

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Oran 2 Mohamed Ben Ahmed



Faculté des sciences de La Terre Et L'univers
Département De Géographie Et l'aménagement Du Territoire

Mémoire pour l'obtention du diplôme de
Master 2 en Hydrologie - climatologie et territoire

Thème

**Etude de la vulnérabilité des ressources en eau
aux changements climatiques : cas de sous bassin
D'oued SIKKAK (Tafna).**

Réalisé par : MESSADI NABILA.

Jury :

Mr. Bellal Sid Ahmed	Professeur	Président
Mr. Hassani Moulay	Professeur	Examineur
Mr. Ghodbani Tarik	Professeur	Rapporteur

Année universitaire : 2018-2019

RESUME

Le changement climatique constitue l'un des plus grands défis actuels auxquels l'humanité est aujourd'hui confrontée. En effet, selon le 5e rapport de l'IPCC (Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat), le réchauffement du système climatique est sans équivoque (IPCC, 2013). Les économies des pays en voie de développement sont présentées comme les plus vulnérables aux chocs climatiques qui s'annoncent (IPCC, 2013).

Les ressources hydriques sont vulnérables aux variations du climat. L'eau et sa gestion sont des problèmes déjà présents conditionnant l'avenir de cette région, indépendamment de tout changement climatique. La forte sensibilité des bassins hydrologiques à de faibles écarts des variables climatiques implique que le volume d'eau mobilisable sera fortement touché par la diminution du ruissellement (Agoumi et al, 1999; PNUD-FEM, 1998). Au regard des estimations des besoins sectoriels, le changement climatique pourrait ainsi placer ces pays dans des situations inconfortables puisque le volume maximal mobilisable serait à la limite des besoins, voire déficitaire.

L'objectif de cette étude est dédiée à la réalisation des simulations des régimes hydrologiques de surface du bassin versant d'Oued sikkak (Tlemcen, Nord-Ouest Algérien), on utilisant le model Génie Rurale GR4J, model hydrologique global pluie-débit, pour la période de référence. On prépare des scénarii du climat futur (horizon 2021-2040), en amont des modèles hydrologiques. Ces scénarii sont générés en utilisant une descente d'échelle statistique avec le logiciel LARS WG, sous la forme de chroniques sur 30 ans avec un pas de temps journalier, et enfin de simuler les régimes hydrologiques dans le contexte des scénarii du climat futur (horizon 2021-2040).

Mots clés : changement climatique, Oued sikkak, modèles hydrologiques, LARS WG.

REMERCIEMENTS

Je saisis l'occasion à travers ce modeste travail pour présenter mes remerciements ;

D'abord à Dieu le tout puissant qui m'a donné le courage, la santé, la volonté et la patience pour accomplir ce travail qui a été pour moi l'occasion de découvrir le monde de la recherche. En suite à mon encadreur MR : Ghodbani.T qui a été présent par ses conseils et son savoir.

Je tiens également à remercier monsieur MR : Lotfi ben Adda, Docteur en hydraulique à l'université de Tlemcen, pour l'aide précieuse qu'il m'a apporté pendant mes études et la préparation de ce mémoire.

Je n'oublie pas l'Agence National des **R**essources **H**ydriques (ANRH) de la willaya d'Oran, en particulier Monsieur Boudaleya, pour m'avoir fourni les données nécessaires pour cette étude.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements et ma gratitude à mon cher mari pour son Dévouement, son soutien et sa patience tout au long de ce travail.

Enfin j'adresse mes meilleurs et chaleureux remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail

A mes parents, ma mère et mon père que Dieu me les garde.

A mon mari, mes adorables enfants « Malak et Moncef ».

A mes sœurs et leurs maris.

A mes frères.

A ma belle-famille.

A tous mes amis(es) et mes connaissances.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : LA VULNERABILITE DES RESSOURCES EN EAU AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES	4
INTRODUCTION :	5
2. TYPES DE RESSOURCES EN EAU :	6
2. 1. <i>Précipitation ou l'eau de pluie</i> :	7
2. 2. <i>Eaux non conventionnelles</i> :	7
3. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE : FACTEUR AGGRAVANT	8
3. 1. <i>Les changements affectant les eaux de barrages</i> :	9
3. 2. <i>Les changements affectant les nappes phréatiques</i> :	9
3. 3. <i>Incidence du changement climatique sur l'irrigation</i> :	10
3. 4. <i>Incidence du changement climatique sur l'assainissement</i> :	10
4. VARIABILITE ET ORIGINE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES :	10
4. 1. <i>Climat</i> :	11
4. 2. <i>Origine des changements climatiques</i> :	12
5. LES RISQUES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE :	12
5. 1. <i>Les risques directs</i> :	12
5. 2. <i>Les risques indirects</i> :	13
6. VULNERABILITE DES RESSOURCES EN EAU :	13
6. 1. <i>Définition générale de la vulnérabilité</i> :	13
6. 2. <i>Facteurs de vulnérabilité des ressources en eau</i> :	14
6. 3. <i>La vulnérabilité dans le domaine de l'hydrogéologie</i> :	16
6. 4. <i>Indices de vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques</i> :	17
7. GESTION DES RESSOURCES EN EAU :	20
7. 1. <i>L'importance de la législation dans la gestion des ressources en eau</i> :	21
7. 2. <i>La gestion de la demande en eau</i> :	21
7. 3. <i>Gestion intégrée des ressources en eau</i> :	22
7. 4. <i>Objectifs de la gestion intégrée des ressources en eau</i> :	24
7. 5. <i>Gestion intégrée de l'eau par bassin versant</i> :	24
8. STRATEGIE DE LUTTE ET OPTIONS PROPOSEES EN MATIERE D'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES :	25
8. 1. <i>Une politique et des actions d'adaptation</i> :	26
8. 2. <i>Actions et Stratégies d'adaptation à mettre en place</i> :	27
CHAPITRE II : PRESENTATION DU MODELE PLUIE-DEBIT(GR).....	28
INTRODUCTION :	29
1. MODELE GR :	29
1.1. <i>Historique</i> :	29
1.2. <i>Présentation du modèle GR</i> :	30

1.3. Objectifs de développement :	30
1.4. Mode de développement :	30
1.5. Principales caractéristiques :	31
2.1. Description du modèle pluie-débit annuel GR1A :	32
2.2. Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M :	33
2.3. Description du modèle pluie-débit journalier GR4J :	39
3. LE CALCUL DES SIMULATIONS DES DEBITS :	42
3.1. Introduction :	42
3.2. Le calage du modèle :	42
4. PRESENTATION DU LOGICIEL R :	46
4. 1. Package :	47
4.2. Package 'airGR' :	47
CHAPITRE III : ETUDE HYDRO CLIMATIQUE DU SOUS BASSIN VERSANT D'OUED SIKKAK	49
1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE :	50
1. 1. Situation géographique du bassin versant de la Tafna :	50
1.2. Situation géographique du bassin versant d'oued Sikkak :	52
1.3. Caractéristique de la forme du bassin versant :	53
1.4. Morphologie des altitudes et pentes :	54
1.5. Réseaux hydrographique :	56
1.6. La géologie du bassin versant d'oued Sikkak :	56
1.7. Les ressources en eau dans le bassin versant d'oued Sikkak :	59
3. HYDRO CLIMATOLOGIE DU BASSIN VERSANT D'OUED SIKKAK :	62
3.1. Etude des précipitations :	62
3.2. Les Températures :	69
3.3. Relation précipitations-Température (Détermination du type de climat) :	70
3.4 Etude des débits :	72
CHAPITRE IV : APPLICATION DU MODELE METHODES ET DISCUSSIONS	76
APPLICATION DU MODELE METHODES ET DISCUSSIONS	77
1. SERIES DE DONNEES APPLIQUEES DANS CETTE ETUDE :	77
2. METHODOLOGIE D'ANALYSES D'IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE :	77
2.1. Utilisation des scénarios du changement climatique	77
2.2. Génération stochastique des scénarios climatiques :	78
2.2.1. Généralité sur LARS-WG :	78
2.3. Méthode d'application des données de GCM dans l'étude d'impact :	78
3.3. Résultats des simulations pour l'horizon 2021-2040 :	85
CONCLUSION	91

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Liste Des Tableaux

Liste des figures

Liste Abréviations

Annexes

Introduction générale

Liste Abréviations

IPCC .Groupe Intergouvernemental d' Experts sur l'évolution du Climat.

A.N.R.H. Agence nationale des ressources hydrauliques (les données climatiques : précipitation, débit mensuel, température) dans le bassin de la Tafna.

ABHOCC : Agence du Bassin Hydrographique Oranie Chott-Chergui. (Les cartes du bassin de la Tafna)

D.R.E : Direction des Ressources en Eau.

GEF/PNUD, Vulnérabilité du Secteur de l'eau Aux Changements Climatiques En Algérie

ANBT : l'agence nationale des barrages et des transferts.

Introduction générale

Les changements climatiques ont depuis longtemps cessé d'être une curiosité scientifique. Ils constituent la question environnementale majeure qui domine notre époque et le défi majeur auquel doivent répondre les organismes de contrôle environnementaux. L'eau, l'une des matières premières les plus importantes en Algérie. Du fait de son importance, il est indispensable de connaître sa vulnérabilité aux changements climatiques. En Algérie, la vulnérabilité aux changements climatiques s'exprime à travers plusieurs aspects : explosion démographique, diminution probable des écoulements des eaux, la rareté des ressources, la dégradation des infrastructures hydrauliques, les menaces aux zones humides...etc. Face à cette situation, l'Algérie a pris des mesures quantitatives et qualitatives adaptatives dans le cadre d'une gestion durable de cette précieuse ressource pour l'avenir.

Le changement climatique constitue l'un des plus grands défis actuels auxquels l'humanité est aujourd'hui confrontée. En effet, selon le 5e rapport de l'IPCC (Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat), le réchauffement du système climatique est sans équivoque (IPCC, 2013). Les économies pays en voie de développement sont présentées comme les plus vulnérables aux chocs climatiques qui s'annoncent (IPCC, 2013). L'agriculture occupe une place importante dans ces économies.

Les ressources hydriques sont vulnérables aux variations du climat. L'eau et sa gestion sont des problèmes déjà présents conditionnant l'avenir de cette région, indépendamment de tout changement climatique. La forte sensibilité des bassins hydrologiques à de faibles écarts des variables climatiques implique que le volume d'eau mobilisable sera fortement touché par la diminution du ruissellement (Agoumi et al, 1999; PNUD-FEM, 1998). Au regard des estimations des besoins sectoriels, le changement climatique pourrait ainsi placer ces pays dans des situations inconfortables puisque le volume maximal mobilisable serait à la limite des besoins, voire déficitaire.

En Algérie, il est admis que des mesures sont nécessaires pour améliorer la capacité à s'adapter à la variabilité hydrologique et aux phénomènes extrêmes (inondations et sécheresses) observés aujourd'hui dans des circonstances dynamiques (notamment les pressions actuelles dues à la démographie, à l'économie, à l'utilisation des terres et au développement régional), de même que pour réduire les vulnérabilités significatives de la société, de l'économie et de l'environnement aux impacts futurs.

Les bassins versants, intègrent les hétérogénéités de nombreux paramètres, notamment hydrologiques, sédimentaires et climatiques. De plus, ils sont affectés par les activités anthropiques. Ils peuvent donc être considérés comme des indicateurs représentant à la fois les variations du climat et les activités humaines, dans un contexte de changement global. De nombreuses études concernant le fonctionnement global du système Terre ont utilisé les transferts d'eau des grands bassins versants comme «archives» des changements climatiques et environnementaux à une échelle globale.

Dans cette étude, nous nous intéressons à la partie nord occidentale du territoire algérien, et plus particulièrement le bassin de la Tafna (7300 km²). La région de la Tafna (l'Ouest de l'Algérie) est classée dans le climat semi-aride, orienté face au nord, subit l'influence des perturbations complexe du régime du bassin méditerranée. Les précipitations y sont irrégulières ; la pluie moyenne annuelle est de 350mm, la période pluvieuse s'étend de septembre a mai, toute fois il arrive souvent qu'on observe des séquences sans pluies dépassants le mois même en pleine saison d'hivers. La pluie ne tombe pas d'une façon continue, mais peut même se manifester en périodes sèches. D'autre part cette région est soumise à des précipitations intenses qui peuvent engendrer des crues et des inondations catastrophiques.

Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est réalisé des simulations des régimes hydrologiques de surface du bassin versant algérien et la description des potentiels effets du changement climatique sur les régimes hydrologiques de ce dernier.

Notre travail est dédiée à la réalisation des simulations des régimes hydrologiques de surface du bassin versant d'Oued Sikkak (Tlemcen, Nord-Ouest algérien), on utilisant le model Génie Rurale GR4J, model hydrologique global pluie-débit, pour la période de référence.

On prépare des scénarii du climat futur (horizon 2021-2040), en amont des modèles hydrologiques. Ces scénarii sont générés en utilisant une descente d'échelle statistique avec le logiciel LARS WG, sous la forme de chroniques sur 30 ans avec un pas de temps journalier, et enfin de simuler les régimes hydrologiques dans le contexte des scénarii du climat futur (horizon 2021-2040).

Un scénario du GIEC de changement climatique a ainsi été retenu. Le RCP 4.5, qualifié de « modéré », a été construit avec pour hypothèse une évolution maximale des températures de +2,4°C. À titre de comparaison, l'objectif ambitieux fixé par la COP21 est de contenir l'élévation de la température moyenne de la planète en dessous de +2°C d'ici 2100.

Pour atteindre cet objectif le mémoire sera organisé en trois chapitres essentiels :

Le premier chapitre : est consacré aux généralités sur la vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques et la gestion des ressources en eau et en particulier celle de gestion intégrée par bassin versant.

Le deuxième chapitre : fera l'objet de Présentation de modèle pluie-débit GR.

Le troisième chapitre : inclus une présentation de la zone d'étude donnant sa situation géographique et ses potentialités en ressources d'eau d'une part et l'étude hydrologie du bassin versant de la Tafna d'autre part.

Le quatrième chapitre : est dédié à l'impact du climat futur, pour les horizons 2021 et 2040, sur les ressources en eau dans ce bassin, nous nous sommes basés sur l'analyse des débits moyens de la période de référence (1980-2010) et de les comparer à ceux qui pourraient résulter de changements des principales contraintes directes (Température et pluies). La méthodologie utilisée repose sur le modèle GR4J avec développement de scénarios prospectifs de changements Climatiques aux horizons 2021 et 2040.

Chapitre I : La vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques

Introduction :

A ce jour, les négociations menées dans le cadre de la convention cadre des nations unies sur les changements climatiques ont beaucoup été axées sur l'aspect atténuation des émissions en Gaz à Effet de Serre et ce en vue de limiter les problèmes à l'origine de ce phénomène planétaire. [1]

Un autre aspect tout aussi important a connu peu de développement lors de ces négociations : la vulnérabilité de certaines régions du monde et leurs besoins d'adaptation aux effets de ces changements climatiques. Il est vrai que des fonds de financement de ces aspects ont été créés mais leur mise en œuvre reste lointaine et on voit peu de résultats concrets sur cette problématique. [1]

Au Maghreb trois pays (Algérie, Maroc, Tunisie) ont agi dans le domaine des changements climatiques de façon concertée et en forte synergie depuis 1994 avec l'appui d'un projet **PNUD- FEM**. Ces pays, peu émetteurs de gaz à Effet de Serre, se trouvent particulièrement vulnérables à ces changements climatiques. [2]

L'eau, l'une des matières premières les plus importantes en Algérie, dont l'importance pour la consommation humaine, l'agriculture, l'industrie, le transport, les loisirs et les écosystèmes n'est plus à démontrer. Du fait de son importance, il est indispensable de connaître sa vulnérabilité aux Changements Climatiques. [1]

Néanmoins, les variations climatiques ne sont pas les seuls facteurs définissant la vulnérabilité de ce secteur aux changements climatiques, les facteurs économiques, démographiques et environnementaux sont aussi des critères à considérer.

La réaction des consommateurs d'eau ainsi que les mécanismes de gestion de cette ressource déterminent dans un large mesure la vulnérabilité en Algérie de ces ressources. [3]

L'étude de la vulnérabilité est réalisée dans le bassin versant du Tafna au centre ouest du pays sélectionné en raison d'une large disponibilité d'études et de données. Cette région à vocation agricole et d'élevage. Connait un faible développement industriel, un stress hydrique et une importante érosion. Elle contient plusieurs barrages et localisées dans les huit sous bassins versants.

L'évaluation de la vulnérabilité du bassin versant du Tafna dans la wilaya du Tlemcen concerne le secteur des ressources hydrique. [3]

Les indicateurs utilisés sont ceux du climat : les températures selon la saison et les précipitations. Les mesures d'adaptation des ressources en eau liées aux changements climatiques visent à limiter les pertes d'eau par ruissellement, à mieux aménager le bassin versant pour maximiser la mobilisation des eaux et à gérer de façon dynamique et adapter les ressources en eau. [3]

L'eau est un élément indispensable pour la vie et pour le développement socio-économique réel et durable d'un pays. Il est donc nécessaire d'avoir une meilleure connaissance sur les ressources en eau existantes dans le bassin versant surtout les informations concernant :

- les types de ressources en eau locales et leur potentialité ;
- la vulnérabilité des ressources à un éventuel facteur ;
- les mesures requises pour développer, gérer et protéger les ressources. [4]

2. Types de ressources en eau :

Dans la nature, on peut signaler d'une part les petites ressources en eau comme l'humidité de l'air et l'humidité du sol que certains animaux et plantes en profitent.

Et d'autre part les grandes ressources d'eau dont :

- l'eau des pluies (précipitations)
- l'eau de surface (eau des fleuves et rivières, des lacs et des marais, des étangs et des petites dépressions fermées)
- les eaux souterraines (dans les différents magasins aquifères)
- l'eau de mer. [4]

2. 1. Précipitation ou l'eau de pluie :

Les précipitations sont toutes l'eau météorique qui tombe sur la surface de la terre tant sous forme liquide que sous forme solide. C'est une source primaire d'eau douce. Par des précipitations efficaces, l'eau de pluie alimente à la fois les nappes souterraines par l'infiltration

(**I**) et l'eau de surface par le ruissellement (**R**).

Dans certaines régions, la pluie est captée directement pour l'approvisionnement en eau de certains villages par l'impluvium.

La pluie tombée peut être mesurée ou quantifiée à l'aide d'un pluviomètre ou d'un pluviographe à une station d'observations.

Les précipitations exprimées en lame d'eau ou en hauteur de pluie en millimètre indiquent la pluie globale précipitée dans un intervalle de temps (journalière, mensuelle, annuelle) de la région et par unité de surface. [4]

a)- Eaux de surfaces

L'eau de surfaces inclue : les eaux des ruisseaux, des rivières et fleuves, des lacs et marais. Elle provienne de l'eau de pluie tombée sur le bassin versant récepteur et (ou) de vidange des nappes souterraines au niveau des sources et suintements. [4]

b)- Eaux souterraines

Les eaux souterraines sont constituées par toutes les eaux contenues dans le sol et sous-sol. On peut distinguer : les eaux adsorbées, pelliculaires et de rétention, non mobilisables par gravitaire ; les eaux gravifiques ou gravitaires. [4]

2. 2. Eaux non conventionnelles :

➤ Dessalement de l'eau de mer

En premier lieu, le dessalement de l'eau de mer concerne, les grosses unités industrielles qui sont généralement localisées en bord de mer. L'option de dessalement de l'eau de mer est à envisager pour mobiliser de nouvelles ressources en eau afin d'améliorer l'approvisionnement des villes.

Ce qui permettra d'envisager une redistribution des eaux des barrages vers l'intérieur du pays et vers les hauts plateaux. Ce sera un appoint important pour l'approvisionnement en eau des zones agricoles de l'intérieur du pays. [4]

La cogénération est une technologie qui convient parfaitement à l'association de la production d'énergie avec le dessalement de l'eau de mer, étant donné que les nouvelles centrales seront implantées, en grande partie, sur le littoral. Ce couplage, par son rendement élevé, peut constituer une solution puisqu'elle concilie deux objectifs du développement durable :

- la maîtrise de l'énergie,
- l'augmentation des ressources en eau potable. [4]

➤ **Eaux usées urbaines traitées**

La récupération des eaux usées va permettre d'économiser, Cette option va dans le sens de la nécessité de traiter les eaux usées avant leur rejet et de la réduction de la pollution et des maladies à transmission hydrique. [4]

3. Le Changement climatique : facteur aggravant

Les données climatiques relevées dans la région du Maghreb durant le 20ème siècle indiquent un réchauffement durant ce siècle estimé à plus de 1°C avec une tendance accentuée les trente dernières années, Les modèles de circulation générale convergente pour estimer un réchauffement probable de la région de l'ordre de 2° à 4° durant le 21ème siècle.

Par son appartenance géographique à la zone aride et semi-aride, l'Algérie est soumise à des conditions physiques et hydro climatiques défavorables, accentuées par des périodes de sécheresses chroniques. L'Algérie présente une grande sensibilité au climat, notamment dans les hauts plateaux et la steppe qui couvrent environ 60% des terres viables du Nord.

Une modification du climat est donc inéluctable et il en résultera des impacts significatifs, liés entre autres à l'augmentation des températures et des précipitations, à la raréfaction des ressources en eau et à la hausse de la fréquence des tempêtes.

D'autres impacts sont étudiés : la perte de biodiversité et la dégradation d'écosystèmes, la hausse du risque de famines, les mouvements de populations, ainsi que les incidences sur la santé. [15]

3. 1. Les changements affectant les eaux de barrages :

Les changements affectant la retenue des eaux de surface sont dus à l'envasement et à la diminution du ruissellement.

❖ **L'envasement** : La nature et la morphologie des terrains en pente, la fragilité du couvert végétal, le manque de boisement et l'urbanisation en amont des barrages engendrent une forte érosion qui réduit la capacité de stockage des barrages de 2 à 3% chaque année, à cause de l'envasement dû au transport et au dépôt de sédiments par les eaux de pluie. Actuellement, 14 barrages sur la soixantaine existante sont envasés ;

❖ **La diminution du ruissellement** : La contribution du ruissellement aux eaux de surface a systématiquement diminué. Les flux trop faibles ne permettent pas de remplir suffisamment les barrages existants.

3. 2. Les changements affectant les nappes phréatiques :

La diminution des pluies due aux sécheresses qui sévissent depuis le début des années 70 a entraîné une baisse constante des réserves d'eau souterraine des principales nappes aquifères du nord du pays. Dans beaucoup de plaines du pays, le niveau des nappes phréatiques a déjà chuté dans des proportions alarmantes (> 20 m.).

L'aggravation des sécheresses conjuguée à la surexploitation des nappes phréatiques a entraîné la minéralisation des zones non saturées des nappes aquifères profondes, dans les régions semi-arides. [15]

3.3. Incidence du changement climatique sur l'irrigation :

Les récentes fluctuations climatiques et les sécheresses, plus fréquentes au cours des trois dernières décennies, ont accentué le phénomène de dégradation des sols, engendrant ainsi la désertification des zones vulnérables comme les steppes et les hautes plaines. La tendance actuelle à des inondations plus intenses pourrait entraîner une érosion et une dégradation des sols plus importantes. Ces terres constituent de véritables potentiels agricoles et doivent assurer la sécurité alimentaire du pays ainsi que la protection de la frange côtière. [15]

3. 4. Incidence du changement climatique sur l'assainissement :

Le changement climatique a des répercussions sur la santé publique, qui est la raison d'être des efforts réalisés en matière d'assainissement.

La facture des épidémies de MTH (maladie à transmission hydrique) est lourde pour l'Etat algérien. Le coût de ces épidémies a été évalué à l'équivalent du budget de construction de plus d'une dizaine de stations de traitement des eaux. Le principal facteur de ces maladies réside dans l'insuffisance des ressources hydriques conjuguée à l'absence de traitement de certains points d'eau. Les spécialistes en matière d'assainissement essaient de mieux comprendre les liens entre changement climatique et assainissement, incluant les questions de santé et d'hygiène.

4. Variabilité et origine de changements climatiques :

L'Eau, l'une des matières premières les plus importantes en Algérie, dont l'importance pour la consommation humaine, la production agroalimentaire, l'industrie, le transport, les loisirs et les écosystèmes n'est plus à démontrer. Du fait de son importance, il est indispensable de connaître sa vulnérabilité aux Changements Climatiques, en Algérie.

Néanmoins, les variations climatiques ne sont pas les seuls facteurs définissant la vulnérabilité de ce secteur aux changements climatiques, les facteurs économiques, démographiques et environnementaux sont aussi des critères à considérer. La réaction des consommateurs d'eau ainsi que les mécanismes de gestion de cette ressource déterminent dans un large mesure la vulnérabilité en Algérie de ces ressources. La volonté de la société de prendre des mesures d'adaptation appropriées ont également une importance critique. [15]

4. 1. Climat :

Etymologiquement, le terme climat vient du mot grec « *Klima* » qui fait référence à l'inclinaison des rayons solaires par rapport à la surface de la Terre. Cette définition souligne le rôle moteur que joue la radiation solaire qui plonge la Terre dans un flux de chaleur et de lumière.

Pour les climatologues, le climat est l'ensemble des phénomènes météorologiques qui se produisent sur un lieu dans leur succession habituelle.

La détermination d'un climat repose sur une analyse du temps qu'il a fait chaque jour durant une longue période, en général trente années consécutives. Elle s'appuie sur les valeurs fournies par la météorologie pour caractériser les états de l'atmosphère : la température de l'air, la lame d'eau précipitée, la durée de l'insolation, la direction du vent. Malgré le caractère fugace du temps, des situations semblables se répètent et peuvent être groupées en famille.

La durée et la fréquence annuelle des types de temps, leur rythme saisonnier permettent de décrire plusieurs types de climats : tropical, tempéré, aride ou semi-aride. [4]

4. 2. Origine des changements climatiques :

Les principales causes des changements sont tous les facteurs pouvant provoquer l'augmentation de la concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Cette augmentation de la concentration engendre la destruction de la couche d'ozone qui entraîne des modifications de l'intensité du rayonnement solaire atteignant la surface terrestre d'où le réchauffement de la Terre.

Ce phénomène de réchauffement lié au problème de couches d'ozone dû à l'énorme production mondiale de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄) de la terre influe sur les différents facteurs climatiques (température, vent,...) et sur les différents termes du bilan hydrique [Evapotranspiration (ETP/ETR), Précipitation (P), Ruissellement (R), Infiltration (I)].

