

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université 20 Août 1955 Skikda

Faculté des Sciences

Département des Sciences Agronomiques



Filière : Sciences Agronomiques

Option : Aménagement Hydro-Agricole

Mémoire de fin d'études :

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Sciences Agronomiques

Thème :

**Modélisation de la relation pluie débit : Cas des bassins versants
Algériens**

Présenté par :

- ZEROUAL Aya .
- BOUCHAALA Rayane.

Membres de Jury:

| | | | |
|---------------------------|-------|------------------|-------------------------------------|
| Mr : HEDDAM Salim | (Pr) | Président | Université du 20 Août 1955 – Skikda |
| Mr : HADDAD Saddek | (MAA) | Examineur | Université du 20 Août 1955 – Skikda |
| Mr : HEBAL Aziz | (MCA) | Promoteur | Université du 20 Août 1955 – Skikda |

Année universitaire : 2021-2022

Nom et prénom : Zeroual Aya.

Nom et prénom : Bouchaala Rayane.

Titre : Modélisation de la relation pluie débit : Cas des bassins versants Algériens.

Résumé :

Les bassins versants Algériens ayant des pluies généralement irrégulières et parfois torrentiels, sont caractérisés par l'absence de réseaux de mesures hydrologiques et notamment hydrométriques. Par conséquent, plusieurs modèles transformant les pluies en débits ont été développés. Dans ce contexte, cette étude a été élaborée en utilisant les modèles GR2M, MLR et MLPNN. Nous avons appliqué ces modèles sur des bassins versants situés au Nord-Est de l'Algérie au pas de temps mensuel. Les résultats de simulation sont jugés bons lorsque la globalité des stations donne des coefficients de R supérieur à 80% et du critère de Nash plus de 50%. L'application sur les bassins versants et l'évaluation des performances de ces trois modèles a montré que le modèle le plus performant est le GR2M, en deuxième position vient le modèle MLPNN et enfin le modèle MLR, qui donne des résultats très faible moins de dix pourcent. Nous pouvons alors conclure, que la relation Pluit-débit pour la région Nord-Est de l'Algérie, est peut être modélisée mieux avec le modèle GR2M par rapport à ceux MLR et MLPNN. Ce dernier peut constituer une vraie alternative.

ملخص :

تتميز أحواض المصبب الجزائرية التي تسودها أمطار غير منتظمة و غزيرة في بعض الأحيان بغياب شبكات القياسات الهيدرولوجية و خاصة الهيدرومترية. لذلك تم تطوير العديد من النماذج التي تحول هطول الأمطار إلى تصريفات. في هذا السياق، تم إجراء هذه الدراسة باستخدام نماذج GR2M و MLR و MLPNN. قمنا بتطبيق هذه النماذج على أحواض المصبب الواقعة في شمال شرق الجزائر في خطوة زمنية شهرية. تعتبر نتائج المحاكاة جيدة عندما تعطي جميع المحطات معاملات R أكبر من 80% و معيار Nash أكثر من 50%. أظهر التطبيق على أحواض المصبب وتقييم أداء هذه النماذج الثلاثة أن النموذج الأكثر كفاءة هو GR2M، في المرتبة الثانية يأتي نموذج MLPNN، وأخيراً نموذج MLR الذي يعطي نتائج ضعيفة جداً أقل من عشرة بالمائة. يمكننا بعد ذلك أن نستنتج أن علاقة تدفق الأمطار للمنطقة الشمالية الشرقية من الجزائر ربما تكون أفضل من خلال نموذج GR2M مقارنة بنموذج MLR و MLPNN هذا الأخير يمكن أن يكون بديلاً حقيقياً.

Abstract :

The Algerian watersheds, which have generally irregular and sometimes torrential rainfall, are characterized by the absence of hydrological and especially hydrometric measurement networks consequently, several models transforming rainfall into flow have been developed. In this context, this study was developed using the GR2M, MLR and MLPNN models. We applied these models on catchments located in the North-East of Algeria at monthly time steps. The simulation results are considered good when the globality of the stations gives coefficients of R higher than 80% and Nash criteria above 50%. The application on the catchment areas and the evaluation of the performances of these three models showed that the most powerful model is GR2M, in second position comes the MLPNN model, and finally the MLR model, which gives very weak results less than ten percent. We can then conclude that the rainfall-runoff relationship for the North-East region of Algeria is perhaps better modelled with the GR2M model than with the MLR and MLPNN models. This latter may constitute a real alternative.

Mots clés (06): Modèle, Pluit-débit, GR2M, bassins versants, Nord-Est de l'Algérie, pas de temps mensuel.

الكلمات المفتاحية (06): نموذج، تساقط-تدفق، GR2M، أحواض المصبب، شمال شرق الجزائر، خطوة زمنية شهرية.

Key words (06): Model, rainfall-runoff, GR2M, catchments, North-East of Algeria, monthly time step.

Remerciement

Avant tout, nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné le courage, la patience et la santé pour faire ce travail dans les meilleures circonstances. Car sans son aide et sa gentillesse, rien de tout cela n'aurait été possible.

*Nous souhaitons remercier en premier lieu notre encadreur **Mr. HEBAL AZIZ**, pour sa disponibilité, ses remarques constructives, ses critiques pertinentes qui nous a permis d'améliorer la qualité de ce travail et pour sa pédagogie.*

*Remerciements spéciaux à **DAJF NOUREDDINE** pour son aide, sa disponibilité, sa compréhension et sa patience ainsi les encouragements qu'il nous a apporté à réussir de ce travail.*

Nos respects aux membres du jury qui nous feront l'honneur d'apprécier ce travail élaboré.

Nos remerciements vont aussi à tous nos enseignants du département Agronomie qui ont contribué à notre formation.

Enfin nous tenons à remercier chaleureusement nos chères familles et toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je tiens à dédier ce travail

À ma chère mère, Taïbi Fatiha, cher père Faziid , pour leurs sacrifices et pour tous les encouragements durant toutes ces années d'étude, je vous aime, qu'Allah vous garde pour nous.

À mes frères, Raid, Fares et sa femme, Ainsi qu'à ma sœur Amira.

À mon cher Walid

À ma grand-mère que Dieu la protège.

À Daïf Hourddine pour son grand soutien, son aide, merci beaucoup.

À tous mes professeurs de la spécialité « Aménagement hydro-agricole».

À tous Mes amies, mes collègues, et mon binôme Rayane.

À toute personne qui a espéré ma réussite et attendu l'achèvement de ce travail.

AQA

Dédicace

Je tiens à dédier ce travail :

- *À mes chers **Parents** qui ont toujours été là pour moi et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et persévérance.*
- *À mes **Grands-mères** pour leur amour, que Dieu le protège.*
- *À mes chers frères **Mouad** et **Wassim**.*
- *À toutes mes **Tantes** et leurs petites familles.*
- *À tous mes **Amis Proches** et mon binôme **Aya**.*
- *À tous ceux qui m'ont appris une lettre, et spécialement à monsieur **Yassin Daif** pour être mon superviseur, pour son soutien inconditionnel, ses encouragements et sa motivation.*
- *À mes familles **Mechhoud** et **Bouchaala**.*
- *À tous ceux qui me sont chers.*

*Un grand **Merci** à vous tous*

RAYANE

SOMMAIRE

Remerciements

Dédicace

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale.....1

CHAPITRE I : LA MODELISATION EN HYDROLOGIE

I.1. Introduction.....3

I.2. Cycle de l'eau.....3

I.3. Conception de la modélisation.....5

I.3.1. Objectifs de la modélisation en hydrologie.....6

I.3.2. Typologie des modèles hydrologiques.....6

I.3.2.1. Modèles stochastiques.....7

I.3.2.2. Modèles déterministes.....7

I.3.2.3. Modèles à base physique.....7

I.3.2.4. Modèles empiriques.....8

I.3.2.5. Modèles analytiques.....8

I.3.2.6. Modèles conceptuels.....9

I.3.2.7. Modèles globaux.....9

I.3.2.8. Modèles basés sur l'intelligence artificielle.....9

I.3.3. Mise au point du modèle.....11

I.3.3.1. Le calage des paramètres.....11

I.3.3.2. La validation du modèle.....12

I.3.3.3. L'exploitation et l'interprétation.....13

I.3.4. Choix du modèle13

I.3.4.1. La problématique.....13

| | |
|---|----|
| I.3.4.2. La possibilité de détermination des paramètres | 14 |
| I.3.4.3. La possibilité de simulation..... | 14 |
| I.3.4.4. La facilité d'utilisation..... | 14 |
| I.3.5. Applications des modèles..... | 14 |

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE LA RÉGION D'ÉTUDE

| | |
|--|----|
| II.1.Introduction..... | 16 |
| II. 2. Situation Géographique..... | 16 |
| II.3. Aperçu topographique..... | 16 |
| II.3.1. Les plaines littorales..... | 16 |
| II.3.2. L'Atlas tellien..... | 17 |
| II.3.3. Les bassins intérieurs..... | 17 |
| II.3.4. Les hautes plaines..... | 17 |
| II.3.5. L'Atlas Saharien..... | 17 |
| II.4. Aperçu géologique..... | 18 |
| II.5. Les sols..... | 19 |
| II.6. Aperçu climatique et précipitation..... | 20 |
| II.7. Le couvert végétal..... | 21 |
| II.8. Le réseau hydrographique..... | 22 |
| II.9.Ressources hydriques..... | 22 |
| II.10. Présentation des bassins versant étudiés..... | 22 |
| II.10.1. Caractéristiques des bassins versant étudiés..... | 23 |
| II.10.1.1. Bassin versant des Côtiers Algérois..... | 23 |
| II.10.1.2. Bassin versant des Côtiers Constantinois..... | 24 |
| II.10.1.3. Bassin versant d'El-Hodna..... | 24 |
| II.10.1.4. Bassin versant des Hauts Plateaux..... | 24 |
| II.10.1.5. Bassin versant d'Isser..... | 25 |
| II.10.1.6. Bassin versant du Kebir Rhumel..... | 25 |

| | |
|---|----|
| II.10.1.7. Bassin versant de la Medjerda..... | 25 |
| II.10.1.8. Bassin versant de la Seybouse..... | 26 |
| II.10.1.9. Bassin versant de la Soummam..... | 26 |
| II.11. Caractéristiques morphométriques des bassins versants étudiés..... | 27 |

CHAPITRE III : PRÉSENTATION ET TRAITEMENT DES DONNÉES

| | |
|---|----|
| III.1. Introduction..... | 29 |
| III .2. Données utilisées..... | 29 |
| III .2.1. Données pluviométriques..... | 29 |
| III .2.2. Données hydrométriques..... | 31 |
| III .2.3. Données climatiques..... | 32 |
| III.3. Comblement des lacunes d'observations..... | 34 |
| III.4. Les données finales..... | 35 |

CHAPITRE IV : MATÉRIELS ET MÉTHODES

| | |
|--|----|
| IV.1. Introduction..... | 37 |
| IV.2. Présentation des Modèles Utilisée..... | 37 |
| IV.2.1. Modèle GR2M..... | 37 |
| IV.2.1.1. Description..... | 37 |
| IV.2.1.2. Le réservoir sol..... | 37 |
| IV.2.1.3. La fonction de production et la fonction de transfert..... | 38 |
| IV.2.1.4. Hiérarchisations des différentes étapes..... | 38 |
| IV.2.2. Les réseaux de neurones artificiels (MLPNN)..... | 41 |
| IV.2.2.1. Généralités..... | 41 |
| IV.2.2.2. Choix d'un réseau de neurones artificiel..... | 42 |
| IV.2.2.3. Apprentissage des réseaux de neurones..... | 43 |
| IV.2.3. La Régression linéaire multiple (MLR)..... | 44 |
| IV.3. Mise en travail..... | 45 |

| | |
|---|----|
| IV.3.1. Critères d'évaluation de la qualité de modèles..... | 45 |
| IV.3.1.1. Critère de Nash–Sutcliffe (NSE)..... | 45 |
| IV.3.1.2. Coefficient de corrélation (R)..... | 46 |
| IV.3.1.3. La racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)..... | 46 |
| IV.3.1.4. L'erreur moyenne absolue (MAE)..... | 46 |
| IV.4. Les logiciels utilisés..... | 47 |
| IV.4.1. Logiciel STATISTICA..... | 47 |
| IV.4.2. La Feuille ExcelGR2M..... | 48 |

CHAPITRE V : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

| | |
|--|-----------|
| V.1. Introduction..... | 49 |
| V.2. Résultats obtenus par le modèle GR2M..... | 49 |
| V.3. Résultats obtenus par le modèle Régression linéaire multiple (MLR)..... | 53 |
| V.4. Résultats de modèle de réseaux de neurones artificiels (MLP)..... | 56 |
| V.5. Comparaison des modèle (GR2M, MLR, MLPNN)..... | 60 |
| Conclusion générale..... | 63 |
| Références Bibliographiques..... | 65 |

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

| | |
|--|----|
| Figure I.1. Le cycle de l'eau..... | 4 |
| Figure I.2. Représentation d'un bassin versant | 4 |
| Figure I.3. Les composants d'un modèle hydrologique (Gnouma , 2006)..... | 5 |
| Figure I.4. Les déférentes approches de modélisation..... | 11 |

CHAPITRE II

| | |
|---|----|
| Figure II.1. Le relief de l'Est algérien (Landsat)..... | 18 |
| Figure II.2. Carte des sols dominants de la région d'étude (FAO, 2005, modifiée)..... | 20 |
| Figure II.3. Situation géographique des bassins étudiés..... | 23 |

CHAPITRE IV

| | |
|--|----|
| Figure IV.1. Résultats en termes de meilleurs calages pour l'ensemble des données sur les 41 bassins pour les sous populations de pluie, d'ETP et de WHC (selon Ardoin, 2003)..... | 38 |
| Figure IV.2. Architecture du Modèle GR2M..... | 41 |
| Figure VI.3. Mise en correspondance entre le neurone biologique et le neurone artificiel (Haykin, 2009)..... | 42 |
| Figure IV.4. Structure d'un modèle de réseau neuronal artificiel de type MLP..... | 42 |
| Figure IV.5. L'interface de STATISTICA..... | 47 |
| Figure IV.6. Feuille Excel GR2M..... | 48 |

CHAPITRE V

| | |
|--|----|
| Figure.V.1. Hydrogramme pluie-débit de la Station 031601 : a) phase calage b) phase validation | 51 |
| Figure.V.2. Hydrogramme pluie-débit de la Station 021606 : a) phase calage b) phase validation..... | 52 |
| Figure.V.3. Résultats obtenus du modèle MLR de la station 031601 : a) phase calage b) phase validation..... | 54 |
| Figure.V.4. Résultats obtenus du modèle MLR de la station 021606 : a) phase calage b) phase validation | 55 |
| Figure.V.5. Résultats obtenus du modèle de réseau de neurones de la station 031601 :a) phase calage b) phase validation | 58 |
| Figure.V.6. Résultats obtenus du modèle de réseau de neurones de la station 021606 : a) phase calage b) phase validation | 59 |

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableaux I.1. Les états et les situations de l'eau dans le cycle hydrologique (Laborde, 2000)...3

CHAPITRE II

Tableau II.1. Caractéristiques des bassins versants étudiés.....28

CHAPITRE III

Tableau III.1. Les coordonnées et les caractéristiques fonctionnelles des séries de données pluviométriques utilisées.....30

Tableau III.2. Caractéristiques des stations hydrométriques étudiées.....31

Tableau III .3. Caractéristiques des séries de données climatiques.....34

Tableau III .4. Les codes des stations (pluviométriques et hydrométriques) utilisées et le nombre de leurs lacunes.....35

Tableau III.5. Liste des séries de données finales utilisées dans cette étude.....36

CHAPITRE IV

Tableau IV.1. Qualité des modèles en fonction des valeurs du critère de Nash.....46

Tableau. IV.2: Qualité des modèles en fonction des valeurs du critère de R.....46

CHAPITRE V

Tableau V.1.Paramètres de calibration du modèle GR2M.....49

Tableau V.2.Valeurs des critères d'évaluation du modèle GR2M.....50

Tableau V.3. Résultats obtenue par le modèle MLR.....53

Tableau V.4. Résultats obtenues par le modèle réseau Neurones.....56

Tableaux V.5. Comparaison des performances entre les meilleurs modèles (GR2M, MLR, MLPNN).....61

LISTE DES ABREVIATIONS

AEP = Alimentation en Eau Potable

ANN = Artificial Neural Networks = Réseaux de neurones artificiels

ANRH = Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

ET₀ = L'évapotranspiration de référence

ETP = L'évapotranspiration potentielle

ETR = L'évapotranspiration réelle

FAO = Food and Agriculture Organization = Organisation pour l'alimentation et l'agriculture

GR = Génie Rural

GR2M = Génie Rural à pas de temps Mensuel à 2 paramètres

GR3J = Génie Rural à pas de temps Journalier à 3 paramètres

GR4J = Génie Rural à pas de temps Journalier à 4 paramètres

GRNN = Réseau de neurones à fonction de régression générale

MAE = Mean Absolute Error = Erreur moyenne absolue

MLP = Multi-Layer Perceptron = Perceptron multicouche

MLPNN = Réseau de neurones à fonction perceptron multicouche

MLR = Multiple linear regression = Régression linéaire multiple

NSE = Nash Sutcliffe criterion = Critère de Nash Sutcliffe

P = Précipitations

PH = Potentiel Hydrogène

Q = Débits

R = Coefficient de corrélation

RBFANN = Réseau de neurones à fonction de base radial

RMSE = Root Mean Square Error = Erreur moyenne quadratique

ONM = Office Nationale de Météorologie

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'hydrologie peut être définie comme étant la science qui étudie le cycle de l'eau dans la nature ainsi que son évolution à la surface de la terre et dans le sol. Elle est liée à des sciences telles que : l'hydraulique, la statistique mathématique, la mécanique des sols, la géographie physique, etc.... L'étude hydrologique est indispensable pour les projets d'irrigations, de distribution d'eau, de drainage et de protection contre les crues et autres, car elles offrent une évaluation des débits faibles, moyens et extrêmes (étiage, apport et crues) pour le dimensionnement, la sécurité et la bonne exploitation des ouvrages hydrauliques.

Les apports sont directement liés aux aléas climatiques et au régime hydrologique du bassin versant tandis que la demande est liée aux stratégies de planification et de gestion urbaine, agricole et industrielle.

Pouvoir simuler le comportement hydrologique d'un bassin versant est un enjeu majeur de l'hydrologie moderne, auquel tente de répondre la modélisation pluie-débit. Il s'agit, à partir de la connaissance de la pluie tombée sur le bassin, de reproduire la réponse en débit du bassin, à l'aide d'un modèle.

Les modèles hydrologiques sont des outils d'une importance capitale pour l'étude et la gestion des ressources en eau et résoudre les problèmes liés à l'eau. La modélisation de la relation pluie-débit est très importante pour les aménageurs et décideurs, car elle permet de prévoir certaines catastrophes naturelles liées à l'eau telles que les inondations et les sécheresses et de prendre les mesures nécessaires. Elle joue également un rôle essentiel dans la conception et l'exploitation des ouvrages hydrauliques et les divers projets de ressources en eau.

Les premiers modèles hydrologiques qui dataient de la fin des années 1950, supposaient des lois simples et linéaires entre la pluie, l'évapotranspiration potentielle et les débits (**Crawford et al. 1966**). Ils ont été suivis par d'autres versions plus performantes, ainsi que par d'autres modèles distributifs au début des années 1970 qui apparaissaient plus satisfaisants car ils prenaient en considération la variabilité spatiale de certaines caractéristiques et des forçages atmosphériques (**Roche et al. 2012 ; Nourani et al. 2014a**). Bien que cette avancée ait déclenché un engouement des chercheurs pour la modélisation mathématique,

Ce mémoire s'inscrit dans le domaine de la modélisation de la transformation de la pluie en débit dans L'Est algérien. Notre objectif principal est de modéliser la relation pluie- débit à l'aide des modèles conceptuels et à boîte noire (GR2M, MLPNN et MLR), et de trouver les paramètres optimaux de chaque modèle qui permettent une meilleure simulation afin d'effectuer une bonne prévision.

Notre travail est divisé en cinq chapitres avec une introduction et conclusion général.

Le premier chapitre est dédié à l'étude du cycle de l'eau avec la description de la modélisation en hydrologie, des différentes classes de modèles et leurs diverses applications.

Le deuxième chapitre porte sur l'étude des bassins versants, l'unité de référence spatiale en hydrologie. Cette étude est nécessaire pour connaître la caractéristique physique de cette entité et les facteurs influençables sur la problématique étudiée. Dans cette partie nous avons présenté la zone d'étude du point de vue géographique, topographique et climatique.

La troisième partie est consacrée à la présentation de la base de données collectées et utilisées au niveau de la région étudiée, ainsi l'analyse statistique et hydrologique de ces dernières (le comblement de lacunes, l'homogénéisation, l'analyse en composante principale...).

Le quatrième chapitre «matériels et méthodes», présentera les logiciels utilisés ainsi qu'une synthèse sur les différents modèles appliqué pour la modélisation.

Les résultats de la modélisation obtenus par les trois modèles GR2M, MLPNN et MLR, seront présentés, discutés et comparés au niveau du cinquième chapitre.

Et nous terminerons ce travail par une conclusion générale.

CHAPITRE I

LA MODELISATION EN HYDROLOGIE

CHAPITRE I : LA MODELISATION EN HYDROLOGIE

I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous essayerons de rappeler la conception de la modélisation et leurs objectifs dans le domaine hydrologique, et de mettre en évidence ses application et les différents modèles pluie-débit, et nous présenterons brièvement comment les choisir. Mais avant d’entamer cette revue, il est utile de donner un bref rappel sur le cycle de l’eau qui est la base de toute modélisation hydrologique.

