). «Methodological and empirical progress and challenges in integrated assessment of agricultural systems and policies .» 122nd EAAE Seminar "Evidence-Based Agricultural and Rural Policy Making. Ancona.

K

KHORCHANI, M. E. (2005). *Development of a discharge equation for side weirs using artificial neural networks. Journal of Hydroinformatics, 7 (1), 31–39.*

KOFFI, B. (2007). Modélisation pluie-débit en région tropicale humide : application des réseaux de neurones sur quatre stations hydrométriques du Bandama Blanc (Bada, Marabadiassa, Tortiya et Bou) situées au Nord de la Côte d'Ivoire. Thèse unique d'hydrogéologie, Université de Cocody Abidjan .

KOLLING, I. (2017). Notion de climatologie. Cour pédagogique, Université Ibn Zohr (Maroc), 97p.

KUSANGAYA S, W. M. (2014). Impacts of Climate Change on Water Resources in Southern Africa, *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 67–69, n. 2014, pp 47–54. DOI: 10.1016/j.pce.2013.09.014.

L

LANGBIN, W. (1947). Topographic characteristics of drainage basins, United States, Geological Survey, Water Supply Paper 968-C.

LEK, S. E. (1996). *Modélisation de la relation pluie-débit à l'aide des réseaux de neurones artificiels. Revue des sciences de l'eau, 9(3), 319–331.* .

LOUP, J. (1974). *Les eaux terrestres. Hydrologie continentale, Editeur Masson, 175page, paris.* .

M

MATE, G. (2010). Seconde communication nationale de l'Algérie sur les changements climatiques à la CCNUCC, 211p .

MCKEE T., D. N., & ALL. (1995). Drought monitoring with multiple time scales. In: *Proceedings of the 9th Conference on Applied Climatology*, AMS, Dallas.

MEARNS LO, G. F. (2003). Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Regional Climate Model Experiments DDC of IPCC TGCIA Final Version 2003, 3-5p .

MEARNS, L. O. (2013). Climate change projections of the North American regional climate change assessment program (NARCCAP), *Climatic Change*, 120(4), 965–975.

Meddi, M. (2010). Impact des changements climatiques sur les débits dans le bassin Chélif. *Projet GEF/PUND 00039149.*

MEGHERBI, W. (2015). L'ensablement, un risque négligé en zone tellienne littorale cas de la région Mostaganem. Mémoire de magister, Université d'Oran 2, 193p.

MERZOUKAN, N. (2009). *Etude des performances des réseaux de neurones dynamiques à représenter des systèmes réels : une approche dans l'espace d'état. diplôme de MAGISTER.* .

MUSY, A. E. (2004). Hydrologie, une science de la nature, Coll. Gérer,l'environnement Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, ISBN2-88074-546-2, 314 pages.

N

NAJJAR, Y. E. (2000). *Characterizing the 3D stress-strain behavior of sandy soils: a neuro-mechanistic approach. ASCE Geotechnical Special Publication, 96, 43–57.*

NASA. (2015). Global Climate Change, Global Climate Change: How do we know?. <http://climate.nasa.gov/evidence>. .

NASH, S. J. (1970). *River flow forecasting through conceptual model. Part 1- a discussion of principles. Journal of hydrology, 10; 282-290.*

NASSRI, L. (2018). Climatologie : notion et application. Cours pédagogique, Université Moulay Ismail, Maroc.

O

OMM. (2006). Suivi de la sécheresse, progrès et enjeu futur. .

OMS. (2011). organisation mondiale de santé.Changement climatique et santé.

OULFAH, M. (2015). Etude hydrologique du bassin versant de la Soummam Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master; Faculté de Technologie Université Mohamed Boudiaf - M'sila.

OUZEAU, G., & ALL. (2014). Le Climat De La France Au Xxie Siècle. V. 4, Scénarios Régionalisés : Edition 2014 Pour La Métropole Et Les Régions D'outre-Mer, Ministère De l'Écologie, Du Développement Durable Et De l'Énergie. Fr.

P

PAYRAUDEAU, S. (2002). Modélisation distribuée des flux d'azote sur des petits bassins versants méditerranéens.

PERRIN, C. (2002). *Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit*. .

R

RIRKALLA, N. (2005). *Nanoparticules et réseaux de neurones artificiels : de la préparation à la modélisation, thèse de doctorat de l'université de Montréal Canada*. .

ROCHARD J., C. J. (2006). Fondement du climat et perspective d'évolution. Congrès mondial de la Vigne et du Vin, OIV. Institut français de la vigne et du vin.