On peut citer à titre d'exemples :

- ❖ les variations de la teneur en aérosols ;
- ❖ la pollution de l'air due à la circulation automobile, les industries, les feux de brousse, les bois de chauffe, les déchets,...
- ❖ les changements de la réflectivité de la surface de la Terre. [3]

5. Les risques du changement climatique :

5. 1. Les risques directs :

- La modification de la configuration des pluies - la même quantité ou une augmentation totale de la pluviométrie par an, mais les précipitations se concentrent sur des périodes plus courtes, des périodes de pluies intenses, avec également de plus longues périodes de sécheresse entre les deux. Les impacts comprennent plus de risques d'inondations et de glissements de terrain et la réduction de la disponibilité en eau au cours de l'année.

- Augmentation des températures de la surface de l'air et de la surface de la mer.

- Il semblerait que la zone des cyclones (les Seychelles ne sont actuellement pas concernées) se déplace plus au nord, ce qui pourrait entraîner une augmentation des tempêtes tropicales, accompagnées de vents, et ondes de tempête.

- Hausse graduelle du niveau de la mer et détérioration des zones côtières accueillant la majeure partie des infrastructures du pays.
- Un changement des saisons est noté par le grand public.
- L'acidification des océans qui est une conséquence directe de l'absorption du dioxyde de carbone par les océans et l'augmentation de la concentration en ions hydrogène. [3]

5. 2. Les risques indirects :

Les risques indirects associés sont les incendies, les maladies et les espèces envahissantes.

Les variations du vent de mousson ;

- Les variations de la position et l'intensité de l'anticyclone du Sud de l'océan Indien tropical ;
- Les migrations saisonnières et les changements de l'intensité du creux des complexes inter-tropicaux
- Les courants océaniques et des modèles de température de surface dans la zone équatoriale de l'océan. [3]

6. Vulnérabilité des ressources en eau :

6. 1. Définition générale de la vulnérabilité :

Le mot **vulnérabilité** vient du latin vulnerabilis, issu de vulnerare, qui signifie blesser et de vulnus, signifie blessure. La vulnérabilité est le caractère de ce qui est vulnérable, c'est-à-dire de ce qui est sensible, fragile, défectueux, et à la merci de la moindre atteinte, blessure, attaque.

Mais elle exprime aussi la capacité d'une personne ou d'un bien de la présence d'un danger donné. [5]

La vulnérabilité est passée progressivement d'un langage courant à un langage plus scientifique, mais comporte aujourd'hui tellement d'usages que la notion devient parfois confuse.

L'approche analytique de la vulnérabilité vise à identifier les **enjeux**, soit les éléments vulnérables, et à évaluer les **pertes** de ces éléments après un ou plusieurs événements catastrophiques. Les enjeux sont les personnes, les biens, milieu naturel susceptible de connaître des dommages, etc.

Cette approche classique consiste à établir une évaluation pour chaque enjeu soumis à un aléa. [5]

6. 2. Facteurs de vulnérabilité des ressources en eau :

La vulnérabilité n'est pas la somme des dommages. Elle est appréhendée à partir d'un ensemble de facteurs qui interagissent sur la capacité de réponse d'un individu, un groupe ou un milieu.

Le système de vulnérabilités se compose de facteurs de vulnérabilité et d'éléments vulnérables les facteurs de vulnérabilité intègrent l'analyse des facteurs directs et indirects intervenants dans la vulnérabilité. L'interaction spatio-temporelle des éléments vulnérables, qui s'exprime à l'occasion d'un ou plusieurs événements plus au moins visible « aléa », donne la possibilité de subir des dommages et des pertes « vulnérabilité » (figure I-1).

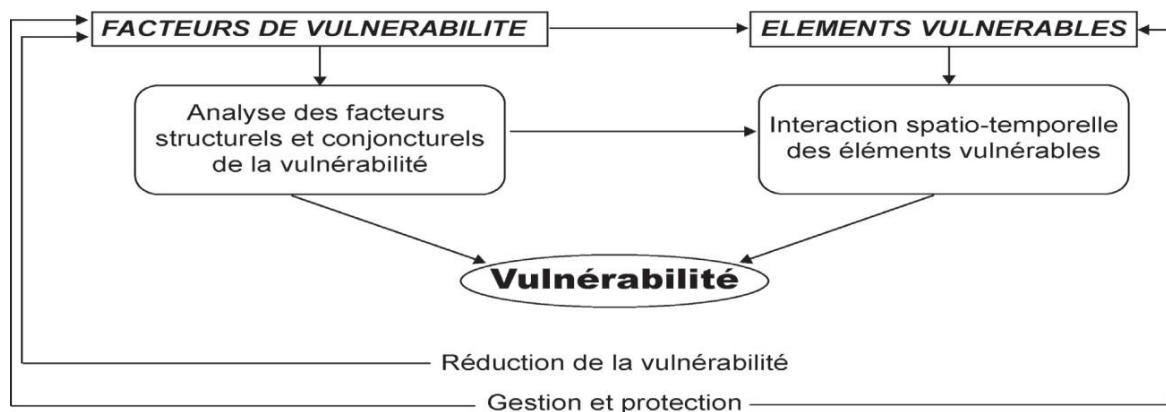


Figure I-1 : Approche systémique de la vulnérabilité. [5]

Les principaux objectifs de la réduction de la vulnérabilité sont de modifier les facteurs qui amplifient la vulnérabilité et de rendre les éléments vulnérables durables. Ceci est assuré par la mise en place d'une gestion et une protection durable à la fois des facteurs de vulnérabilité et des éléments vulnérables.

Dans cette approche, l'expression de la vulnérabilité traduit la fragilité d'un système dans son ensemble face aux risques. [5]

Donc pour mieux appréhender la vulnérabilité, le travail méthodologique nécessite l'analyser les nombreux paramètres des systèmes complexes pour discerner les différents facteurs intervenants dans la vulnérabilité. Cette analyse permet **la mise en scène de la vulnérabilité**.

L'étude de la vulnérabilité est d'abord liée aux structures internes du système et à leurs degrés d'importance. Elle est également liée aux influences externes. D'autres causes influencent le degré de vulnérabilité, moins visible mais bien pointées et apparaissent liées aux politiques mises en œuvre dans la gestion d'un espace, territoire et ressources naturelles. C'est autour de ces aspects que se concentre la réflexion touchant aux questions de la vulnérabilité des eaux.

La vulnérabilité résulte donc de plusieurs facteurs :

- ✚ La croissance démographique provoque une augmentation de besoin en eau potable donc de l'exploitation des ressources existantes.
- ✚ Les facteurs anthropiques en particulier les pollutions dues à l'urbanisation, l'industrialisation, l'agriculture,....
- ✚ Les facteurs physico - chimique du sol et sous-sol dont la nature lithologique (porosité et perméabilité, la structure et texture de l'aquifère) pour les eaux souterraines.
- ✚ Les facteurs climatiques surtout la variabilité et le changement du climat avec une faible ou forte pluviosité (cyclone, inondation, sécheresse) ou une forte évapotranspiration. [4]

6. 3. La vulnérabilité dans le domaine de l'hydrogéologie :

La vulnérabilité est un terme introduit en hydrogéologie par MARGAT dans les années 60. Il est défini et utilisé de manière très diverse.

Certains auteurs l'ont défini comme une propriété intrinsèque des aquifères ; d'autres estiment que la vulnérabilité est liée aux propriétés spécifiques du contaminant. Cependant, d'autres auteurs l'associent aux activités humaines et à la qualité agro-pédologique des terrains de surface. [5]

Pour les hydrogéologues, la vulnérabilité des eaux est liée à la notion de contamination. Il y a contamination lorsqu'une activité humaine ou un phénomène naturel induisent une perturbation de la composition naturelle des eaux souterraines qui limite ainsi leur usage où provoquent des risques pour la santé. La vulnérabilité permet alors d'évaluer la faiblesse des protections naturelles de la ressource en eau.

Dans la littérature, on différencie deux types de vulnérabilité :

- ❖ la vulnérabilité **intrinsèque** est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution.

- ❖ la vulnérabilité **spécifique** est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un groupe de polluants. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque. [5]

La notion de la vulnérabilité repose donc sur l'idée que les conditions naturelles et anthropiques, posées dès impluvium, procurent un degré variable de protection vis-à-vis de l'infiltration des eaux de surface et la recharge des aquifères karstiques.

La vulnérabilité des eaux karstiques, est donc la tendance à favoriser la dégradation qualitative et quantitative des eaux. Elle résulte de la conséquence de multiples facteurs d'ordre géologique géomorphologique, climatique, bio-pédologique et anthropique. On peut parler ici des « **facteurs déclenchant** ». [5]

6. 4. Indices de vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques :

Les changements climatiques portent atteinte sur les caractéristiques physico-chimiques (quantité et qualité) des ressources en eau que ce soit eau de surface ou eaux souterraines.

Quelques indices de vulnérabilité des ressources en eau sont observés actuellement.

6. 4. 1. Dégradation de la quantité des ressources en eau :

I. Faible ou forte pluviosité

La perturbation du régime pluviométrique (variation de la pluviométrie moyenne, nombre de jours de pluie, ...) se manifeste dans l'espace et dans le temps. Il y a repartitions inégales et (ou) diminutions de la pluviométrie mensuelle ou annuelle. Ce qui provoque des impacts sur le régime hydrologique aussi bien de surface que souterrain. [4]

II. Forte évaporation

Une augmentation de température à cause du réchauffement de l'atmosphère engendrera une variation de la valeur des différents termes du bilan hydrique : nouvelle répartition temporelle et spatiale des précipitations et des écoulements, faible infiltration, intensification de l'évapotranspiration qui conduira à un assèchement ou tarissement des points d'eau naturels (lacs, marais, rivière, ruisseau, source). [4]

III. Tarissement des rivières, ruisseaux et sources

La variation des précipitations et de température pourrait faire baisser les niveaux d'eau dans le bassin et rivières. La saison de pluie devient de plus en plus irrégulière et de moins en moins pluvieuse qui pourrait entraîner le tarissement des points d'eau.

Ce changement peut influencer sur la variation du niveau marin qui, par le déplacement de l'interface eau douce et eau salée, diminue la disponibilité en eau de qualité le long du littoral. [4]

6. 4. 2. Dégradation de la qualité des ressources en eau :

i. Effets de la forte évaporation

Sous l'effet de la forte évaporation, il peut y avoir une augmentation de la teneur en sel des points d'eau ou une tendance à un accroissement de la concentration en polluants dans l'eau.

En outre, l'élévation des températures entraînerait une hausse de température de l'eau qui se met en équilibre avec le milieu. Ce changement pourrait contribuer à réduire la concentration d'oxygène dissous, à accroître les concentrations des nutriments comme les phosphores et à donner à l'eau un goût et une odeur désagréable pendant la saison chaude.

Le changement climatique pourrait également dégrader la qualité d'eau souterraine. Il peut y avoir intrusion d'eau salée ou montée du niveau marin et infiltration dans les aquifères des régions côtières). [4]

ii. Effets des crues

L'augmentation des débits et la fréquence des inondations accentuent la turbidité de l'eau, l'érosion et le lavage chimique des sols (sédimentation ou ensablement, différentes formes d'érosions). Les précipitations intenses augmentent le risque de propagation ou de dispersion des rejets contaminants (déchets urbains, animaux, ...) et des maladies d'origine hydrique Par ailleurs, on pourra avoir aussi une destruction des infrastructures à cause d'un fort débit dû à un cyclone (cas du pont Poamay qui relie Malaimbandy – Morondava), inondation de la ville ou des infrastructures scolaires. [4]

iii. Pollutions

Une ressource en eau est dite polluée lorsqu'elle devient impropre à satisfaire la demande d'utilisation où qu'elle présente un danger pour l'environnement.

La pollution est un problème mondial. Elle est définie comme la souillure ou l'infection due aux activités humaines. La pollution tellurique ou naturelle constitue aussi une base de discussions ces derniers temps. [4]

La pollution peut toucher tous les types de ressources en eau (aussi bien l'eau de pluie, l'eau souterraine, l'eau de surface).

❖ Contamination des eaux de surface

L'eau est un véhicule de transport de substance minérale, organique ou bactérienne idéale.

Pour l'eau de surface, la contamination peut se faire par :

- déversement direct des rejets polluants dans les réseaux et réservoirs de surface ;
- transport et infiltrations des eaux de ruissellement en surface du sol en présence d'une précipitation efficace et mauvais assainissements ;
- vidange des nappes polluées.4)

Contamination des eaux souterraines

Les sources de pollution et les principaux contaminants sont les mêmes que celles des eaux de surface. La différence réside sur le mode de contamination. En présence des précipitations et infiltrations efficaces, la partie infiltrée véhicule les polluants dans le sol et sous-sol en franchissant quelques obstacles avant d'atteindre l'aquifère :

- introduction des pollutions dans le sol et sous-sol à la zone d'impact ou foyer de pollution
- immigration et évolution du polluant en zone non saturée vers la zone saturée pendant laquelle il peut y avoir autoépuration
- propagation et évolution du polluant dans l'aquifère. [4]

Contamination des eaux de pluie

L'eau de pluie est actuellement pollué aussi on peut avoir des pluies acide, pluie pollué par les poussières nucléaire. Les pluies acides se forment lorsque les oxydes de soufre et d'azote s'associent à l'humidité de l'air pour libérer de l'acide sulfurique et de l'acide nitrique qui est ensuite transportés très loin de leur source avant d'être précipités par les pluies. Ils résultent de la combinaison des émissions d'origine industrielle avec l'humidité atmosphérique.

Les polluants peuvent être transportés sur de longues distances avant de tomber au sol ; ainsi, des forêts et des lacs peuvent être attaqués par des pluies acides même s'ils se trouvent loin des régions industrielles. À proximité des usines, des dégâts supplémentaires sont dus à la chute des plus grosses particules polluantes qui tombent en pluie sèche. [4]

7. Gestion des ressources en eau :

La gestion efficace et durable des eaux est une opération complexe, qui nécessite une nouvelle approche permettant l'amélioration de la situation hydrique des pays et par la même réaliser le développement durable qui prend en compte les politiques et les conventions adoptées à l'échelle internationale. Toute approche ne peut réussir sans prendre en considération les intérêts de tous les acteurs et les besoins d'un état en matière de la gestion efficace des ressources en eau. [12]

L'accroissement de la demande en matière d'eau alors que les ressources sont limitées, et parfois non renouvelables, et la parution des nouveaux modes de vie et des nouvelles industries ont abouti à la consommation excessive de l'eau. De même, le problème devient plus complexe lorsqu'il s'agit de pays partageant la même ressource ou le même cours d'eau.[11]

La concurrence est de plus en plus rude entre la ville et la campagne, entre le secteur industriel et le secteur touristique en matière d'eau et d'irrigation.

De plus, la croissance démographique galopante, l'accroissement de l'urbanisation et de l'industrialisation ont eu pour conséquence l'accroissement de la demande en matière d'eau. Par ailleurs, la désertification, la pollution de l'environnement, l'impact négatif des changements climatiques (sécheresse, inondation) commencent à ravager des grandes superficies du monde ; sachant que les ressources en eau ont subi des modifications profondes sur le plan quantitatif et qualitatif, et ont entravées les cours d'eau et les lieux de stockage (barrages ; lacs ; aquifères souterraines) ce qui a eu un impact négatif sur la sécurité de l'approvisionnement en eau.

La gestion optimale des ressources en eau est le choix idoine pour planer sur ce problème de grande importance. En effet, sans une utilisation optimale de l'eau on ne peut répondre aux besoins de tous les secteurs en matière d'eau.

7. 1. L'importance de la législation dans la gestion des ressources en eau :

La gestion optimale des ressources en eau est basée sur une réglementation fondamentale, moderne et des mesures pratiques, sachant que les principaux problèmes qui entravent cette gestion résident dans la multiplicité des intervenants dans le domaine de l'eau, le manque de coordination et les lacunes enregistrées au niveau de certaines lois en vigueur notamment celles relatives à la protection des ressources en eau et à la lutte contre la pollution.

7. 2. La gestion de la demande en eau :

La gestion de la demande en eau doit permettre l'adoption de pratiques visant à :

- augmenter le niveau d'économie de l'eau, en assurant une utilisation efficace maximale ;
- protéger la qualité de l'eau et améliorer la qualité de l'eau distribuée, pour répondre aux exigences de la demande ;
- augmenter les réserves en eau, en utilisant des sources non-conventionnelles ;
- envisager un approvisionnement varié en eau, selon les secteurs utilisateurs et en fonction des divers degrés de qualité d'eau. [11]

7. 3. Gestion intégrée des ressources en eau :

Face à l'augmentation croissante des besoins par rapport à des ressources disponibles relativement limitées, à la pollution incessante de ces ressources superficielles et souterraines, aux conflits d'usage à l'intérieur des pays et entre pays frontaliers s'impose la nécessité d'une politique mondiale de l'eau. Il faut donc opter pour une gestion intégrée et durable des ressources en eau en tenant compte des faits que l'eau est un « bien patrimonial » et une « Source de vie ». [11]

Dans ce sens, la gestion des ressources en eau, en plus des aspects techniques, doit intégrer les dimensions politique, économique et sociale.

L'eau, en plus de son rôle primordial pour la vie, entraîne et transporte les déchets domestiques, agricoles et industriels qui sont les éléments principaux de la pollution. Cette pollution diminue l'utilisation de l'eau en aval et menace la santé publique et les écosystèmes aquatiques. Ces problèmes sont aggravés par l'absence des systèmes de gestion efficaces.

D'une part, les approches sectorielles présentent une gestion des ressources en eau fragmentée et non coordonnée ; d'autre part, la gestion de l'eau est généralement faite selon un schéma descendant, c'est-à-dire du sommet à la base. C'est pour ceci que les principaux problèmes découlent d'une telle gestion inefficace et non pas de l'existence d'une ressource limitée. [11]

La gestion intégrée des ressources en eau fait appel à une gestion coordonnée de l'ensemble des ressources naturelles à l'intérieur d'un même territoire. C'est un élément fondamental du développement durable qui nécessite d'associer les acteurs des différents secteurs au niveau local et au niveau global. Par conséquent la gestion intégrée des ressources en eau est un processus favorisant le développement et la gestion coordonnés de l'eau, des terres et des ressources connexes, en vue de maximiser, de manière équitable, le bien-être économique et social en résultant, sans pour autant compromettre la pérennité d'écosystèmes vitaux (TAC .2000). [11]

L'approche de la gestion intégrée des ressources en eau représente un aspect relativement nouveau dont il est nécessaire de connaître son intérêt par rapport à la gestion par bassin traditionnelle. Selon Allan et al (1999), des préalables existent pour une gestion durable des ressources en eau à savoir :

- ❖ Les intérêts des usagers et des collectivités doivent être pris en compte ;
- ❖ Les institutions qui facilitent la communication et le compromis sont indispensables ;
- ❖ L'apport d'information hydrologique ou d'autres informations scientifiques est important ;
- ❖ Le rôle de l'eau doit être abordé dans un contexte plus large que le bassin et son hydrologie (hydrologique, écologique, économique, commercial et socio-politique). [11]

Notons que la planification des ressources en eau inspirée seulement du cycle hydrologique et sa modification présente une base très peu sûre pour la planification des ressources en eau. Par conséquent, le concept de la gestion intégrée des ressources en eau est sûr et solide mais d'une application difficile. Ce concept fait l'objet d'une grande concertation obligeant les institutions régionales et nationales de mettre au point leurs propres pratiques de gestion intégrée en se basant sur le cadre participatif qui se développe au niveau régional et mondial. [11]

7. 4. Objectifs de la gestion intégrée des ressources en eau :

Les objectifs d'une gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) sont multiples dont les principaux sont les suivants :

- ❖ Habilitier les femmes, les hommes et les collectivités à décider de leur niveau d'accès à l'eau potable et à des conditions de vie hygiénique, à choisir le type d'activité économique prêtant à l'utilisation d'eau qui leur convient et à s'organiser pour y parvenir ;
- ❖ Produire davantage de nourriture, concevoir des moyens d'existence durables par unité d'eau utilisée (un rendement agricole accru) et s'assurer que toute la population peut se procurer la nourriture dont elle a besoin pour vivre de façon saine et productive ;
- ❖ Gérer l'utilisation de l'eau afin de conserver le nombre et la qualité des écosystèmes.


7. 5. Gestion intégrée de l'eau par bassin versant :

La gestion intégrée de l'eau par bassin versant est un processus qui favorise la gestion coordonnée de l'eau et des ressources connexes à l'intérieur des limites d'un bassin versant en vue d'optimiser, de manière équitable, le bien-être socio-économique qui en résulte, sans pour autant compromettre la pérennité des écosystèmes vitaux. [10]

La gestion intégrée de l'eau par bassin versant est donc un concept très large. Par conséquent, chaque pays l'applique selon la nature et l'intensité des problèmes liés à l'eau, les ressources humaines, les capacités institutionnelles, les forces et les caractéristiques relatives des acteurs de l'eau, le paysage culturel et les conditions naturelles qui lui sont propres.

Rappelons que les buts de la gestion intégrée de l'eau par bassin versant sont les

- ✚ suivants : Maintenir ou récupérer les usages de l'eau ;
- ✚ Conserver ou restaurer l'intégrité physique, chimique et biologique des écosystèmes aquatiques ;
- ✚ Protéger la santé humaine ;

 Assurer un climat socio-économique durable. [10]

Pour ceci la gestion intégrée de l'eau par bassin versant suppose :

- ❖ une approche de gestion ciblée sur l'unité hydrologique (bassin versant, sous-bassin versant), avec des échelles variables selon les problèmes à résoudre, ce qui implique une imbrication cohérente des actions d'une échelle à l'autre et avec les bassins versants voisins ;
- ❖ Un cadre de travail coordonné et partagé pour favoriser la collaboration et le partenariat ;
- ❖ Une démarche à long terme qui favorise le développement durable ;
- ❖ Une vision intégrée qui tient compte de plusieurs dimensions de la gestion de l'eau et des écosystèmes aquatiques (environnementale, économique, sociale) ;
- ❖ Un processus de résolution des problèmes basé sur de solides connaissances scientifiques et historiques et sur des données fiables ;
- ❖ Une approche qui privilégie la concertation des acteurs de l'eau, la conciliation des objectifs et la coordination des moyens et des actions ;
- ❖ Des organisations possédant une structure, des rôles et des pouvoirs taillés sur mesure (c'est-à-dire adaptés à l'échelle du bassin versant) ;
- ❖ Une approche ascendante basée sur la responsabilisation et la participation des acteurs locaux et régionaux ;
- ❖ Un processus d'apprentissage continu incluant la formation des acteurs de l'eau et l'éducation du public.

8. Stratégie de lutte et options proposées en matière d'adaptation aux changements climatiques :

La dimension stratégique et vitale de l'eau caractérisée par la rareté et la pénurie impose une politique de mobilisation maximale et d'exploitation rationnelle de cette ressource. Les défis à relever dans ce domaine sont liés à la sécurité de la population et de l'économie du pays dont il importe de pourvoir aux besoins tant il est vrai que la sécurité hydrique est intimement liée à la sécurité économique, sanitaire et

écologique et à la sécurité alimentaire en particulier.

Les changements et les imprévus climatiques vont rendre la gestion de l'eau de plus en plus difficile. Une action rapide destinée à adapter le secteur au changement climatique sera beaucoup moins coûteux que les dommages qui résulteront de ce phénomène. En ce qui concerne les effets pour lesquels les projections sont suffisamment fiables, l'adaptation doit donc commencer dès maintenant. [16]

La stratégie de l'eau consiste en des programmes quinquennaux visant à réaliser les objectifs de la politique nationale de l'eau : Cette politique de développement vise deux objectifs :

- ❖ la sécurisation de l'alimentation en eau potable des populations ;
- ❖ amélioration du taux de sécurité alimentaire par les possibilités offertes au maintien et à l'extension des superficies irriguées ;
- ❖ Amélioration de l'accès des citoyens aux services d'alimentation en eau potable en mettant l'accent sur la gestion intégrée de la ressource (gestion de l'offre, de la demande et de la conservation) ;
- ❖ Réforme du mode de gestion de l'eau agricole ;
- ❖ Renforcement du partenariat public-privé ;
- ❖ Amélioration des stratégies de planification et de préparation en vue des sécheresses et inondations sévères ;
- ❖ Actualisation de l'état de connaissance des eaux souterraines à travers le lancement des études d'actualisation des inventaires dans l'objectif d'améliorer les connaissances et renforcer les actions de prospection des systèmes aquifères non connus et étendre la possibilité de leur utilisation. [16]

8. 1. Une politique et des actions d'adaptation :

Le peu de maîtrise que l'on a de cette vulnérabilité des ressources en eau ne doit pas pour autant laisser les gestionnaires de cette ressource dans l'inaction face à ce défi. On n'a pas à attendre des résultats très précis pour agir car ce qu'on peut déjà faire pour limiter les dégâts :

- Mobilisation des eaux conventionnelles ;
- Développement du recours aux eaux non conventionnelles (eaux usées,

dessalement, recharge artificielle) ;

- Dépollution des systèmes hydriques et épuration des eaux usées avant leur rejet ;
 - Recours aux techniques d'économie d'eau en particulier en agriculture et choix de cultures moins consommatrices d'eau ;
 - Application des principes préleveur-payeur et pollueur-payeur ;
 - Sensibilisation et éducation des citoyens à la valeur de l'eau dans cette région.
- [16]

8. 2. Actions et Stratégies d'adaptation à mettre en place :

Pour faire face aux impacts négatifs de ces changements climatiques dans la région des actions de natures diverses s'imposent. Ces actions devraient être menées en parallèle. Elles auraient pour but :

- ✓ D'avoir un suivi plus précis et donc une connaissance meilleure, tant au niveau qualitatif que quantitatif, de l'évolution du climat de la région ;
- ✓ De disposer d'une meilleure prévision du comportement à moyen et à long terme du climat de la région en relation avec les changements climatiques attendus ;
- ✓ D'avoir une estimation plus développée, plus complète et autant que possible quantitative de la vulnérabilité de cette région face aux changements climatiques et des actions d'adaptation qui s'imposent en conséquence. Il s'agira aussi de mettre en place un observatoire permettant le suivi de l'évolution de cette vulnérabilité au niveau des différents secteurs concernés ;
- ✓ De permettre, dès à présent, l'intégration dans les choix socio-économiques et politiques faits au niveau de ces pays, de la forte Vulnérabilité de la région face aux changements climatiques et de besoins de stratégies et d'actions durables d'adaptation pour y faire face. [4]

CHAPITRE II :
PRESENTATION DU
MODELE PLUIE-
DEBIT(GR)

Introduction :

Il existe un très grand nombre de modèles variés, simples ou complexes, qui dépendent de l'utilisateur et des questions auxquelles ils cherchent à répondre (prédiction de crues, simulation d'ouvrage, gestion de la ressource en eau, aménagement des bassins versants...)