I.2. Cycle de l’eau

Le cycle hydrologique ou cycle de l'eau est un modèle qui représente le parcours de l'eau entre les grands réservoirs. Ces réservoirs peuvent être sous forme d'eau liquide, solide ou de vapeur d'eau sur Terre. On a par exemple les océans, l'atmosphère, les lacs, les cours d'eau, les nappes d'eaux souterraines et les glaciers (**Tableau I.1**).

Tableaux I.1. Les états et les situations de l'eau dans le cycle (Laborde, 2000)

| Etats | Principaux stocks |
|--------------------------------|--|
| Vapeur nuages, brouillards. | Humidité atmosphérique, évapotranspiration |
| liquide | Océans, mers, lacs, eaux souterraines |
| solide | Glaciers, manteaux neigeux, calottes polaires |

Le moteur de ce cycle est l'énergie solaire qui, en favorisant l'évaporation de l'eau, entraîne tous les autres échanges. Le cycle de l'eau est composé des phénomènes d'évaporation, de l'évapotranspiration, des précipitations, de ruissellement, d'infiltration et de percolation (**Figure I.1**).

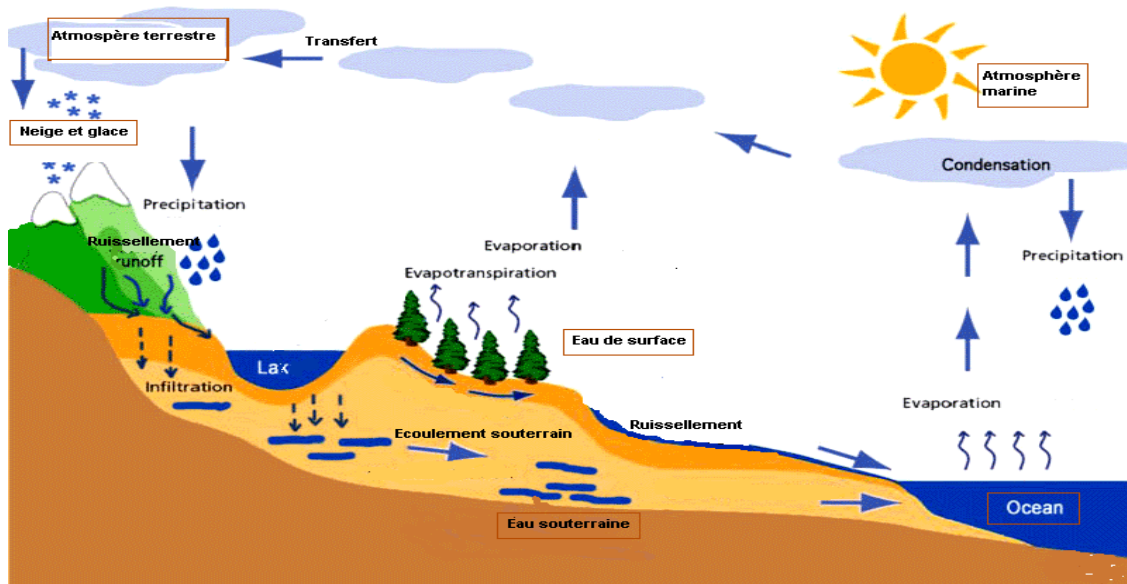


Figure I.1. Le cycle de l'eau

L'hydrologie étudie généralement le cycle de l'eau à l'échelle du bassin versant. Un bassin versant est une portion de territoire dont l'ensemble des eaux convergent vers un même point de sortie appelé exutoire qui peut être la mer, l'océan, une rivière, etc. Le bassin versant est limité par des frontières naturelles appelées lignes de crêtes ou lignes de partage des eaux (Figure I.2).

De part et d'autre de ces lignes de crêtes s'écoulent les eaux des précipitations et des sources, ainsi que tous les éléments dissous ou en suspension tels que les sédiments et les pollutions.

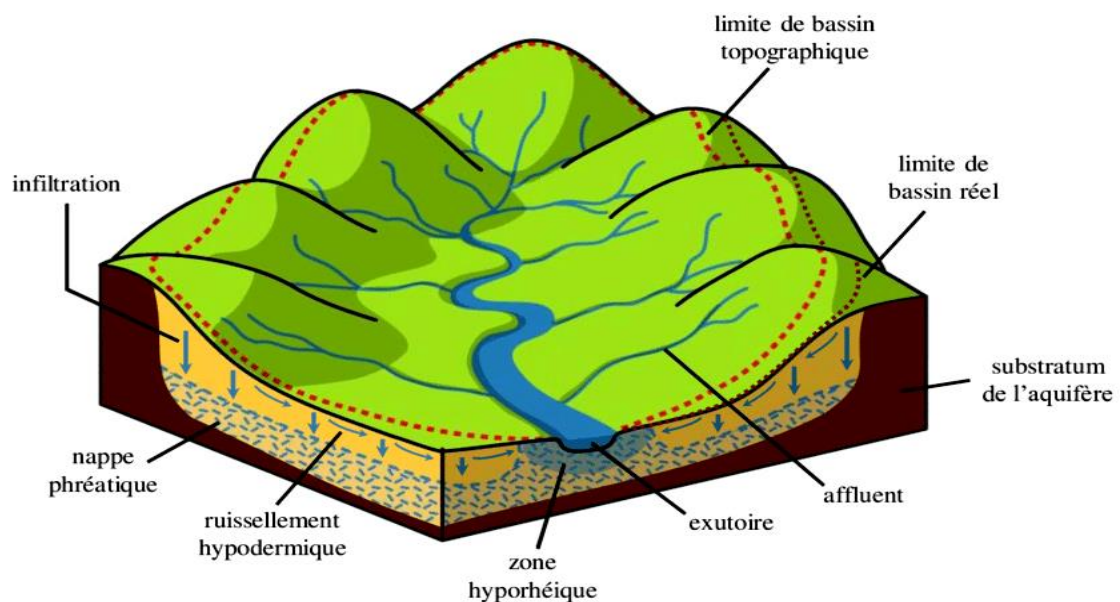


Figure I.2. Représentation d'un bassin versant

I.3. Conception de la modélisation

Un modèle hydrologique, ou modèle pluie-débit, est un outil numérique de représentation de la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant. Il permet de transformer des séries temporelles décrivant le climat d'un bassin versant donné (séries de précipitations et de températures par exemple, séries qui sont les entrées du modèle hydrologique) en une série de débits (sortie du modèle hydrologique).

Un modèle hydrologique est caractérisé par cinq éléments qui le constitue (**Figure I.3**): la géométrie du bassin versant (le système), les entrées du système, les lois de formalisation des processus, l'état initial et les conditions aux limites du système et les sorties du modèle (**Singh, 1995**).

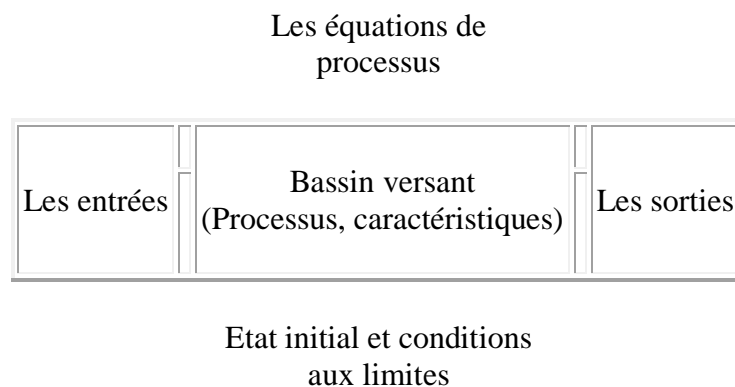


Figure I.3. Les composants d'un modèle hydrologique (Gnouma, 2006)

Le principe de la modélisation se présente sous plusieurs approches :

- La représentation des processus hydrologiques par des lois physiques qu'on appelle modélisation à base physique : On cherche à reproduire le monde réel dans sa complexité par les lois physiques expérimentales. Cette approche exige la qualité et la représentativité des données. Elle permet d'identifier et d'expliquer les facteurs déterminants.
- La reproduction des écoulements sans chercher à représenter les processus : la modélisation conceptuelle. Dans ce genre de modélisation, on simplifie au maximum la représentation du monde réel. Ce type de modélisation possède un nombre de paramètres réduit et une mise en œuvre facile.
- La spatialisation ou non des paramètres (les modèles globaux et les modèles spatialisés ou distribués).

I.3.2. Objectifs de la modélisation en hydrologie

Nous pouvons résumer les objectifs de la modélisation hydrologique aux points suivants :

- Un modèle est la description d'un système réel, naturel, dans une expression graphique ou mathématique; et c'est également la simulation des relations "causes à effets" des processus naturels gérant la nature par une reproduction physique à une échelle plus petite.
- La modélisation permet d'appréhender ce système naturel, de caractériser la variabilité de ses composantes pour en étudier son comportement et de le concevoir même dans des conditions ou des scénarios hors de son environnement normal.
- Le système qui intéresse particulièrement la modélisation hydrologique se rapporte à la phase terrestre du cycle de l'eau, avec ses principaux processus physiques (précipitation interception - évapotranspiration - ruissellement - flux dans les couches de sol, non saturées et saturées).
- Dans un autre domaine de l'hydrologie appliquée, la simulation du comportement des phénomènes hydrologiques résultant du fonctionnement des ouvrages hydrauliques est également modélisée. On peut modéliser, par exemple, la gestion des réservoirs de contrôle de crues ou de soutien à l'étiage pour différentes situations climatiques.

I.3.3. Typologie des modèles hydrologiques

Il existe plusieurs modèles hydrologiques qui sont choisis par rapport aux ; objectifs de modélisation, des paramètres du modèle et aux données d'entrée. On peut trouver plusieurs classifications de modèles hydrologiques dans la littérature en fonction des auteurs. Par exemple, (**Refsgaard et Storm, 1996**) classent les modèles hydrologiques en trois grandes catégories : les modèles empiriques, les modèles conceptuels et les modèles à base physique. La notion de la classification des modèles est très complexe et en raison de l'ambiguïté de certains critères (notion de conceptuel ou physique), une certaine confusion règne encore sur l'appartenance de tel ou tel autre modèle à une catégorie donnée (**Payraudeau, 2002**). Nous avons énuméré dans cette partie quelques types de modèles sans pouvoir les classer forcément comme certains auteurs peuvent les faire dans plusieurs ouvrages. La liste de modèles cités ci-dessous n'est pas exhaustive.

I.3.3.1. Modèles stochastiques

Compte tenu des incertitudes sur les données et quelquefois même sur les processus mis en jeu, une modélisation stochastique peut sembler appropriée, qu'il s'agisse de l'hydrologie ou de l'environnement. On considère que l'approche stochastique est un moyen rationnel de traiter la caractérisation spatiale de la variabilité, et d'établir un lien entre les incertitudes des paramètres et celles des prédictions. Toutefois cette approche, qui semble par ailleurs le meilleur moyen de caractériser la variabilité des grandeurs, nécessite la connaissance des lois de probabilité les plus courantes pour la variabilité considérée ou au moins de leurs premiers moments (Makhlouf, 1994).

I.3.3.2. Modèles déterministes

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

I.3.3.3. Modèles à base physique

Les modèles à base physique reposent sur la résolution d'un grand nombre d'équation de continuité et de quantité de mouvement liée soit au processus de transport d'eau ou des substances soit d'énergie. Ces équations doivent décrire les différents phénomènes dans d'un bassin versant. On a par exemple le système d'équation de Barré de Saint Venant qui ressource les écoulements en surface libre et celui de Darcy qui résout les écoulements souterrains. En matière d'écoulement, le modèle à base physique qui serait le plus complet est celui qui pourra résoudre l'équation de Barré de Saint Venant en deux dimensions pour les écoulements en surface libre et celui de Darcy à trois dimensions pour les écoulements souterrains. Le SHE4 est le modèle le plus utilisé parmi les modèles à base physique en hydrologie.

La plus grande difficulté dans ce type de modèle est la détermination des paramètres. Les paramètres ayant un sens physique comme la conductivité hydraulique, les paramètres de

friction devraient être mesurable in situ mais en pratique, on constate que la mesure de ces paramètres et la détermination de leur répartition spatiale induit le plus souvent à des difficultés d'utilisation rigoureuse des modèles à base physique tel que le SHE. Les distorsions des modèles même pour les plus détaillés sont inévitables. Pour calculer un débit à l'exutoire d'un bassin versant, les paramètres du modèle doivent endosser les incertitudes liées aux simplifications. Ces simplifications sont inévitables et elles impliquent que certains processus ne sont pas très bien simulés.

Après le test de simulation, on constate le plus souvent que les valeurs des paramètres ne correspondent plus à leurs valeurs mesurées même si elles pouvaient être exactes. A partir de ce constat on peut alors affirmer que le modèle à base physique qui donne une réponse très proche des observations n'a pas des paramètres physiques ; et donc un modèle à base physique qui utilise les paramètres mesurés devraient normalement donner une réponse inexacte. Ces modèles est plus adapté dans la recherche sur des bassins test ou pour simuler des expériences en laboratoire mais difficile à appliquer dans le cas pratique.

I.3.3.4. Modèles empiriques

Le modèle empirique cherche à reproduire la dynamique des variables de sortie en fonction des variables d'entrée sans tenter de décrire les processus élémentaires. Le modèle empirique utilise une représentation des formules et des équations qui calculent par exemple un débit en utilisant une information minimale du bassin versant. Deux exemples sont les plus utilisés, on a la formule rationnelle et les courbes enveloppent.

Les modèles empiriques caractérisent globalement la relation Pluie-Débit par des traitements des séries chronologiques (**Ambroise, 1991**).

I.3.3.5. Modèles analytiques

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

I.3.3.6. Modèles conceptuels

Les modèles conceptuels considèrent généralement le bassin versant comme étant un ensemble de réservoirs interconnectés, après quelques simplifications du cycle de l'eau. Un modèle hydrologique conceptuel tente de reproduire la réponse hydrologique d'un bassin versant en remplaçant la réalité de l'écoulement par une idéalisation simplifiée de la situation réelle tant de la géométrie du bassin versant que de l'écoulement lui-même. Les données hydrologiques et météorologiques servent alors à faire des estimations seulement des paramètres. Les modèles hydrologiques conceptuels sont basés sur un aspect perceptuel du comportement de l'eau dans le bassin versant et sont par conséquent des modèles déductifs.

Parmi les modèles à réservoir, on a le modèle d'hydrogramme unitaire instantané de **(Nash, 1957)**. Dans ce modèle, les réservoirs représentent l'évolution du ruissellement de surface due à la circulation de l'eau dans le bassin versant, tant le long des pentes que dans le réseau hydrographique. Le modèle de Nash permet de simuler les crues de beaucoup des bassins versants avec succès. La validation des résultats des simulations est conditionnée par les hypothèses de l'hydrogramme unitaire qui doivent être vérifiées de toute évidence quel que soit le modèle utilisé. Les modèles à réservoir ont été développés par plusieurs chercheurs avec différentes approches tels que des modèles GR3J (**Michel et Edijatno, 1988**), les modèles GR4J (**Edjatino et Michel, 1994; Perrin et al. 2003**), les modèles GR2M (**Kabouya, 1990 et Michel, 1994**).

I.3.3.7. Modèles globaux

Dans le panel de modèles hydrologiques existants, la modélisation globale a la particularité de traiter le bassin versant dans son ensemble comme une seule entité, aux propriétés uniformes.

On estime que les variations spatiales des paramètres et les variables d'entrée ont un effet négligeable et qu'il n'y a pas lieu d'effectuer un découpage dans l'espace. Le modèle est d'ordre zéro dans l'espace (**Makhlouf, 1994**).

I.3.3.8. Modèles basés sur l'intelligence artificielle

Suivent un apprentissage de l'intelligence artificielle qui leur permet de comprendre et de résoudre les problèmes de prévision et de modélisation (**Bishop, 2006**). On peut classer les

méthodes d'apprentissage artificiel en deux grandes familles : l'apprentissage non supervisé et l'apprentissage supervisé. La prévision des séries temporelles est classiquement réalisée par la deuxième famille d'algorithmes mais nous verrons dans la suite que l'utilisation de l'apprentissage non supervisé est aussi possible. Dans l'apprentissage non supervisé, l'algorithme va lui-même, sans information supplémentaire, catégoriser les variables d'entrées.

Ce type d'apprentissage permet l'élaboration d'une représentation interne de l'espace des données d'entrée en identifiant une structure statistique sous-jacente des variables sous une forme plus ou moins simple.

De façon générale, l'apprentissage artificiel supervisé consiste à créer un modèle de prédiction (classification ou prévision) à partir d'une base d'apprentissage comprenant les exemples d'entrée ainsi que les sorties désirées associées. Les paramètres du modèle vont ainsi s'adapter en comparant à chaque fois les sorties obtenues et les sorties désirées, d'où l'appellation supervisé (**Mitchell, 1997; Nilsson, 2004**). Une fois le modèle obtenu par une base d'apprentissage, l'utilisation d'une base de test, comprenant de nouveaux exemples non utilisés pendant l'apprentissage, permet de mesurer les performances de la méthode. Une des possibilités est de calculer l'erreur quadratique moyenne (MSE).

L'algorithme d'apprentissage permet de prédire une valeur cible étant donnée une ou des valeurs d'entrées. Dans le cas où cette valeur cible est dans un ensemble fini, la tâche réalisée par l'algorithme est appelée classification supervisée puisqu'il s'agit de trouver la classe correspondant à un exemple donné en entrée. Quand la valeur cible appartient à un ensemble continu (par exemple \mathbb{R} ou $(0 ; 1)$), la tâche est appelée régression. Elle représente le plus souvent la prévision d'une ou de plusieurs valeurs futures correspondant à une suite de valeurs passées. Dans ce mémoire, on s'intéressera uniquement à un type de méthode : les réseaux de neurones artificiels (ANN).

La figure ci-dessous donne la structure générale des modèles :

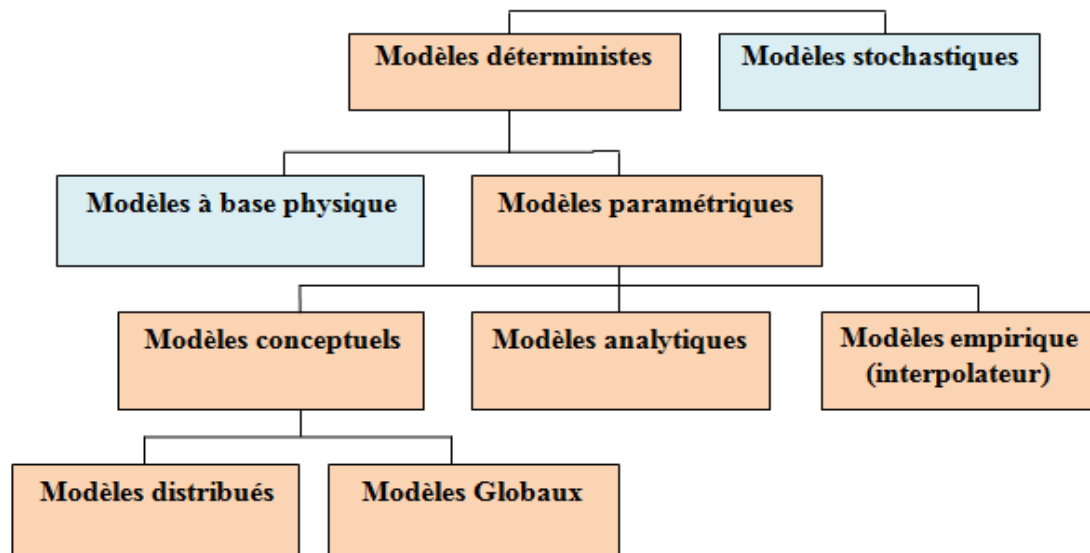


Figure I.4. Les différentes approches de modélisation

I.3.4. Mise au point du modèle

La mise au point d'un modèle se fait en suivant 3 grandes étapes qui sont la calibration du modèle (le calage), la validation du modèle, l'exploitation et l'interprétation.

I.3.4.1. Le calage des paramètres

D'une façon très générale, la calibration consiste à évaluer les paramètres inconnus du modèle de manière à simuler des réponses qui soient très proches de la réalité (les observations). Ceci permet l'exploitation du modèle avec les valeurs estimées des paramètres pour simuler des crues qui n'ont pas servi au calage tout comme des crues hypothétiques passées ou futures. La première étape du calage consiste à sélectionner les événements et en suite l'estimation des paramètres proprement dits. Le choix des événements est simplifié dans le cas de la simulation en continu ; sur les années existantes, on ne prend qu'une moitié pour le calage et une autre pour la validation.

Les modèles qui comportent plus de trois paramètres inconnues sont difficiles à caler. Les modèles conceptuels simples qui sont plus facile à caler. Ces modèles contiennent souvent une équation d'infiltration globale à un ou deux paramètres et un hydrogramme unitaire à deux paramètres (Par exemple le nombre de réservoirs et le temps de montée pour l'hydrogramme de Nash).

Les méthodes de calage plus rigoureuses et automatiques nécessitent l'adoption d'une fonction d'erreur et d'un algorithme d'optimisation. La fonction d'erreur est la valeur absolue de la différence entre les débits de pointe observés et simulés. Les plus complexes prennent en compte l'ensemble de l'hydrogramme. Parmi les fonctions d'erreur, on peut avoir par exemple :

- ✓ La différence des débits de pointe.
- ✓ La somme des carrés des erreurs.
- ✓ La fonction de Nash-Suttcliffe.

La fonction de Nash exprime le rapport entre l'erreur du modèle donné et l'erreur d'un modèle de référence, apprécié à la moyenne des débits. Il existe beaucoup d'autres fonctions d'erreur qu'on n'a pas mentionnées.

L'algorithme d'optimisation est représenté par la surface décrite par la fonction critère dans l'espace des paramètres qu'on appelle la surface de réponse. La recherche de paramètres optimaux revient à trouver le minimum global de cette surface.

Il existe plusieurs algorithmes, comme par exemple :

- Algorithme de Rosenbrock-Palmer (**Rosenbrock, 1960 et Palmer, 1969**).
- Méthode de Simplex (**Singh, 1995**).
- Méthode des gradients basée sur les équations de Lagrange.