S

SALINGER, M. J. (2000). Agrometeorological adaptation strategies to increasing climate variability and climate change. *Agri for Meteorolo*, v. 103, n. 2000, pp. 167-184. Doi :10.1016/S0168-1923(00)00110-6.

Références Bibliographiques

SEBBAR, A. (2013). Étude de la variabilité et de l'évolution de la pluviométrie au Maroc (1935-2005) : Réactualisation de la carte des précipitations [en ligne]. Casablanca : Université Hassan II Mohammedia-Faculté des Sciences Ben M'Sik. Thèse de Doctorat.

SIVARAMANAN, S. (2015). Global Warming and Climate change causes, impacts and mitigation. DOI:10.13140/RG.2.1.4889.7128. .

SOLOMON S., Q. E. (2007). IPCC Reports.<https://ethree.com/downloads/Climate%20Change%20Readings/Climate%20Science/IPCC%20Reports/AR4WG1_FrontMatter-v2.pdf>.

STOKER, T. (2011). Introduction to Climate Modelling. Advances in Geophysical and Environmental Mechanics and Mathematics, ed: 1, Springer, 182 pp. Doi: 10.1007/978-3642-00773-6. .

W

WHITE, P. (2013). Strengthening adaptive capacities to the impacts of climate change in resource poor. Small-scale aquaculture and aquatic resources-dependent sector in the south and south east Asian region-aqua climate. A Review of Climate Change Model Predictions.

Y

YAHIAOUI, D. (2015). Impact des variations climatiques sur l'agriculture en Oranie. Mémoire de magister, Université d'Oran 1, 161p. .

Résumé

Depuis le milieu du 19^{ème} siècle, un certain réchauffement planétaire a été constaté. Ce réchauffement exceptionnel est en relation directe avec les émissions de gaz à effet de serre et qui peut produire un impact significatif sur le déficit hydrique, c'est que nous avons montré à travers ce travail.

Nous avons donné premièrement un aperçu sur le changement climatique. Ensuite on a présenté notre zone d'étude, le bassin versant Isser. Puis une projection des précipitations futur au l'horizon de 2100 par un model régional CORDEX. Ainsi, La modélisation pluie-Débit a été faite par l'application du modèle RNA sur le bassin versant étudié. les résultats obtenus-(apprentissage, validation et test) sont très bons. A la fin, le calcul de SPI qui nous montre que le bassin Isser était affecté par une sécheresse sévère pour l'année 2027, tandis que l'année 2068 est l'année la plus humide.

Mots clés : changement climatique, bassin versant ISSER, Modélisation, pluie-Débit, Modèle, CORDEX, RNA

Abstract

Since the middle of the 19th century, some global warming has been observed. This exceptional warming is directly related to greenhouse gas emissions and which can produce a significant impact on the water deficit, as we have shown through this work.

In the first we gave an overview of climate change. Then we presented our study area, the Isser watershed. Then a projection of future precipitation to the horizon of 2100 by a CORDEX regional model. Thus, the rainfall-flow modeling was done by applying the ANN model to the studied watershed. The results obtained (learning, validation and testing) are very good. At the end, the calculation of SPI which shows us that the Isser basin was affected by a severe drought for the year 2027, while the year 2068 is the wettest year.

Keywords: climate change, ISSER watershed, modeling, rainfall-flow, model, CORDEX, RNA

ملخص

منذ منتصف القرن التاسع عشر ، لوحظ بعض الاحترار العالمي. يرتبط هذا الاحترار الاستثنائي ارتباطاً مباشراً بانبعثات غازات الاحتباس الحراري والتي يمكن أن تحدث تأثيراً كبيراً على عجز المياه ، كما أوضحنا من خلال هذا العمل.

في الأول قدمنا لمحة عامة عن تغير المناخ. ثم قدمنا منطقة دراستنا ، مستجمعات المياه في إيسر. ثم إسقاط لهطول الأمطار في المستقبل حتى أفق 2100 بواسطة نموذج CORDEX الإقليمي. وهكذا ، تم عمل نمذجة تدفق الأمطار من خلال تطبيق نموذج ANN على مستجمعات المياه المدروسة. النتائج التي تم الحصول عليها (التعلم والتحقق من الصحة والاختبار) جيدة جداً. وفي النهاية ، فإن حساب المؤشر المعياري للهطول يوضح لنا أن حوض إيسر تأثر بجفاف شديد عام 2027 ، في حين أن عام 2068 هو العام الأكثر رطوبة.

الكلمات المفتاحية: تغير المناخ ، مستجمعات المياه ISSER ، النمذجة ، تدفق الأمطار ، النموذج ، CORDEX ، RNA