Dans ce chapitre nous avons présenté le modèle pluie-débit GR

1. Modèle GR :

1.1. Historique :

L'idée de la modélisation 'GR' a été lancée par C. Michel en 1983 après l'analyse d'un modèle conceptuel CREC (Centre de Recherche et d'Etude de Chatou) (Cormary et Guilbot, 1973) à neuf paramètres sur le bassin expérimental de l'Orgeval. Il a été constaté que ce modèle présentait des difficultés au niveau de la mise en œuvre et du calage.

L'idée s'est développée alors, en partant du modèle le plus élémentaire possible (un unique paramètre lié à un unique réservoir). Cette démarche a débouché sur un modèle simple à deux paramètres GR2J (Michel, 1983). De façon plus générale, ce premier modèle était un modèle à deux paramètres, GR2, avec un paramètre pour chaque capacité de réservoir.

La version GR3J (Edijatno, 1987 ; Edijatno et Michel, 1989) a servi, principalement, comme modèle de base pour l'élaboration des autres versions au pas de temps journalier ainsi qu'au pas de temps mensuel. GR2 (Edijatno et Michel, 1989), GR3 (Michel, 1989), GR3M (Kabouya, 1990) et GR2M (Makhlouf, 1994) Les versions qui semblent les plus performantes et la plus robuste est (GR4J) proposée

par Perrin (2000), GR5J (Le Moine 2008) et GR6J. (Pushpalatha 2013)

1.2. Présentation du modèle GR :

Les modèles globaux offrent à l'utilisateur un choix très attractif, car il présente une structure très simplifiée, il ne demande pas trop de données, faciles à utiliser et à calibrer. La représentation du processus hydrologique est très simplifiée.

Il peut souvent mener à des résultats satisfaisants. Un exemple de ce type de modèle est le modèle GR (Génie Rural) (CEMAGREF) que nous allons utiliser dans cette étude. C'est un modèle à réservoir, il fonctionne pour différents pas de temps annuel GR1A, mensuel GR2M et journalier GR4J, GR5J et GR6J. Pour cela, nous allons présenter dans ce qui suit, le modèle du Génie Rural (GR), que nous appliquerons sur les données climatiques de notre bassin. (Gherissi, 2012)

1.3. Objectifs de développement :

La simulation du débit à l'exutoire d'un bassin versant est nécessaire voire indispensable pour La de nombreuses applications d'ingénierie et de gestion de la ressource en eau, telles que le dimensionnement et la gestion d'ouvrages, la prévision des crues ou des étiages, la détection d'impact, etc. C'est pour répondre à ces questions que le Cemagref a commencé à développer au début des années 1980 des modèles hydrologiques (du Génie Rural – GR) permettant de faire le lien entre la lame d'eau précipitée sur un bassin versant et son débit à l'exutoire (Michel, 1983). Au-delà de leur aspect pratique, ces modèles ont soulevé des questions essentielles sur la façon de représenter la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant (Andréasian *et al.* 2007).

1.4. Mode de développement :

Bien que ces modèles soient parfois apparentés à des modèles conceptuels du fait de leur structure à réservoirs, ce sont en fait des modèles empiriques: leur construction s'est faite sur la base de grands jeux de données et en découvrant progressivement la structure permettant de reproduire au mieux le comportement

hydrologique du bassin versant (c'est-à-dire sa réponse aux pluies).

Les idées suivantes se sont progressivement imposées au cours du développement de ces modèles pour permettre d'obtenir des modèles fiables et robustes (Mathevet, 2005):

- représentation globale du bassin versant ;
- approche empirique de développement sans recours a priori à la physique des écoulements ;
- augmentation progressive de la complexité de la structure du modèle en partant de structures simples ;
- justification de la complexité de la structure d'un modèle par ses performances ;
- recherche de structures de modèle générales (applicables à des bassins variés) ;
- utilisation de larges échantillons de bassins versants pour tester les performances des modèles (Andréassian *et al.* 2006) ;
- évaluation d'un modèle par comparaison à d'autres structures du modèle.

1.5. Principales caractéristiques :

Comme tout modèle hydrologique, les modèles GR opèrent, selon la littérature une triple globalisation (triple considération de moyenne) du système bassin versant :

- au niveau des processus : les modèles GR proposent des relations comportementales simples à l'échelle du bassin, mises au point empiriquement et sans liens directs avec la physique des processus à petite échelle et pouvant représenter une moyenne de plusieurs processus;

- au niveau de l'espace : les modèles GR sont globaux, c'est-à-dire que, tout en reconnaissant l'extraordinaire hétérogénéité de tout bassin versant, ils considèrent le

bassin versant comme un tout. Les tentatives de distribution progressive n'ont, jusqu'à présent, pas abouti à des résultats intéressants. C'est le comportement de la moyenne spatiale qui est étudié en priorité ;

- au niveau du temps : les modèles GR ont été développés pour des pas de temps de fonctionnement spécifiques : annuel (GR1A), mensuel (GR2M), journalier (GR4J, GR5J et GR6J) et horaire (GR3H) .

Dans la suite, on désignera par P (mm) la hauteur journalière de pluie, par E (mm) l'évapotranspiration potentielle journalière (ETP) et par Q (mm) le débit simulé (mm). P est une estimation de la pluie de bassin, calculée à partir de l'information pluviométrique disponible (postes au sol notamment).

Toutes les variables internes des modèles sont exprimées en mm.

2.1. Description du modèle pluie-débit annuel GR1A :

Introduction :

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

La principale version, que nous présentons ici, est celle proposée par Mouelhi (2003) et Mouelhi *et al.* (2006a).

2.1.2. Description mathématique :

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

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

Où X est l'unique paramètre du modèle.

Cette formule dérive de la formule de Turc (1955), qui donne l'écoulement moyen interannuel. Une recherche systématique de la meilleure manière de prendre en compte l'état antérieur du système a montré que l'on devait se limiter à prendre en compte la pluie de l'année précédente et l'année en cours. Le paramètre X traduit l'influence d'une ouverture du bassin sur l'extérieur non atmosphérique (par exemple échange avec des nappes profondes ou avec des bassins adjacents dans le cas d'une non-superposition des limites topographiques et géologiques) : si X est supérieur à 1, le système perd de l'eau et si X est plus petit que 1, le système en gagne, le tout exprimé en fraction de l'ETP.

2.1.3. Paramètre :

Le modèle ne comporte qu'un paramètre optimisable, le paramètre X adimensionnel, qui apparaît comme un coefficient modulateur de l'évapotranspiration potentielle. Sur un large échantillon de bassins versants, la médiane de X vaut 0.7 et un intervalle de confiance à 90% est donné par [0.13 ; 3.5] (Andreassian *et al.* 2007).

2.2. Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M :

2.2.1. Introduction :

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) est un modèle pluie- débit global à deux paramètres optimisables : X_1 , capacité du réservoir de production (mm) ;

X_2 , coefficient d'échanges souterrains (mm). Le modèle est à pas de temps mensuel. Il fonctionne autours de deux réservoirs, un de production (ou réservoir sol) et un de routage sur lesquels les ajustements et interception se font différemment sur

les entrées. Le modèle utilise en entrées la pluie moyenne et l'ETP, et fournit en sortie le débit (Sossou, 2011). Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1980, avec des objectifs d'applications dans le domaine des ressources en eau et des étiages. [14]

Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement par Kabouya (1990), Kabouya et Michel (1991), Makhloof (1994), Makhloof et Michel (1994), Mouelhi (2003) et Mouelhi *et al.* (2006b), qui ont permis d'améliorer progressivement les performances du modèle. La version présentée ici est celle de (Mouelhi *et al.*, 2006b) qui paraît la plus performante (Perrin *et al.* 2007).

Sa structure, bien qu'empirique, l'apparente à des modèles conceptuels à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui semble être le meilleur moyen de tenir compte des conditions antérieures et d'assurer un fonctionnement en continu du modèle. Sa structure associe un réservoir de production et un réservoir de routage ainsi qu'une ouverture sur l'extérieur autre que le milieu atmosphérique. Ces trois fonctions permettent de simuler le comportement hydrologique du bassin.

2.2.2 Description mathématique :

Un schéma de la structure est donné à la (Figure : 1). P_k est la pluie mensuelle du mois k et E l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même mois calendaire. Les équations qui régissent le modèle sont les suivantes :

Production :

La fonction de production du modèle repose sur un réservoir de suivi d'humidité du sol. Une partie P_s de la pluie P_k va être ajoutée au contenu S_k dans le réservoir en début de pas de temps :

$$P_s = \frac{X_1 \left(1 - \left(\frac{S_k}{X_1}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_k}{X_1}\right)}{1 + \frac{S}{X_1} \cdot \tanh\left(\frac{P_k}{X_1}\right)} \dots\dots\dots II.2$$

Le paramètre X1, capacité du réservoir, est positif et exprimé en mm. La pluie en excès, P1, est donnée par :

$$P_1 = P - P_s' \dots\dots\dots (3)$$

et le contenu du réservoir est actualisé :

$$S' = S_k + P_s \dots\dots\dots (4)$$

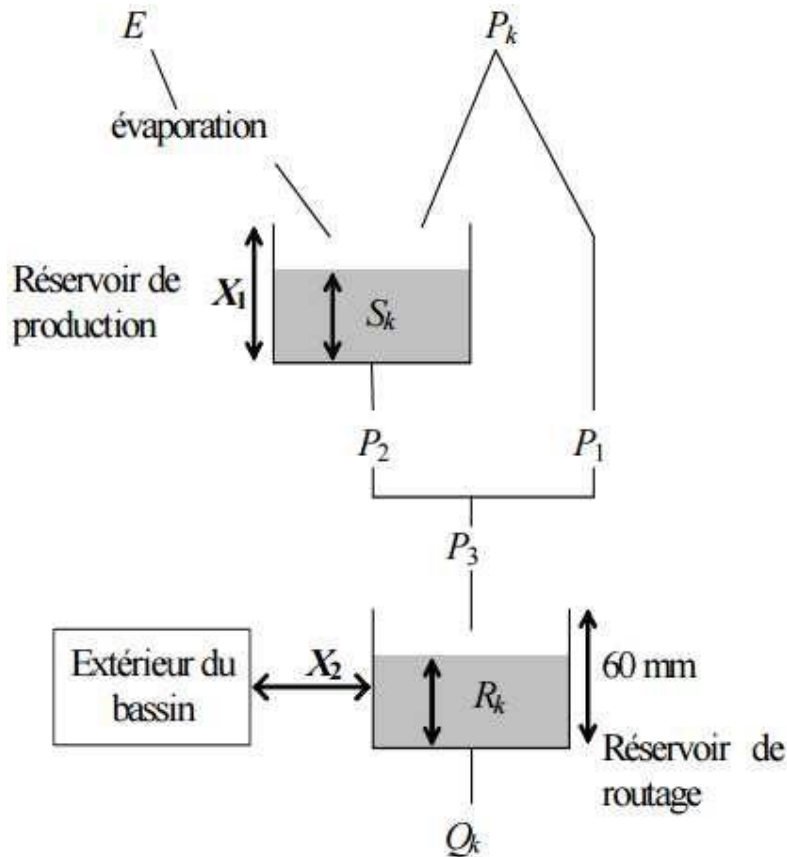


Figure 1 : Schéma de la structure du modèle GR2M.

Du fait de l'évapotranspiration, une quantité E_s est prélevée du réservoir :

$$P_s = \frac{S' \left(2 - \left(\frac{S'}{X_1} \right)^2 \right) \cdot \tanh \left(\frac{E}{X_1} \right)}{1 + \left(1 - \frac{S'}{X_1} \right) \cdot \tanh \left(\frac{E}{X_1} \right)} \dots \dots \dots \text{II. 5}$$

E est l'évapotranspiration potentielle moyenne du mois calendaire considéré. Le niveau S' devient S'' :

$$S'' = S' - E \dots \dots \dots (6)$$

Percolation :

Le réservoir de suivi d'humidité du sol se vidange ensuite selon une percolation P_2 :

$$P_s = S'' \cdot \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{S''}{X^1} \right)^3 \right]^{-1/3} \right\} \dots \dots \dots \text{II.7}$$

et son niveau S_{k+1} , prêt pour les calculs du mois suivant, est alors donné par :

$$S_{k+1} = S'' - P_2 \dots \dots \dots (8)$$

Routage et échange avec l'extérieur non atmosphérique :

La quantité d'eau totale P_3 qui atteint le réservoir de routage est donnée par :

$$P_3 = P_1 + P_2 \dots \dots \dots (9)$$

Le niveau R_k dans le réservoir devient alors R' :

$$R' = P_k + P_3 \quad (10)$$

Un terme d'échange en eau souterrain F a été imposé par les données des nombreux bassins utilisés. Ignorer cette ouverture sur l'extérieur non atmosphérique conduit à une baisse considérable de l'efficacité du modèle. F est alors calculé par :

$$F = (X - 1) R' \dots \dots \dots (11)$$

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

$$R'' = X - R' \dots\dots\dots (12)$$

Le réservoir, de capacité fixe égale à 60 mm, se vidange pour donner le débit Q_k selon l'équation suivante :

$$Q_k = \left(\frac{R''^2}{R'' + 60} \right) \dots\dots\dots (13)$$

Le contenu du réservoir est enfin actualisé par :

$$R_{k+1}$$

2.2.3.Paramètres :

$$= R'' + Q^k \dots\dots\dots (14)$$

Le modèle a deux paramètres optimisables :

X₁ : capacité du réservoir de production (mm)

X₂ : Coefficient d'échanges souterrains (-)

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

Paramètre	Médiane	Intervalle de confiance à 90%
X ₁ (mm)	380	140 – 2640
X ₂ (-)	0.92	0.21– 1.31

Tableau 1 : Valeur des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants (Andreassian et al. 2007).

2.3. Description du modèle pluie-débit journalier GR4J :

Introduction :

Le modèle GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier) est un modèle pluie- débit global à quatre paramètres optimisables : X_1 , capacité du réservoir de production (mm) ; X_2 : coefficient d'échanges souterrains (mm), X_3 : capacité à un jour du réservoir de routage (mm), X_4 : temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 (j). Le modèle utilise en entrée la hauteur de pluie moyenne sur le bassin versant P (mm) et l'évapotranspiration potentielle E (mm) (Sossou, 2011). Son développement a été initié au Cemagref au début des années 1980, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie-débit robuste et fiable en vue d'utilisations pour des applications de gestion de la ressource en eau et d'ingénierie (dimensionnement d'ouvrage, prévision des crues et des étiages, gestion de réservoirs, détection d'impact...).

Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement par Edijatno et Michel (1989), Edijatno (1991), Nascimento (1995), Edijatno *et al.* (1999), Perrin (2000), Perrin (2002) et Perrin *et al.* (2003) qui ont permis d'améliorer progressivement les performances du modèle. C'est la version de Perrin *et al.* (2003) qui est présentée ici.

Bien que GR4J soit un modèle empirique, sa structure l'apparente à des modèles conceptuels à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui permet de tenir compte des conditions antérieures et d'en assurer un fonctionnement en continu. Sa structure associe un réservoir de production et un réservoir de routage, des hydrogrammes unitaires ainsi qu'une fonction d'ouverture sur l'extérieur non atmosphérique permettant de simuler le gros du comportement hydrologique du bassin.

Le modèle GR4J a certaines fonctions communes avec le modèle GR2M (par exemple la fonction de production liée au réservoir sol). Son module de routage est cependant plus sophistiqué qu'au pas de temps mensuel.

2.3.2. Description mathématique :

Un schéma de la structure est donné à la (Figure : 2). P_k est la pluie journalière du jour k et E l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même jour calendaire.

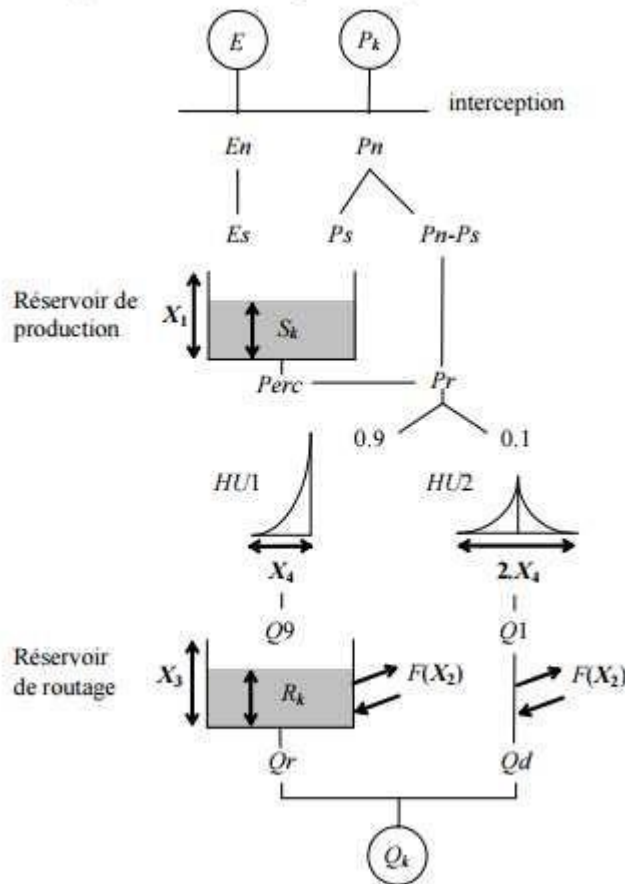


Figure 2 : Schéma de la structure du modèle GR4J.[14]

Neutralisation :

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

Si $P_k \geq E$ alors $P_n = P_k - E$ et $E_n = 0$ (15)

Si $P_k \leq E$ alors $P_n = 0$ et $E_n = E - P_k$ (16)

Fonction de rendement :

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

$$P_s = \frac{X_1 \left(1 - \left(\frac{S_k}{X_1}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{X_1}\right)}{1 + \frac{S_k}{X_1} \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{X_1}\right)} \dots \dots \dots (II. 17)$$

Où X_1 (mm) est la capacité maximum du réservoir de production et S_k le contenu du réservoir de production au début du jour k .

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

$$E_s = \frac{S_k \left(2 - \left(\frac{S_k}{X_1}\right)\right) \cdot \tanh\left(\frac{E_n}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S_k}{X_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E_n}{X_1}\right)} \dots \dots \dots (II. 18)$$

Le contenu du réservoir qui résulte de ces opérations est donnée par :

$$S' = S_k + P_s - E_s \dots \dots \dots (19)$$

Percolation :

Une percolation $Perc$ issue du réservoir de production est alors calculée par l'équation suivante :

$$Perc = S' \cdot \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4 S'}{9 X_1}\right)^4 \right]^{-1/4} \right\} \dots \dots \dots (II. 20)$$

Par suite, le contenu du réservoir devient :

$$S_{k+1} = S' - Perc \dots \dots \dots (21)$$

Et la quantité d'eau Pr qui atteint finalement la partie routage du modèle est donnée par :

$$Pr = Perc + (P_n - P_s) \dots \dots \dots (22)$$

3. Le calcul des simulations des débits :

3.1. Introduction :

Le modèle hydrologique adopté doit être calé afin de s'adapter aux propriétés du bassin versant étudié. En effet, la simplification de la réalité implique que certains, voire la totalité des paramètres utilisés pour décrire le modèle, ne peuvent être reliés directement à des mesures de terrain, d'où la nécessité d'un calage mathématique qui s'effectue sur une période où la pluie, le débit et l'évapotranspiration potentielle sont connus. Ainsi, nous pouvons comparer les débits simulés avec les débits observés grâce à des critères appelés fonctions- objectif.

3.2.Le calage du modèle :

Dans cette partie, il y a deux étapes : la première appelée calage et la seconde appelée contrôle.

- **Le calage**

Le modèle hydrologique adopté devra être calé afin d'identifier et de reconnaître certaines propriétés hydrologiques du bassin versant. En effet, la simplification de la réalité implique que certains, voire la totalité, des paramètres utilisés pour décrire le modèle, ne peuvent être reliés directement à des mesures de terrain, d'où la nécessité d'un calage. Ainsi, à partir de pluies, on déduit des estimations de débits que l'on compare aux débits observés, grâce à des critères appelés fonctions objectif. Le calage s'effectue sur une période où la pluie, le débit et l'évapotranspiration potentielle doivent être connus. En général, on considère une période d'une à plusieurs années afin de caler nos paramètres pour l'ensemble des saisons, sur des événements très différents.

- **Le contrôle**

Une fois les paramètres estimés, on doit ensuite valider le modèle en s'assurant de ses "bonnes" estimations. On compare donc une deuxième fois les débits calculés aux débits observés, avec un critère qui peut être différent de la fonction objectif utilisée lors du calage. On apprécie alors la qualité du modèle sur des échantillons de données qui n'ont pas servi à sa construction. La période de contrôle choisie doit être différente de la période de calage (Klemeš, 1986). On évalue ainsi la robustesse et la fiabilité du modèle.

On constate alors souvent que si le nombre de paramètres à caler est trop important, l'ajustement des simulations sur la réalité est très bon sur la période de calage, mais que le modèle se dégrade ensuite en période de contrôle.

Les erreurs calculées donnent une estimation des performances du modèle.

Plusieurs critères sont couramment utilisés pour estimer la qualité des simulations des débits Q_{sim} par rapport aux débits observés Q_{obs} . Ces critères sont nommés « fonction objectif ».

Les critères quadratiques basés sur les moindres carrés sont ceux qui sont le plus traditionnellement employés dans le domaine de l'hydrologie. L'erreur quadratique s'écrit :

$$Eq = \sum_{t=1}^n (Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t))^2$$

.....(23) Avec :

- $Q_{sim}(t)$ est le débit simulé à l'instant t ,
- $Q_{obs}(t)$ est le débit observé à l'instant t ,
- n le nombre totale de pas de temps.

Un problème de ce critère vient du fait que l'erreur commise est du même ordre de grandeur que le débit moyen du bassin, ce qui rend la comparaison avec d'autres bassins versants difficile. Nash et al. (1970) ont donc proposé de normaliser ce critère par la variance des débits observés. Le NSE est considéré le critère historiquement le plus utilisé en hydrologie pour étudier la performance des modèles pluie-débit. Il prend des valeurs entre $-\infty$ et 1.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t))^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs}(t) - \overline{Q_{obs}(t)})^2} \dots\dots\dots(24)$$

Tel que :

- Si le $NSE \leq 0$: le modèle n'est pas meilleur que la moyenne des débits observés,
- Si le $NSE > 0$: le modèle est meilleur que la moyenne des débits observés,
- Si le $NSE = 1$: le modèle correspond parfaitement aux débits observés.

Si le NSE est positif, le modèle donne de meilleurs résultats qu'un modèle naïf donnant à chaque pas de temps un débit constant égal à la moyenne des débits observés, et s'il est négatif, c'est l'inverse.

En 2009, Gupta et al. (2009) ont proposé une modification du critère NSE qui améliore la performance des modèles pluie-débit en simulation, ce nouveau critère est nommé KGE. Il est basé sur le biais, le rapport des variances, et le coefficient de corrélation entre débits observés et cumulés.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \dots\dots\dots(25)$$

Avec :

□ $\alpha = \frac{\sqrt{(\overline{Q_{sim}(t)} - \overline{Q_{sim}(t)})^2}}{\sqrt{(\overline{Q_{obs}(t)} - \overline{Q_{obs}(t)})^2}}$ présente le rapport des écarts types,

• $\beta = \frac{\overline{Q_{sim}}}{\overline{Q_{obs}}}$ est le biais,

• r est la corrélation entre Qobs et Qsim, donnée par :

$$r = \frac{1}{n} \sum \frac{(Q_{obs}(t) - \overline{Q_{obs}(t)})(Q_{sim}(t) - \overline{Q_{sim}(t)})}{\sigma_{obs}\sigma_{sim}} \dots\dots\dots(26)$$

Où :

- σ_{obs} est la variance des débits observés,
- σ_{sim} est la variance des débits simulés.

Nous citons aussi la RMSE, *Root Mean Square Error* ou la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne. Il est rarement utilisé. Il permet d'évaluer la qualité moyenne des prévisions et ainsi d'avoir une vue d'ensemble de la qualité des modèles.

Il peut être calculé sur les débits. Il est défini par :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t))^2}{n}} \dots\dots\dots(27)$$

Pour la validation nous avons plusieurs critères de validation :

- Le critère de persistance *PI* qui permet de quantifier les différences observées entre l'hydrogramme prévu et celui observé.
- Les trois composantes intervenant dans le critère *KGE* :
 - Le rapport des variances σ^2 des débits prévus et observés
 - Le biais, qui est en fait le rapport des moyennes des débits prévus et observés
 - Le coefficient de corrélation r entre les débits prévus et observés
- Le critère de qualité *CSI* (Critical Success Index) qui permet de quantifier la qualité de la prévision

4. Présentation du logiciel R :

R est un logiciel de développement scientifique libre, distribué par 'GNU Public Licence' spécialisé dans l'analyse statistique et la représentation graphique de données. C'est au départ un clone du logiciel S+ (logiciel payant) qui a petit à petit acquis son autonomie et est devenu une référence dans le monde de la statistique de part son caractère libre qui en fait un outil très dynamique, il a un certain nombre d'utilisation :

- il permet l'utilisation des méthodes statistiques classiques à l'aide de fonctions prédéfinies,
- il permet de créer ses propres programmes dans un langage de programmation assez simple d'utilisation (proche de Matlab),
- il permet d'utiliser des techniques statistiques innovantes et récentes à l'aide de package développés par les chercheurs et mis à disposition sur le site du CRAN.

Le langage de programmation est, comme Matlab ou Scilab, un langage (interprété) basé sur le calcul matriciel (C, C++, Fortran) et la manipulation simple d'objets complexes (listes, data.frame).

Sa simplicité d'utilisation permet de programmer rapidement des algorithmes initialement dédié à la statistique, le langage R est maintenant suffisamment puissant (et précis) pour le calcul scientifique et l'ingénierie mathématique.