I.3.4.2. La validation du modèle

La validation du modèle a pour objectif de déterminer si le modèle est adapté à la simulation et estimer l'erreur à craindre en simulation. On peut estimer ces erreurs en appliquant le modèle sur des événements autre que ceux utilisés pour le calage. Pour faire la validation du modèle, il faut :

- Faire le choix final des valeurs des paramètres du modèle.
- Appliquer le modèle sur les événements autre que ceux qui ont été prise pour le calage.
- Apprécier les résultats et calculer les erreurs résultantes.

I.3.4.3. L'exploitation et l'interprétation

L'exploitation et l'interprétation des résultats est l'étape finale d'une modélisation hydrologique. En définitive, il faut prendre quelques précautions à ce niveau :

- Eviter un modèle pour des extrapolations très importantes.
- Les résultats obtenus de la modélisation doivent être vérifiés et comparés à d'autres études similaires.
- Les erreurs calculées doivent être reportées dans les résultats finals.
- Faire des représentations graphiques de résultats à l'image de la qualité des simulations.

I.3.5. Choix du modèle

Comme nous l'avons dit précédemment, il existe une grande diversité de modèle en hydrologie et souvent on a des difficultés à choisir un modèle pour une étude donnée. Le choix d'un modèle se fait, en générale, en fonction de l'objectif de l'étude hydrologique qu'on aura à effectuer, et en fonction des composantes hydrologiques du bassin versant qu'on cherche à représenter. Il est important de choisir un modèle qui est adéquat à la problématique posée. Le choix du modèle doit vérifier ces quatre principes :

I.3.5.1. La problématique

Les études hydrologiques sont faites pour résoudre les problèmes d'aménagement hydrauliques de cours d'eau, et des ouvrages dans le domaine d'urbanisme et des problèmes de sécurité des populations, pour éviter les inondations et d'autres catastrophes liées à l'eau. Ces études peuvent servir à dimensionner des ouvrages de régulations des crues, les ouvrages d'évacuation des eaux des pluies, les pollutions ponctuelles, ... Par exemple, pour ce type de problématique, le modèle à choisir devra prendre en compte quelques paramètres tels que l'évaporation, les variations du niveau de la nappe, etc et négliger ou au moins simplifier la formation des crues. Pour ces études de bilan hydrologique on peut recourir aux modèles linéaires et les modèles non linéaires.

I.3.5.2. La possibilité de détermination des paramètres

Les données hydrométéorologiques et la taille du bassin versant sont les deux aspects qui expliquent cette contrainte de possibilité à déterminer les paramètres. Par exemple pour les modèles conceptuels on a besoin d'une longue série de données pluie-débit pour assurer un bon calage. Pour la plupart des modèles beaucoup plus complexes, il faut apporter des données supplémentaires de conductivité hydraulique par exemple qui doit être estimée ou mesurée. On peut aussi se retrouver dans le cas où on doit faire des estimations des paramètres du modèle par régionalisation, c'est-à-dire faire des interpolations qui permettront de transporter des paramètres estimés sur un bassin versant jaugés vers un bassin non jaugé. Dans ce cas, il faudra trouver un modèle qui offre cette possibilité. On peut retenir dans ce cas le modèle de Nash qui, ses paramètres peuvent être reliés à la description géomorphologique du bassin versant.

I.3.5.3. La possibilité de simulation

L'utilisation de certains modèles présente des avantages du fait qu'ils donnent la possibilité de fonctionner automatiquement d'une manière itérative.

I.3.5.4. La facilité d'utilisation

On peut aussi avoir certains modèles qui présentent des difficultés pour les utilisateurs. Même en possédant le manuel d'utilisation, la lecture des fichiers de sortie rend le logiciel une source de travail pénible. Il est conseillé d'utiliser des programmes récents qui possèdent les idées de base sur les anciens modèles. On doit éviter d'utiliser les modèles dont les modules ne peuvent pas être compris et maîtrisés. Les difficultés hydrologiques restent les mêmes quel que soit les programmes mais elles restent inaperçues grâce à la facilité d'usage.

I.3.6. Applications des modèles

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

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

- Simulation des débits pour des reconstitutions historiques.
- Prévision des crues.
- Détection de l'influence des changements d'occupation du sol.
- Simulation de l'impact du changement climatique.
- Prédétermination des débits de crues ou d'étiages (fréquence et durée).
- Prévision des étiages.

CHAPITRE II

PRÉSENTATION DE LA RÉGION D'ÉTUDE

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE LA RÉGION D'ÉTUDE

II.1. Introduction

L'Est Algérien a été choisi comme zone d'application de notre étude. Nous présenterons dans ce chapitre les principales caractéristiques géographiques, climatiques et hydrographiques de la zone d'étude ainsi que les bassins versant étudiés.

II. 2. Situation Géographique

Notre étude concerne la région localisée au niveau de l'Est algérien, la région s'étend de Béjaïa à l'Ouest jusqu'à la frontière algéro-tunisienne à l'Est et de la mer méditerranéenne au Nord jusqu'à Biskra au Sud, le territoire se situe entre les parallèles : $36^{\circ} 54'$ et $34^{\circ} 48'$ de latitude Nord et entre $8^{\circ} 27'$ et $5^{\circ} 4'$ de longitude Est.

D'un point de vue climatique, la région correspond à la zone de déplacement saisonnier des positions hautes pressions subtropicales, qui connaît un balancement régulier entre le $30^{\text{ème}}$ et le $40^{\text{ème}}$ parallèle, vers le Sud en hiver et vers le Nord en été. Le front polaire saisonnier connaît un mouvement entre le $35^{\text{ème}}$ et le $65^{\text{ème}}$ parallèle, ce dernier régit le climat de la région de l'Est algérien pendant la saison la plus froide de l'année.

L'Algérie du nord par sa position subit un balancement contrasté entre la circulation d'un air saharien sévissant l'été et une circulation polaire sévissant en hiver ; expliquant ainsi un climat aride en été et tempéré humide en hiver.

II.3. Aperçu topographique

Sur le plan du relief, la région d'étude est composée principalement de cinq grandes unités physiques disposées du nord au sud comme indiqué ci-dessous.

II.3.1. Les plaines littorales

Elles se présentent sous forme épars le long de la mer méditerranéenne, entrecoupées par quelques monts, leurs présences à l'Ouest est plus discrète car peu nombreuses et peu étendus, elles correspondent aux basses vallées des oueds et sont principalement représentées par les plaines de Collo (Oued Guebli), de Skikda (Oued Safsaf) et de Jijel (Oued Djendjen). Par contre, elles ont une présence plus marquée dans la partie Est, où on peut distinguer une

large plaine sous forme de croissant qui s'étale sur environ 100 Km autour de Djebel Edough, et qui prend origine depuis la forêt de Guerbes jusqu'à la région de Bouteldja. Leur situation leur confère une exposition favorable aux vents souvent humide du nord et nord-ouest. Les vraies plaines sont toujours littorales et correspondent aux débouchés des oueds.

II.3.2. L'Atlas tellien

Cette chaîne dédoublée (Tell interne et tell externe) et légèrement parallèle est orientée N-E-S-O. C'est un ensemble constitué par une succession de massifs montagneux, côtiers et sublittoraux s'étendant sous forme de bourrelet de Béjaia à l'Ouest jusqu'à la frontière tunisienne à l'Est, les chaînes telliennes littorales sont principalement constituées par les massifs de Collo, Skikda et l'Edough. Plus au Sud on retrouve les chaînes telliennes externes constituées quant à elle par le massif de petite kabylie (la chaîne des Babors), qui s'étend depuis l'Ouest à la vallée de la Soummam jusqu'à Djendjen et le massif d'El Ouana à l'Est. Les altitudes restent modestes, avec un point culminant à Djebel Babor (2004 m).

II.3.3. Les bassins intérieurs

Sont situés entre les monts de l'Atlas Tellien, ils sont principalement représentés par Guelma, Mila et Soummam. La région de Mila se caractérise par un relief irrégulier, complexe et profondément parcellisé par un réseau hydrographique dense. Leur altitude moyenne est de 400 m. La région de Guelma située plus à l'Est, est caractérisée quant à elle par un relief généralement montagneux, dont les plus importants sont Djebel Maouana (1411 m) et Djebel Houara (1292 m).

II.3.4. Les hautes plaines

Elles se présentent comme une large plateforme compartimentée et s'étendant d'ouest en Est entre les deux alignements, du tell au nord et les monts de Hodna, des Aurès et Nemecha au Sud avec des altitudes plus ou moins importantes entre 800 et 1200 m. Elles sont parsemées de dépressions salées, de chotts et de sebkhas surtout celle de Ain M'lila. Elles sont topographiquement perchées par rapport aux plaines littorales ou sahariennes (**Mébarki, 2005**).

II.3.5. L'Atlas Saharien

Il est principalement constitué de massifs volumineux, relativement ouverts, dont les principaux sommets atteignent plus de 2000 m : Djebel Chelia (2328 m), Djebel Mahmel

(2321 m) et Bélazma (2094 m). Ils se caractérisent par des alignements Sud-Ouest - Nord-Est s'étendant sur une soixantaine de Km. Le Sud de la région d'étude comprend la partie nord du chott Melrhir (-34 m).

Ce dernier constitue un réceptacle pour les Oueds du flanc méridional des Aurès et des Némemchas, avec un sens d'écoulement Nord-Sud ; c'est au niveau de cette grande dépression lacustre que se déverse l'oued Dejedi, d'une largeur de 500 m environ.

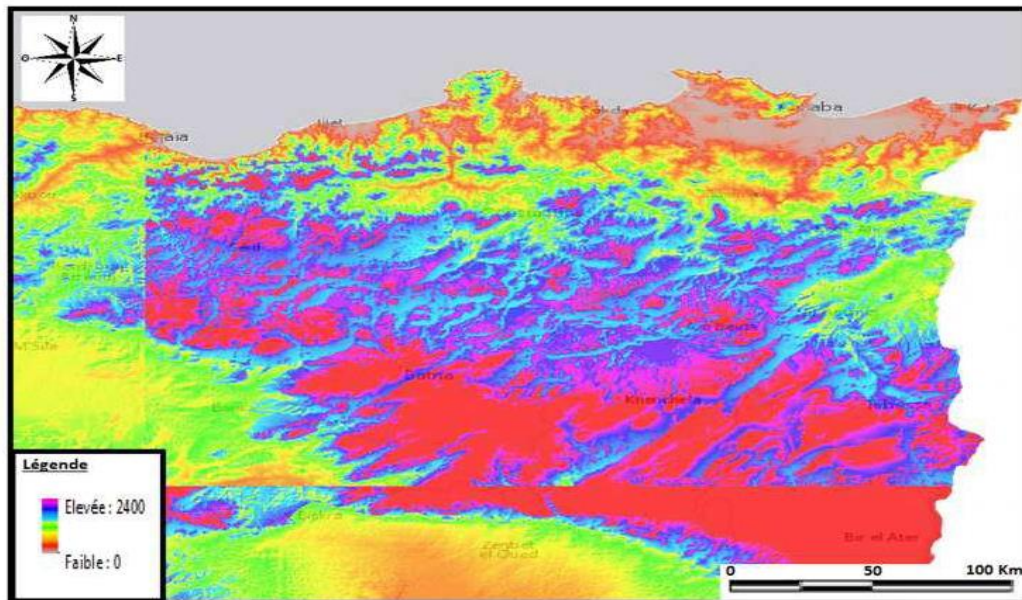


Figure II.1. Le relief de l'Est Algérien (Landsat)

II.4. Aperçu géologique

L'Algérie orientale est constituée de reliefs jeunes, modelés au cours du Tertiaire par les mouvements alpins. Il est délimité au sud, par l'Atlas saharien (chaîne alpine) et au centre, par des plates-formes (môle d'Aïn Regada). Dans la partie septentrionale, l'Atlas tellien (Jurassique à Miocène) est une zone complexe constituée de nappes mises en place au Miocène inférieur. Des bassins néogènes tardifs, comme le Hodna (qui est un est un bassin d'avant-fosse dont la séquence de remplissage débute par des dépôts continentaux d'âge Eocène et Oligocène et se poursuit par un Miocène marin) qui s'est installé sur ces nappes. Le plateau continental quant à lui est réduit ; les dépôts tertiaires et quaternaires (1000 m à 3500 m) reposant sur un socle métamorphique. Les Aurès se présentent avec un substrat de grès et de calcaire du crétacé (**Abdessamed, 1981**). Les bassins du Chott Melrhir dans le Sud-Est constantinois, structurés au tertiaire, à remplissage crétacé (5000 m), ont engendrés et accumulés des hydrocarbures principalement dans le crétacé (Djbel Onk).

II.5. Les sols

La répartition des sols au niveau de la région d'étude est due essentiellement au climat, la nature des roches mères, du relief, de l'eau, de la végétation et des facteurs biotiques et anthropogènes. Les sols des régions humides peuvent se définir par leur mode de formation original : entrainement de substances en profondeur sous l'action des eaux d'infiltration. Mais cette migration est conditionnée par la nature de La roche mère, très variable dans le Tell algérien du fait de sa structure plissée d'où une grande variété de sols dont le seul caractère commun est un lessivage plus ou moins poussé, et qui peuvent être classé en deux grands groupes :

a) Le groupe calcaire comporte tous les sols formés à partir de roches calcaires. Deux types de sols : sols calcaires et sols décalcifiés.

b) Groupe non-calcaire, qui comporte les sols formés sur roche mère non calcaire. Deux types principaux ; sols insaturés et sols podzoliques.

Les sols insaturés sont caractérisés par un pH acide, il s'agit typiquement de sols désaturés et lessivés (**Duchaufour, 1975**). Les sols podzoliques se forment dans des conditions d'humidité telles que les sels sont dissous et entraînés en profondeur de même que les colloïdes organiques et minéraux (argile, silice colloïdale). D'une façon générale, dans les régions où la pluviosité annuelle est supérieure à 500 mm, les sols podzoliques se forment en Algérie à partir de roches non calcaires produisant des éléments grossiers pauvres en bases ; perméabilité et pluviométrie sont alors suffisantes pour permettre la destruction quasi totale du complexe absorbant. Ces sols, très acides, se rencontrent dans les régions Nord de l'Algérie, sur les grès de Numidie, les gneiss et certaines dunes, et supportent normalement de belles forêts d'arbres acidophiles (chênes) avec sous-bois dense de bruyère, de dyss, etc.

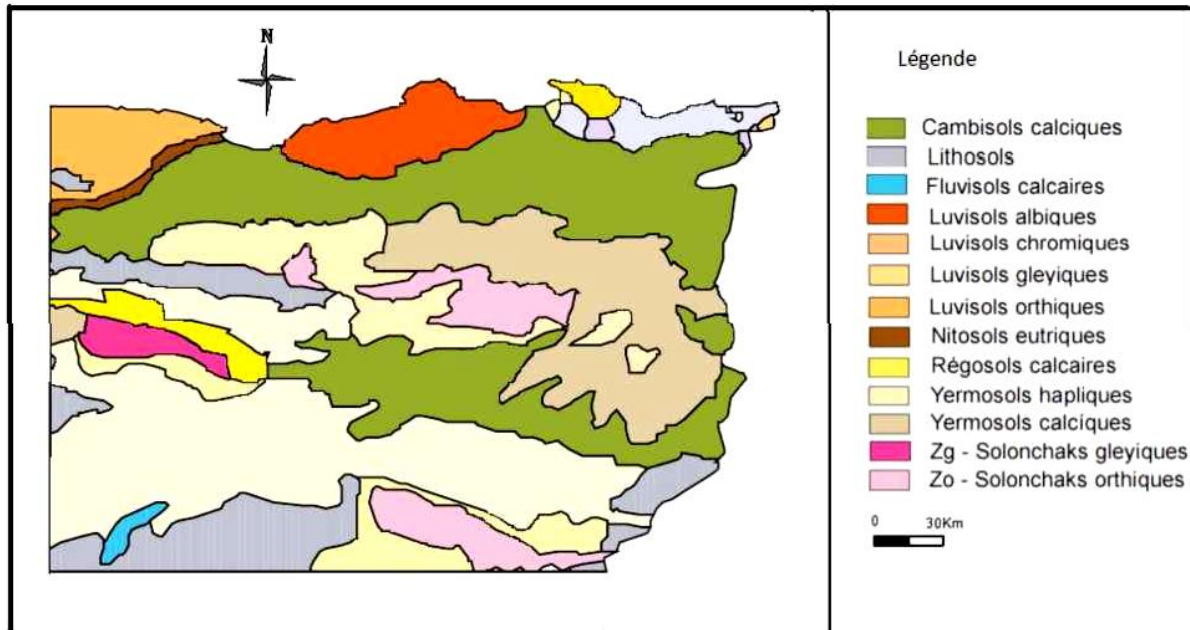


Figure II.2. Carte des sols dominants de la région d'étude (FAO, 2005, modifiée)

II.6. Aperçu climatique et précipitation

L'Est algérien est la région la plus variée du pays sur le plan climatique. Aussi, tout bilan hydrologique se trouve-t-il directement influencé par les nuances du climat, plus spécialement par deux paramètres déterminants : pluviométrique (conditionnant l'alimentation en eau des rivières) et évaporométrique (pertes ou retour de l'eau l'atmosphère). (Mébarki, 2005).

Par ailleurs, toute mise en valeur hydro-agricole doit tenir compte de cette variété même s'il est vrai que l'irrigation est nécessaire, quel que soit la situation géographique, pour faire face au déficit hydrique des mois « secs » et aux irrégularités interannuelles des pluies, (Mébarki, 2005).

Schématiquement, les précipitations décroissent du littoral vers l'intérieur, suivant un fort gradient latitudinal, altéré néanmoins par l'effet orographique de l'Atlas saharien, avant de s'accroître à nouveau dans le Piémont saharien où les pluies se raréfient. Les cartes pluviométriques de l'Algérie (Seltzer, 1946 ; Gausson, 1948 ; Chaumont et Paquin, 1971 ; ANRH, 1993) retracent toutes cet ordonnancement des précipitations.

Deux groupes de facteurs, géographiques (éloignement par rapport à la mer, altitude, exposition des versants par rapport aux vents pluvieux du Nord-Ouest) et météorologiques (déplacement des masses d'air polaire océanique, froid et humide, des masses d'air tropical chaud et humide de l'Atlantique Sud, et enfin des masses d'air tropical continental ou

anticyclone saharien) influencent la répartition spatiale des précipitations, mais aussi les structures des régimes pluviométriques (**Chaumont et Paquin, 1971**). Le caractère d'irrégularité temporelle des précipitations est, par ailleurs, une donnée fondamentale du climat de l'Est algérien (**Mébariki, 2005**).

II.7. Le couvert végétal

La végétation est un facteur déterminant de la rapidité du ruissellement superficiel, du taux d'évaporation et de la capacité de rétention du bassin. Donc la présence de végétation va jouer le rôle de « Régulateur » dans le régime d'écoulement.

L'occupation végétale a une influence directe sur l'écoulement fluvial aussi bien que facteurs orographiques et climatiques. La résistance à l'écoulement est d'autant plus grande que le couvert végétal est plus dense. Cette influence de la forêt sur le régime des eaux en domaine méditerranéen a un rôle considérable.

Il est clair que le couvert végétal est efficace pour réduire le ruissellement. La couverture du sol, plus particulièrement celle assurée par la strate herbacée et les résidus végétaux, constitue la protection la plus efficace du sol. Elle intervient vis à vis du sol par :

- L'interception nette : une partie de la pluie qui tombe sur la végétation est directement reprise par l'évaporation. Elle ne participe alors, ni à l'infiltration, ni au ruissellement.

- La dissipation de l'énergie cinétique : une partie de la pluie interceptée par le feuillage continue sa course jusqu'au sol. L'énergie cinétique des gouttes s'en trouve alors modifiée. L'expérience montre (**Ruiz-Figueroa, 1983**) que l'efficacité d'un couvert végétal l'égard de l'infiltration est d'autant plus marquée que le dernier élément récepteur est bas.

Suite de la différence climatique, la végétation n'a pas un aspect uniforme dans toute l'Algérie. On distingue suivant les tranches pluviométriques :

- **900 - 1 200 mm**, c'est l'étage humide que l'on retrouve dans les régions Nord-Est, dominé en altitude par les forêts à *Cedrus atlantica* et différentes chênaies bien venantes, *Quercus faginea*, *Quercus suber* et *Quercus afares*.

- **600 - 900 mm**, correspond à l'étage subhumide qui couvre la partie septentrionale de l'Est de l'Atlas tellien.

II.8. Le réseau hydrographique

Au niveau de l'Est algérien, deux grands types de bassins hydrographiques peuvent être distingués (**Mébariki, 2005**) :

- Au Nord, des oueds importants prennent naissance sur les hautes plaines pour rejoindre la mer méditerranéenne en traversant le tell par des gorges (Oued Rhumel-El kebir Beni Haroun, Oued Safsaf à Zerdzas et Oued Seybous au Nador) et plus à l'Ouest l'Oued Djendjen et l'Oued Soummam. Ces bassins sont à écoulement exoréique à régime quasiment pérenne.

- Au Sud, au niveau des Aurès, le réseau hydrographique est à écoulement endoréique et à régime quasi temporaire dont l'écoulement se perd dans les dépressions intérieures.

II.9. Ressources hydriques

En Algérie, l'eau est une ressource de plus en plus précieuse. La concurrence que se livrent l'agriculture, l'industrie et l'AEP (Alimentation de l'Eau Potable) pour avoir accès à des disponibilités limitées en eau grève d'ores et déjà les efforts de développement de nombreux pays. La pluviométrie moyenne annuelle en Algérie du nord est évaluée entre 95 et 100 10^9 m³. Plus de 80 10^9 m³ s'évaporent, 3 10^9 m³ s'infiltrent et 12.5 10^9 s'écoulent dans les cours d'eau. Dans l'Algérie du Nord, l'apport principal vient du ruissellement. En 2012, l'Algérie dispose de 63 barrages d'une capacité de 10,2 milliards de m³. Le reste se déversent directement dans la mer (**Bellout, 2015**).