Un grand nombre de fonctions, contenus dans différents packages, sont installés dans la

version de base du logiciel R. Il est possible d'installer des packages supplémentaires.

4. 1. Package :

une archive (fichier compressé) comprenant les fichiers informatiques, les informations et procédures nécessaires à l'installation d'un logiciel sur un système d'exploitation au sein d'un agrégat logiciel, en s'assurant de la cohérence fonctionnelle du système ainsi modifié.

4.2. Package 'airGR' :

4.2. 1. Description :

AirGR Version 1.0.5.12 est un logiciel de simulation hydrologique publié le 23/01/2017 qui permet de simuler la transformation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant et de produire des séries de débits à différents pas de temps (horaire, journalier, mensuel, annuel) à partir de séries pluviométriques observées sur des bassins versants. Il permet ainsi de faire tourner les modèles hydrologiques développés par Irstea (modèles GR, publiés) pour différentes applications de recherche ou d'ingénierie. Ces modèles étant simples, ils peuvent être assez facilement recodés à partir des publiés par des personnes connaissant bien la modélisation hydrologique, ce qu'ont fait de nombreux acteurs extérieurs, dans le domaine de la recherche, de l'ingénierie ou la gestion opérationnelle.

Le package airGR incorpore dans le logiciel R les outils de modélisation hydrologique incluant GR4H, GR4J, GR5J, GR6J, GR2M, GR1A et CemaNeige. Chaque coeur des modèles est codé en FORTRAN afin de permettre des exécutions rapides. Les autres fonctions du package (i.e. principalement l'algorithme de calage et les critères d'efficacité) sont codées en R.

Le package airGR a été développé pour remplir deux objectifs majeurs : pour faciliter l'utilisation par des utilisateurs non-experts et pour permettre de la flexibilité en ce qui concerne l'ajout de critères, de modèles ou d'algorithmes de calage. Les noms des fonctions et leurs arguments ont été choisis à cet effet.

4.2.2 Avantage du logiciel :

Modèle simple ; possibilité de recoder par des experts en hydrologie

- Modèle utilisable sur de nombreux bassins versants d'étude avec de nombreuses conditions (notamment en neige)
- Données requises limitées aux séries chronologiques de précipitations, de température et de débit
- Package souple permettant l'acceptation de modèles externes, de critères d'efficacité ou d'algorithmes d'optimisation définis par l'utilisateur.

**CHAPITRE III : Etude
hydro climatique du sous
bassin versant d'oued
Sikkak**

1. Présentation de la zone d'étude :

1. 1. Situation géographique du bassin versant de la Tafna :

Le bassin versant de la Tafna, situé au Nord-Ouest du territoire algérien s'étend sur la totalité de la Wilaya de Tlemcen et Ain Témouchent (77% de la superficie totale) et déborde sur le royaume du Maroc.

Le principal cours d'eau, la Tafna, long d'environ **170 km**, a une superficie de 7245 km² (figure III-1). Il s'étend entre la latitude 34°47 et 35°10 et la longitude 2°14 Ouest et 0°50 Est.

Le bassin de la Tafna est le bassin numéro 16 de l'ensemble des bassins d'Algérie, selon la codification de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques, (ANRH).

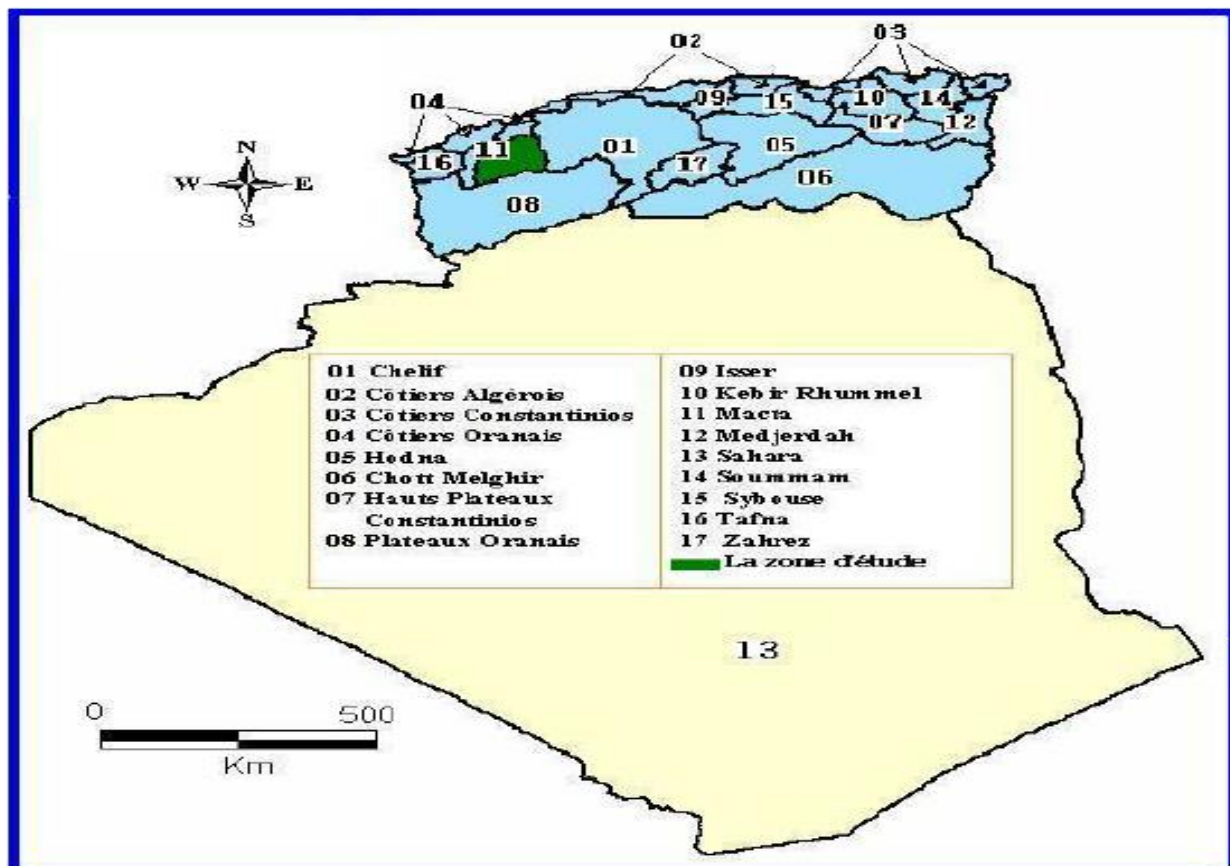


Figure III-1 : Bassins versants de l'Algérie [7]

Le bassin de la Tafna se situe dans la partie Nord – Ouest de la région Oranie
– Chott el Chergui, il est limité :

- ❖ Au Nord par le sous bassin Côtier Oranais Occidental
- ❖ Au Nord Est par le sous bassin Côtier Oranais Central
- ❖ A l'Est par le bassin de la Macta
- ❖ Au sud par le bassin de Chott – Chergui
- ❖ A l'ouest par le Maroc.

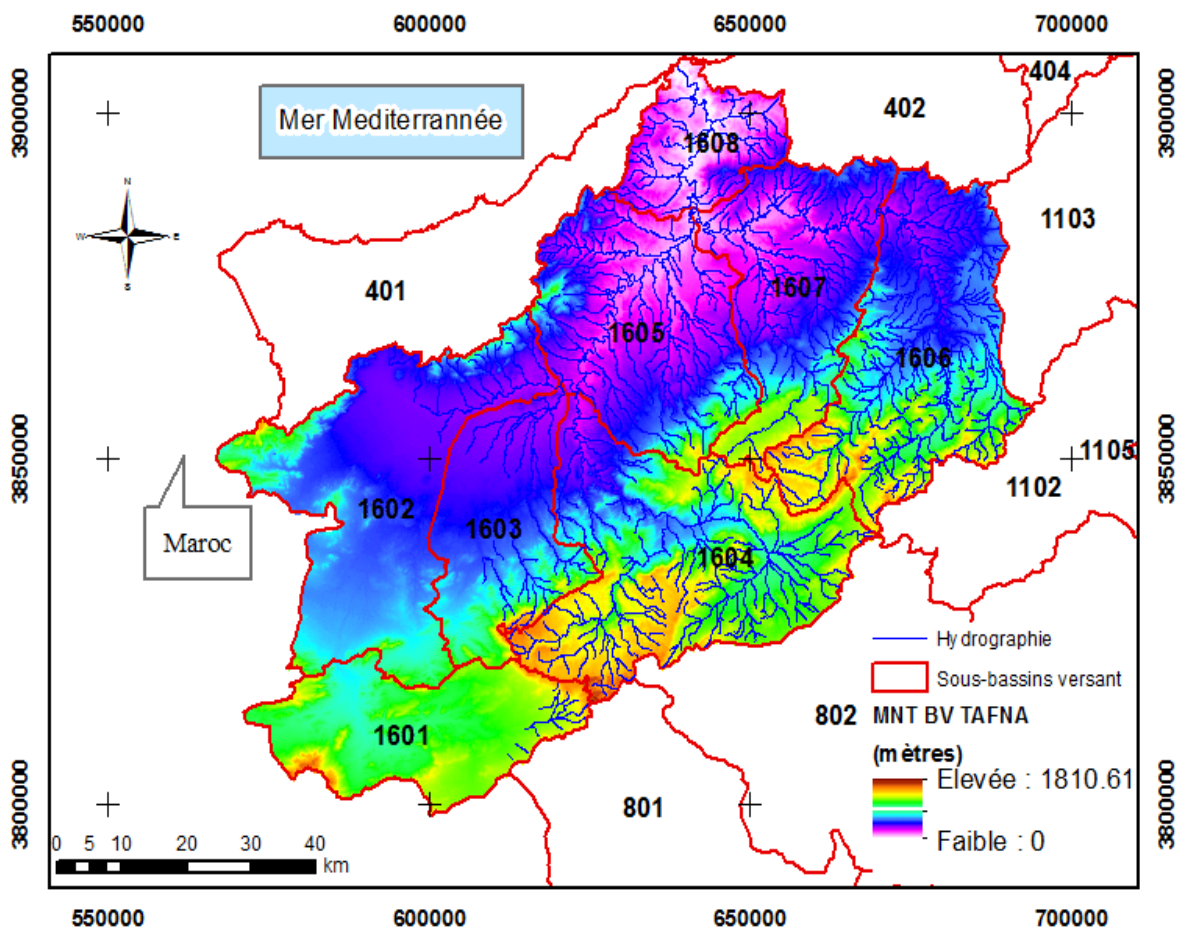


Figure III-2 : Situation géographique du bassin de la Tafna dans l'ensemble Oranie Chott Chergui[7]

Globalement, le bassin versant peut être subdivisé en trois grandes parties (Figure III-2):

- partie orientale avec comme principaux affluents l'oued Isser et l'oued Sikkak);
- partie occidentale comprenant la Haute Tafna (oued Sebdou et oued Khemis) et l'oued Mouilah ;
- partie septentrionale : qui débute pratiquement du village Tafna et s'étend jusqu'à la plage de Rachgoune, embouchure de la Tafna sur la mer. Les oueds Boukiou, Boumessaoud et Zitoun sont les principaux affluents de cette partie.

1.2. Situation géographique du bassin versant d'oued Sikkak :

Le bassin versant de l'oued SIKKAK couvre quatre cartes topographiques – à l'échelle de 1/50.000 - celles de Terny, Tlemcen, Bensekrane et de l'ouled Mimoun. Ces cartes ont été publiées par l'I.N.C. en 1949 selon les latitudes et longitudes suivantes : latitude : 34° 45' à 34° 64' Nord et longitude : 1° 07' à 1° 25' Ouest.

Ce bassin occupe une superficie de 463Km², il Est limité :

- au Sud, par les djebels NADHOR et BOULAADOUR.
- à l'Est, par les djebels ER-RAMLYA, OUKRIF et TABELDAOUT.
- à l'Ouest, par les djebels TEFATISSET et le plateau des ZENATA.
- au Nord, par les djebels FOUT HAIT.

Administrativement, la région étudiée fait partie de la wilaya de Tlemcen.

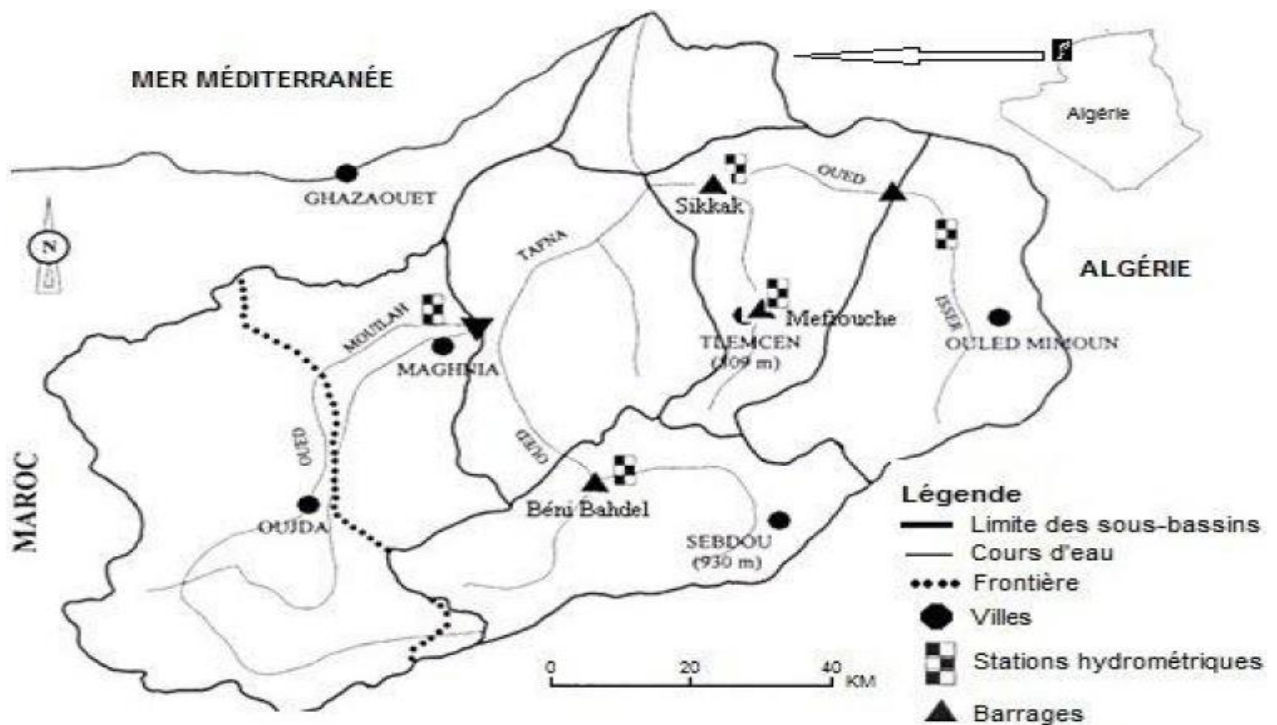


Figure III-3 : Situation du bassin versant de l'Oued Sikkak.

1.3. Caractéristique de la forme du bassin versant :

Le bassin versant a une superficie de 241 Km² pour un périmètre de 91 Km. La forme du bassin versant conditionne le temps de réponse aux précipitations. [7]

1.3. 1. Indice de capacité ou coefficient de gravelius :

Le coefficient de gravelius K_c caractérisant la compacité permet de comparer la forme du bassin versant.

$$K_c = 0,28 \frac{p}{\sqrt{A}} = 1,64$$

Où;

P : Périmètre (m)

A : Surface du bassin versant (Km²)

Plus le coefficient se rapproche de la valeur **1**, plus la forme du bassin devient circulaire. La forte valeur indique un bassin allongé.

La valeur de l'indice de compacité permet de montrer que le bassin de l'oued Sikkak est moyennement allongé.

2.3.2. Rectangle équivalent :

Le rectangle équivalent est une représentation géométrique du bassin versant ayant le même périmètre et la même surface.

2.4. Morphologie des altitudes et pentes :

Les fréquences altimétriques sont présentées dans le *tableau III-1*. Ces représentations montrent la distribution des tranches d'altitude dans notre bassin.

Altitude (m)	Ai (km ²)	Ai cumulés (km ²)	Ai %	% Ai cumulés
1488-1400	0,22	0,22	0,09	0,09
1400-1300	0,83	1,05	0,34	0,44
1300-1200	1,07	2,12	0,44	0,88
1200-1100	13,31	15,44	5,53	6,41
1100-1000	7,84	23,28	3,25	9,66
1000-900	10,94	34,22	4,54	14,20
900-800	17,63	51,85	7,32	21,52
800-700	21,07	72,92	8,75	30,27
700-600	26,55	99,46	11,02	41,29
600-500	26,02	125,48	10,80	52,08
500-400	34,44	159,91	14,29	66,38
400-300	55,72	215,63	23,13	89,51
300-200	25,27	240,91	10,49	100

Tableau III-1 : répartition altimétrique du bassin versant de Sikkak. [7]

2.4.1. L'Indice de pente global :

Etabli par M. Roche, l'indice de pente global est plus simple à calculer que l'indice de pente.

$$IG = \frac{D}{L} = 22,7 \text{ m/km}$$

Où ;

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} = 881 \text{ m}$$

L : Longueur du rectangle équivalent

D'après la Classification de l'O.R.S.T.O.N, le relief du bassin versant de Sikkak est assez fort : $20 \text{ m/Km} < I_g < 35 \text{ m/Km}$

2.4.2. Dénivelée spécifique (Ds) :

Le dénivelé spécifique d'oued Sikkak est classé relief de type très fort (Tableau III-2).

$$Ds = I_g \cdot \sqrt{A} = 352,$$

Ds (m)		
R7	Très fort	500-750
R6	Fort	250-500
R5	Assez fort	100-250
R4	Modéré	50-100
R3	Assez faible	25-50
R2	Faible	10-25
R1	Très faible	0-10

Tableau III-2 : Classification du relief de l'O.R.S.T.O.N

Le dénivelé spécifique d'oued Sikkak est classé relief de type très fort.

2.5. Réseaux hydrographique :

Les affluents les plus importants d'oued Sikkak sont les oueds Tasseddarine, Bou Rhorara, Sennoun et Chaâbat El Hora, El Ihoudi, Ain beida, tishert, Melah, Houad ben Rahou (fig III-4). [7]

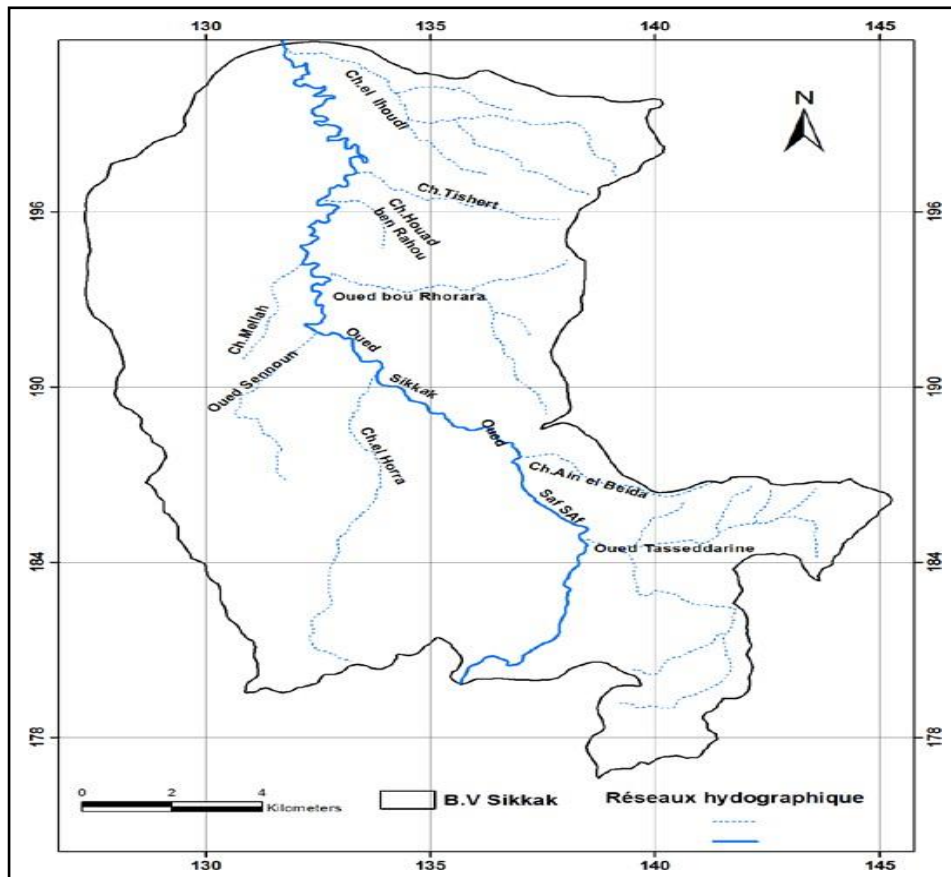


Figure III-4 : Réseaux hydrographique d'oued Sikkak.[7]

2.6. La géologie du bassin versant d'oued Sikkak :

La lithologie joue un rôle important sur le ruissellement, l'infiltration, l'érosion et le transport solide. Les matériaux géologiques se distinguent en formations meubles (sables, argiles, marnes) ou en formations consolidées (grés, calcaires, dolomies,...). La nature des affleurements a une influence sur l'hydrologie de surface et le type du dépôt alluvionnaire.

Dans cette partie, nous allons présenter brièvement quelques caractères généraux sur la géologie de Sikkak qui font l'objet de cette étude en essayant de mettre en relief leur impact sur l'hydrologie.

La zone étudiée s'insère dans l'ensemble « des monts de Tlemcen » limitée :

- au Nord, par le Tell.
- au Sud, par les plaines Oranaises.
- à l'Est par, les monts de Daïa.
- à l'Ouest, par le Horst de Ghar Roubane

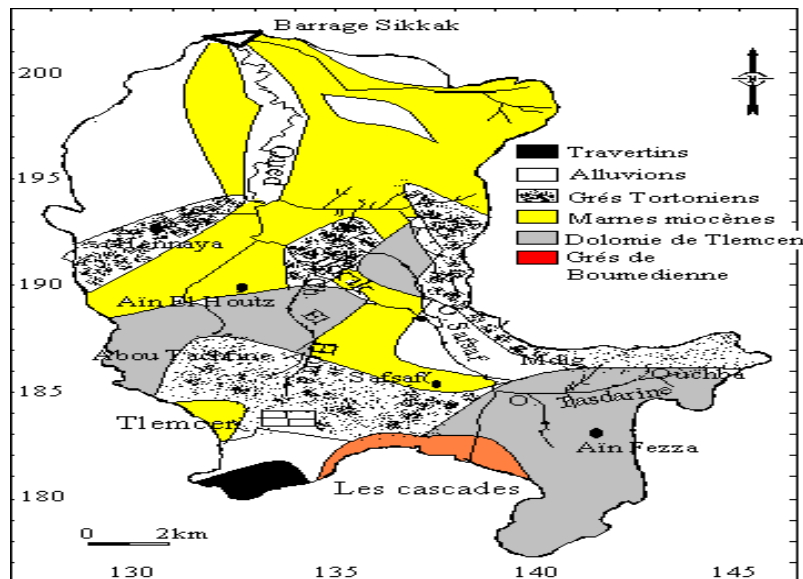


Figure III-5 : Carte lithologique du bassin versant d'oued Sikkak [7]

2.6.1. La série lithostratigraphique :

Dans le secteur étudié, nous pouvons reconnaître deux grands ensembles :

- au Nord, une dépression où le principal élément ayant contribué au remplissage est représentée par le Miocène et le Quaternaire.
- au Sud et à l'Est, les massifs montagneux où affleurent principalement des terrains Jurassique.

2.6.2. Analyse structurale :

La structure actuelle de l'Algérie du Nord est liée aux mouvements hercyniens et alpins qui ont permis l'individualisation de plusieurs domaines. En Oranie, du Nord au Sud :

- le domaine tellien représenté par les monts des Traras et des Sebâa Chioukh,
- le domaine Tlemcen en dominé essentiellement par les monts de Tlemcen,
- les hautes plaines oranaises,
- le domaine atlasique,
- et le domaine saharien.

Le bassin de la Tafna comprend de grandes plaines, dont les deux principales sont celles de Maghnia à l'Ouest et celle des Ghossels à l'Est entourées de massifs élevés :

- le massif des Traras comprenant la chaîne des Fillaoucène qui s'étendent vers l'Ouest par le massif des Béni-Snassen.
- les monts de Tlemcen dessinant la bordure Sud du bassin et s'interposent entre deux domaines bien définis :
 - Le domaine des nappes du Tell au Nord,
 - Le domaine stable des hautes plaines oranaises au S

La terminaison occidentale des monts de Tlemcen qui s'élève graduellement du Nord vers le Sud-Est occupée par un massif montagneux représenté par les monts de Rharr-Roubane.

Dans la région étudiée, nous avons quatre types d'accidents principaux :

- accidents WSW-ENE (Nord 70°E) : qui morcellent la région en panneaux allongés suivant leur direction et qui sont des zones hautes ou effondrées.
- accidents SSW-NNE (Nord 20°E) : le réseau de ces fractures est celui des transversales de L. Glangeaud (1951). Récemment S. Elni (1970) a souligné leur rôle dans la structure des monts de Tlemcen. La plupart de ces accidents ont fonctionné en décrochements senestres.
- accidents SSE-NNW (Nord 140°E) : ce sont des failles ayant joué en décrochements dextres.
- accidents E-W (Nord 90°E) : Ce sont des failles ayant joué en décrochements dextres.

2.7. Les ressources en eau dans le bassin versant d'oued Sikkak :

Le bassin versant d'oued sikkak est très sollicité du point de vue hydraulique car ses ressources en eau. Ces sollicitations deviennent toujours plus contraignantes et qui s'expliquent par la croissance des centres urbains intégrée au bassin tels Tlemcen, et du développement des unités industrielles et agricoles consommatrices d'eau. Devant cette situation la région n'a pas d'autre choix que de s'adapter en consolidant ses aménagements hydrauliques, par des ouvrages de stockage, de mobilisation et des ouvrages de transfert.

Dans le but de mettre en place les bases d'une gestion rationnelle et intégrée des ressources en eau, il est important de présenter dans ce chapitre un inventaire des aménagements hydrauliques importants ainsi que des activités consommatrices d'eau.