II.10. Présentation des bassins versant étudiés

La figure II.4 présente la situation géographique des bassins versants retenus dans cette étude, qui sont au nombre de neuf :

- Le bassin versant des Côtiers Algérois (02).
- Le bassin versant des Côtiers Constantinois (03).
- Le bassin versant d'El Hodna (05).
- Le bassin versant des Hauts Plateaux Constantinois (07).
- Le bassin versant d'Isser (09).

- Le bassin versant du Kebir Rhumel (10).
- Le bassin versant de la Medjerda (12).
- Le bassin versant de la Seybouse (14).
- Le bassin versant de la Soummam (15).

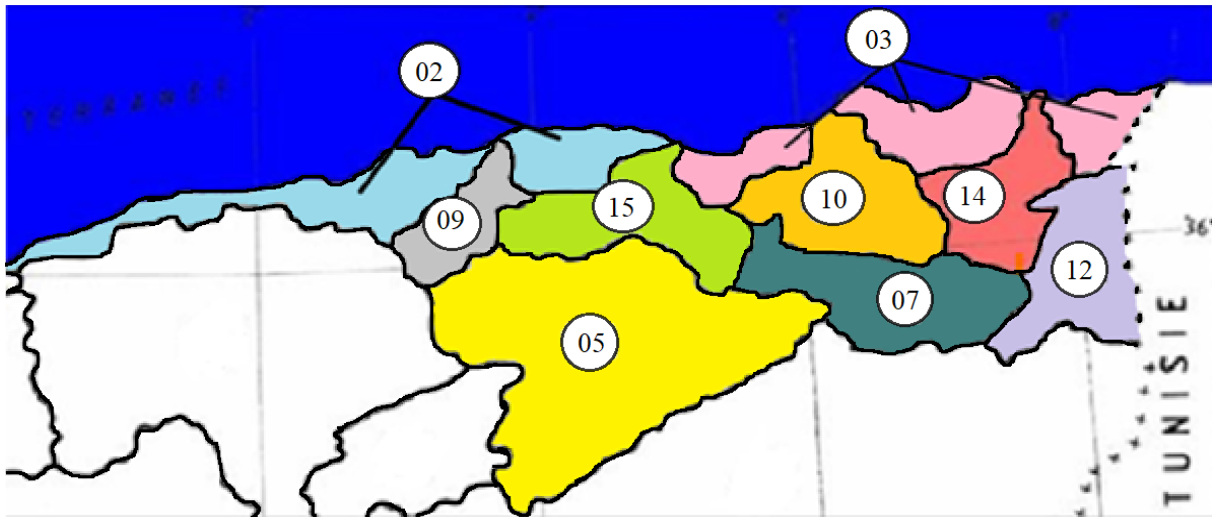


Figure II.3. Situation géographique des bassins étudiés

II.10.1. Caractéristiques des bassins versants étudiés

II.10.1.1. Bassin versant des Côtiers Algérois

Situé au Nord centre d'Algérie, il est limité au Nord par la mer Méditerranée, à l'Est par le bassin de l'Isser, au sud par le bassin de Cheliff qui le borde à l'Ouest aussi. La limite sud est constituée principalement par la chaîne montagneuse de l'Atlas Tellien. La partie ouest du bassin appartient au bassin hydrographique Cheliff-Zahrez, tandis que la partie Est à l'Algérois-Soummam-Hodna. Il couvre une superficie de 11972 km², et il est divisé par l'ANRH en vingt sous bassins hydrologique.

Le climat de la région est un climat type méditerranéen, pluvieux en hiver, sec en été avec une pluviométrie moyenne avoisinant les 900 mm par an, sauf que l'Est est beaucoup plus pluvieux que l'Ouest qui s'approche d'un climat semi-aride. Donc le bassin des Côtiers Algérois a un potentiel pluviométrique assez important, Le couvert végétal se compose de maquis dense de feuille de résineux et de cultures.

II.10.1.2. Bassin versant des Côtiers Constantinois

Le bassin hydrographique " Côtiers Constantinois " est situé dans le littoral Nord de l'Est Algérien, limité au Nord par la Méditerranée, à l'Est par la frontière tunisienne, à l'Ouest par le bassin " Algérois - Hodna - Soummam " et au sud par les bassins : " Kebir Rhumel ", " Seybouse ", " Medjerda ". Il couvre une superficie totale de 11511 Km².

La région d'étude est caractérisée par un climat méditerranéen, doux et pluvieux en hiver, chaud et sec en été, avec une pluviométrie de l'ordre de 650 à 1800 mm/an.

II.10.1.3. Bassin versant d'El Hodna

Le Chott El Hodna est un lac salé endoréique du Nord-Est de l'Algérie. Il est classé après le chott Melghir, le plus grand lac d'Algérie. Il est situé dans la région Nord-Est de l'Algérie à environ 130 Km de la méditerranée, dans la wilaya de M'Sila.

La cuvette du Hodna a une superficie de 8500 km² mais le chott en lui-même à une superficie de 1100 km² et situé à une altitude moyenne de 392 mètres.

Le chott a une forme elliptique et s'étend sur 77 km de long et 19 km de large. Son alimentation est assurée par au moins 22 cours d'eau principaux auxquels il faut ajouter des sources d'eau douce. Il se met en eau uniquement en hiver et sec en été avec des croûtes de sel couvrant toute son étendue. A cause d'une forte évaporation, il devient régulièrement un désert de sel (**Hadjab et al., 2007 et Hasbaia et al.,2012**).

II.10.1.4. Bassin versant des Hauts Plateaux

L'ensemble hydrographique des hauts plateaux constantinois est situé au sud de la Seybouse et subdivisé en sept (7) sous bassins. Il couvre une superficie de 9615 km², et présente un chevelu hydrographique caractéristique des zones semi-aride, dont les principaux oueds sont l'Oued El Madher (54 km), l'Oued Chemoura (33 km) et l'Oued Boulfraïs (52 km). Ces oueds prennent leur origine dans les versants septentrionaux des Aurès et se dirigent vers le nord (centre du bassin) où ils se perdent dans les lacs salés, à l'exemple de Sebket Et Zemoul, Garaat Ank Djemel, Sebket Djendli et Garaat El Tarf. De tous ces oueds, un seul semble être pérenne, l'Oued Chemoura qui, sur la partie haute de son cours s'appelle Oued Reboa.

IL s'agit en effet d'un réseau hydrographie atrophie et incomplet dont l'eau des pluies s'y rassemble dans les dépressions saumâtres sans emprunter de véritables vallées. L'écoulement qui se produise dans ce réseau, surmonté par une atmosphère à très fort pouvoir évaporant, est étroitement lié aux précipitations.

II.10.1.5. Bassin versant d'Isser

Le bassin d'Isser est situé au centre nord de l'Algérie, à 70 km au sud-est d'Alger. Il couvre une superficie de 4149 Km², Il est limité A l'Est, par le bassin de la Soummam, Au Sud, par le bassin du Hodna a l'Ouest, au Nord par le bassin du Côtier Algérois et à l'Ouest le bassin de Cheliff.

Le bassin d'Isser Couvre en partie quatre wilayas : Médéa, Bouira, Boumerdes et Tizi-Ouzou.

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

II.10.1.6. Bassin versant du Kebir Rhumel

Le bassin de l'oued El kebir est situé en Algérie Orientale, il est bordé au Sud par les hauts plateaux telliens, à l'Ouest par la montagne de petite Kabylie, au Nord par la frontière de partage des eaux que forme l'Atlas Tellien, et à l'Est par le bassin du Seybouse , Le bassin Kebir Rhumel présente une surface totale de 8735 Km² , Les deux rivières, Oueds l'Endja et le Rhumel, confluent près de l'extrémité, le bassin versant total au site de barrage de Beni Haroun a une superficie de 7.725 km² .

Le bassin versant du Kebir Rhumel la saison pluvieuse s'étend généralement du mois de Décembre au bassin versant du Kebir Rhumel, la saison pluvieuse s'étend généralement de Décembre au Mai, dans le bassin de l'oued Rhumel qui s'étend du sud au Nord- est du bassin, la pluviométrie est distribuée de façon plus uniforme tout au long de l'année.

II.10.1.7. Bassin versant de la Medjerda

Le bassin versant de Medjerda qui s'étale entre l'Algérie et la Tunisie occupe une superficie de 23700 km² dont 7600 km² en territoire algérien. Ce dernier est bordé au Nord par le bassin des Côtiers Constantinois, à l'Ouest par les bassins d'oued Seybouse et des hauts

plateaux Constantinois, au Sud par le bassin de Chott Melghrir, et à l'Est par la Tunisie. Ce bassin est aussi traversé par un des principaux oueds maghrébins, l'oued Medjerda au Nord et l'oued Mellegue au Sud.

Le bassin d'étude constitue une zone charnière entre deux domaines structuraux distincts à savoir : l'Atlas Tellien au Nord et Saharien au Sud. C'est une zone à structure généralement simple au Sud et complexe au Nord. Au Nord, le bassin d'étude présente un relief accidenté et entouré d'une série de montagnes dont l'altitude varie entre 1400 m et 700 m. Il se caractérise par une végétation très développée et dense. Au Sud, il est considéré comme le prolongement naturel des hautes plaines constantinoises sans pour autant en avoir

Les mêmes caractéristiques naturelles et physiques. Il présente une structure plissée d'une orientation dominante Sud-Ouest, Nord-Est.

II.10.1.8. Bassin versant de la Seybouse

Située à l'extrême nord-est de l'Algérie, la Seybouse couvre une superficie d'environ 6450 km² et s'étend des hauts plateaux constantinois aux massifs telliens, et à la plaine d'Annaba à l'aval, en bordure de la Méditerranée. La Seybouse compte au totale six (6) sous bassins versants, Il est limité au Nord par la mer méditerranéenne, à l'Est et l'Ouest par les Côtiers constantinois, au sud par le Kébir Rhumel, les hauts plateaux Constantinois et de la Medjerda.

Ce bassin se caractérise par une saison pluvieuse d'octobre à mai et par un été chaud et sec. La saison chaude est marquée par une augmentation générale de la température.

II.10.1.9. Bassin versant de la Soummam

Le bassin versant de la Soummam, portant le n° 15 selon la codification de l'ANRH est subdivisé en 10 sous bassins versants. Le bassin couvre une superficie de 9109 Km² de forme irrégulièrement étirée dans la direction Est-Ouest et accède à la Méditerranée par le golf de Bejaïa. Il est limité par les chaînes montagneuses de Djurdjura et ses contreforts qui s'étendent jusqu'à la mer au Nord, les contreforts du mont du Hodna au Sud, les chaînes des Babors et le plateau de Sétif à l'Est et le plateau de Bouira à l'Ouest.

Le climat du bassin versant de la Soummam, montre une série de transition entre climat humide, dans les montagnes proches de la Méditerranée, et climat semi-aride des hautes-plaines (environ Sétif). Mais partout les averses sont fréquentes et règne aussi en été une sécheresse prolongée.

II.11. Caractéristiques morphométriques des bassins versants étudiés

Les différents paramètres morphométriques, interviennent et souvent de façon combinée dans les modalités de l'écoulement, de ce fait, il convient de les préciser dans cette étude.

Ces caractéristiques telles que Le temps de concentration, la taille du bassin versant (sa surface), sa forme, son élévation, sa pente et son orientation. Sans oublier le type de sol, le couvert végétal et les caractéristiques du réseau hydrographique

Le tableau suivant Récapitule les principales caractéristiques morphométriques et hydrographiques des bassins aux droits de différentes stations hydrométriques étudiée.

Tableau II.1. Caractéristiques des bassins versants étudiés

| Bassin | Nom de station | Code station | S (km ²) | P (km) | Ic | H _{max} | H _{min} | H _{moy} | Ip | Dd (Km/Km ²) | Ct |
|------------------------------|-----------------|--------------|----------------------|--------|------|------------------|------------------|------------------|------|--------------------------|------|
| Côtiers Algérois | BOUMEDFAA | 021006 | 336 | 72 | 1.16 | - | - | - | 0.19 | 2.5 | 16.5 |
| | FER A CHEVAL | 021201 | 1900 | 185 | 1.19 | - | - | - | 0.26 | 5.2 | 21 |
| | BARAKI-PONT | 021418 | 970 | 143 | 1.28 | 1629 | 20 | 525 | 0.15 | 3 | 22 |
| | FREHA | 021606 | 100 | 42 | 1.18 | - | - | 476 | 0.26 | 3.4 | 25 |
| | BAGHLIA VILLAGE | 022001 | 2390 | 200 | 1.14 | - | - | 500 | 0.17 | 2.7 | 19.6 |
| Côtiers constantinoise | CHEFFIA(BGE) | 031501 | 117.48 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | AIN EL ASSEL | 031601 | 680 | 115 | 1.23 | - | - | 298 | 0.15 | 3 | 16.3 |
| Chott Hodna | MEDJEZ | 050901 | 1330 | 165 | 1.27 | - | - | 637 | - | 4 | 27 |
| Hauts plateaux constantinois | REBOA | 070403 | 296 | 80 | 1.3 | - | - | 1410 | 0.19 | 2.2 | 7.26 |
| Isser | BENI SLIMANE | 090305 | 273 | 71 | 1.2 | 1371 | 600 | 940 | 13 | 2.4 | 18 |
| Kebir Rhumel | HAMMA BOUZIANE | 100602 | 295 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | AL ANCER | 100701 | 8735 | 375 | 1.12 | - | - | 767 | - | - | - |
| Medjerdah | OUEENZA | 120401 | 4575 | 305 | 1.26 | - | - | - | - | - | - |
| Seybouse | BOUCHEGOUF | 140501 | 550 | 120 | 1.43 | 95 | 1317 | 641 | 0.15 | 4 | 25.2 |
| Soummam | FERMATOU | 150601 | 105 | 60 | 1.09 | - | - | 1205 | - | 2.94 | 18 |
| | BOU BIREK | 150703 | 2960 | 250 | - | - | - | - | - | - | - |

S : surface (km²), P: Périmètre (km), Ic: Pente de roche, H_{max} : Hauteur maximale (m), H_{min} : Hauteur minimale (m), H_{moy} : Hauteur moyenne (m), Ip : Pente moyenne, Dd : Densité de drainage (Km/km²), Ct : Coefficient de torrentialité.

CHAPITRE III

PRÉSENTATION ET TRAITEMENT DES DONNÉES

CHAPITRE III : PRÉSENTATION ET TRAITEMENT DES DONNÉES

III.1. Introduction

Dans ce chapitre ; Nous présentons le traitement des données et les méthodes utilisées pour celui-ci, ainsi que les propriétés fonctionnelles des séries de données mensuelles de précipitations, de débit et d'évapotranspiration à étudier.

III .2. Données utilisées

La création du projet nécessite une série de données hydrologiques (précipitations, débits) et climatiques (évapotranspiration) pour procéder à la modélisation.

La collecte et la mise en forme des données est la phase la plus délicate et difficile en hydrologie. Nous avons collecté des données de plusieurs stations situées à différents endroits de l'Est algérien. Les données hydrologiques utilisées proviennent de la banque de données de l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques) en Algérie.

Pour cette étude, nous avons collecté plusieurs stations situées dans l'Est algérien. Après traitement et comblement des lacunes, la plupart de ces stations ont été rejetées, comme celles des bassins 07, et 06, car elles contiennent de nombreuses lacunes et sont donc invalides et peu fiables.

Finalement la zone d'étude contient un réseau suffisant pour les mesures hydrologiques et climatiques, composé de 16 stations réparties sur 9 bassins versants situés dans l'Est algérien.

III .2.1. Données pluviométriques

Les données de pluviométrie sont définies par les hauteurs des précipitations mensuelles. Pour calculer les précipitations mensuelles, nous devons additionner l'ensemble des précipitations quotidiennes pour chaque mois (Le calcul est fait pour le nombre de jours de chaque mois). Les périodes étudiées ont pu être fixées en fonction des débits disponibles pour chaque bassin versant.

$$P_{\text{men}} = \sum p_j \quad \text{(III.1)}$$

Où : P_{men} : Pluies mensuelles.

$\sum P_j$: La somme des pluies journalières.

Le tableau suivant présente les coordonnées des stations étudiées et leurs caractéristiques fonctionnelles.

Tableau III.1. Les coordonnées et les caractéristiques fonctionnelles des séries de données pluviométriques utilisées

| Bassin | Nom de la station | Code station | Année de fonctionnement | X (km) | Y (km) | Z (m) |
|--|--------------------|--------------|-------------------------|--------|--------|-------|
| Côtiers Algérois (02) | OUED ZBOUDJ | 021014 | 1979/1993 | 468.05 | 334.8 | 400 |
| | BOUFARIK PEPINIERE | 021209 | 1982/1992 | 518,55 | 363,4 | 60 |
| | BARAKI-PONT | 021421 | 1996/2006 | 535.05 | 376.5 | 20 |
| | FREHA | 021603 | 1986/2002 | 641.9 | 383.5 | 140 |
| | BAGHLIA VILLAGE | 022002 | 1979/1989 | 603.65 | 390 | 30 |
| Côtiers constantinoise (03) | CHEFFIA(BGE) | 031501 | 1985/2003 | 977,15 | 381,3 | 170 |
| | AIN EL ASSEL | 031601 | 1979/1989 | 1005,6 | 400,05 | 35 |
| Chott Hodna (05) | MEDJEZ | 050901 | 1979/1994 | 673.35 | 289.65 | 636 |
| Hauts plateaux constantinois (07) | REBOA | 070406 | 1986/1996 | 848.1 | 250.25 | 1002 |
| Isser (09) | DJOUAB | 090301 | 1985/1995 | 539.8 | 3998.9 | 825 |
| Kebir Rhumel (10) | HAMMA BOUZIANE | 100603 | 1989/2004 | 848,5 | 352,8 | 460 |
| | AL ANCER | 100706 | 1979/1989 | 36.79 | 6.16 | 24 |
| Medjerdah (12) | EL AOUINET | 120402 | 1979/1989 | 967,8 | 297,4 | 650 |
| Seybouse (14) | BOUCHEGOUF | 140505 | 1985/19950 | 949.15 | 362.2 | 110 |
| Soummam (15) | BOU BIREK | 150703 | 2002/2012 | 689,6 | 354,5 | 500 |
| | FERMATOU | 150613 | 1985/1995 | 745.75 | 337.5 | 1130 |

III .2.2. Données hydrométriques

Ces données sont primordiales dans la relation pluie-débit. Elles correspondent aux débits mesurés à l'exutoire. Le débit représente un volume d'eau écoulé par unité de temps, généralement exprimé en m³/s.

Le débit mensuel est calculé en faisant la moyenne de tous les débits quotidiens pour chaque mois.

$$Q_{\text{men}} = \sum(Q_j) / N \quad (\text{III.2})$$

Où : Q_{men} : Débit mensuel.

$\sum Q_j$: Débit journalières.

N : Nombre d'années de la série.

Les tableaux suivants indiquent l'année de fonctionnement ; le nombre d'observation ; la surface et le périmètre.

Tableau III.2. Caractéristiques des stations hydrométriques étudiées

| Bassin | Nom de la station | Code station | Année de fonctionnement | S (km ²) | P (m) |
|--|-------------------|--------------|-------------------------|----------------------|--------|
| Côtiers Algérois (02) | BOUMEDFAA | 021006 | 1979/1993 | 336 | 72 |
| | FER A CHEVAL | 021201 | 1982/1992 | 1900 | 185 |
| | BARAKI-PONT | 021418 | 1996/2006 | 970 | 143 |
| | FREHA | 021606 | 1986/2002 | 100 | 42 |
| | BAGHLIA VILLAGE | 022001 | 1979/1989 | 2390 | 200 |
| Côtiers constantinoise (03) | CHEFFIA (BGE) | 031515 | 1985/2003 | 117,48 | - |
| | AIN EL ASSEL | 031601 | 1979/1989 | 680 | 115 |
| Chott Hodna (05) | MEDJEZ | 050901 | 1979/1994 | 1330 | 165 |
| Hauts plateaux constantinois (07) | REBOA | 070403 | 1986/1996 | 296 | 80 |
| Isser (09) | BENI SLIMANE | 090305 | 1985/1995 | 273 | 71 |
| Kebir Rhumel (10) | BOUCHDIRA | 100602 | 1989/2004 | 295 | - |
| | AL AN CER | 100701 | 1979/1989 | 8735 | 375 |
| Medjerdah (12) | OUENZA | 120401 | 1979/1989 | 4575 | 305 |
| Seybouse (14) | BOUCHEGOUF | 140501 | 1985/1995 | 550 | 120 |
| Soummam (15) | BOU BIREK | 150703 | 2002/2012 | 2960 | 250 |
| | FERMATOU | 150601 | 1985/1995 | 105 | 60 |

III .2.3. Données climatiques

La collecte de données climatiques consiste à rechercher toute l'information météorologique disponible dans la région étudiée.

Cette étape constitue la phase la plus importante et la plus fastidieuse de notre travail. Elle consiste à collecter l'information brute, mais aussi de vérifier sa fiabilité pour une prise de décision correcte.

Pour notre travail nous disposons de 10 stations météorologiques réparties sur l'Est algérien. Les données météorologiques utilisées proviennent de la banque de données de l'O.N.M (Office Nationale de Météorologie) en Algérie. Elles sont structurées suivant l'année calendaire allant du 1er janvier au 31 décembre.

Pour estimer l'évapotranspiration, nous utilisons : la température maximale (T_{max}), la température minimale (T_{min}), la pluie (P), l'humidité relative (H%), la vitesse du vent (U_2) et le rayonnement solaire (SR).

L'ETP est un des termes majeurs du bilan hydrologique en relation directe avec le climat caractéristique des zones semi-arides, faisant intervenir le climat, le sol ou encore la végétation.

L'évapotranspiration est le processus biophysique de transfert d'une quantité d'eau vers l'atmosphère, par l'évaporation au niveau du sol et par la transpiration des plantes.

A l'aide de la formule de Penman Monteith modifiée (FAO), on calcule l'ETP. Nous disposons de données telles que les durées d'insolation, la vitesse du vent, le rayonnement et la température sur une seule station étudiée

Dans un premier temps, nous estimerons l'évapotranspiration de référence, c'est à dire l'évapotranspiration qu'aurait un gazon bien alimenté en eau sous l'effet de notre climat.

La formule de Penman-Monteith se distingue parmi les différentes formules par son origine théorique dérivée du bilan de flux énergétique à la surface de couvert végétale, dans un souci de normalisation, la FAO, à travers son groupe d'experts opérants dans différent contextes climatiques, a adapté la formule Penman-Monteith aux conditions d'un couvert de gazon et propose la formule dérivée comme la nouvelle définition 'l'évapotranspiration de référence'. (Allen et al., 1998) ont défini l' ET_0 comme « l'évapotranspiration d'un couvert

végétale « hypothétique » de référence ayant une hauteur de 12 cm, une résistance du couvert de 70 s/m et un albédo de 23%. Un couvert de gazon se développe activement sur une grande étendue régulièrement tendu, bien alimenté en eau et indemne de maladies.

L'évapotranspiration de référence peut s'écrire selon la formule :

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (III.3)$$

Avec :

ET₀ : Evapotranspiration de référence journalière (mm/j),

R_n : Rayonnement net à a surface de culture (M J/m²/j),

G : Flux de chaleur échangé avec le sol (M J/m²/j) ; qui est à la l'échelle de journée pratiquement nul, en effet le gain diurne de chaleur par le sol équilibre la perte nocturne.

T : Température moyenne journalière (°C)

U₂ : Vitesse moyenne journalière du vent mesuré à 2 mètre (ms)

e_s et **e_a** : Respectivement la pression de vapeur saturant et la pression réelle de l'air à la même hauteur (kPa) ;

γ : Constant psychrométrique (kPa /°C),

900 : Coefficient pour la culture de référence (kg k/ kJ) liées aux unités utilisées a la distribution de variables ρ, c_p et r_a,

0.34 : Coefficient de vent pour la culture de référence (kg K/ kJ) résultat du rapport r_s/ r_a,

0.408 : inverse de λ = 2.45 MJ/ kg,

Δ : Pente de la courbe de pression de vapeur saturante à la température T (kPa /°C),

Où :

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp \left(\frac{17.27T}{T + 237.3} \right) \right]}{(T + 237.3)^2} \quad (III.4)$$

Les données climatiques utilisées concernent les régions suivantes : Alger, El-Kala, Bordj, Batna, Mila, Tebessa, Guelma et Setif.

Tableau : III .3. Caractéristiques des séries de données climatiques

| Station ETP | X | Y | Z |
|---------------------|----------|----------|----------|
| ALGER | 36.76 | 3.08 | 6 |
| EL-KALA | 36.9 | 8.45 | 13 |
| BORDJ BOUARAREDJ | 36.06 | 4.76 | 930 |
| BATNA | 35.56 | 6.17 | 1052 |
| MILA | 36.45 | 6.27 | 1040 |
| TEBESSA | 35.41 | 8.13 | 813 |
| GUELEMA | 36.46 | 7.46 | 228 |
| SETIF | 36.18 | 5.41 | 1038 |
| TIZI-OUZOU | 36.70 | 4.05 | 189 |
| BLIDA | 36.48 | 36.48 | 170 |

III.3. Comblement des lacunes d'observations

Dans la base de données des pluies et des débits, il y a des lacunes donc il est nécessaire de combler ces lacunes. Le comblement de lacunes d'observation a été effectué par la méthode de la moyenne mensuelle.

Cette méthode permet de combler les lacunes d'observations par le calcul de la moyenne des valeurs mesurées de chaque mois de toutes les années disponibles. Une fois les moyennes de chaque mois sont calculées, on procède au remplissage des lacunes par la moyenne du mois correspondant.

Le tableau suivant montre les noms et codes des séries de stations pluviométriques et hydrométriques et le nombre de leurs lacunes.

Tableau : III .4. Les codes des stations (pluviométriques et hydrométriques) utilisées et le nombre de leurs lacunes

| Bassin | Nom de la station hydrométrique | Code station pluviométrique | Nombre de lacunes (Pluie) | Code station hydrométrique | Nombre de lacunes (débit) |
|--|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Côtiers Algérois (02) | BOUMEDFAA | 021014 | 0 | 021006 | 0 |
| | FER A CHEVAL | 021209 | 0 | 021201 | 0 |
| | BARAKI-PONT | 021421 | 0 | 021418 | 0 |
| | FREHA | 021603 | 0 | 021606 | 0 |
| | BAGHLIA VILLAGE | 022002 | 0 | 022001 | 0 |
| Côtiers constantinoise (03) | CHEFFIA(BGE) | 031501 | 0 | 031515 | 0 |
| | AIN EL ASSEL | 031601 | 2 | 031601 | 0 |
| Chott Hodna (05) | MEDJEZ | 050901 | 3 | 050901 | 3 |
| Hauts plateaux constantinois (07) | REBOA | 070406 | 0 | 070403 | 0 |
| Isser (09) | BENI SLIMANE | 090301 | 0 | 090305 | 0 |
| Kebir Rhumel (10) | BOUCHDIRA | 100603 | 0 | 100602 | 0 |
| | AL ANCER | 100706 | 0 | 100701 | 0 |
| Medjerdah (12) | OUENZA | 120402 | 3 | 120401 | 0 |
| Seybouse (14) | BOUCHEGOUF | 140505 | 0 | 140501 | 0 |
| Soummam (15) | BOU BIREK | 150703 | 1 | 150703 | 1 |
| | FERMATOU | 150613 | 2 | 150601 | 0 |

III.4. Les données finales

Chaque sous-bassin contient une station pluviométrique, hydrométrique et climatique, le tableau suivant présente les trois stations de chaque sous-bassin, et qui représentent les données finales de cette étude.

Le tableau ci-dessous indiquent une liste des données définitives pour les trois stations (pluviométriques, hydrométriques, climatiques) utilisées par la suite pour modéliser la relation pluies-débits, objet de ce travail, ainsi que la période de fonctionnement.

Tableau : III.5. Liste des séries de données finales utilisées dans cette étude

| Année de fonctionnement | Code station pluviométrique | Code station hydrométrique | Station ETP |
|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 1979/1993 | 021014 | 021006 | BLIDA |
| 1982/1992 | 021209 | 021201 | ALGER |
| 1996/2006 | 021421 | 021418 | TIZI-OUZOU |
| 1986/2002 | 021603 | 021606 | TIZI-OUZOU |
| 1979/1989 | 022002 | 022001 | TIZI-OUZOU |
| 1985/2003 | 031501 | 031515 | EL-KALA |
| 1979/1989 | 031601 | 031601 | EL-KALA |
| 1979/1994 | 050901 | 050901 | BORDJ |
| 1986/1996 | 070406 | 070403 | BATNA |
| 1985/1995 | 090301 | 090305 | ALGER |
| 1989/2004 | 100603 | 100602 | MILA |
| 1979/1989 | 100706 | 100701 | MILA |
| 1979/1989 | 120402 | 120401 | TEBESSA |
| 1985 /1995 | 140505 | 140501 | GUELMA |
| 2002/2012 | 150703 | 150703 | SETIF |
| 1985/1995 | 150613 | 150601 | SETIF |

CHAPITRE IV

MATÉRIELS ET MÉTHODES

CHAPITRE IV : MATÉRIELS ET MÉTHODES

IV.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter les principales techniques de modélisation, les différents modèles utilisés dans cette étude et le matériel qui s'exprime sous forme des logiciels servant comme outils de mise en service de la procédure.

IV.2. Présentation des Modèles Utilisés

IV.2.1. Le modèle mensuel GR2M

IV.2.1.1. Description

Elaboré au CEMAGREF sur un ensemble de bassins français (**Makhlouf, 1994**), GR2M est un modèle conceptuel pluie-débit à réservoirs, à pas de temps mensuel et utilisant seulement deux paramètres.

Bien qu'il soit le plus souvent utilisé en mode global, sa simplicité d'utilisation et sa robustesse permet facilement de l'adapter au mode semi-distribué.

GR2M restitue ainsi les débits calculés à travers une série de réservoirs à partir des données initiales du bassin versant au début de la période simulée. Ici, les variables d'entrée sont la pluie et l'ETP et les variables de sortie sont les débits simulés notés Q .

Les deux paramètres à caler de ce modèle sont notés $X1$ et $X2$.

IV.2.1.2. Le réservoir sol

Il est caractérisé par sa capacité maximale A . Le niveau S du réservoir sol permet de définir la fraction de la pluie qui accédera au réservoir eau gravitaire. Il permet notamment de définir l'évapotranspiration réelle (ETR) qui pourra être fournie, celle-ci est une fraction de l'ETP ayant des caractéristiques symétriques à la fraction de pluie entrant dans le réservoir eau gravitaire.

La valeur ' A ' utilisée ici est issue de la carte "Soil Map of the World" fournie par la FAO (**FAO-UNESCO, 1974-1981**). Pour la FAO, cette variable est notée S . On s'est aperçu que parmi les différentes grilles fournies par la FAO, S_{max} conduit aux valeurs du critère les plus élevées pour la majorité des cas (**Figure IV.1**), et cela, quelque soit le modèle considéré (**Ardoin, 2003**).

Nous avons donc, fait le choix d'utiliser cette valeur S_{max} pour la donnée "sol" A utilisée dans GR2M.

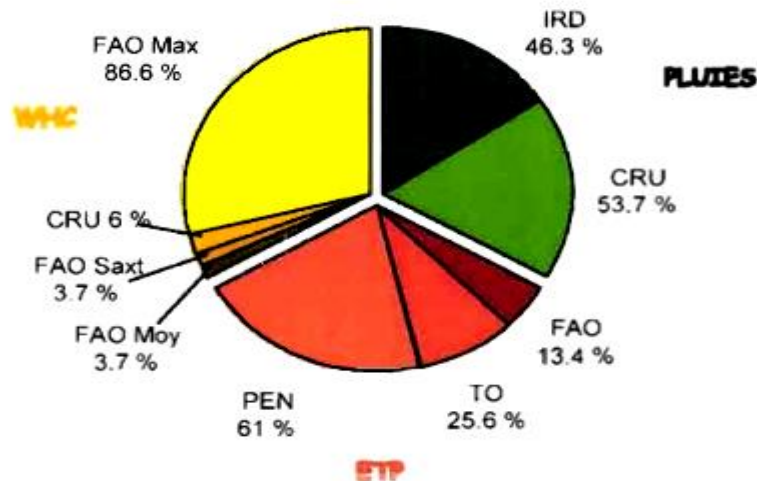


Figure IV.1. Résultats en termes de meilleurs calages pour l'ensemble des données sur les 41 bassins pour les sous populations de pluie, d'ETP et de WHC (selon Ardoin, 2003)

Les valeurs de la capacité d'emmagasinement de l'humidité du sol (the soil moisture storage capacity) ont été déterminées par une analyse de cent premiers centimètres du sol ou dans les couches imperméables superficielles, cette valeur va donc être caractéristique des particularités du sol et l'on retrouve en général une donnée différente pour chaque grande typologie de sol. S_{max} est exprimé en millimètres.

IV.2.1.3. La fonction de production et la fonction de transfert

La fonction de production met en évidence la répartition de l'eau précipitée entre les différents termes du bilan hydrique, elle permet essentiellement de déterminer l'ETR, le ruissellement superficiel et la partie de l'eau transitée par la fonction de transfert appelée "eau gravifique". A P donnée, une valeur faible de FAO_{max} donnera une production plus forte, et donc un écoulement plus important que pour une forte valeur de FAO_{max} .

IV.2.1.4. Hiérarchisations des différentes étapes

- **Ajustement des entrées :**

Les données de précipitations (P) et d'évapotranspiration (ETP) sont ajustées par un paramètre multiplicatif X_1 afin d'obtenir P' et ETP'.

Ce paramètre agit comme un coefficient correcteur des entrées et correspond à un des paramètres à estimer dans la phase d'optimisation.

$$\begin{cases} P = X_j \cdot P' \\ ETP = X_j \cdot ETP' \end{cases} \quad (IV.1)$$

• **Neutralisation :**

Elle se traduit par la soustraction d'une quantité (U) aux valeurs de P' et ETP'.

On aboutit ainsi aux quantités de pluie (Pn) et d'évapotranspiration nette (En), participant de manière effective à l'écoulement.

U est de la forme:

$$U = \frac{P' \cdot ETP'}{(\sqrt{P'} + \sqrt{ETP'})^2} \quad (IV.2)$$

Cette quantité est ainsi soustraite aux entrées :

$$\begin{cases} P_n = P' - U \\ E_n = ETP' - U \end{cases} \quad (IV.3)$$

• **Action du réservoir (Stockage) :**

Soit H le stock d'humidité du réservoir sol en début du mois considéré, le forçage de Pn augmente le niveau de H pour donner H1:

$$H_1 = \frac{H + AV}{1 + \frac{HV}{A}} \quad (IV.4)$$

Où : $V = \tanh \frac{P_n}{A}$

et A correspondant à la capacité maximum du réservoir sol.

La valeur d'excès de pluie Pe est déterminée ici par :

$$P_e = P_n - (H_J - H_1) \quad (IV.5)$$

Puis, sous l'effet de En, le niveau H1 du réservoir devient H2 qui correspond au niveau du réservoir sol au début de chaque mois suivant.

$$H_2 = \frac{H_1(1-W)}{1+W(1-\frac{H_1}{A})} \quad (\text{IV.6})$$

Avec : $W + \tanh \frac{H_1}{A}$

Ces relations sont issues de l'intégration de formules plus élémentaires (**Edijatno et Michel, 1989**).

• **Routage et écoulements**

Remarque:

Le réservoir d'eau gravitaire S (fonction de transfert) reçoit directement Pe et le niveau de celui-ci au début de chaque mois considéré, augmente pour devenir SI. On peut noter qu'ici, on considère que toute la portion de Pe s'écoule dans le réservoir d'eau gravitaire.

La partie complémentaire, initialement prévue dans le schéma de GR2M, correspondant à l'écoulement direct, n'est plus pris en compte.

Ce choix fait suite à la constatation (**Lubes-Niel, 2003**) après optimisation, que l'écoulement direct en région tropicale semi-aride, tout au moins d'un point de vue numérique, est nul sur un très grand nombre de bassins versants africains.

Nous ne considéreront donc pas ici les écoulements directs.

Le niveau S du réservoir au début du mois considéré augmente et devient SI.

$$SI = S + Pe \quad (\text{IV.7})$$

Le débit Qg libéré par le réservoir linéaire au cours de la vidange est alors de la forme:

$$Qg = X2.Sj \quad (\text{IV.8})$$

Celui-ci correspond à l'écoulement total puisque l'écoulement direct est considéré comme nul D'où $Q = Qg$.

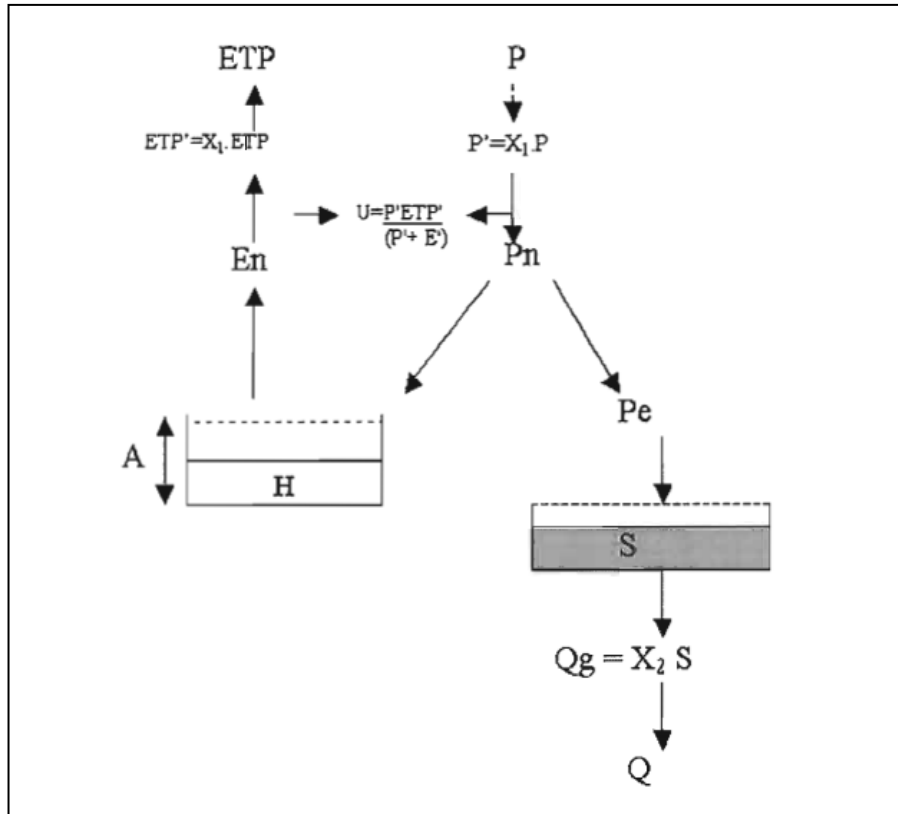


Figure IV.2. Architecture du Modèle GR2M

IV.2.2.les réseaux de neurones artificiels (MLPNN)

IV.2.2.1.Généralités

Un "neurone formel" (ou simplement "neurone") est une fonction algébrique non linéaire et limitée, dont la valeur dépend de paramètres appelés poids ou coefficients (**Dreyfus, 1998**). C'est un opérateur mathématique non linéaire qui se caractérise par des paramètres, généralement appelés coefficients synaptiques, et par une fonction dite d'activation. Un neurone peut avoir une ou plusieurs variables et une ou plusieurs sorties (**Figure VI.3**).

Le réseau neuronal est défini comme un ensemble d'éléments de structure identique appelés cellules (ou neurones) interconnectés comme les cellules du système nerveux des vertébrés (**Coulibaly et al., 1999**). À partir des neurones biologiques, des auteurs comme (**Werbos 1982**) ont été inspirés pour développer des neurones formels ou artificiels. Des similitudes ont donc été établies entre les éléments des neurones biologiques et les composants des neurones formels ou artificiels (**Figure IV.3**).

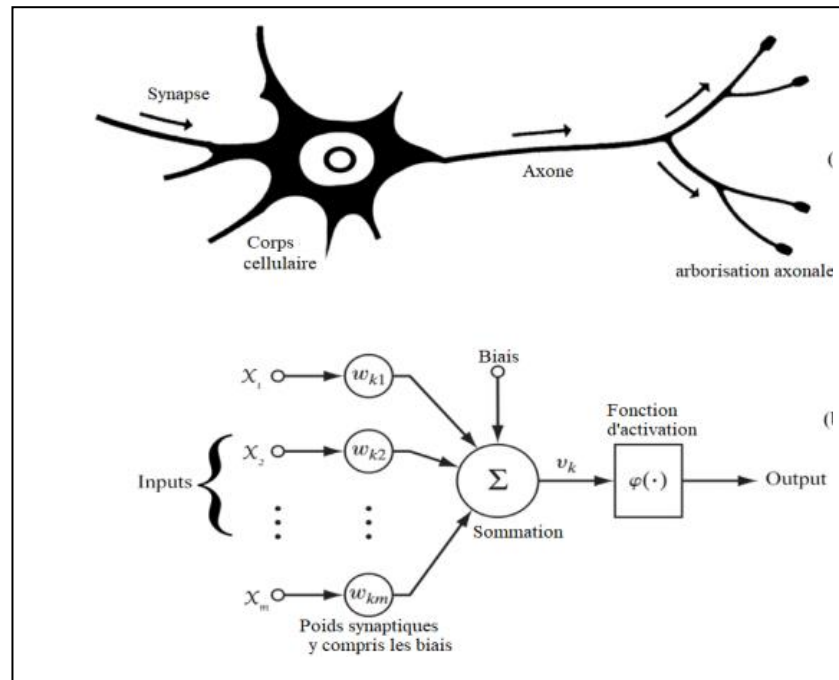


Figure VI.3. Mise en correspondance entre le neurone biologique et le neurone artificiel (Haykin, 2009)

IV.2.2.2.Choix d'un réseau de neurones artificiel

Plusieurs types de réseaux de neurones existent comme le réseau de neurones à fonction de régression générale (GRNN), réseau de neurones à fonction de base radial (RBFANN) et le perceptron multicouche (MLP).

Mais, le perceptron multicouche avec une ou plusieurs couches cachées entre la couche d'entrée et la sortie est utilisé dans cette étude. Un réseau de neurones multicouche est formé d'une couche d'entrée, une autre couche de sortie et d'une couche cachée. Le terme de couche cachée est emprunté au réseau multicouche, il souligne le fait que cette couche n'est pas directement observable par l'utilisateur à la différence de l'entrée ou de la sortie.

Il n'y a pas de connexion entre les neurones d'entrées. Par contre, la couche cachée est une couche d'activation compétitive, tous les neurones sont reliés les uns aux autres par des connexions inhibitrices de poids fixes. La Figure IV.4 représente une structure d'un modèle perceptron multicouche avec une seule couche cachée, chaque neurone de la couche d'entrée est relié à tous les neurones de la couche cachée et, réciproquement, chaque neurone de la couche cachée est relié à tous les neurones de la couche de sortie. A chaque connexion est associé un poids (Touzet, 1992).