Les ressources en eau dans le bassin d'oued sikkak sont assurées par des ressources conventionnelles (principalement les eaux de barrages), et des ressources non conventionnelles (dessalement d'eau de mer et de traitement des eaux de rejet), et ressources souterraines (forages, sources).

2.7.1. Les ressources conventionnelles :

➤ Les eaux de surface :

Le bassin de Sikkak comporte deux infrastructures de mobilisation:

❖ **Le barrage de Sikkak :**

Il est situé dans la commune d'Ain Youcef sur l'oued Sikkak, à l'aval du barrage de Mefrouche et au nord de Tlemcen. Il draine un bassin versant de 241 km², mis en eau en 2005 avec une capacité de 27 hm³ sur une surface inondée de 206,7 ha. Ce barrage est conçu dans un objectif visant le renforcement du réseau du secteur de l'hydraulique dans la wilaya de Tlemcen ayant souffert des sécheresses antérieures.

❖ **Le barrage de Mefrouche :**

C'est un barrage à voûtes multiples en béton mis en eau en 1963 d'une capacité de 15 millions de mètre cubes (14,9 hm³ selon l'ANBT 2004) pour une superficie inondée de 190 hectares. Les eaux du barrage alimentent la ville de Tlemcen et les habitations du plateau de Mafrouche, ainsi l'irrigation de sidi Boumédiene.

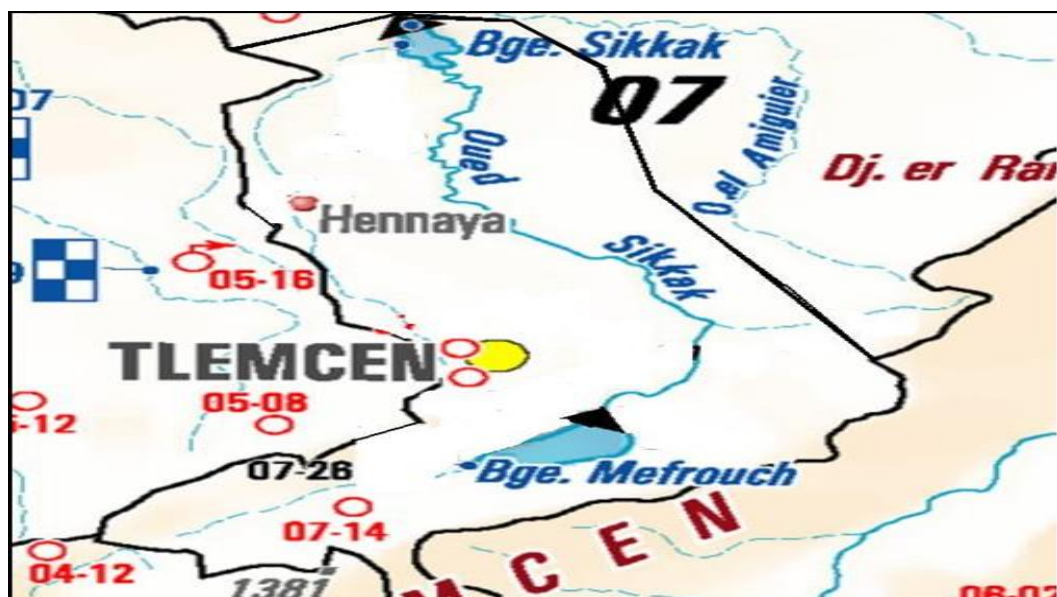


Figure III-6: Position des barrages de l'oued Sikkak. (A.N.R.H)

2.7.2. Les ressources non conventionnelles :

❖ Les eaux usées traitées :

Le traitement des eaux usées représente une composante essentielle de gestion intégrée et durable des ressources en eau. Les impacts les plus importants peuvent être résumés comme suit:

- ✚ Amélioration de la situation écologique des systèmes hydrographiques
Réduction des risques pour la santé ;
- ✚ Réutilisation des eaux usées traitées en tant que nouvelle ressource ;
- ✚ Amélioration de la qualité de l'eau dans les cours d'eau et ainsi que la mise à disposition de ressources supplémentaires de meilleure qualité.

3. Hydro climatologie du bassin versant d'Oued Sikkak :

3.1. Etude des précipitations :

Pour mieux cerner l'étude de la pluviométrie, nous avons retenu des séries des pluies moyennes mensuelles pour les stations pluviométriques du bassin de l'oued Sikkak. Ces stations se répartit dans ce bassin comme l'indique la figure (III-7) Les caractéristiques géographiques (coordonnées Lambert) avec leurs périodes d'observations sont données dans le tableau (III-3).

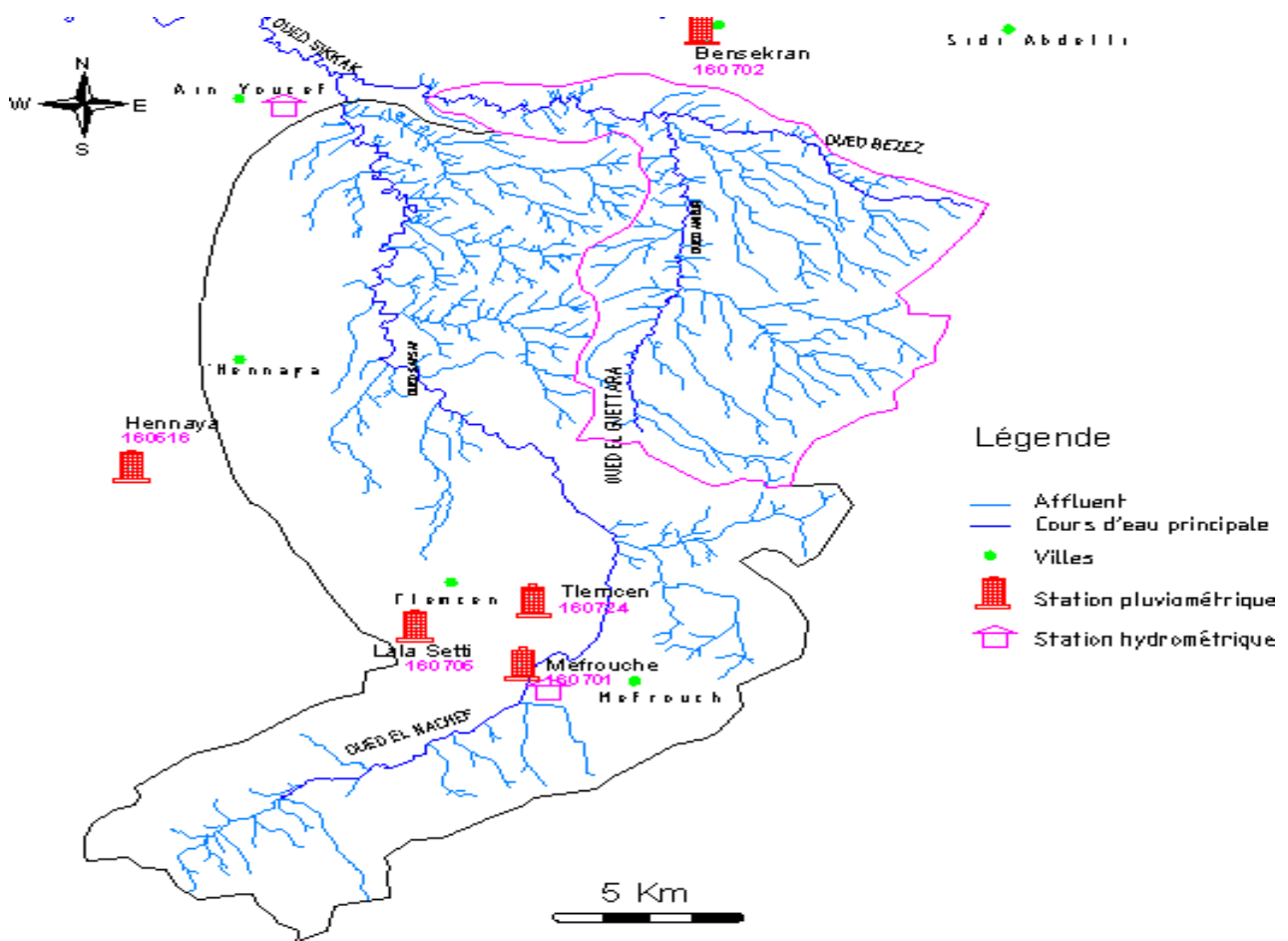


Figure III-7 : Localisation des stations pluviométriques, hydrométrique dans le bassin de l'oued Sikkak

N°	Nom de la Station	Code	Période d'observation	Longitude (m)	Latitude (m)	Altitude (m)
01	Tlemcen	160724	1980-2010	132.9	183.5	832
02	Meffrouch	160701	1980-2006	135.6	180.2	1120
03	Piere du chat	160802	1980-2010	122,4	213,2	301,5
04	Bensekrane	160702	1980-2010	143.4	205.3	260

Tableau III-3 : Caractéristiques des stations pluviométriques

Le tableau ci-dessus (III-3), montre que toutes les stations de bassin versant ont une longue période d'observation qui s'étend de 1980 jusqu'à 2010.

3.1.1. Variation interannuelle de la pluviométrie :

Pour déterminer la variation interannuelle de pluviométrie pour chaque station du bassin de l'oued Sikkak, nous avons utilisé des paramètres statistiques tels que la moyenne annuelle.

Vu que les stations sont bien réparties et les valeurs de la pluie annuelle aux stations étudiées, est presque égales, donc nous avons appliqué la méthode de la moyenne arithmétique.

Cette dernière se base sur le calcul de la moyenne des pluies annuelles de ces stations, et le coefficient d'immodération donné par le rapport des pluies extrêmes (P_M/P_m) sont données dans le tableau (III-4).

Station	Moyenne (mm)	Max (P_M)(mm)	Min (P_m) (mm)	P_M/ P_m
Zennata	516.22	761.70	338.80	2.25
P . Chat	307.23	545.3	135.40	2.09
Bensekran	361.93	502.7	191.2	3.58
Mefrouch	576.3	875.7	392.7	0.86

Tableau (III-4) : Caractéristiques de la précipitation annuelle des stations pluviométriques du Bassin de l'oued Sikkak

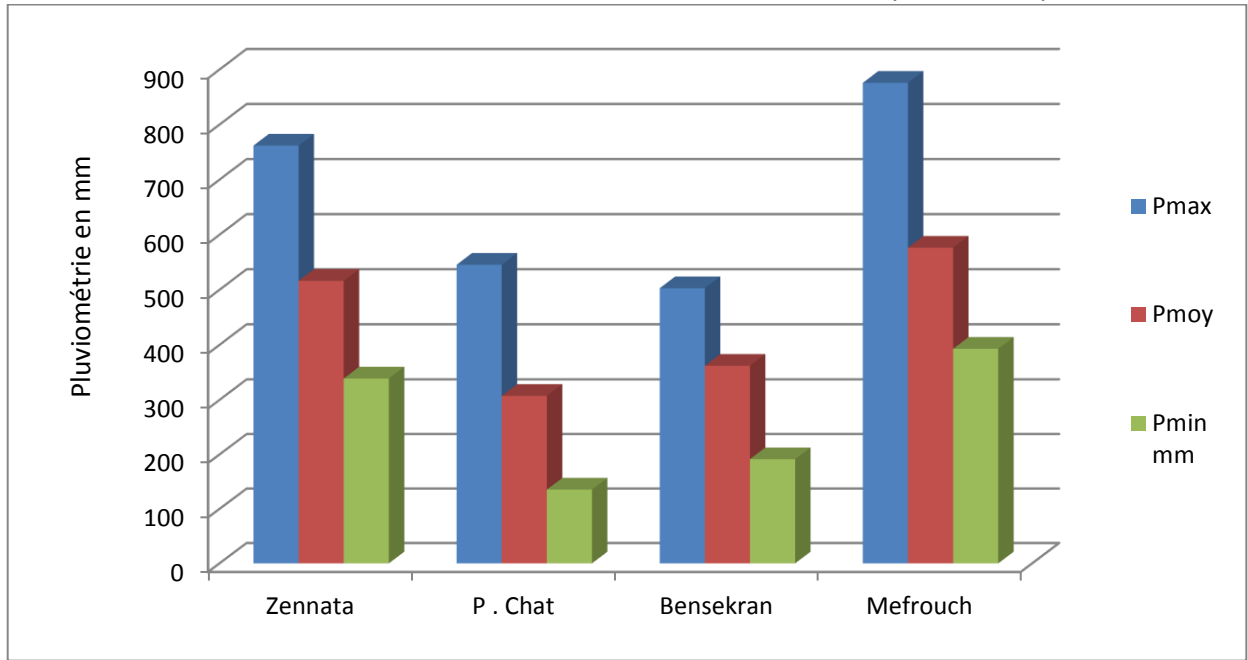


Figure III-8 : Précipitations moyennes annuelles aux stations pluviométriques du bassin de l'oued Sikkak

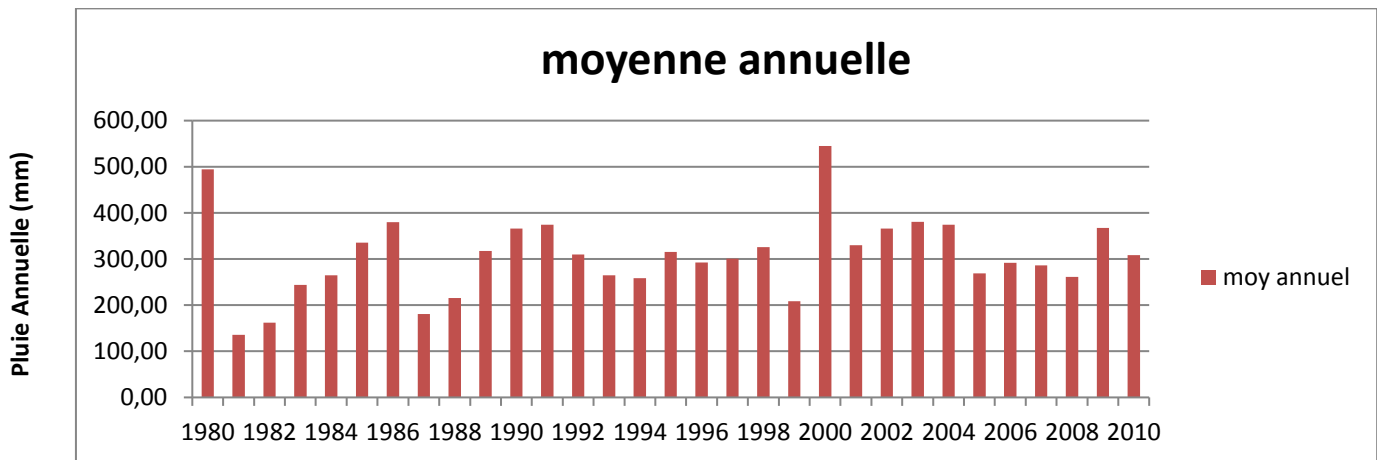


Figure III-9 : Variation interannuelle des précipitations annuelles de la station de "PIERRE DE CHAT"

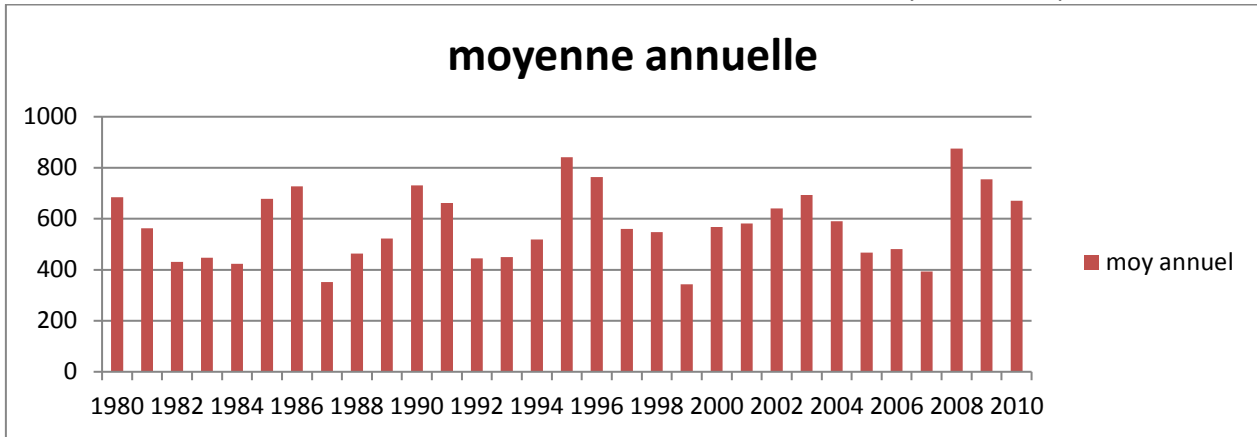


Figure III-10 : Variation interannuelle des précipitations annuelles de la station de Meffrouche

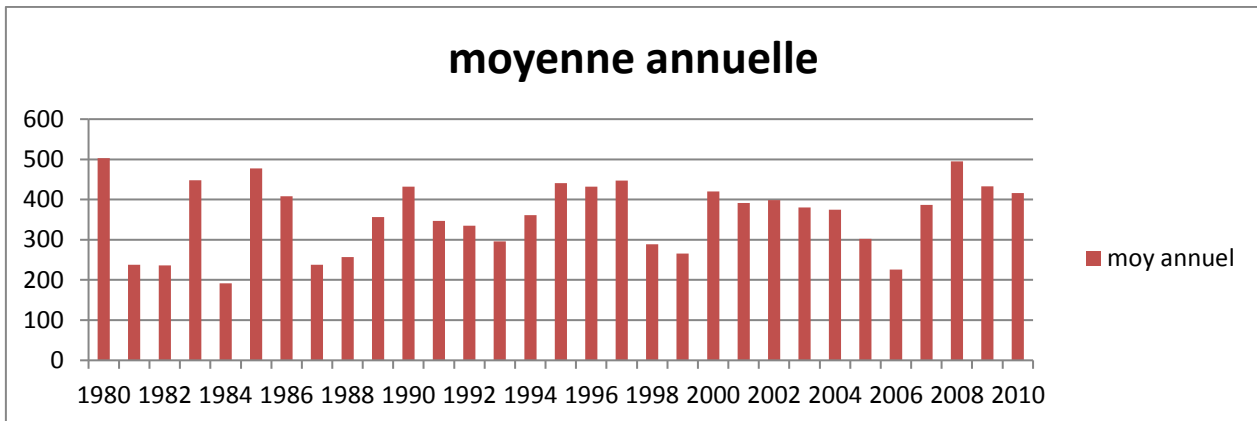


Figure III-11: Variation interannuelle des précipitations annuelles de la station de Bensekran

3.1.2. Variations Spatiales :

La carte de la répartition spatiale de la pluviométrie moyenne du bassin de l'oued Sikkak (Figure III-12) représente un échantillon caractéristique de l'ouest algérien. En effet, la

pluie diminue successivement lorsqu'on s'éloigne des chaînes montagneuses c'est le cas de la station de Bensekran située à une altitude de 260 m qui ne reçoit que 361.93 mm, tandis que la station de Mefrouch à une altitude de 1120 m est plus arrosée et reçoit 576.3 mm.

Figure III-12 : Carte en isohyète de Bassin Sikkak [7]

Station	Pluie (mm)	Altitude (m)
P de chtat	516.22	60
Zennata	307.23	832
Bensekran	361.93	260
Mefrouch	576.3	1120

Tableau (III-5): Variation de pluviométrie annuelle en fonction de l'altitude des stations de bassin Sikkak

3.1.3. Précipitations mensuelles et les régimes saisonniers :

La variation mensuelle de pluviométrie influence sur le régime des cours d'eau, tels que l'érodabilité des sols et le transport des matériaux en suspension.

La répartition mensuelle et saisonnière des précipitations nous permet de définir

les mois humides et secs dans l'année.

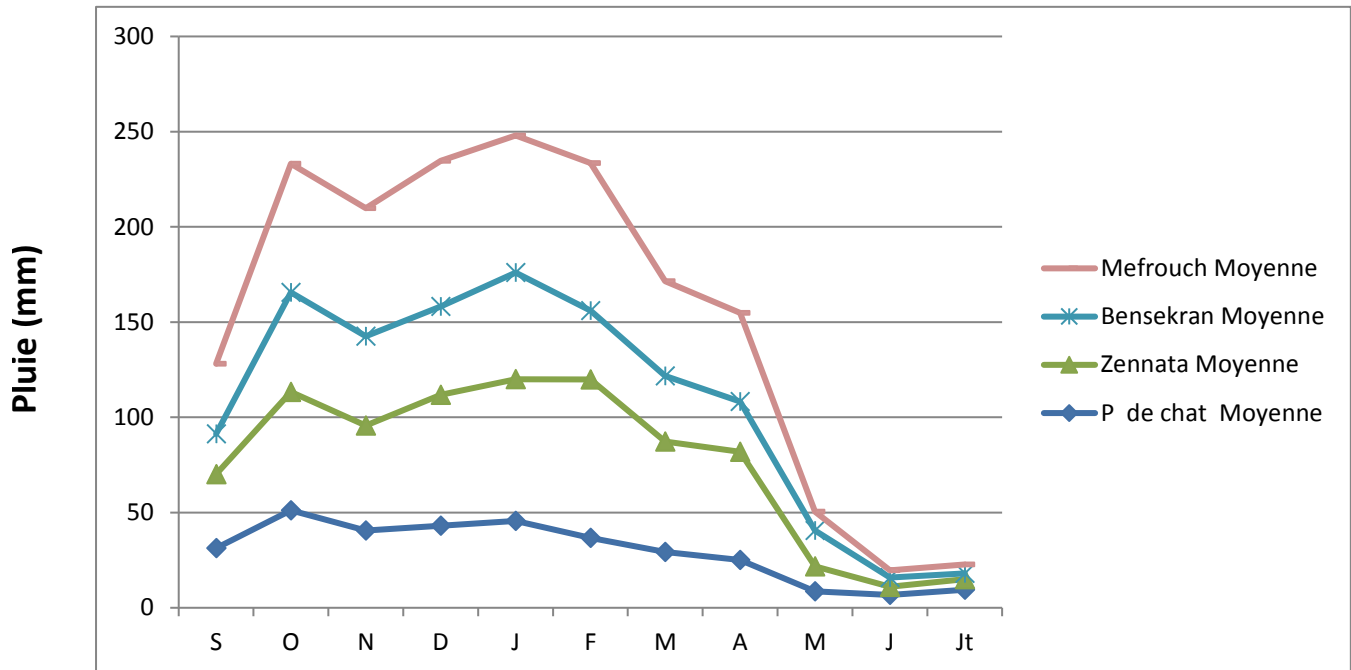


Figure III-13 : Variations mensuelles de la pluviométrie dans le bassin de l'oued Sikkak

Pour la représentation graphique des précipitations moyennes mensuelles (figure III-13), nous constatons que l'année hydrologique dans notre bassin se divise en trois périodes pluviométriques :

1. une période sèche qui correspond au mois (juin, juillet et août) ;
2. une période relativement sèche qui correspond au mois (Septembre, Octobre) ;
3. une période humide qui correspond au mois (Novembre jusqu'à Mai).

A partir de la figure (III-14) nous observons dans l'ensemble du bassin, les saisons les plus pluvieuses sont l'hiver et le printemps et la saison la plus sèche est l'été.

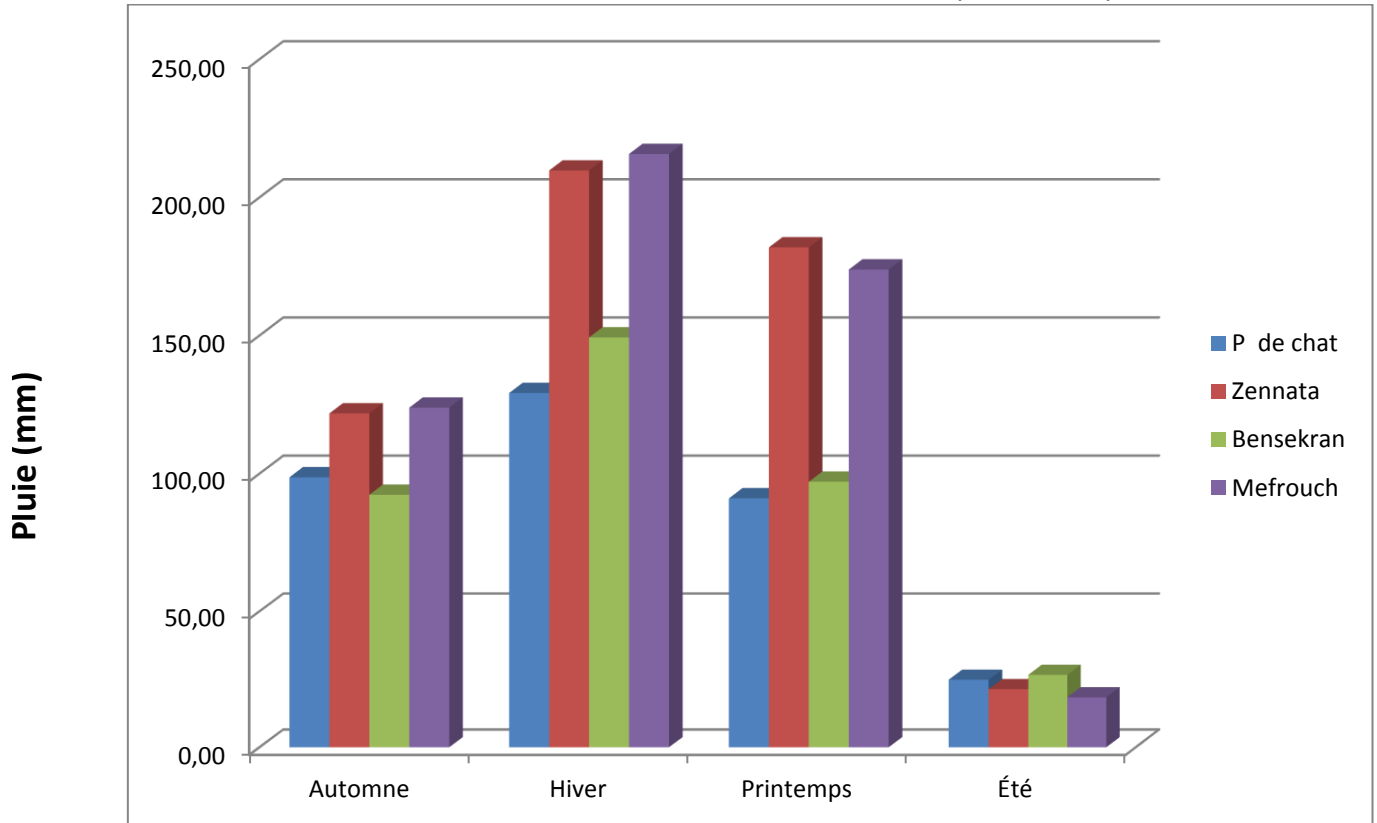


Figure III-14: Variation saisonnière des précipitations dans le bassin de l'oued Sikkak

3.2. Les Températures :

Les températures moyennes annuelles et mensuelles sont des éléments moteurs du cycle de l'eau influençant directement d'autres facteurs météorologiques tels qu'insolation, vitesse, turbulence du vent, précipitation et évaporation.