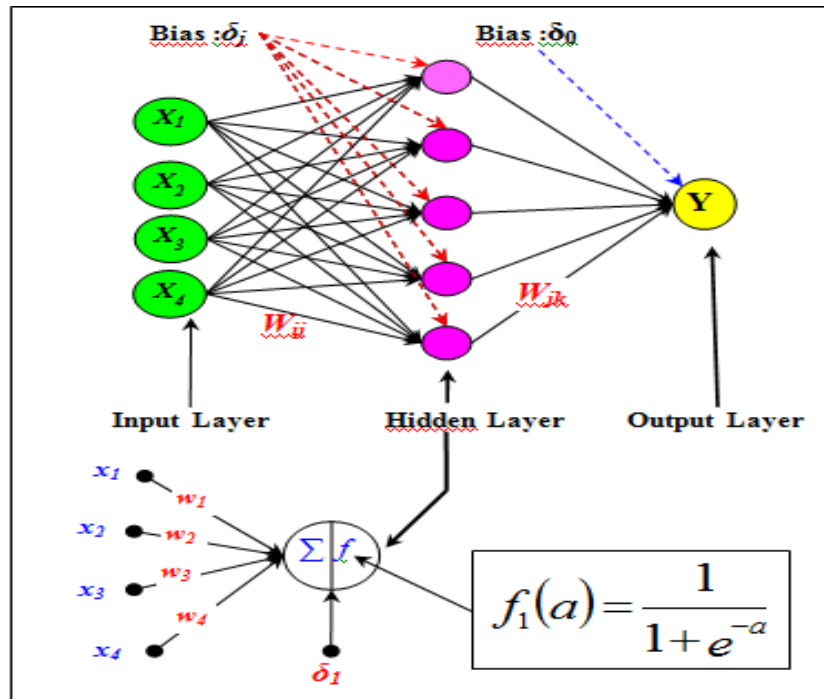


Figure IV.4. Structure d'un modèle de réseau neuronal artificiel de type MLP

IV.2.2.3. Apprentissage des réseaux de neurones

Le point crucial dans le développement d'un réseau de neurones est son apprentissage. Il s'agit d'une procédure adaptative par laquelle les connexions des neurones sont ajustées à une source d'information (**Rumelhart et al., 1986**). Contrairement aux affirmations répétées, l'apprentissage des réseaux de neurones n'est pas particulièrement lent : il existe des algorithmes d'optimisation non linéaire extrêmement rapides (**Press et al., 1992**).

Dans la majorité des algorithmes actuels, les variables modifiées pendant l'entraînement sont les poids des connexions.

L'expression mathématique précise pour calculer le débit prévu (Valeur de sortie) peut être exprimée en utilisant le réseau de neurones artificiels comme suit :

$$Y = F_2 \left[\sum_{i=1}^m w_{kj} \cdot F_1 (A_j) + b_0 \right] \quad (\text{IV.9})$$

$$A_j = \sum_{i=1}^n X_i (w_{ji}) + b_j \quad (\text{IV.10})$$

Où :

Y : est la variable de sortie qui a été calculée par le modèle ANN (le débit prévu rapporté comme Y),

X_i : sont les variables d'entrée,

A_j : est la somme des entrées et de leurs poids représentés par l'équation (IV.10).

F_1 : est la fonction d'activation pour la couche cachée représentée par l'équation (IV.11),

F_2 : est la fonction d'activation pour la couche de sortie,

W_{ij} : est le poids entre l'entrée i et le neurone caché j .

b_j : est le biais du neurone caché j ,

W_{jk} : est le poids de la connexion du neurone j dans la couche cachée au neurone k dans la couche de sortie,

b_o : est le biais du neurone de sortie k .

$$F_1(A_j) = \frac{1}{1 + \exp(-A_j)} \quad (\text{IV.11})$$

L'apprentissage est la modification des poids du réseau afin de faire correspondre la réponse du réseau aux exemples et à l'expérience. Les poids sont initialisés avec des valeurs aléatoires.

Ensuite, des exemples expérimentaux représentatifs du fonctionnement de la méthode dans un domaine donné sont présentés au réseau de neurones. Ces exemples sont constitués de paires expérimentales de vecteurs d'entrée et de sortie. Une méthode d'optimisation modifie les poids comme les itérations au cours desquelles tous les exemples sont présentés, afin de minimiser l'erreur entre les sorties calculées et les sorties expérimentales. Dans cette étude, la régularisation Bayésien a été utilisée. L'algorithme de régularisation bayésienne (RB) a une fonction objectif comprenant la somme des carrés des résidus et la somme des carrés des poids afin de minimiser l'estimation des erreurs et d'atteindre un modèle généralisé adéquat (Marwala, 2007; Burden et Winkler, 2008). L'avantage de cet algorithme est qu'il est intégré dans le logiciel de programmation Matlab par défaut, il a même une grande capacité à détecter des relations potentiellement complexes ce qui lui permet d'être utilisé dans des cas complexes pour fournir un modèle plus robuste (Humphrey et al., 2016; Kayri, 2016; Sun et al., 2017).

IV.2.3. La Régression linéaire multiple (MLR)

La régression linéaire multiple MLR est l'une des méthodes de modélisation les plus populaires par sa simplicité d'utilisation et facilité d'interprétation. Le modèle MLR est basé sur l'équation de régression qui illustre la relation simple entre les variables dépendantes et les variables indépendantes.

Le MLR peut être considéré comme une méthode mathématique qui aide à expliquer une variable de réponse Y (à prédire) et une série de variables explicatives X_t (prédicteurs) en recherchant une relation linéaire entre elles (**Huien et Peter, 1997; Malik et Kumar, 2015; Li et al., 2017**).

En fait, l'hypothèse du modèle est que la relation entre la variable dépendante Y et le vecteur des variables X est linéaire. MLR est utilisé pour trouver une relation de régression basée sur la fonction suivante :

$$Y = f(x_i) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_i x_i \quad (\text{IV.12})$$

Où $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ sont les paramètres et Y est la variable à modéliser en fonction des variables explicative X_i .

IV.3. Mise en travail

Pour pouvoir dire qu'un modèle est robuste on doit établir la relation entre les variables d'entrées (ETP, P) et les variables de sorties (Q simulées), et cela ne peut se faire que par l'estimation des paramètres du modèle (calage et validation).

La base de données est scindée en deux parties : 70% pour la partie calage (apprentissage), cette dernière doit être suffisamment représentative, et 30% pour la partie validation afin de juger la qualité prédictive du modèle.

IV.3.1. Critères d'évaluation de la qualité des modèles

Pour savoir si le modèle fonctionne correctement, et pour déterminer la fiabilité et les performances du modèle utilisé, il existe plusieurs méthodes pour évaluer ses qualités. Les critères de performance sont un outil utile pour estimer les résultats obtenus et analyser l'efficacité et l'efficience des modèles utilisés. Comme le notent (**Legates et McCabe, 1999**), une bonne évaluation de l'exactitude des modèles hydrologiques doit inclure au moins deux mesures : l'une dépendante de la corrélation et l'autre de l'erreur absolue. Quatre critères de performance ont été utilisés pour l'évaluation de tous les modèles. Ces critères sont :

IV.3.1.1. Critère de Nash–Sutcliffe (NSE)

Nash et Sutcliffe (1970) ont défini le coefficient d'efficacité qui va de moins l'infini à 1 avec des valeurs plus élevées indiquant un meilleur accord comme :

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N [(Q_o)_i - (Q_p)_i]^2}{\sum_{i=1}^N [(Q_o)_i - \bar{Q}_o]^2} \right], \quad (-\infty < NSE \leq 1) \quad (\text{IV.13})$$

En fonction de la valeur du critère de Nash-Sutcliffe, on peut définir des performances des modèles pluie-débit :

Tableau. IV.1: Qualité des modèles en fonction des valeurs du critère de Nash

| Qualité | Nash |
|--------------|------------------------|
| Très bonne | $0,75 < NSE \leq 1,00$ |
| bonne | $0,65 < NSE \leq 0,75$ |
| Satisfaite | $0,50 < NSE \leq 0,65$ |
| insatisfaite | $NSE \leq 0,50$ |

IV.3.1.2. Coefficient de corrélation (R)

Le coefficient de corrélation décrit la proportion de la variance totale dans les données observées qui peut être expliquée par le modèle. Il varie de 0 à 1, les valeurs les plus élevées indiquant une meilleure corrélation, et est donné sous la forme :

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((Q_0)_i - \bar{Q}_0)((Q_p)_i - \bar{Q}_p)}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((Q_0)_i - \bar{Q}_0)^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((Q_p)_i - \bar{Q}_p)^2}}, \quad (-1 < R \leq +1) \quad (\text{IV.14})$$

En fonction de la valeur du critère de R, on peut définir des performances des modèles pluie-débit :

Tableau. IV.2: Qualité des modèles en fonction des valeurs du critère de R

| Qualité | R |
|--------------|----------------------|
| Très bonne | $R \geq 0,90$ |
| bonne | $0,85 < R \leq 0,90$ |
| Satisfaite | $0,80 < R \leq 0,85$ |
| insatisfaite | $R \leq 0,80$ |

IV.3.1.3. La racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)

Il est défini comme étant la racine carrée de l'erreur quadratique, l'introduction de la racine carrée a pour but d'homogénéiser les écarts entre les débits simulés et observés en particulier dans les cas extrêmes (débits faibles ou élevés), du fait que cette erreur est élevée au carré dans le cas du critère quadratique. Le critère RMSE exprimé en m³/s est défini comme suit :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(Q_0)_i - (Q_p)_i]^2}, \quad (0 \leq RMSE < +\infty) \quad (\text{IV.15})$$

IV.3.1.4. L'erreur moyenne absolue (MAE)

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |(Q_0)_i - (Q_p)_i|, \quad (0 < MAE < \infty) \quad (\text{IV.16})$$

Où : $(Q_0)_i$ est le débit observé dans le pas concerné (i), $(Q_p)_i$ est le débit prédit, N est la taille de l'échantillon (nombre de données journalières ou mensuelles), $\overline{Q_0}$ et $\overline{Q_p}$ sont la valeur moyenne des débits observé et prévu, respectivement.

IV.4. Les logiciels utilisés

Les principaux logiciels utilisés sont :

- Tableur Excel.
- Logiciel STATISTICA.
- Feuille Excel GR2M.

IV.4.1. Logiciel STATISTICA

Le développement des modèles à base MLPNN a été établi par le logiciel STATISTICA, STATISTICA est le nom générique de la gamme de logiciels édités par la société StatSoft, Inc. Cette gamme de produits comprend une soixantaine de modules logiciels différents qui couvrent tout ou partie de l'analyse statistique des données, de l'exploration de données et de l'informatique décisionnelle.

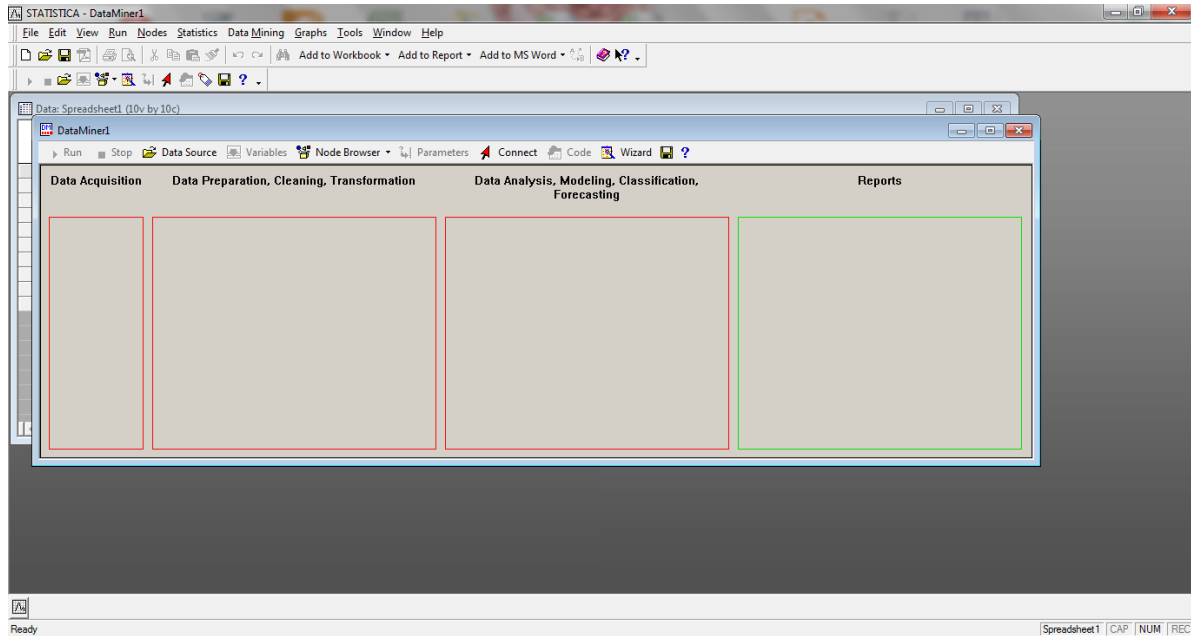


Figure IV.5. L'interface de STATISTICA

IV.4.2. La Feuille Excel GR2M

La feuille "GR2M" permet de faire des simulations de débit au pas de temps mensuel à l'aide du modèle GR2M. La version utilisée ici est celle présentée par (Mouelhi, 2003 et Mouelhi et al.,2006).

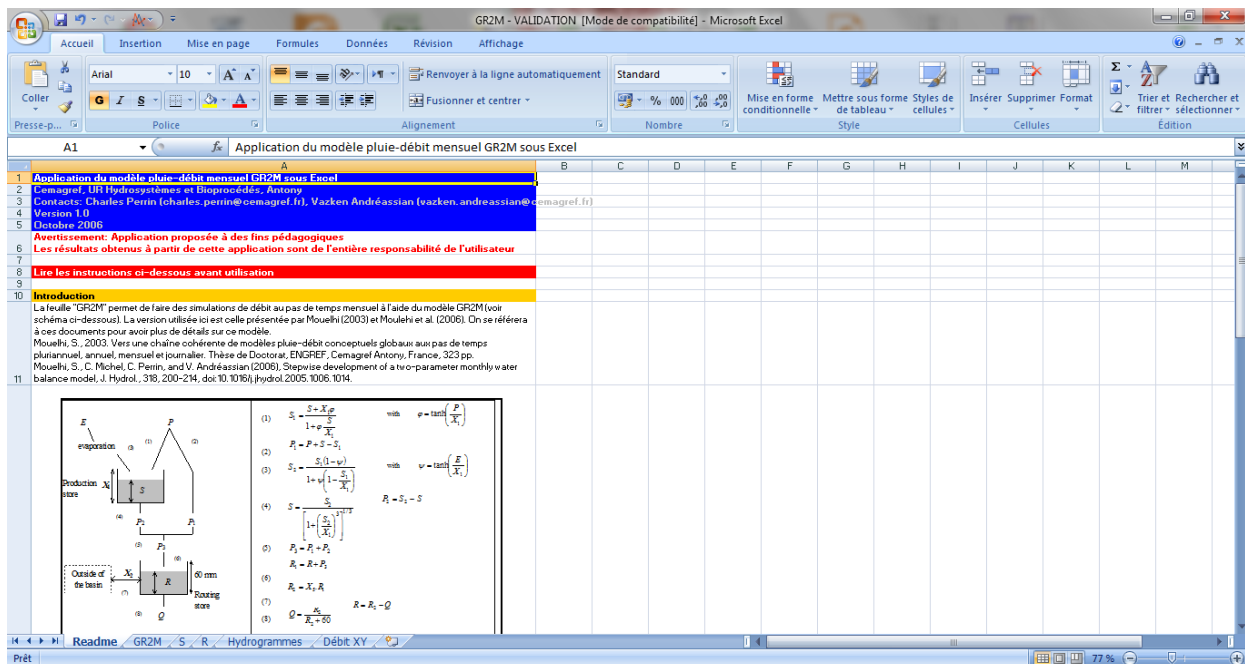


Figure IV.6. Feuille Exel GR2M

CHAPITRE V

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

CHAPITRE V : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

V.1. Introduction

Dans ce chapitre on va essayer de donner une interprétation scientifique, concernant les résultats d'application de différents modèles hydrologiques sur les séries des données utilisées dans cette étude.

V.2- Résultats obtenus par le modèle GR2M

Dans cette partie, nous avons fait la calibration des paramètres du modèle suivant l'algorithme d'optimisation intégré dans le solveur d'Excel. Afin d'atteindre le plus vite possible les meilleurs valeurs de Nash, et d'améliorer ainsi les résultats, nous avons choisi des niveaux initiaux dans les réservoirs (S0 et R0), qui représentent les paramètres initiaux du modèle, en se basant sur les directives données par les concepteurs du ce dernier.

Tableau V.1. Paramètres de calibration du modèle GR2M

| Code station | X1 | X2 |
|--------------|--------|------|
| 021006 | 4,82 | 0,44 |
| 021201 | 5,76 | 0,46 |
| 021418 | 5,84 | 1,26 |
| 021606 | 4,45 | 1,01 |
| 022001 | 5,59 | 1,30 |
| 031515 | 5,63 | 2,34 |
| 031601 | 5,55 | 0,96 |
| 050901 | -22,75 | 0,30 |
| 070403 | 5,73 | 0,92 |
| 090305 | 5,45 | 0,67 |
| 100602 | 4,85 | 1,13 |
| 100701 | 6,23 | 0,41 |
| 120401 | 1,72 | 0,29 |
| 140501 | 5,51 | 1,29 |
| 150601 | 5,37 | 0,95 |
| 150703 | 5,96 | 0,49 |

Les résultats des critères de performance NSE et R calculés, pendant les deux phases : calage et validation du modèle GR2M, pour (16) stations étudiée sont donnée dans le tableau (V.2).

Tableau V.2. Valeurs des critères d'évaluation du modèle GR2M

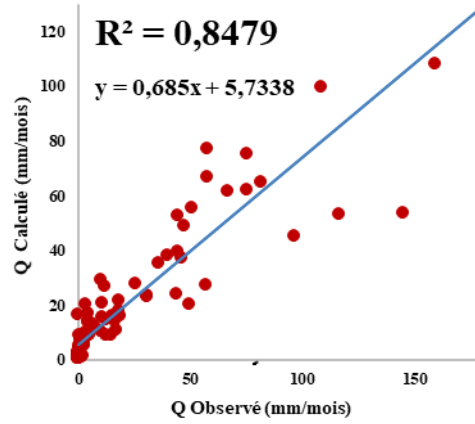
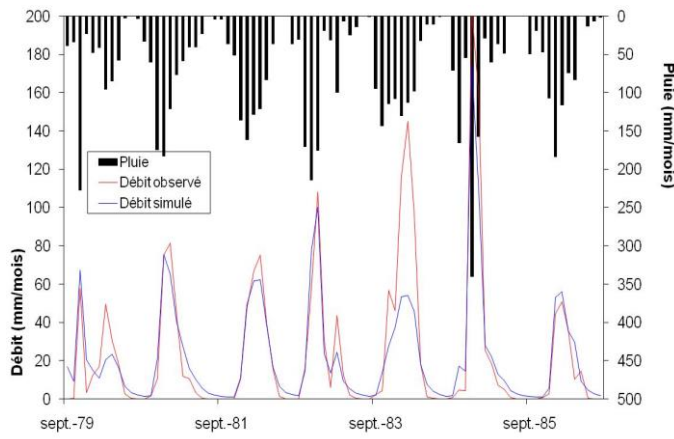
| Stations | Code stations | Calage | | Validation | |
|-----------------|---------------|---------|-------|------------|-------|
| | | NSE (%) | R (%) | NSE (%) | R (%) |
| AIN EL ASSEL | 031601 | 81 | 92 | 84 | 93 |
| FREHA | 021606 | 69 | 83 | 82 | 92 |
| CHEFFIA (BGE) | 031515 | 55 | 83 | 59 | 91 |
| BOUCHDIRA | 100602 | 72 | 87 | 70 | 89 |
| FERMATOU | 150601 | 56 | 75 | 57 | 87 |
| BOUCHEGOUF | 140501 | 67 | 86 | 56 | 86 |
| BENI SLIMANE | 090305 | 87 | 94 | 60 | 84 |
| AL ANCER | 100701 | 68 | 83 | 45 | 83 |
| BAGHLIA VILLAGE | 022001 | 62 | 80 | 65 | 82 |
| REBOA | 070403 | 26 | 61 | 64 | 82 |
| FER A CHEVAL | 021201 | 80 | 89 | 62 | 81 |
| BARAKI-PONT | 021418 | 63 | 80 | 60 | 79 |
| MEDJEZ | 050901 | 20 | 50 | 46 | 78 |
| BOU BIREK | 150703 | 60 | 78 | 60 | 77 |
| BOUMEDFAA | 021006 | 42 | 66 | 45 | 68 |
| OUENZA | 120401 | 80 | 89 | 17 | 50 |

Selon le tableau (V.2), la station d'Ain El Assel, présente les meilleurs critères par rapport aux autres stations dans la phase validation avec des valeurs de corrélations plus élevée (R=93%, NSE=84 %), même pour la station de Freha et Cheffia, Les critères donnent aussi de très bonnes valeurs par rapport aux autres stations (R=92 %, NSE=82 % et R=91 %, NSE=51%) respectivement.

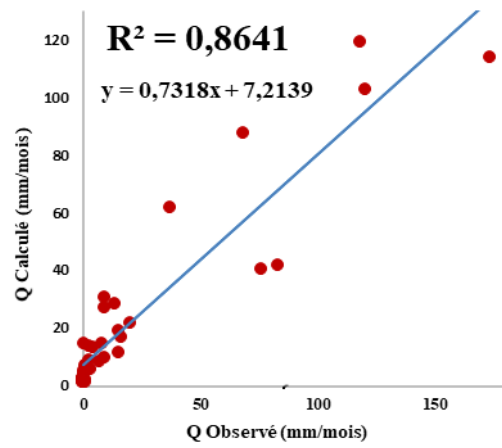
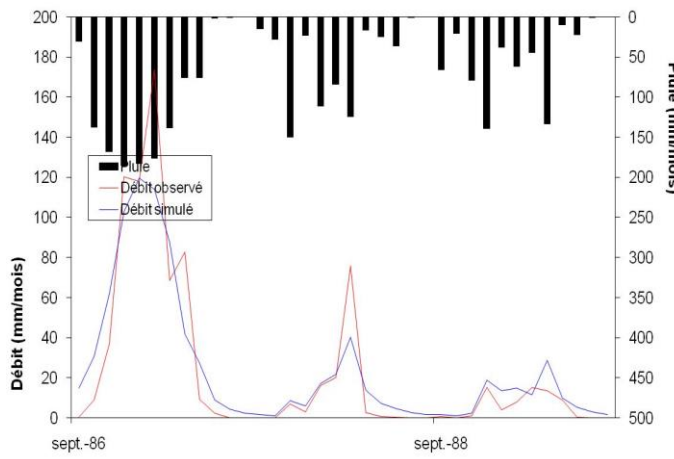
Par contre, les résultats du modèle GR2M restent insuffisantes pour quelques bassins, puisque le NSE est ≤ 50 % surtout en période de validation, telle que le bassin de Ouenza où le Nash atteint 17% et le R une valeur de 50 %.

Ces résultats sont confirmés graphiquement, les figures (V.1) et (V.2) montrent une comparaison entre les lames d'eau calculées et celles observées pour deux stations hydrométriques retenues, en calage et en validation, et pour les mêmes périodes de simulation. Les droites et les coefficients de corrélation entre les débits observés et calculés par le modèle GR2M sont donnés dans les figures ci-dessous.

Nous avons pris comme exemple, pour une illustration graphique, les résultats obtenus pour les bassins d'Ain El Assel (031601) et de Ferha (021606), et ce pour le reste des modèles aussi, cela nous permettrons de faire une comparaison entre les résultats exposés dans ce document.



A



B

Fig.V.1. Hydrogramme pluie-débit de la Station 031601 : a) phase calage b) phase validation

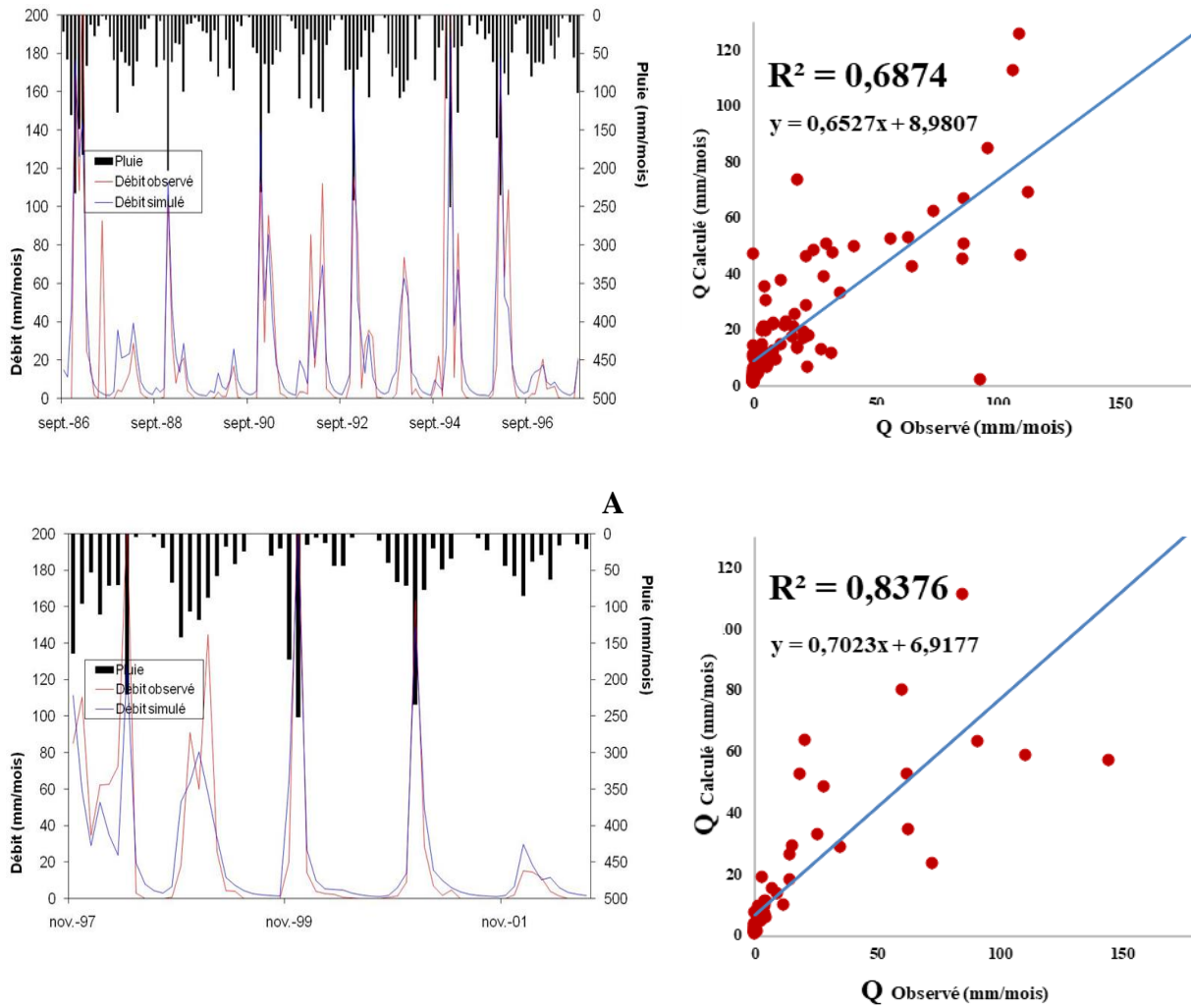


Fig.V.2. Hydrogramme pluie-débit de la Station 021606 : a) phase calage b) phase validation

Les critères graphiques confirment les résultats numériques, avec une évolution parfaite de la forme des hydrogrammes observés et simulés, y compris pour les pics, on remarque une bonne reproduction de l'évolution des débits observés lors des deux phases.

Ainsi, les résultats graphiques des débits simulés présentent des allures qui épousent quasi-parfaitement celles des débits observés (de manière acceptable), et ce pour tous les bassins étudiés. On peut dire que la qualité de simulation du modèle GR2M est bonne.

D'une manière générale, l'application du modèle GR2M sur les données des sous bassins au nord-est de l'Algérie à donner des résultats très satisfaisants, vu que l'optimisation des paramètres de calage montre que 12 stations (75%) ont des valeurs de Nash supérieures à 50%, et pour les 4 stations (25%) restantes le NSE est très faible.

Alors, l'analyse des résultats numériques et graphiques, montre que les lames d'eau calculées présentent une bonne concordance avec les lames d'eau observées.

Finalement, la modélisation par le modèle GR2M indique une très bonne corrélation entre les valeurs observées et celles estimées.

V.3. Résultats obtenus par le modèle Régression linéaire multiple (MLR)

Les régressions multiples permettent l'établissement de prévisions d'une variable dépendante à partir de plusieurs variables indépendantes, pour autant que des mesures de ces différentes variables soient disponibles.

Les variables d'entrée pour chaque bassin versant sont : la pluie, l'ETP, et la variable sortie c'est le débit simulé, et sur la base des deux critères de performances R et NSE, Le tableau ci-dessous montre les résultats de chacun d'eux dans les deux phases pour les 16 stations avec les paramètres du modèle.

Tableau V.3. Résultats obtenus par le modèle MLR

| Nom de la station | Code station | Paramètres | | | Calage | | Validation | |
|-------------------|--------------|------------|-------|--------|--------|-------|------------|-------|
| | | β | X1 | X2 | R % | NSE % | R % | NSE % |
| AIN EL ASSEL | 031601 | 0.770 | 0.090 | -0.001 | 73 | 54 | 71 | 49 |
| FREHA | 021606 | -24.313 | 0.700 | 0.086 | 75 | 56 | 84 | 69 |
| BOUCHDIRA | 100602 | -1.236 | 0.448 | -0.037 | 64 | 40 | 66 | 36 |
| FERMATOU | 150601 | 2.629 | 0.205 | -0.019 | 49 | 24 | 55 | 25 |
| BOUCHEGOUF | 140501 | 6.816 | 0.293 | -0.047 | 54 | 30 | 70 | 48 |
| AL ANCER | 100701 | 4.342 | 0.072 | -0.024 | 66 | 38 | 75 | 52 |
| BAGHLIA VILLAGE | 022001 | 4.670 | 0.447 | -0.011 | 61 | 30 | 65 | 34 |
| REBOA | 070403 | 0.770 | 0.090 | -0.001 | 55 | 43 | 45 | 18 |
| FER A CHEVAL | 021201 | 1.790 | 0.101 | -0.023 | 66 | 37 | 64 | 39 |
| BARAKI-PONT | 021418 | 7.944 | 0.269 | -0.043 | 61 | 37 | 51 | 40 |
| BOUMEDFAA | 021006 | 0.889 | 0.139 | -0.015 | 60 | 36 | 66 | 40 |
| BOU BIREK | 150703 | 1.175 | 0.049 | -0.002 | 63 | 39 | 58 | 40 |
| CHEFFIA (BGE) | 031501 | -10.869 | 1.443 | -0.078 | 61 | 37 | 73 | 46 |
| MEDJEZ | 050901 | 0.868 | 0.053 | -0.003 | 53 | 28 | 77 | 53 |
| BENI SLIMANE | 090305 | -1.194 | 0.106 | 0.005 | 72 | 51 | 66 | 27 |
| OUEENZA | 120401 | -1.472 | 0.091 | 0.005 | 79 | 63 | 61 | 28 |

Les résultats obtenus par la régression linéaire multiple, à 16 stations utilisées dans cette étude dans la partie validation, ont montré une différence entre eux sur les deux critères de performance, où les stations ont été regroupées en 3 groupes différents dans la qualité d'ajustement des deux critères. Le premier groupe est celui où il y a des stations avec de bonnes performances par rapport à R, où le rapport de R varie entre 70 et 80 %, et des

performances de bonnes à insuffisantes pour le NSE, où ces derniers varient entre 50 et 70 %, et ces stations sont Ain El Assel, Freha, Bouchdira, Bouchghouf, Baghlia village, Bou Birek, Cheffia, Medjez, Al Ancer et Beni Slimane.

Le deuxième groupe comprend les stations assez performantes où R est satisfaisant et varie entre 50 et 60% alors que le NSE est insatisfaisant entre 10 et 40% et ces stations sont Fermatou, Fer à cheval, Boumedfaa, Reboa et l'Ouenza.

Une seule station a donné un résultat plutôt médiocre pour R (50%), alors que le NSE est très bon (NSE = 80%), il s'agit de la station Baraki-Pont.

Les résultats ont été confirmés par les graphiques suivants : Courbes de variation et les Scatterplots qui donnent une comparaison entre les débits observés et ceux simulés par le modèle de Régression linéaire multiple (MLR) de deux stations : 031601 et 021606 prise comme exemple, dans les deux phases calage et validation (figure V.3 et V.4).

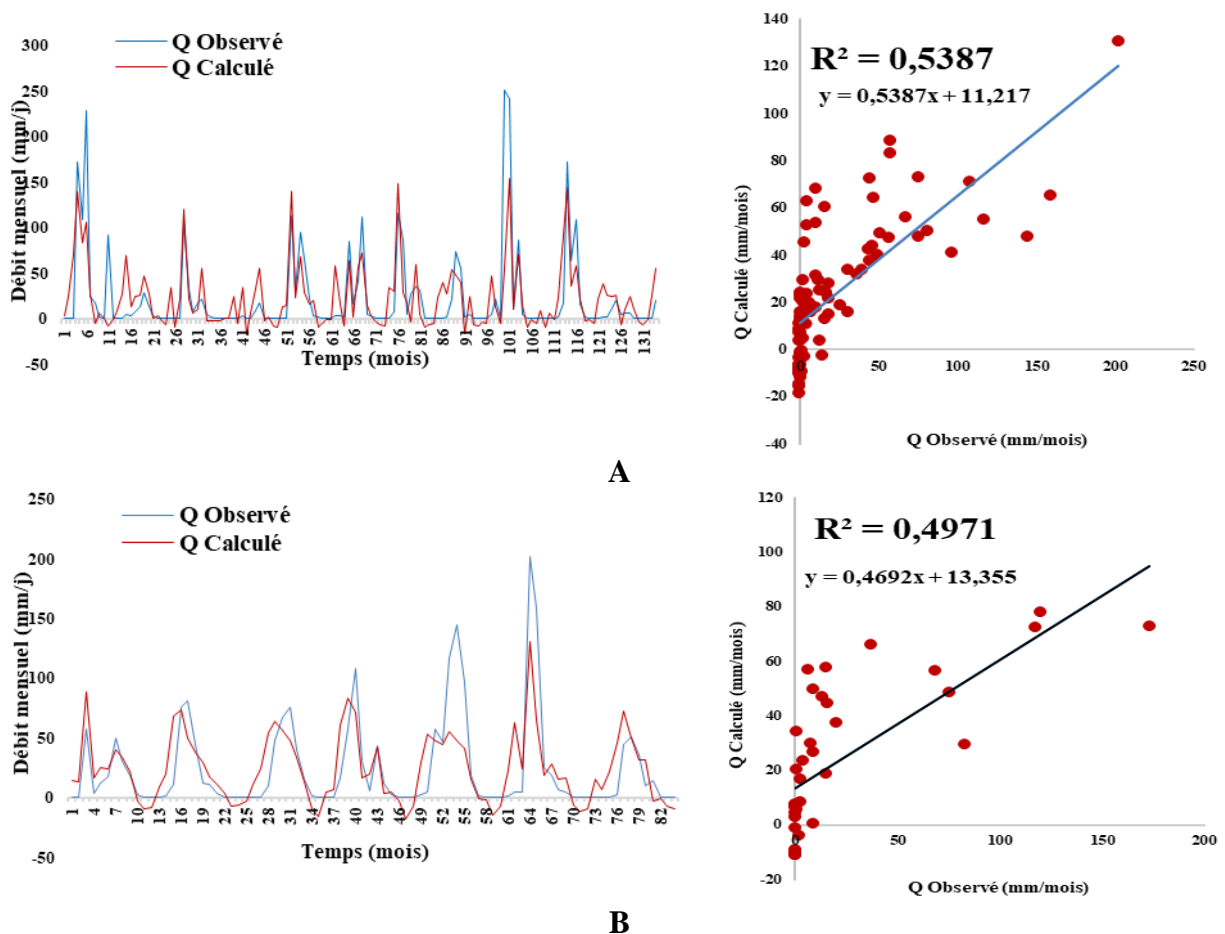


Fig.V.3. Résultats obtenus du modèle MLR de la station 031601 : a) phase calage b) phase validation

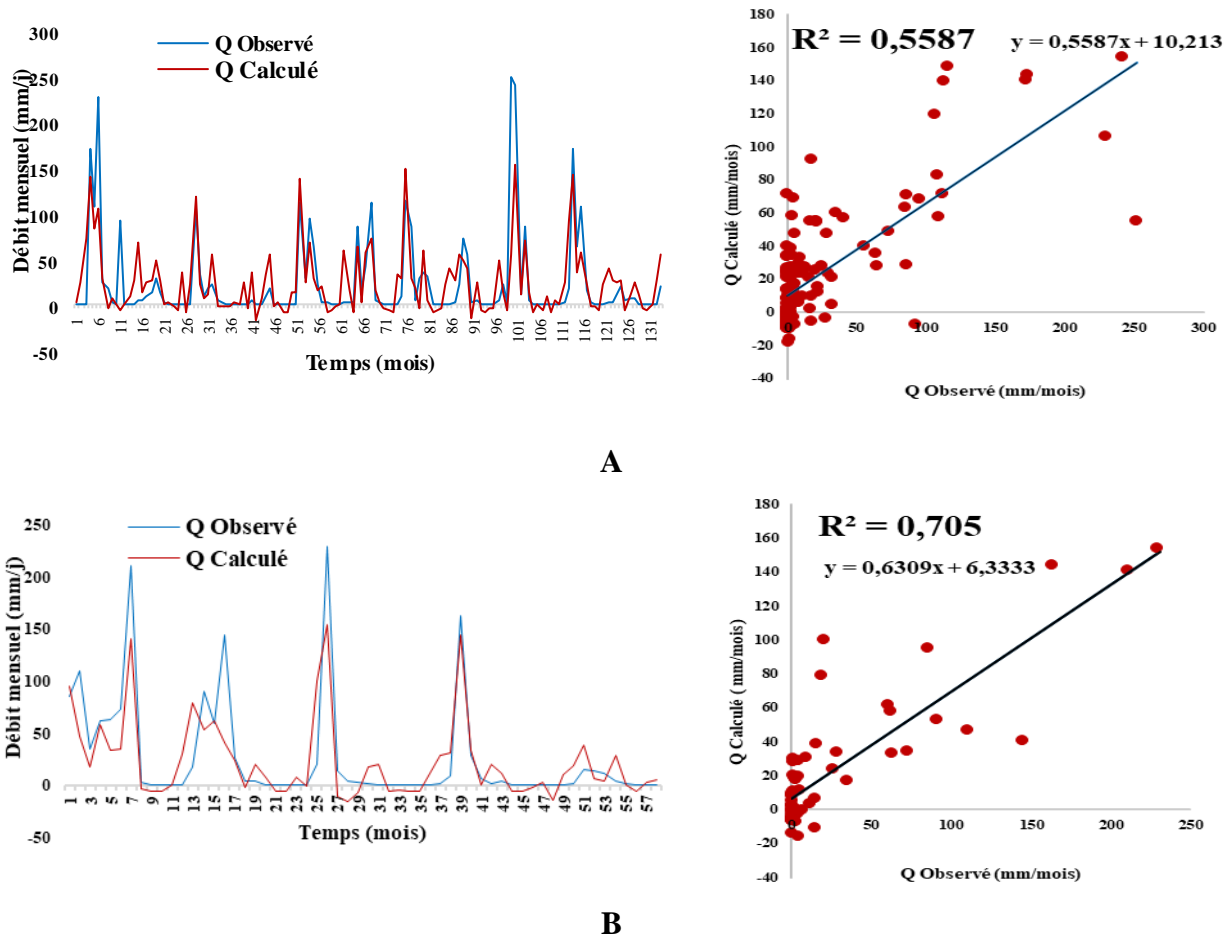


Fig.V.4. Résultats obtenus du modèle MLR de la station 021606 : a) phase calage b) phase validation

Selon le tableau, les résultats obtenus par le modèle de régression linéaire multiple, on montrés que 62,5 %, soit 10 stations de l'ensemble des stations étudiées ont donnés de bonnes performances pour des R compris entre 70 et 80 %, alors que les mêmes stations donnent des valeurs de performances variant entre insatisfaisantes et bonnes pour les NSE où elles oscillent entre 30 et 70 %. Tandis que 25 % des stations étudiées, soit 4 stations sur 16, donnent une valeur satisfaisante pour R (60 %) et des valeurs insatisfaisantes pour NSE compris entre 10 et 40%. Finalement, 12,5 % des stations, soit 2 sur 16, donnent une valeur insatisfaisante pour un R de 50% et une bonne valeur pour le NSE de 80 %.

Enfin, l'analyse des résultats du modèle régression linéaire multiple RLM, montre que les lames d'eau calculées, relativement présentent une faible concordance avec les lames d'eau observées.

Donc, la modélisation par le modèle MLR indique une faible corrélation entre les valeurs observées et celles estimées.

V.4. Résultats de modèle de réseaux de neurones artificiels (MLP)

La modélisation consiste à déterminer le nombre optimal de neurone à retenir ainsi que le décalage dans le temps des paramètres de la couche d'entrée par ce modèle. Ce qui permet à l'utilisateur de faire de bonnes prévisions à partir de données de courte période d'enregistrement.

Dans ce modèle, nous avons séparé les données en deux parties, une pour la calibration (70%) et l'autre à la validation (30%) par le logiciel STATISTICA de manière aléatoire, les variables d'entrée pour chaque bassin versant sont : les valeurs de la pluie et l'ETP mensuels, et la variable de sortie est celle du débit mensuel. Sur la base des deux critères de performances R et NSE, Le tableau ci-dessous montre les résultats de chacun d'eux dans les deux phases pour les 16 stations.