Les températures de la région d'étude sont traitées à partir la station climatologiques d'ONM à savoir la station de Tlemcen, pour une période d'observation allant de 1980 à 2010 (Tableau III-6).

Stations	Température (°C)	SEP	OC T	NO V	DEC	JAN	FE V	MA R	AV R	MA I	JUI	JUI L	AOU T	Moy. Annuel
Tlemcen	Min	15,0	12,0	8,0	7,0	5,0	7,0	7,0	8,0	10,0	14,0	17,0	18,0	10,7
	Max	28,0	23,0	17,0	16,0	14,0	16,0	17,0	18,0	22,0	27,0	32,0	33,0	21,9
	Moy	21,5	17,5	12,5	11,5	9,5	11,5	12,0	13,0	16,0	20,5	24,5	25,5	16,3

Tableau III-6 : Température mensuelle et annuelle de stations (1980 à 2010)

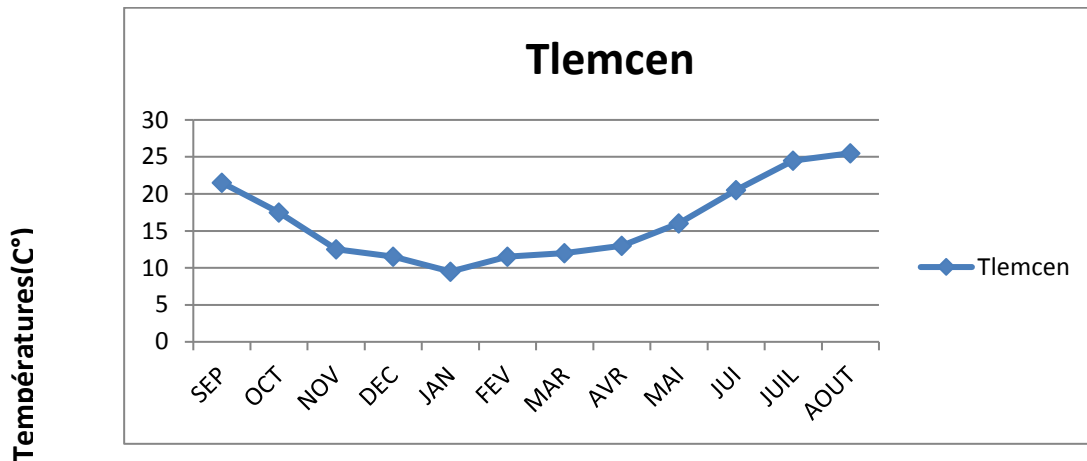


Figure III-15. Les températures moyennes mensuelles à la station Tlemcen (1980-2010).

Du Tableau et la figure nous remarquons ce qui suit :

- ❖ La période chaude s'étale de Juin à Septembre avec comme pic le mois de Août avec 25° ;
- ❖ La période la plus froide s'étale de Décembre à Février, avec comme mois le plus froid celui de janvier avec une moyenne de 9° ;

3.3. Relation précipitations-Température (Détermination du type de climat) :

En 1925, Emmanuel De Martonne a proposé une formule climatologique permettant le calcul d'un indice dit Indice d'Aridité (Ia). Cet indice est en fonction de la température (°C), et des précipitations (mm) et permet de déterminer le type de climat qui caractérise la zone d'étude. Ce paramètre se calcule selon la formule suivante :

$$L_a = \frac{P}{T + 10}$$

Avec :

I_a : indice d'aridité

P : précipitations moyennes annuelles [mm] ; **T** :

températures moyennes

annuelles [°C].

Les valeurs de l'indice permettent déterminer le climat selon le classement suivant :

Indice d'aridité	Type du climat	Signe de climat
$I < 5$	Hyper aride	Ha
$5 < I < 7.5$	Désertique	D
$7.5 < I < 10$	Steppique	S
$10 < I < 20$	Semi-aride	Sa
$20 < I < 30$	Tempéré	T
$I > 30$	Pluvieux	P

Tableau III-7 : Classe de l'Indice d'Aridité

Les valeurs de l'Indice d'Aridité I_a annuels sont enregistrées dans le tableau III-7.

Stations	Pannuelle (mm)	Tannuelle (°C)	T+10	I_a	Etage climatique
Tlemcen	513,7	16,3	26,3	19,5	Semi-aride
Mefrouche	538,4	14,1	24,1	22,3	Tempéré

Tableau III-8 : Indice d'Aridité annuel (1980- 2010)

Pour le cas de notre zone d'étude cet indice nous permet de dire que le climat est de type Semi- aride avec écoulement temporaire pour Mefrouch; et semi-aride évoluant vers le tempéré pour Tlemcen .

3.4 Etude des débits :

3.4.1. Débits annuels :

Après un traitement des séries d'observations fourni par ANRH nous avons déduit des valeurs moyennes annuelles des débits et apports dans notre bassin ; les résultats sont donnés dans le tableau le graphe ci-dessous.

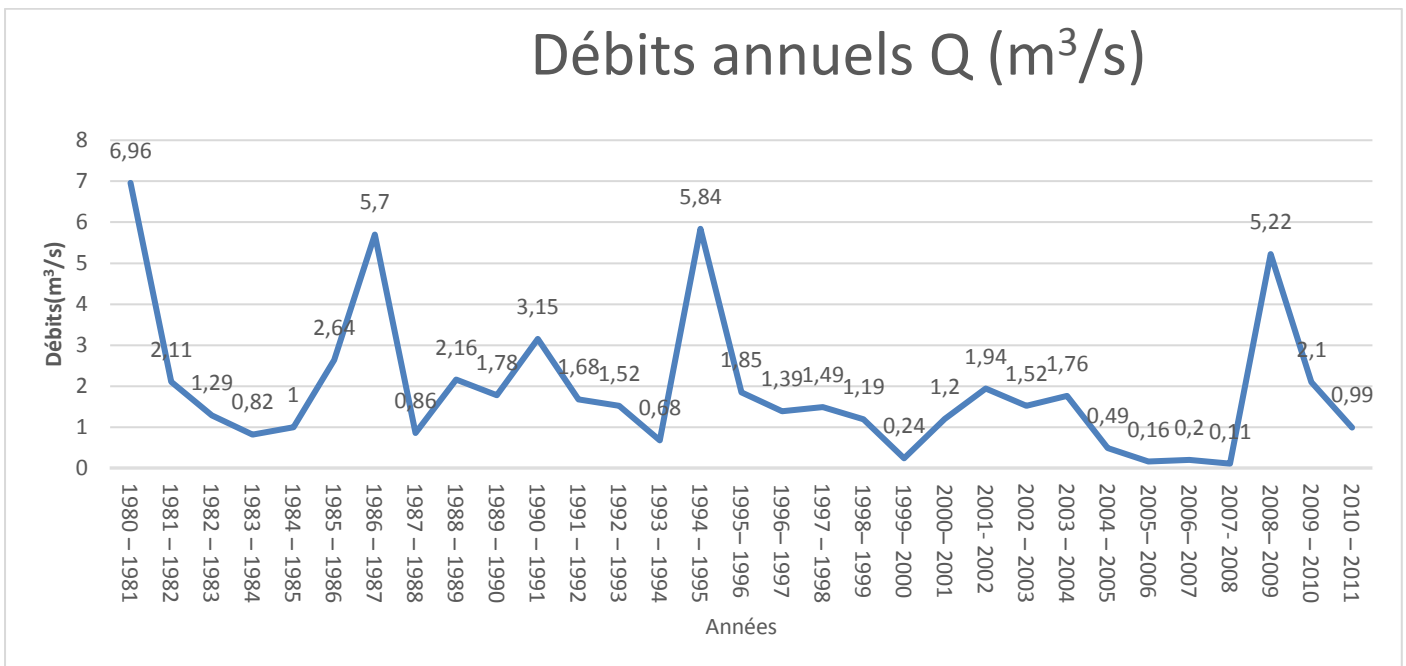


Figure III-16 : Débits annuels Q (m³/s) à la station Pierre de chat du bassin d'oued Sikkak

Il est clair que les débits les plus importants sont enregistrés au niveau de Pierre du Chat, qui constitue l'exutoire du bassin versant.

3.4.2. Débits moyens mensuels :

L'analyse des débits moyens mensuels permet de mettre en évidence les régimes des cours d'eau et leurs variations inter annuelles ou inter saisonnières.

STATION	SEPT	OCT	NOV	DEC	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL	AOUT
PIERRE DU CHAT	0.63	0.87	2.36	2.38	2.99	3.33	6.28	1.59	1.48	0.78	0.34	0.20

Tableau III-9 : Débits moyen mensuel (1980-2010) de station en (m³/s)

Les régimes moyens de ces bassins à alimentation essentiellement pluviale comportent généralement des hautes eaux de saison froide, de janvier à mai et des basses eaux de saison chaude, de juin à septembre

❖ Pour le bassin du Sikkak, la période des hautes eaux s'étale de janvier à mai et entrecoupée par le mois d'avril. Soit quatre mois humides. Tous les autres mois sont dans les « basses eaux ». Le barrage du Mefrouche et les formations karstiques en amont retardent l'arrivée des pluies importantes d'automne sur les monts de Tlemcen d'y arriver à l'exutoire du Sikkak. En effet, le réseau de failles et fissures existantes dans les dolomies jurassiques des monts de Tlemcen au niveau de Mefrouche en amont du Sikkak, favorisent l'infiltration des eaux dans l'aquifère karstique sous le barrage du Mefrouche. Ces eaux dont une partie est stockées dans la partie souterraine du barrage et l'autre sortira plus tard pour rejoindre le ruissellement de surface par l'intermédiaire des sources.

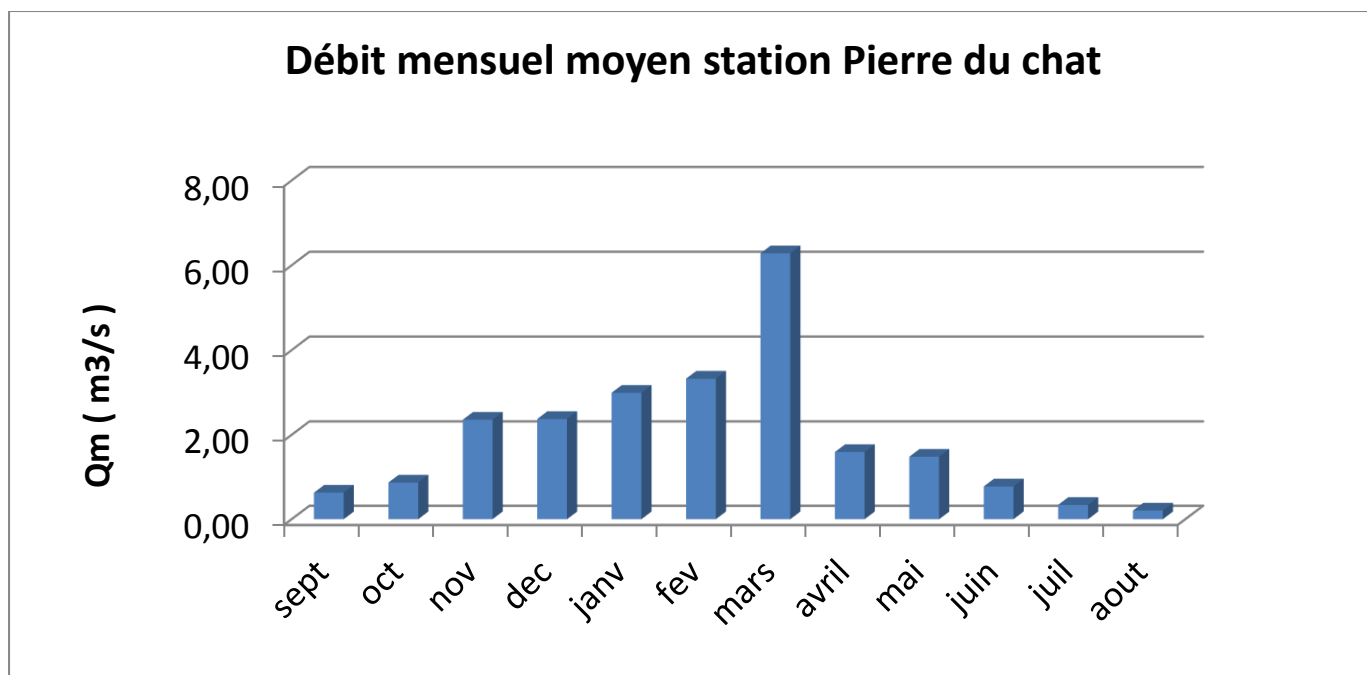


Figure III-17 : Histogramme du débit moyen mensuel pour à la station Pierre de chat.

L'analyse des débits moyens mensuels permet de mettre en évidence les régimes des cours d'eau et leurs variations inter annuelles ;

Ecoulement irrégulier : une forte variabilité avec un écoulement maximal au mois de mars et très faible de mois Juin – Septembre.

Synthèse :

L'étude climatique et du débit du bassin versant de l'oued sikkak par l'analyse de quatre stations pluviométriques et hydrométriques contenue dans son périmètre, en l'occurrence, Mefrouche, Sikkak, Zenata et Pierre du chat, étalée sur 30 ans à savoir la période allant de 1980 à 2010, nous a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- La moyenne annuelle des précipitations de 440,42 mm ;
- La région présente des variations périodiques allant du semi-aride à humide ;
- mensuellement on constate une irrégularité des précipitations avec le mois de Novembre comme étant le plus arrosé ;
- A l'échelle saisonnière l'étude des précipitations montrent que l'hiver et le printemps sont les saisons les plus humides ;
- L'altitude joue un rôle important point de vue augmentation des précipitations en fonction de l'élévation ;
- Point de vu température, la moyenne annuelle est de 16,1°C, avec Août le mois le plus chaud avec une moyenne de 25°C ;
- La moyenne annuelle la plus faible des températures est enregistrée au niveau de la station de Mefrouche, alors que la moyenne annuelle la plus forte est enregistrée au niveau de la station de Pierre de chat ;
- La méthode de l'indice d'aridité de de Martonne nous a permis de dire que le climat est de type Semi- aride avec écoulement temporaire ;
- L'écoulement à l'exutoire (pierre du Chat) est irrégulier, dont la plus importante fluctuation est pendant le mois de mars ;
- L'étiage est remarqué à partir de juillet, quant-à la reprise de l'écoulement débute en Septembre ;
- C'est entre novembre et février que l'écoulement prend de l'intense avant d'enregistrer son maxima de pointe en Mars ensuite à partir d'avril s'entame la période de décrue.

Chapitre IV : Application du modèle méthodes et discussions

Application du modèle méthodes et discussions

1. Séries de données appliquées dans cette étude :

Pour utiliser la méthodologie des anomalies, nous avons utilisé des données quotidiennes, réelles, issues d'une station météorologiques de l'ONM s'étalant du 1980 à 2010 « série de référence »

Alors que les données hydrologique, c'est les données des débits au pas de temps journalier de la station de jaugeage pierre de chat de Tlemcen du réseau l'ANRH (l'Agence nationale des ressources en eau) de septembre 1980 à 2010.

L'évapotranspiration a été calculée avec la formule d'Oudin (Oudin L., 2004) du package AirGR ver 1.2.13.16 (GR Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling).[17]

2. Méthodologie d'analyses d'impacts du changement climatique :

2.1. Utilisation des scénarios du changement climatique

Les modèles climatiques ont typiquement une résolution horizontale comprise entre 12 et 50 Km, leur résolution est donc très grossière pour le contexte d'étude d'impacts. Ceci signifie que la représentation de la surface de la terre dans le modèle est très lissée par rapport à la réalité, avec des conséquences évidentes sur la véracité de la simulation du climat (Christian, 2005). [18]

L'obtention des données climatiques à plus haute résolution repose sur l'établissement des relations significatives entre les climats locaux et ceux à grande échelle, ce qui permet l'obtention de données utiles à l'échelle du site précis. Ces relations demeureront valides dans les conditions climatiques futures (Semenov et Brooks, 1999). [20]

2.2. Génération stochastique des scénarios climatiques :

2.2.1. Généralité sur LARS-WG :

Le générateur climatique LARS-WG (Semenov, 1998) est un modèle stochastique ayant pour but de calculer des séries journalières de température, précipitations et rayonnement à partir de séries observées. Il permet de créer des scénarios climatiques à pas de temps journalier qui sont basés sur les variations mensuelles prévues par les sorties de GCM (González *et al.*, 2005). Ce type de modèle statistique peut :

- Générer de longues séries chronologiques de données météorologiques (précipitations, températures maximales et minimales et rayonnement solaire) qui permettent l'évaluation des risques agricoles et hydrologiques ;
- Offrir un moyen de simuler les données météorologiques là où les relevés d'observation sont très courts ;
- Servir d'outil moins coûteux en terme de temps de calcul et capable de produire des informations sur les scénarios de changements climatiques à haute résolution.

2.3. Méthode d'application des données de GCM dans l'étude d'impact :

La méthode des anomalies appliquées dans le générateur climatique LARS-WG (Semenov et Barrow, 1998), permet de calculer des anomalies mensuelles pour chaque variable climatique, comme le rapport (pour la pluie) ou la différence (pour la température) entre le climat mensuel moyen simulé sous les effets du changement climatique. Cette anomalie est calculée par rapport à la série de référence de la station de l'ONM (l'office nationale de la météorologie) de Tlemcen, allant de 1980 à 2010.

Les récapitulatifs des anomalies sont présentés sous forme des tableaux, pour les trois paramètres sélectionnés du le scenario du RCP 4.5 de l'IPCC à l'horizon 2021-2040 avec cinq modèles/

Ensuite, elles sont appliquées sur la distribution statistique des données physiques réelles : ce sont les valeurs moyennes ainsi que leurs variabilités qui peuvent être modifiées. LARS-WG, est capable de prendre en compte les modifications sur les moyennes et les écart-types des paramètres climatiques observées.

Les simulations du climat futur sont injectées dans un modèle d'impacts, pour l'hydrologie c'est le modèle Génie Rurale GR4J.

Mois /model	EC-EARTH	GFDL- CM3	HadGEM 2-ES	MIROC5	MPI-ESM- MR
Jan	0.97	0.52	0.67	1.07	0.78
Feb	0.95	0.53	0.84	0.98	0.85
Mar	0.87	<u>0.48</u>	0.72	0.98	0.96
Apr	0.85	0.65	<u>0.58</u>	1.08	0.92
May	0.91	0.94	0.75	1.1	0.98
Jun	0.92	0.93	0.92	1.14	<u>1.13</u>
Jul	0.81	1.04	0.85	1.02	0.94
Aug	<u>0.81</u>	<u>1.32</u>	0.71	<u>0.95</u>	<u>0.7</u>
Sep	0.88	1.18	0.83	1.11	0.69
Oct	0.93	1.02	<u>0.93</u>	<u>1.19</u>	0.81
Nov	<u>1.03</u>	0.91	0.73	1.04	0.82
Dec	1	0.62	0.56	0.99	0.76

Tableau 1 : Anomalies de précipitations appliquées aux données par LARS WG

Mois /model	EC-EARTH	GFDL-CM3	HadGEM2-ES	MIROC5	MPI-ESM-MR
Jan	<u>1.23</u>	<u>0.99</u>	1.13	<u>0.95</u>	0.48
Feb	1.24	1.18	1.21	0.96	0.75
Mar	1.56	1.71	1.14	1.19	0.96
Apr	<u>1.88</u>	2.28	1.03	1.37	1.15
May	1.76	2.78	1.25	1.52	1.27
Jun	1.35	3.38	1.75	1.58	1.43
Jul	1.33	<u>3.6</u>	<u>1.93</u>	1.56	<u>1.66</u>
Aug	1.5	3.22	1.89	1.68	1.6
Sep	1.5	3.04	1.85	<u>1.71</u>	1.26
Oct	1.5	2.77	1.64	1.39	1.02
Nov	1.53	2.06	1.24	1.2	0.72
Dec	1.45	1.34	<u>1.02</u>	1.15	<u>0.4</u>

Tableau 2 : Anomalies de températures minimales appliquées aux données par LARS WG

Mois /model	EC-EARTH	GFDL-CM3	HadGEM2-ES	MIROC5	MPI-ESM-MR
Jan	<u>1.23</u>	1.05	2.1	<u>1.06</u>	1.06
Feb	1.24	1.05	1.53	1.31	1.07
Mar	1.56	<u>1.06</u>	<u>1.34</u>	1.7	0.89
Apr	<u>1.88</u>	1.05	1.68	1.8	1.24
May	1.76	1.02	1.76	1.8	1.49
Jun	1.35	0.99	2	1.71	1.6
Jul	1.33	0.99	<u>2.28</u>	1.7	1.87
Aug	1.5	0.99	2.27	<u>1.89</u>	<u>1.91</u>
Sep	1.5	<u>0.98</u>	2.1	1.79	1.63
Oct	1.5	0.99	2.06	1.27	1.28
Nov	1.53	1.02	2.22	1.14	0.94

Dec	1.45	1.04	2.25	1.22	<u>0.79</u>
-----	------	------	------	------	-------------

Tableau 3 : Anomalies de températures maximales appliquées aux données par LARS WG

Tous les modèles s'accordent sur l'augmentation des températures minimales et maximales pour l'horizon 2021-2040 du scénario RCP 4.5, avec +0.4 °C (MPI-ESM-MR mois de décembre) à +3.6°C (GFDL-CM3 mois de juillet), pour les températures minimales, et +0.98 °C (GFDL-CM3 mois de septembre) pour les températures maximales.

Les précipitations, il existe certaines différences (tableaux 1, 2 et 3) : pour HadGEM2-ES il y aurait une diminution des cumuls pour tous les mois (-44% pour avril à -7% pour octobre), quant à MIROC5 il n'y aurait pas ou peu de diminution (de -5% pour août à +0.19% pour octobre).

Les autres modèles, il y aurait des mois déficitaires et d'autres au contraire excédentaires.

3. Résultat des simulation de modèle GR4J

Nous avons procédé à la simulation de nos résultats précédemment analysés, en l'occurrence pluies (input) débit (output), sur le modèle GR4J, dont nous présentons l'affichage du modèle par la figure suivante.

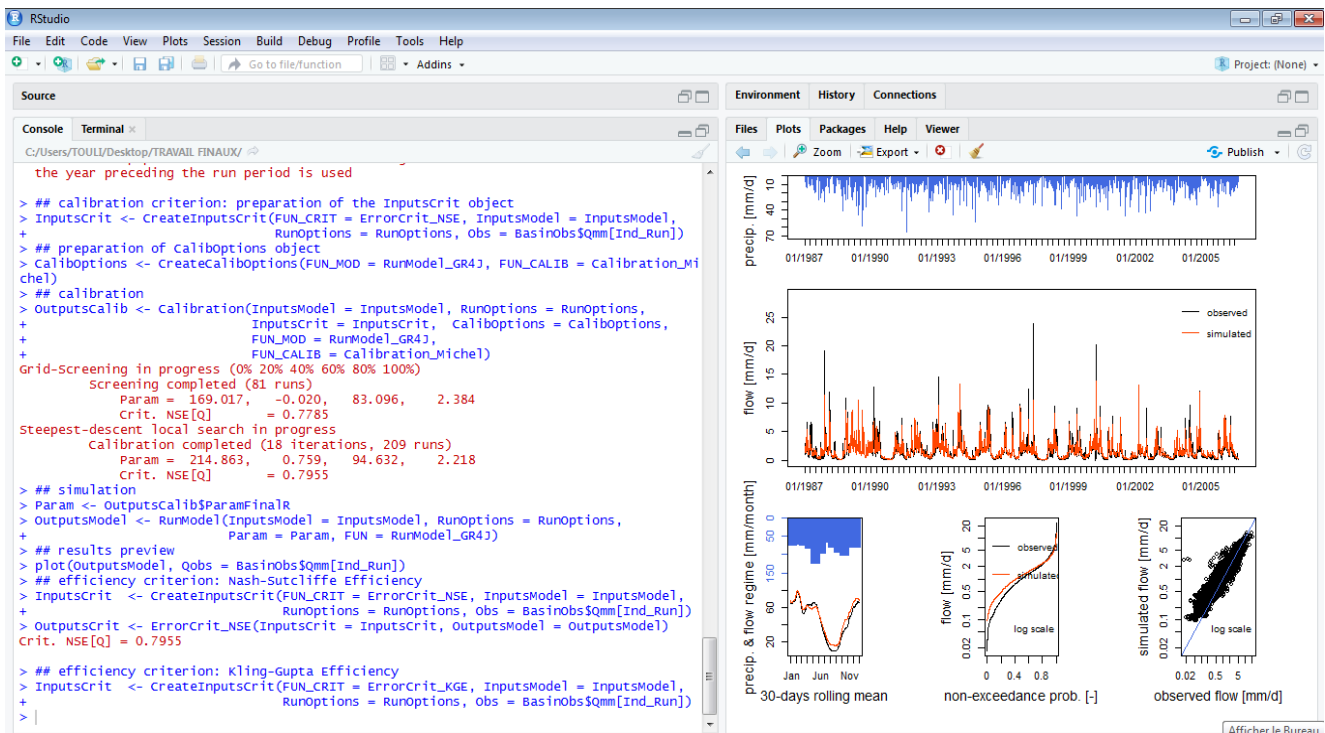


Figure 1 : Sortie du modèle GR4J

Ainsi, le modèle décrit avec spécification le régime d'écoulement, par simulation des données, statistique sur l'écoulement et l'homogénéité du débit en fonction des entrées, à savoir les précipitations.

Dans ce qui suit nous allons simuler et discuter les différents résultats de notre analyse, afin de donner une description sur l'écoulement dans la région.

3.1. Etude pluie et débit quotidien simulés et observés :

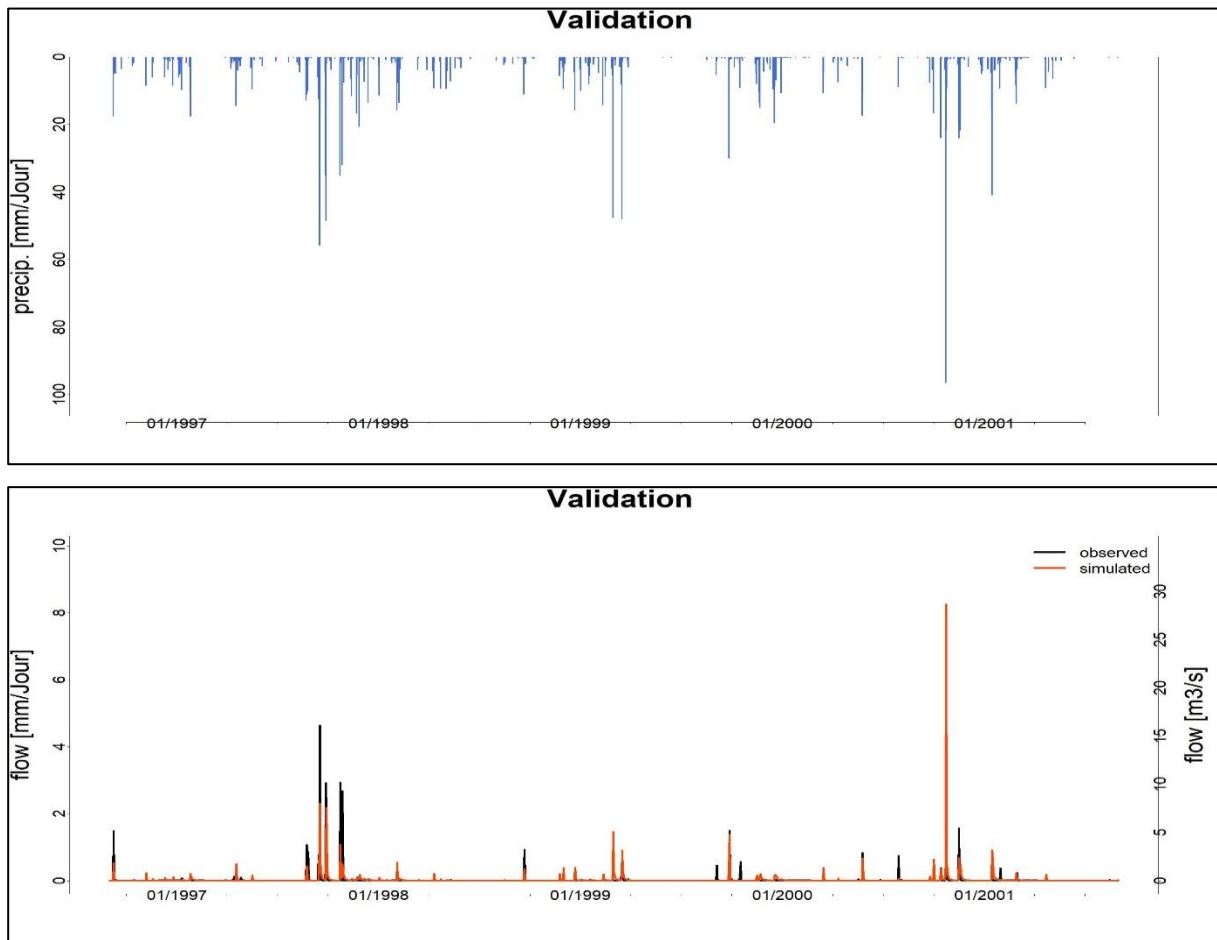


Figure 2 : Résultat des simulation pluie et débit quotidien de GR4J, pour la période de référence

Durant toute la période de référence, il est clair que la simulation épouse l'allure des données observées, dont le résultat indique que la lame d'eau écoulee est équivalente aux précipitations.

3.2. Etude des régimes saisonniers simulés et observés :

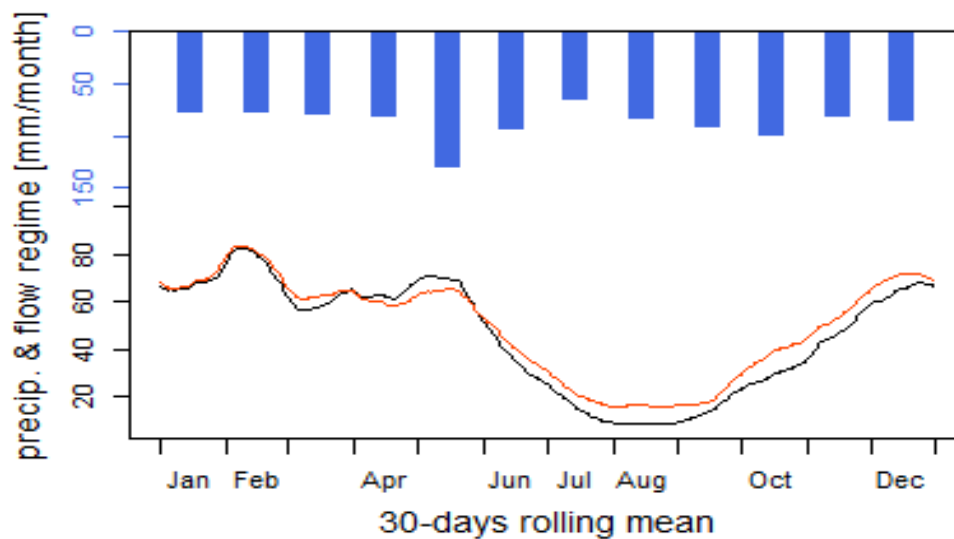


Figure 3 : Résultat des simulation régimes de GR4J, pour la période de référence 1980-2010

Selon la simulation, les valeurs observée de l'écoulement sont complètement en adéquation, tel que signalé au chapitre précédent, l'écoulement saisonnier débute en mois de septembre en enregistrant une montée avec des piques entre février et mai, avant de connaitre la période d'étiage s'étalent dès l'arrivée du mois de juin.

3.3. Résultats des simulations pour l'horizon 2021-2040 :

3.3.1 Simulation des débits journaliers :

Dans cette partie nous allons simuler la réponse du débit écoulé par rapport aux précipitation en utilisant plusieurs modèles de simulation, en l'occurrence EC_EARTH, GFDL_CM3, HadGEM2_ES, MIROC5 et MPI_ESM_MR.

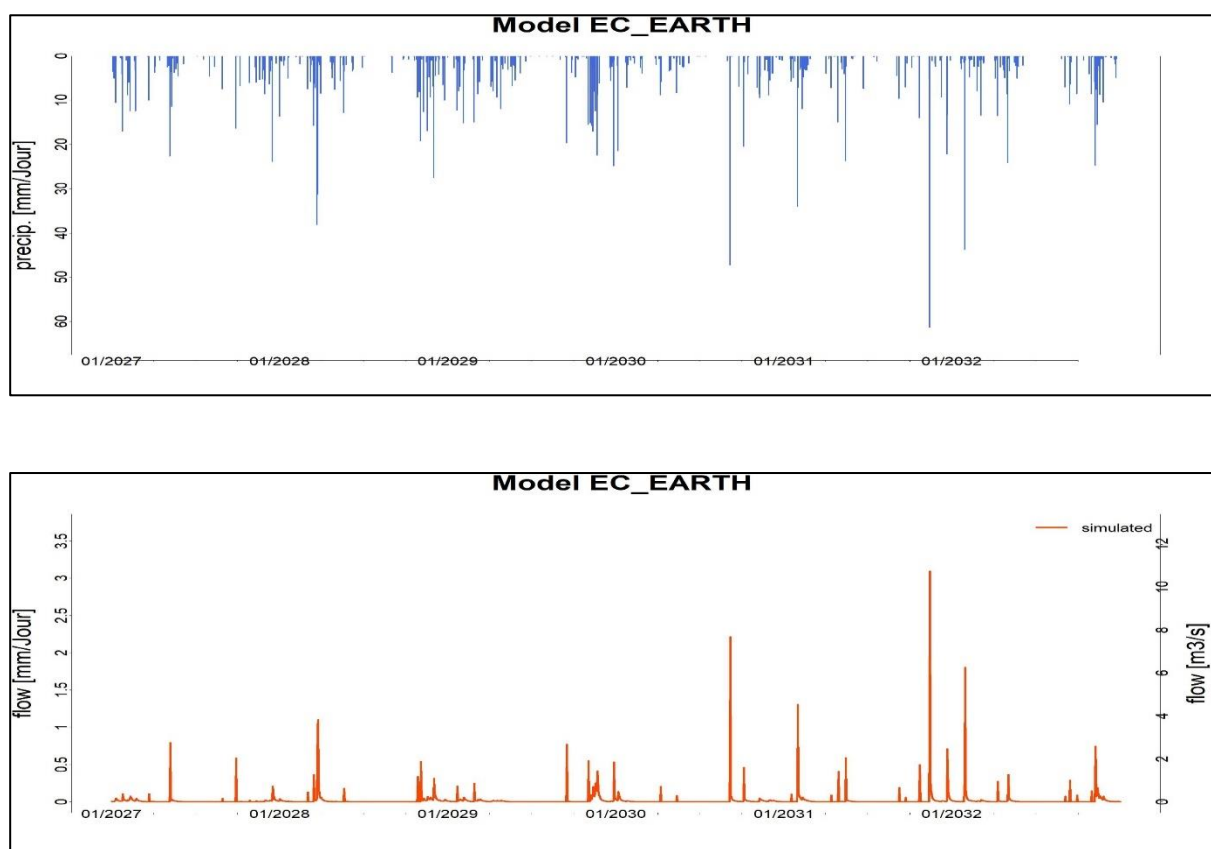


Figure 4 : Résultat des simulations des débits journaliers, horizon 2021-2040 par le model EC-EARTH

La réponse de l'écoulement journalier est en complète adéquation avec les précipitations, selon le modèle statistique l'existence d'une variation pluviométrique entre la période allant de 2021 à 2040 avec des réponses miroir point de vu écoulement.

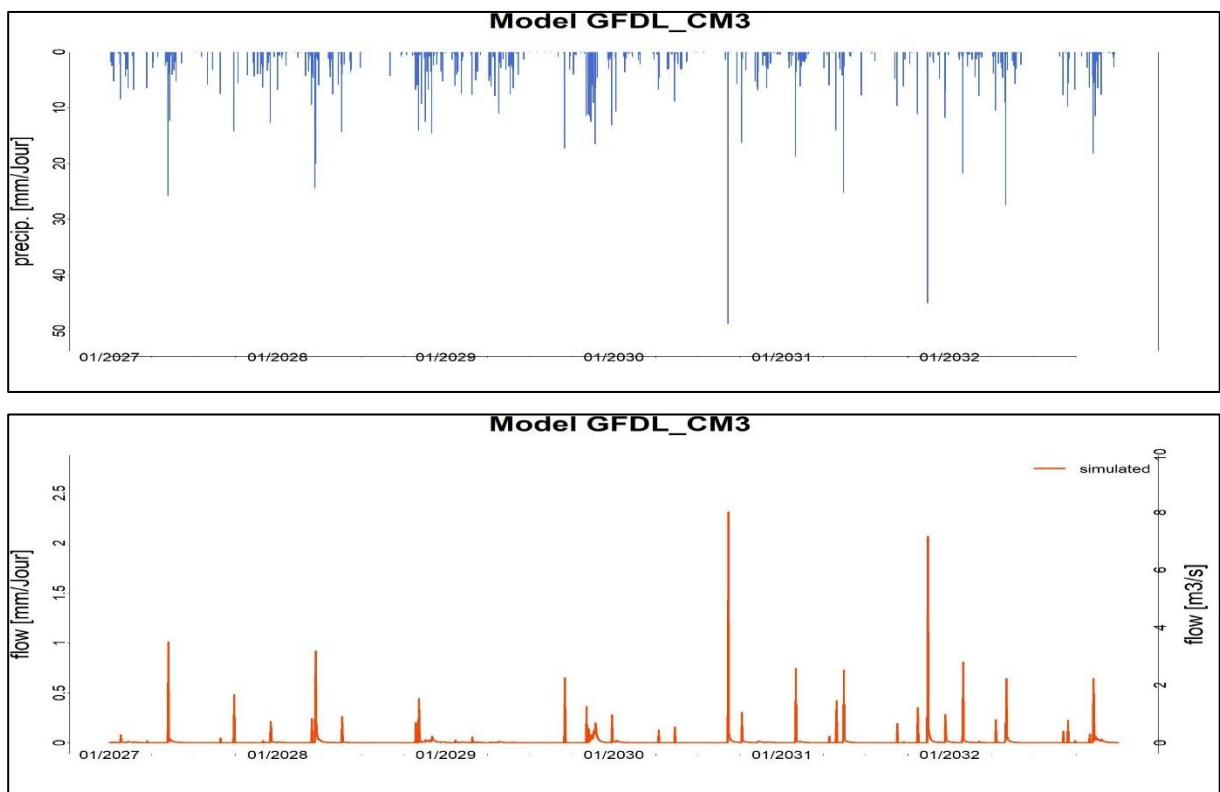


Figure 5 : Résultat des simulations des débits journaliers, horizon 2021-2040 par le model GFDL_CM3
Ce modèle donne la même indication du modèle précédent.

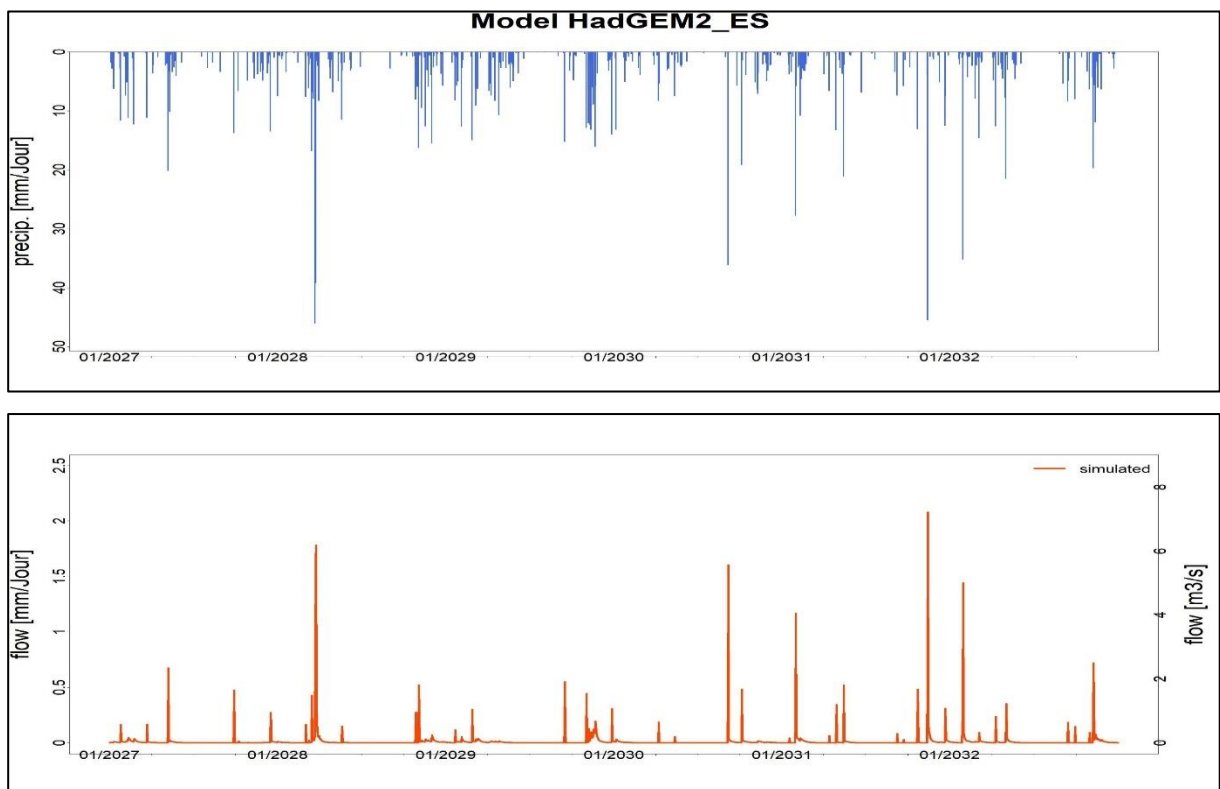


Figure 6 : Résultat des simulations des débits journaliers, horizon 2021-2040 par le model HadGEM2_ES

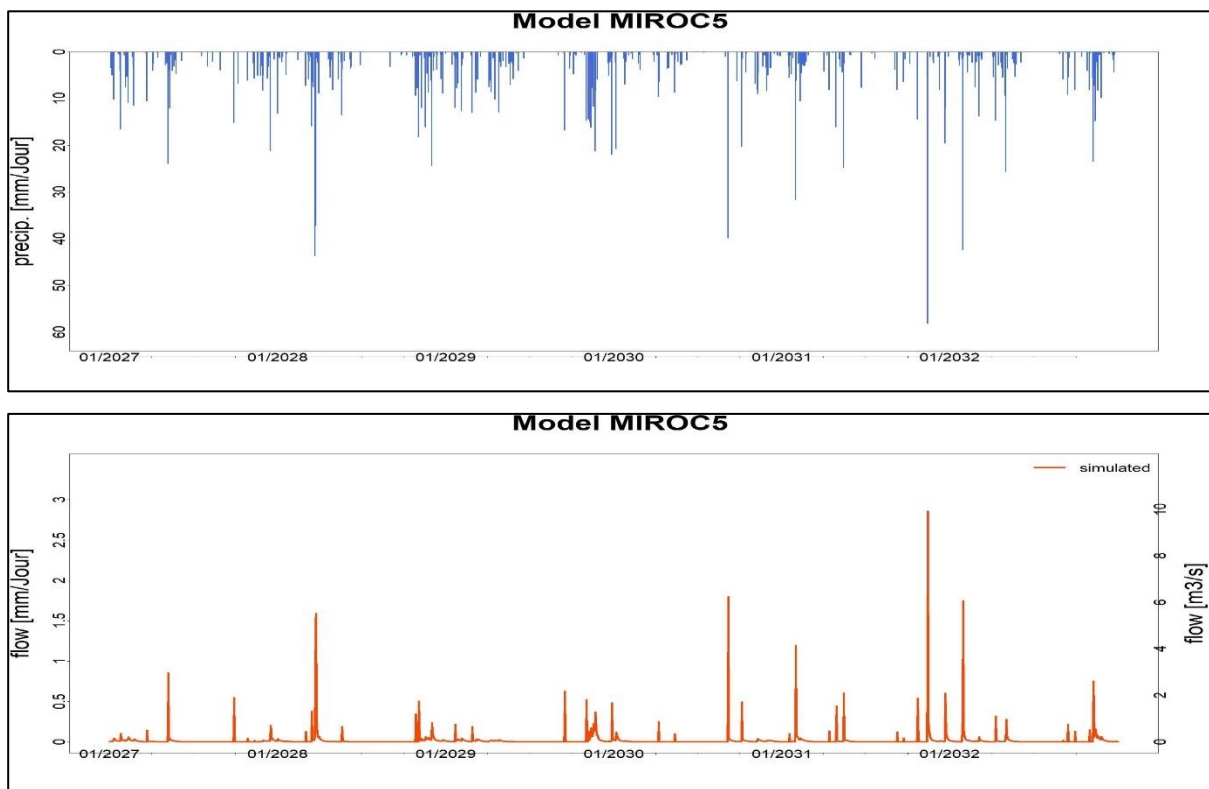


Figure 7 : Résultat des simulations des débits journaliers, horizon 2021-2040 par le model MIROC5

Ce modèle donne la même indication du modèle précédent.

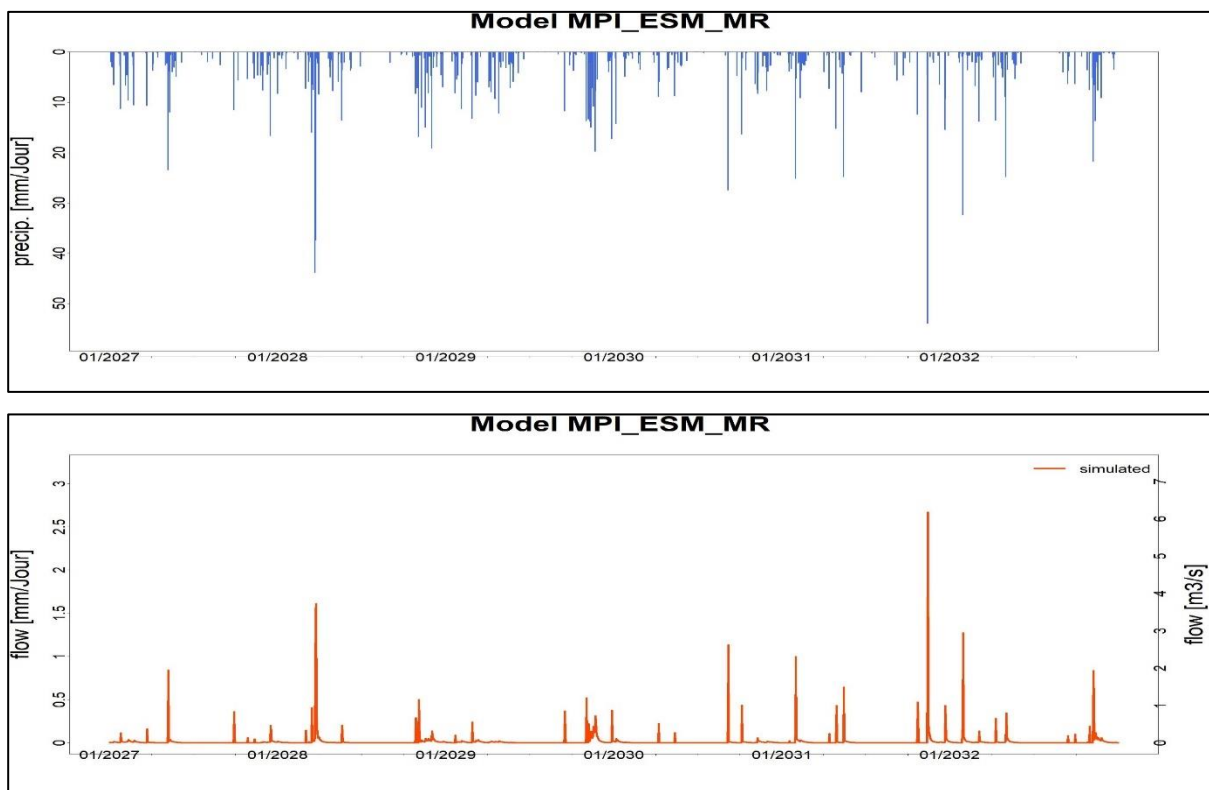


Figure 8 : Résultat des simulations des débits journaliers, horizon 2021-2040 par le model MPI-ESM-MR

Ce modèle donne la même indication du modèle précédent.

3.3.2. Simulation des régimes des débits :

La simulation des débits est très importante pour confirmer le type du régime d'écoulement, raison pour laquelle nous avons utilisé les mêmes modèles pour valider le type du régime.

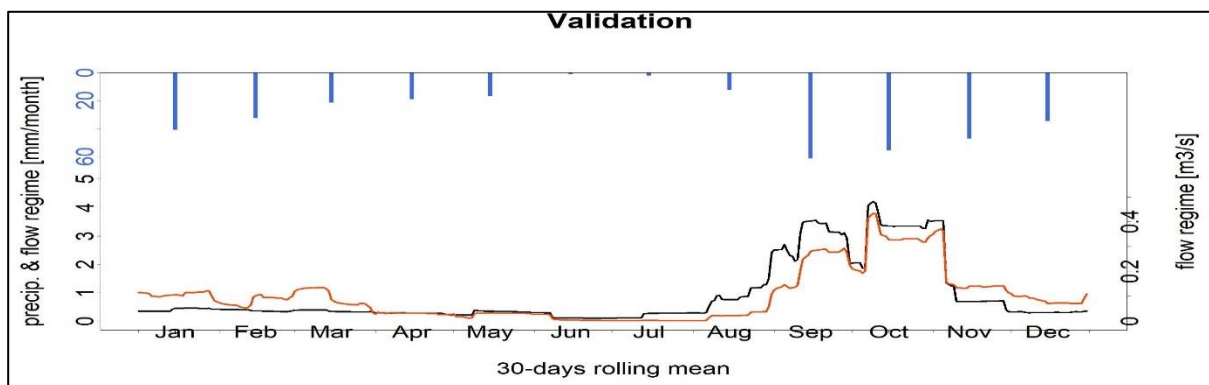


Figure 9 : Résultat des simulations des régimes pour la période de référence 1980-2010

On se basant sur la validation du régime pour la période 1980-2010, nous allons procéder aux différentes simulations futures (2021-2040).

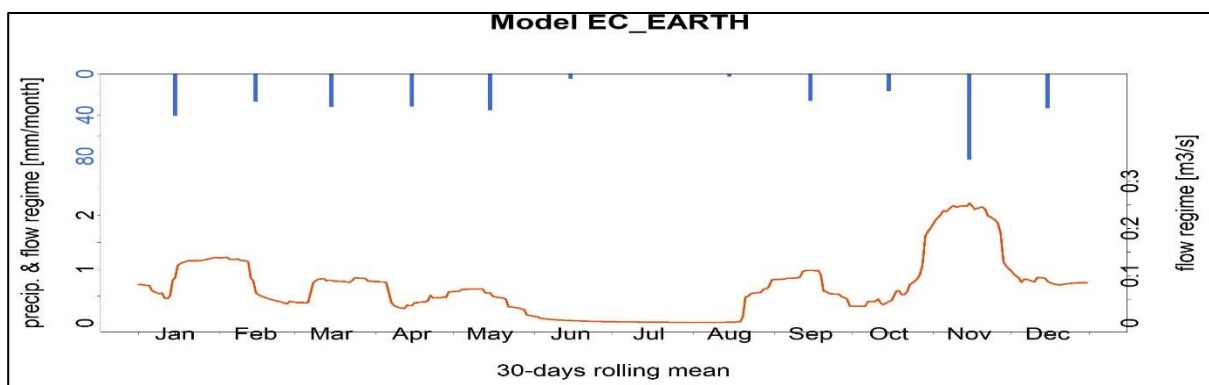


Figure 10 : Résultat des simulations des régimes, pour de l'horizon 2021-2040 model EC-EARTH

On remarque changement en écoulement sauf en période d'étiage avec diminution en débit.

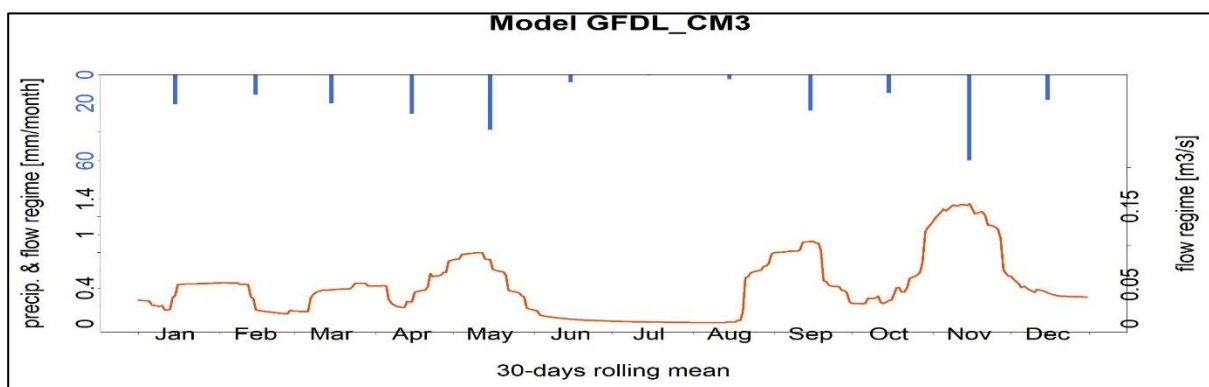


Figure 11 : Résultat des simulations des régimes, pour de l'horizon 2021-2040 model GFDL-CM3

La simulation a la même allure du modèle précédent, avec un débit d'écoulement plus faible.

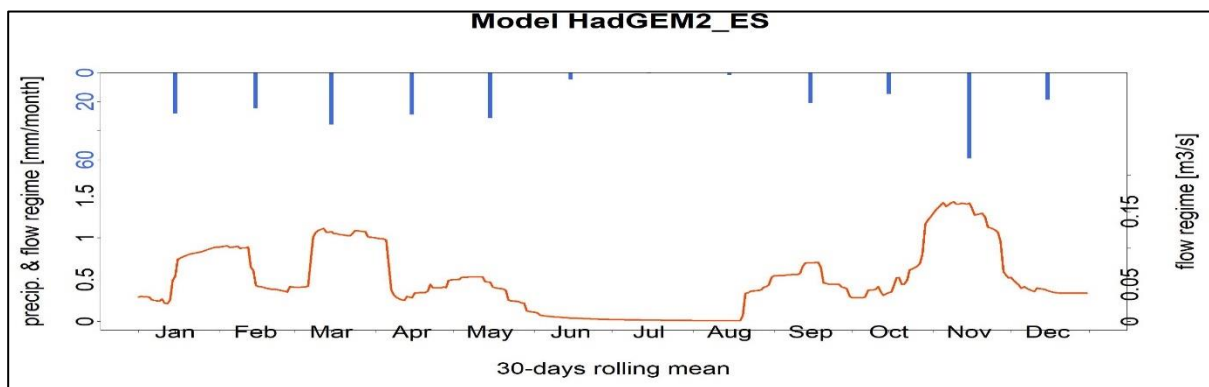


Figure 12 : Résultat des simulations des régimes, pour de l'horizon 2021-2040 model HadGEM2-ES

Résultat presque identique au modèle précédent.

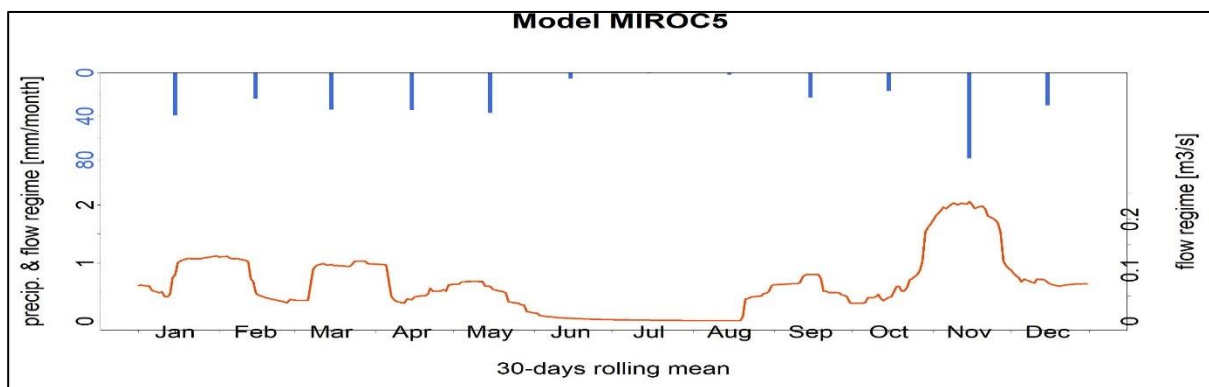


Figure 13 : Résultat des simulations des régimes, pour de l'horizon 2021-2040 model MIROC5

Résultat presque identique au modèle précédent.

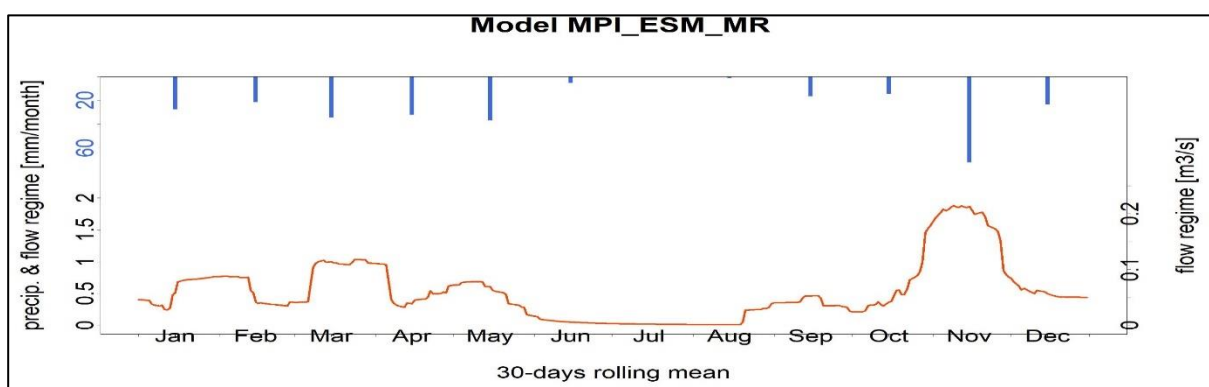


Figure 14 .: Résultat des simulations des régimes, pour de l'horizon 2021-2040 model MPI-ESM-MR

Résultat presque identique au modèle précédent.

Ainsi, on remarque que pratiquement les différents modèles donnent le même type du régime des débits, dont le résultat de simulation donne la même allure, elle est pratiquement identique à l'allure de la période de référence.

On distingue une légère différence de mois de janvier au mois mai, Cette différence dans le régime est due, comme déjà citée plus haut, à la réponse aux précipitations (voir Tableau **1**: Anomalies de précipitations).

On note aussi une baisse dans les régimes d'écoulement malgré les précipitations, ceci est dû à l'intervention humaine dans ce changement de régime, par l'intensification des irrigations et la réalisation des édifices importantes tel que les barrages.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion

Les modèles pluie-débit sont des outils qui permettent de simuler les débits en un point donné d'un cours d'eau, à partir de la connaissance des pluies tombées sur le bassin versant correspondant. Cette modélisation est faite à l'échelle du bassin versant, entité caractéristique de concentration des écoulements, et permet donc de simuler la transformation qu'effectue le bassin sur les pluies pour générer les débits.

Les applications des modèles pluie-débit sont multiples : simulations de crues à court terme, prévision d'étiages, prédétermination des crues et dimensionnement d'ouvrages, mise en évidence du non stationnarité du comportement hydrologique sous l'effet du changement climatique.

De plus les modèles pluie-débit permettent d'allonger les délais de prévision par rapport aux modèles débit-débit.

Dans ce but, pour une meilleure compréhension du comportement hydrologique du bassin versant de l'Oued Sikkak en matière d'écoulement, nous avons utilisé les modèles hydrologiques de simulation pluie-débit dans le passé et dans le future, afin de détecté tout changement climatique.

En premier, nous avons entamé l'application du modèle génie rural au pas du temps journalier (GR4J), dont l'étude statistique des conditions climatiques, met en évidence une variation des précipitations, alors que l'hydrologie a permis d'apprécier l'évolution des lames d'eau écoulées au niveau de la station de jaugeage du bassin versant de l'Oued Sikkak Tlemcen. Les résultats obtenus par l'application du modèle du génie rural (GR4J) montrent une valeur très prometteuse du critère de Nash égal 79.66 %, jugeant les résultats très acceptables.

D'après les simulations par différents modèles, nous avons constaté que le régime des débits mensuels simulés procèdent la même allure, de mois juin au mois de décembre, que celle de la période de référence, mais il y a une légère modification des régimes de mois de janvier au mois mai en réponse aux régimes pluviométrique, la baisse dans les régimes d'écoulement malgré les précipitations, ceci est dû à l'intervention humaine dans ce changement de régime, par l'intensification des irrigations et la réalisation des édifices importantes tel que les barrages. Enfin, ce travail ballait l'ensemble de l'étude pluie-débit de notre bassin versant, en espère qu'il constitue une bonne référence pour les études futures.

BIBLIOGRAPHIE

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) Vulnérabilité des pays du Maghreb face aux changements climatiques : 2000–2001.
- (2) Communications nationales initiales des trois pays (Algérie, Maroc, Tunisie) présentées à la COP7 en octobre 2001.
- (3) Vulnérabilité du Secteur de l'eau Aux Changements Climatiques En Algérie ;
- « **Vulnérabilité aux Changements Climatiques des secteurs nationaux prioritaires** » du projet « GEF/PNUD » établi entre le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE), le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) et le Fonds pour l'Environnement Mondial (FEM) au titre de la « Seconde Communication Nationale sur les Changements Climatiques ».
- (4) **RAKOTONDRABE Felaniaina**, 2007, « Etude de la vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques, modélisation par le logiciel WEAP 21 : cas du bassin versant de Morondava (Sud-ouest de Madagascar), Université d'Antananarivo Ecole Supérieure polytechnique d'Antananarivo- **Madagascar**.
- (5) **TAYEBI**, 2011, « Vulnérabilité des ressources en eaux karstiques en milieu méditerranéen semi-aride : le massif des Béni Snassen (Maroc oriental).
- (6) **IPCC (GIEC)**, Changement climatique 2013. Rapport de synthèse du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, Suisse, 2013.
- (7) **BOUANANI**, 2004, Hydrologie, Transport Solide et Modélisation ; Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérie).
- (8) **GAUME E. . (2002)**. Hydrologie de versant et de bassins versants et modélisation pluie-débit-Cours . DEA en Sciences et Techniques de l'environnement, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées France.
- (9) **GAUME. (2000)**. Hydrologie: Cycle de l'eau et modélisation pluie-débit,. ENPCCEREVE.
- (10) **Mehdi**, 2010 ; la gestion intégrée des ressources en eau par bassin : manuel de formation.
- (11) **BENTAHAR** ,2014 ; gestion qualitative et quantitative de l'eau de la ville de Tlemcen.
- (12) **ARAF ALI** ,2012 ; Application de HEC-ResSim,SWAT,et HEC-HMS dans la gestion de l'eau de la wilaya de Tlemcen.

- (13) MATHEVET . T. (2005).** Quels modèles Pluie-Débit globaux au pas de temps horaire? Développèrent empiriques et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants. Thèse de Doctoral, Cemagref Ecole Nationale du Génie Rural.
- (14) MOUELHI S. . (2003).** Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier . These de Doctoral, Cemagref. Ecole Nationale du Génie Rurale, des Eaux et des Forêts.
- (15)** projet plan d'action national d'adaptation aux changements climatiques ,2007.
- (16) GEF/PNUD,** Vulnérabilité du Secteur de l'eau Aux Changements Climatiques En Algérie.
- (17) Oudin L., 2004.** Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global.Thèse de doctorat: Sciences de l'eau, Paris.
- (18)Christian, J. R. et al. . (2010).** The global carbon cycle in the CCCma earth system model CanESM1: preindustrial control simulation. J. Geophys. Res. (Biogeosciences).
- (19)Martin. (2013).** Downscaling à fine résolution spatiale des températures actuelles et futures par modélisation statistique des sorties ALADIN-climat sur les Alpes-Maritimes (France) .
- (20)Semenov MA (2007)** Development of high resolution UKCIP02-based climate change scenarios in the UK. Agric For Meteorol .
- (21) Semenov MA, Brooks RJ, Barrow EM, Richardson CW (1998)** Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates.

Sites web :

Site web du SEI – B : www.seib.org

Site web WEAP21 : www.weap21.org

web de l'eau douce : Publication _ FSA_9 : www.cc.gc.ca/water/fr/info/pubs/FS/f_FSA9.htm

www.eau-de-pluie.com.

ANNEXE

Annexe :

Annexe 1 : moyennes annuelles des débits pour les différentes stations.

	Ain Youcef	Meffrouch	Pierre de Chat
Année	moy annuel	moy annuel	moy annuel
1980	0.70	0.00	6.96
1981	0.36	0.02	2.11
1982	0.26	0.00	1.29
1983	0.15	0.00	0.82
1984	0.16	0.00	1.00
1985	0.40	0.01	2.64
1986	0.61	0.00	5.70
1987	0.29	0.00	0.86
1988	0.17	0.00	2.16
1989	0.18	0.05	1.78
1990	0.26	0.00	3.15
1991	0.46	0.00	1.68
1992	0.26	0.00	1.52
1993	0.26	0.00	0.68
1994	0.20	0.12	5.84
1995	0.44	0.02	1.85
1996	0.49	0.00	1.39
1997	0.39	0.01	1.49
1998	0.42	0.00	1.19
1999	0.13	0.02	0.24
2000	0.20	0.00	1.20
2001	0.66	0.04	1.94
2002	3.27	0.00	1.52
2003	3.30	0.01	1.76
2004	0.22	0.05	0.49
2005	0.30	0.01	0.16
2006	0.21	0.00	0.20
2007	0.09	0.33	0.11
2008	1.19	0.00	5.22
2009	0.49	0.00	2.10
2010	0.32	0.02	0.99

Annexe 2 : moyennes saisonnières des débits pour la station Ain Youcef et Meffrouch

Année	Station Ain Youcef				Station Meffrouch			
	Automne	Hiver	Printemps	Été	Automne	Hiver	Printemps	Été
1980	1.47	17.14	7.19	2.05	0.01	0.21	0.02	0.00
1981	1.69	3.22	3.00	0.53	0.01	0.00	0.02	0.00
1982	1.49	2.94	0.72	0.01	0.00	0.02	0.04	0.00
1983	0.06	2.03	1.07	0.11	0.00	0.03	0.01	0.00
1984	2.27	1.19	0.53	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00
1985	0.04	6.07	4.45	0.02	0.00	0.00	0.24	0.00
1986	11.98	8.57	2.03	0.21	0.00	0.16	0.01	0.00
1987	1.07	2.01	0.28	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00
1988	0.24	0.38	8.02	0.01	0.00	0.00	0.26	0.00
1989	0.75	4.14	1.82	0.42	0.00	0.04	0.00	0.00
1990	0.28	1.67	10.65	0.00	0.00	0.03	0.95	0.00
1991	0.77	0.82	3.90	1.21	0.00	0.00	0.21	0.00
1992	0.99	1.47	3.33	0.27	0.00	0.00	0.23	0.00
1993	0.08	2.38	0.27	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00
1994	0.34	0.68	22.34	0.00	0.00	0.00	0.58	0.00
1995	0.40	3.52	3.01	0.46	0.00	0.20	0.34	0.01
1996	1.66	1.76	1.93	0.21	0.00	0.01	0.00	0.00
1997	2.81	2.53	0.60	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
1998	0.01	1.02	3.58	0.15	0.00	0.02	0.38	0.00
1999	0.05	0.52	0.28	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00
2000	1.88	1.40	1.08	0.46	0.05	0.29	0.03	0.00
2001	1.43	2.29	2.37	1.66	0.03	0.00	0.04	0.00
2002	0.63	2.49	1.49	1.44	0.03	0.34	0.01	0.00
2003	0.30	1.87	3.34	1.53	0.00	0.07	0.08	0.00
2004	0.10	0.84	1.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.00
2005	0.12	0.10	0.18	0.23	0.00	0.03	0.00	0.00
2006	0.19	0.01	0.61	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00
2007	0.37	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2008	5.54	12.29	2.44	0.60	0.02	1.18	0.07	0.00
2009	0.50	3.67	3.32	0.92	0.00	0.01	0.16	0.00
2010	0.33	0.78	1.86	0.99	0.00	0.01	0.02	0.00
moy	1.29	2.90	3.12	0.44	0.00	0.10	0.12	0.00

Annexe 2 : moyennes saisonnières des débits pour la station Pierre de Chat. (Suite).

	Station de Pierre de Chat			
Année	Automne	Hiver	Printemps	Été
1980	1.47	17.14	7.19	2.05
1981	1.69	3.22	3.00	0.53
1982	1.49	2.94	0.72	0.01
1983	0.06	2.03	1.07	0.11
1984	2.27	1.19	0.53	0.00
1985	0.04	6.07	4.45	0.02
1986	11.98	8.57	2.03	0.21
1987	1.07	2.01	0.28	0.06
1988	0.24	0.38	8.02	0.01
1989	0.75	4.14	1.82	0.42
1990	0.28	1.67	10.65	0.00
1991	0.77	0.82	3.90	1.21
1992	0.99	1.47	3.33	0.27
1993	0.08	2.38	0.27	0.00
1994	0.34	0.68	22.34	0.00
1995	0.40	3.52	3.01	0.46
1996	1.66	1.76	1.93	0.21
1997	2.81	2.53	0.60	0.00
1998	0.01	1.02	3.58	0.15
1999	0.05	0.52	0.28	0.12
2000	1.88	1.40	1.08	0.46
2001	1.43	2.29	2.37	1.66
2002	0.63	2.49	1.49	1.44
2003	0.30	1.87	3.34	1.53
2004	0.10	0.84	1.00	0.00
2005	0.12	0.10	0.18	0.23
2006	0.19	0.01	0.61	0.00
2007	0.37	0.05	0.00	0.00
2008	5.54	12.29	2.44	0.60
2009	0.50	3.67	3.32	0.92
2010	0.33	0.78	1.86	0.99
moy	1.29	2.90	3.12	0.44

Liste Des Tableaux

CHAPITRE II

<u>TABLEAU 1 : VALEUR DES PARAMETRES DU MODELE GR2M OBTENUES SUR UN LARGE ECHANTILLON DE BASSINS VERSANTS (ANDREASSIAN ET AL., 2007).</u>	<u>37</u>
---	-----------

CHAPITRE III

<u>TABLEAU-1 : REPARTITION ALTIMETRIQUE DU BASSIN VERSANT DE SIKKAK</u>	<u>53</u>
<u>TABLEAU-2 : CLASSIFICATION DU RELIEF DE L'O.R.S.T.O.N</u>	<u>54</u>
<u>TABLEAU -3 : CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT SEKKAK.</u>	<u>62</u>
<u>TABLEAU -4: CARACTERISTIQUES DES STATIONS PLUVIOMETRIQUES</u>	<u>62</u>
<u>TABLEAU -5: VARIATION DE PLUVIOMETRIE ANNUELLE EN FONCTION DE L'ALTITUDE DE STATIONS DE BASSIN SIKKAK</u>	<u>65</u>
<u>TABLEAU -6: TEMPERATURE MENSUELLE ET ANNUELLE DE STATIONS</u>	<u>68</u>
<u>TABLEAU -7: CLASSE DE L'INDICE D'ARIDITE</u>	<u>70</u>
<u>TABLEAU -8 : INDICE D'ARIDITE ANNUEL (1980- 2010)</u>	<u>70</u>
<u>TABLEAU -9: DEBITS ANNUELS Q (M³/S) AU STATION PIERRE DE CHAT DU BASSIN D' OUED SIKKAK</u>	<u>72</u>

CHAPITRE IV

<u>TABLEAU 1 : ANOMALIES DE PRECIPITATIONS APPLIQUEES AUX DONNEES PAR LARS WG</u>	<u>78</u>
<u>TABLEAU 2 : ANOMALIES DE TEMPERATURES MINIMALES APPLIQUEES AUX DONNEES PAR LARS WG . 79</u>	<u>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</u>
<u>TABLEAU 3 : ANOMALIES DE TEMPERATURES MAXIMALES APPLIQUEES AUX DONNEES PAR LARS WG</u>	<u>80</u>

Liste des figures

Chapitre I

<u>FIGURE -1: APPROCHE SYSTEMIQUE DE LA VULNERABILITE</u>	<u>14</u>
---	-----------

Chapitre II

<u>FIGURE -1 : SCHEMA DE LA STRUCTURE DU MODELE GR2M.</u>	<u>35</u>
--	-----------

<u>FIGURE- 2 : SCHEMA DE LA STRUCTURE DU MODELE GR4J.</u>	<u>39</u>
--	-----------

Chapitre III

<u>FIGURE -1 : BASSINS VERSANTS DE L'ALGERIE.....</u>	<u>49</u>
---	-----------

<u>FIGURE -2 : SITUATION GEOGRAPHIQUE DU BASSIN DE LA TAFNA DANS L'ENSEMBLE ORANIE CHOTT CHERGUI.</u>	<u>50</u>
--	-----------

<u>FIGURE -3 : SITUATION DU BASSIN VERSANT DE L'OUED SIKKAK.</u>	<u>59</u>
---	-----------

<u>FIGURE -4 : RESEAUX HYDROGRAPHIQUE D'OUED SIKKAK</u>	<u>55</u>
---	-----------

<u>FIGURE -5 : CARTE LITHOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT D'OUED SIKKAK.....</u>	<u>56</u>
--	-----------

<u>FIGURE -6: POSITION DES BARRAGES DE L'OUED SIKKAK. (A.N.R.H)</u>	<u>59</u>
---	-----------

<u>FIGURE -7 : LOCALISATION DES STATIONS PLUVIOMETRIQUES, HYDROMETRIQUE DANS LE BASSIN DE L'OUED SIKKAK.....</u>	<u>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.61</u>
--	--------------------------------------

<u>FIGURE -8 : PRECIPITATIONS MOYENNES ANNUELLES AUX STATIONS PLUVIOMETRIQUES DU BASSIN DE L'OUED SIKKAK</u>	<u>63ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</u>
--	--------------------------------------

<u>FIGURE -9 : VARIATION INTERANNUELLE DES PRECIPITATIONS ANNUELLES DE LA STATION DE "PIERRE DE CHAT</u>	<u>63</u>
--	-----------

<u>FIGURE -10 : VARIATION INTERANNUELLE DES PRECIPITATIONS ANNUELLES DE LA STATION DE MEFFROUCHE</u>	<u>64</u>
--	-----------

<u>FIGURE -11 : VARIATION INTERANNUELLE DES PRECIPITATIONS ANNUELLES DE LA STATION DE BEN SEKRAH</u>	<u>64</u>
--	-----------

<u>FIGURE -12 : CARTE EN ISOHYETE DE BASSIN SIKKAK</u>	<u>65</u>
--	-----------

<u>FIGURE -13 : VARIATIONS MENSUELLES DE LA PLUVIOMETRIE DANS LE BASSIN DE L'OUED SIKKAK</u>	<u>66</u>
--	-----------

<u>FIGURE -14: VARIATION SAISONNIERE DES PRECIPITATIONS DANS LE BASSIN DE L'OUED SIKKAK</u>	<u>68</u>
---	-----------

<u>FIGURE -15. LES TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES A LA STATION TLEMCEN (1980-2010).....</u>	<u>69</u>
---	-----------

<u>FIGURE -16 : DEBITS ANNUELS Q (M3/s) AU STATION PIERRE DE CHAT DU BASSIN D OUED SIKKAK</u>	<u>71</u>
---	-----------

<u>FIGURE -17 : HISTOGRAMME DU DEBIT MOYEN MENSUEL POUR A LA STATION PIERRE DE CHAT</u>	<u>73ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</u>
---	--------------------------------------

Chapitre IV

<u>FIGURE -1 : SORTIE DU MODELE GR4J</u>	<u>81</u>
<u>FIGURE- 2 : RESULTAT DES SIMULATION PLUIE ET DEBIT QUOTIDIEN DE GR4J,POUR LA PERIODE DE REFERENCE</u>	<u>82</u> ERREUR !
SIGNET NON DEFINI.	
<u>FIGURE -3 : RESULTAT DES SIMULATION REGIMES DE GR4J,POUR LA PERIODE DE REFERENCE 1980-2010.....</u>	<u>83</u>
<u>FIGURE -4 : RESULTAT DES SIMULATIONS DES DEBITS JOURNALIERS, HORIZON 2021-2040 PAR LE MODEL EC-EARTH</u>	<u>84</u> ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
<u>FIGURE -5 : RESULTAT DES SIMULATIONS DES DEBITS JOURNALIERS, HORIZON 2021-2040 PAR LE MODEL GFDL CM3</u>	<u>85</u>
<u>FIGURE -6 : RESULTAT DES SIMULATIONS DES DEBITS JOURNALIERS, HORIZON 2021-2040 PAR LE MODEL HADGEM2 ES ...</u>	<u>85</u>
<u>FIGURE -7 : RESULTAT DES SIMULATIONS DES DEBITS JOURNALIERS, HORIZON 2021-2040 PAR LE MODEL MIROC5</u>	<u>86</u> ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
<u>FIGURE -8 : RESULTAT DES SIMULATIONS DES DEBITS JOURNALIERS, HORIZON 2021-2040 PAR LE MODEL MPI-ESM-MR ...</u>	<u>86</u>