Tableau V.4. Résultats obtenus par le modèle MLPNN

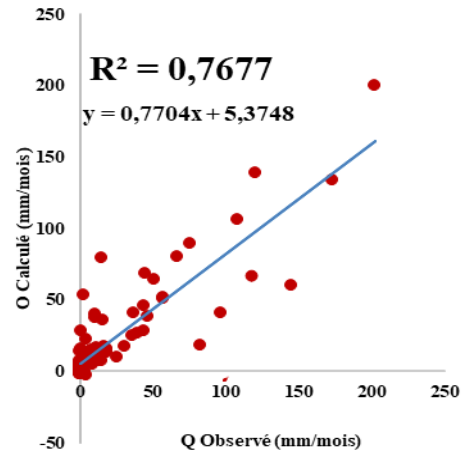
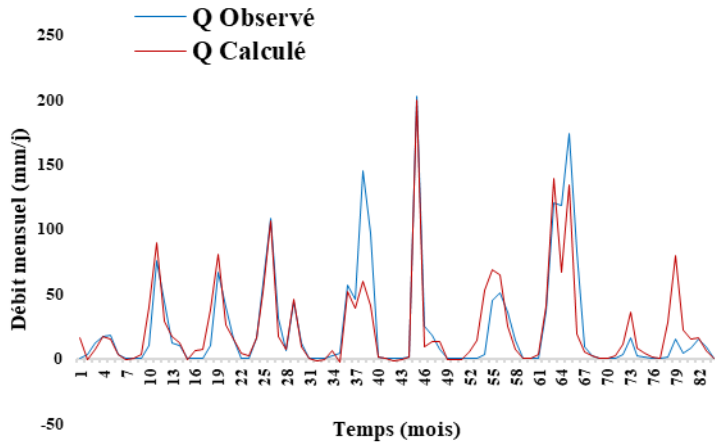
| Nom de la station | Code station | Structure | Calage | | Validation | |
|-------------------|--------------|------------|--------|-------|------------|-------|
| | | | R % | NSE % | R % | NSE % |
| AIN EL ASSEL | 031601 | MLP 2-6-1 | 88 | 77 | 91 | 77 |
| FREHA | 021606 | MLP 2-8-1 | 84 | 70 | 71 | 48 |
| BOUCHDIRA | 100602 | MLP 2-7-1 | 77 | 59 | 80 | 59 |
| FERMATOU | 150601 | MLP 2-8-1 | 56 | 31 | 47 | 18 |
| BOUCHEGOUF | 140501 | MLP 2-10-1 | 62 | 38 | 64 | 40 |
| AL AN CER | 100701 | MLP 2-7-1 | 73 | 54 | 67 | 44 |
| BAGHLIA VILLAGE | 022001 | MLP 2-9-1 | 69 | 48 | 44 | 50 |
| REBOA | 070403 | MLP 2-10-1 | 59 | 34 | 70 | 48 |
| FER A CHEVAL | 021201 | MLP 2-8-1 | 78 | 61 | 82 | 66 |
| BARAKI-PONT | 021418 | MLP 2-8-1 | 55 | 30 | 58 | 33 |
| BOUMEDFAA | 021006 | MLP 2-7-1 | 81 | 65 | 48 | 22 |
| BOU BIREK | 150703 | MLP 2-10-1 | 64 | 41 | 62 | 33 |
| CHEFFIA (BGE) | 031501 | MLP 2-13-1 | 77 | 59 | 64 | 40 |
| MEDJEZ | 050901 | MLP 2-13-1 | 63 | 39 | 60 | 33 |
| BENI SLIMANE | 090305 | MLP 2-9-1 | 67 | 45 | 93 | 67 |
| OUENZA | 120401 | MLP 2-8-1 | 76 | 57 | 85 | 70 |

Les résultats obtenus par le réseau de neurones pour les seize (16) stations utilisées dans cette étude pour la partie validation, ont montré une différence entre eux pour les deux critères de performance, où les stations ont été regroupées en 3 groupes différents selon la qualité d'ajustement des deux critères. Le premier groupe où il y a des stations avec de très bonnes performances avec $R \geq 90\%$ et NSE entre 80 et 60%, ces stations sont : Ain El Assel et Beni Slimane.

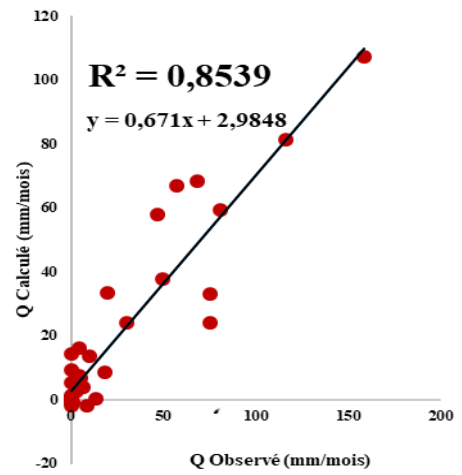
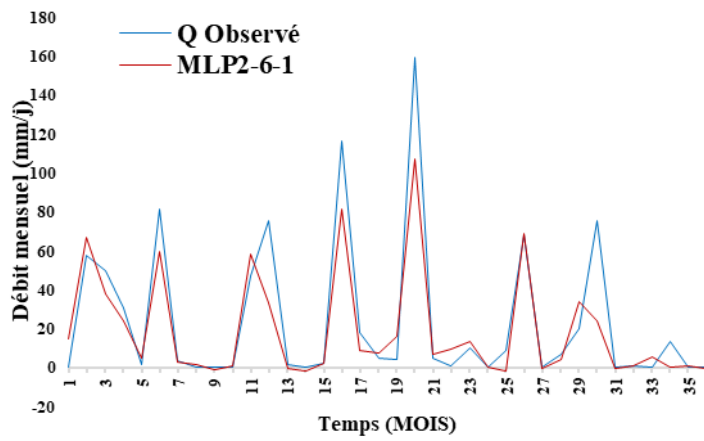
Le deuxième groupe comprend les stations avec une assez bonne performance, où le R varie entre bon et satisfaisant (80 et 60%), tandis que le NSE varie entre bon, satisfaisant et insatisfaisant, soit entre 40 et 70%. Ces stations sont : Freha, Bouchdira, Al Ancer, Reboa, Fer à cheval, Ouenza, Bouchegouf, Bou Birek, Cheffia (BGE), Medjez.

Certaines stations ont donné des résultats faibles pour les deux critères, où la valeur R varie entre 40 et 60%, tandis que le NSE atteint la valeur minimale de 5%, et la valeur maximale ne dépasse pas 22%, et ces stations sont : Fermatou, Baghlia Village, Boumedfaa, Baraki-Pont qui représente le troisième et dernier groupe.

Les résultats ont été confirmés par les graphiques suivants : Courbes de variations et Scatterplots, qui donnent une comparaison entre les débits observés et ceux simulés par le modèle de réseau de neurons (MLP) de deux stations : 031601 et 021606 prise comme exemple, dans les deux phases calage et validation (figure V.5 et V.6).



A



B

Fig.V.5. Résultats obtenus du modèle de réseau de neurones de la station 031601 : a) phase calage b) phase validation

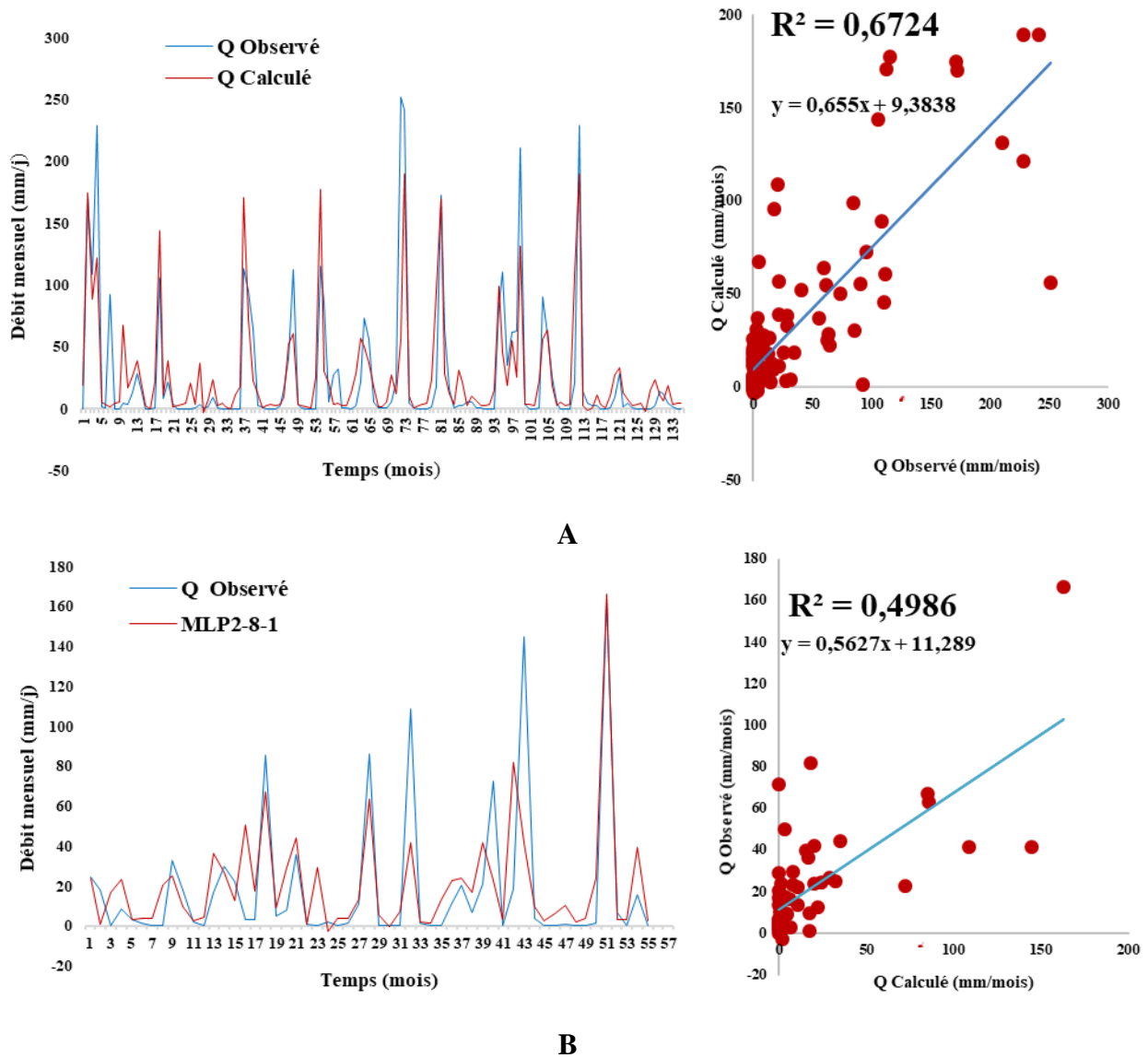


Fig.V.6. Résultats obtenus du modèle de réseau de neurones de la station 021606 : a) phase calage b) phase validation

D'après les résultats obtenus par le modèle de réseau de neurones, on constate que 12.5%, soit deux stations du total des stations étudiées, ont donné de très bonnes performances pour les deux critères, où $R = 90\%$ et NSE entre 70 et 80 %, 37.5 % ou 6 stations sur 16 donnent une bonne valeur de R de l'ordre de 80 à 60 %, avec un NSE moyen relativement faible entre 50 et 30 %. Aussi, deux stations avec 12.5% du total des stations donnent également une valeur satisfaisante pour le R (50%), et des valeurs insatisfaisantes pour le NSE de l'ordre de 20%, et une seule station (6.25%) donnent une valeur insatisfaisante pour les deux critères avec $R=40\%$ et $NSE=10\%$.

Les résultats sont dus, au fait que la plupart des stations qui donnent des valeurs très bonnes et moyennes de R et NSE sont situées dans le nord, où l'écoulement est important en raison de fortes précipitations enregistrées dans les sous bassins du nord, et donc le réseau hydrographique est très développé. En outre, les surfaces des bassins contrôlés par ces stations, sont petites relativement aux autres bassins drainés par le reste des stations, ce qui minimise les pertes et diminue le temps de concentration. Au contraire, les stations à faibles valeurs de R et NSE, sont situées dans des zones de faibles précipitations et donc l'absence du réseau hydrographique, en plus que les surfaces de drainage de ces dernières sont très importantes, ce qui favorise les pertes par infiltration et évaporation et augmente considérablement le temps de concentration.

A partir des résultats obtenus, nous pouvons conclure que la modélisation par les réseaux de neurones artificiels, donne une corrélation satisfaisante entre les valeurs observées et les valeurs estimées.

V.5. Comparaison des modèles (GR2M, MLR, MLPNN)

Pour évaluer les performances des modèles (MLPNN, MLR et GR2M), la comparaison a été faite sur la base du $R \geq 80\%$ et du critère de Nash $\geq 50\%$ dans les deux périodes : test et calage. Le tableau V.5 récapitule la comparaison des performances entre les meilleurs modèles pour le pas de temps mensuel et pour toutes les stations en (%).

Nous avons observé la supériorité des performances de modèle GR2M traduit par 68.75% de stations donnent des coefficients de R supérieur à 80%, et 75% des stations donnent un Nash $\geq 50\%$ pour la phase de validation, et la même chose pour la période de calage où les résultats obtenus pour R et NSE montrent des valeurs très élevés par rapport aux autres modèles utilisés dans cette étude. En deuxième position vient le modèle MLPNN avec 31.25% des stations donnent un $R \geq 80\%$, et 37.50% des stations donnent un Nash supérieurs à 50%, dans la période test. Enfin, le modèle MLR vient en dernière position dans les deux phases ; calage et test, avec 25% et 18.75% de stations donnent un Nash plus grand que 50%, et 6.25% de stations présentent un R plus grand que 80% respectivement.

Tableaux V.5. Comparaison des performances entre les meilleurs modèles (GR2M, MLR et MLPNN)

| Modèle | Phase Calage | | phase Test | |
|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| | NSE \geq 50 % | R \geq 80% | NSE \geq 50 % | R \geq 80% |
| GR2M | 81.25% | 68.75% | 75 % | 68.75 % |
| MLPNN | 50 | 18.75 | 37.50% | 31.25% |
| MLR | 25% | 0% | 18.75 % | 6.25 % |

L'application du modèle GR2M a montré de hautes performances dans la modélisation des écoulements de surface pour les 9 bassins versants objet de cette étude. Ce modèle a abouti à des résultats plus prometteurs que ceux obtenus par la méthode neuronale, ou la méthode de régression linéaire multiple.

Le modèle MLR donne des résultats insatisfaisants. Comme tous les modèles hydrologiques actuels, le modèle de la régression linéaire multiple (RLM) reste perfectible malgré les efforts déjà consentis pour les rendre aussi performants que possible. Les recherches continuent donc pour les faire progresser et améliorer, ainsi la compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin versant, peut aider à leur perfectionnement.

Pour le modèle du réseau de neurones, il donne des résultats assez bons et acceptables car il est basé sur une base mathématique et non pas hydrologique, mais en général il peut être utilisé comme modèle alternatif.

Conclusion

Pour une modélisation pluie-débit proche des phénomènes physiques, le mode de fonctionnement idéal devrait correspondre au pas de temps le plus fin possible pour pouvoir prendre en compte, avec toute la précision possible, les différents processus mis en œuvre au cours de la transformation de la pluie en débit.

Dans ce chapitre, nous avons pu montrer que les résultats obtenus par le modèle GR2M, par comparaison avec les méthodes MLR et MLPNN, indiquent que le premier possède un meilleur pouvoir prévisionnel, et est mieux adapté aux bassins du Nord-Est algérien. Ceci est dû certainement au fait que les paramètres du modèle GR2M et la formulation de calcul de la transformation Pluie-Débit intégrée dans ce dernier, ont été choisis en se basant sur des concepts purement hydrologique.

Ainsi, on remarque aussi que les performances des modèles appliqués aux stations situées dans la partie Nord de la région d'étude, sont supérieures par rapport à celles situées au Sud.

Ce paradoxe peut être dû à la nature de la région :

- La région Nord, est caractérisée par : un climat méditerranéen, doux et pluvieux en hiver, de l'ordre de 650 à 1800 mm/an (source : ANRH), ce qui produit des écoulements superficiels importants, et c'est ainsi qu'il est développé un réseau hydrographique dense dans une petite section, tel que le bassin des côtiers algérois (station : FREHA) et le bassin des côtiers constantinois (stations : CHEFFIA et AIN EL ASSEL).
- La région Sud, cette dernière est caractérisée par : de grandes superficies des bassins versants contrôlées par les stations étudiées, un climat semi-aride (moins de précipitations) et un faible réseau hydrographique, comme le bassin de la Medjerda (station : OUENZA) et le bassin de chotte El Hodna (station : MEDJEZ).

Ou il se peut dû à la taille réduite des séries utilisées et à leur non stationnarité. Ces mêmes modèles utilisés pour d'autres régions (sous différents régimes climatiques et hydrométriques) avec des séries stationnaires de grandes tailles a abouti, par contre, à de très bonnes performances dans la prévision des débits mensuels (**Lin et al., 2006 ; Wang et al., 2009 ; Tikhamarine et al., 2020**).

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants est incontournable dès lors que l'on s'intéresse aux problématiques relatives à la gestion des ressources en eau, à l'aménagement du territoire, ou à l'une des différentes facettes du risque hydrologique (inondation, sécheresse). Elle est sensée pouvoir décrire de façon fidèle les différentes étapes de la transformation pluie en débit, et en particulier les processus liés à la formation des crues et à l'apparition des étiages. Par conséquent, plusieurs modèles ont été développés.

L'objectif principal de cette étude est de trouver le meilleur modèle de prévision des débits au pas de temps mensuels, parmi plusieurs modèles utilisés. Au cours de notre travail de recherche, qui s'inscrit dans le cadre de la modélisation mathématique des précipitations en écoulement, trois approches de modèles ont été utilisées dans ce mémoire : le premier est le modèle hydrologique conceptuel 'à réservoirs' GR2M «Génie Rural, à deux paramètres de calage, et au pas de temps mensuel», le deuxième modèle est le réseau neuronal artificiel avec fonction dite d'activation (MLPNN), enfin le modèle de régression linéaire multiple (MLR) basé sur l'équation de la régression, qui illustre la relation simple entre les variables dépendantes et les variables indépendantes. Nous avons appliqué ces modèles sur 16 stations situées dans neuf bassins versants du Nord-Est algérien (Côtiers Algérois, Côtiers Constantinois, El Honda, Hauts Plateaux Constantinois, Isser, Kebir Rhumel, la Medjerda, la Seybouse et le Soummam).

La méthode utilisée consiste à diviser les séries hydrologiques en deux parties : la calibration (70%) et la validation (30%) pour vérifier la qualité du modèle calibré sur des séries de mesures non utilisées lors du calage, ces modèles ont été testés avec des logiciels, afin d'évaluer leur capacité dans la modélisation de la relation Pluie-Débit.

La comparaison entre ces différents modèles a été effectuée sur la base des critères d'évaluations numérique : le coefficient de corrélation R et le coefficient d'efficacité de Nash, dans les deux périodes : calage et test.

Les résultats trouvés pour les critères les plus puissants, donnés par ordre de mérite : le modèle GR2M donne 68.75% des stations avec un coefficient R supérieur à 80%, et 75% des stations avec un Nash $\geq 50\%$ pour la phase de validation, et la même chose pour la période de calage. En deuxième position vient le modèle MLPNN avec 31.25% des stations donnent un $R \geq 80\%$, et 37.50% des stations donnent un Nash supérieur à 50%, dans la période test. Enfin,

le modèle MLR vient en dernière position dans les deux phases ; calage et test, avec 25% et 18.75% de stations donnent un Nash plus grand que 50% et 6.25% de stations présentent un R plus grand que 80% respectivement.

D'après ces résultats, le modèle GR2M a montré de hautes performances, ceci est due certainement au fait que les paramètres du modèle et la formulation de calcul de la transformation Pluie-Débit intégrée dans ce dernier, ont été choisis en se basant sur des concepts purement hydrologique. Le modèle MLPNN est un modèle intéressant selon les résultats trouvés (assez bon), sachant que sa formulation est à base mathématique et non pas hydrologique. Le modèle MLR est un modèle à déconseiller sur cette zone d'étude et cela pour ses résultats insatisfaisants, mais il reste un modèle perfectible malgré les efforts déjà consentis pour les rendre aussi performants que possible.

A la lumière de ce travail, nous pouvons dire que l'application du modèle Génie Rural à deux paramètres de calage au pas de temps mensuel, aux données des bassins versants du Nord-Est algérien, donne de bons résultats par rapport aux autres modèles utilisés. Donc on peut dire, que le GR2M est le meilleur modèle pour la prévision des débits au pas de temps mensuels dans cette zone de l'Algérie. Ainsi, le modèle de réseau neuronal artificiel peut être utilisé comme un bon modèle alternatif.

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIGRAPHIQUES

- Abdessamed.K. ,1981. Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Menetti) dans les massifs de l'Aurès et du Bélezma. Etude phytosociologique, problème de conservation et d'aménagement. Thèse Doc. Ing. Univ. Aix-Marseille, 200 p.
- Allen R.G., Pereira I.S., Raes D. Smith M. ,1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper, Rome, Italy, No56, 300p.
- Ardoln S., Dezetter A., Servat E., Mare G., Paturel J.E., Dieulln C., Boyer., J.F., 2003. Analyse de la variabilité des ressources en eau en Afrique de l'ouest sahélienne par modélisation hydrologique à grands pas de temps et d'espace. Int. Conf. on the Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions, Montpellier, France, 1-4 Avril 2003. Poster
- Bellout, M., 2015. Etude de la répartition fréquentielle et annuelle des débits des cours d'eau de l'Algérie du nord, Mémoire de magister, Département de génie civil et hydraulique, université de Kasdi Merbah, Ouargla,143 p.
- Bishop, C.M., 2006. Pattern Recognition and Machine Learning, volume 4 de Information. science and statistics. Springer.
- Burden, F., Winkler, D., 2008. Bayesian regularization of neural networks. *Methods Mol Biol* 458, 25–44. https://doi.org/10.1007/978-1-60327-101-1_3.
- Coulibaly, P., Anctil, F., Bobée, B., 1999. Prévision hydrologique par réseaux de neurones artificiels : état de l'art. *Can. J. Civ. Eng.* 26, 293–304. <https://doi.org/10.1139/198-069>.
- Crawford N. H. et Linsley R. K. ,1966. Digital simulation in hydrology: Stanford watershed model IV. Technical Report No39, Stanford University, Department of Civil Engineering, Palo Alto, CA, USA 94305.
- Dreyfus, G., 1998. Les Réseaux De Neurones. *Mécanique Industrielle et Matériaux*, n°51.
- Duchaufour . Ph., 1975. Atlas écologique des sols du monde. Ed. Masson. pp 11- 92.
- Edijatno et Michel.,1989. Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La houille Blanche*, 1989, n02: 113-121.

- FAO., 2002. L'étude prospective du secteur forestier en Afrique : Algérie (FOSA). FAO, Roma, 61 p.
- FAO/UNESCO., 1974-1981. Soil Map of the World, Ten volumes, UN Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
- Gaume. E., 2000. Hydrologie: cycle de l'eau et modélisation pluie-débit. École nationale des ponts et chaussées. Rapport technique. France.
- Gnouma, R. 2006. Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques : Application au bassin versant de l'Yzeron.
- Hasbaia.M, Seddi.A, Bournane. A, Hedjazi.A, Paquier.A., 2012. Study Of The Water And Sediment Yields of Hodna Basin In The Centre Of Algeria, Examination Of Their Impacts.
- Haykin, S.S., 2009. Neural networks and learning machines, 3rd ed. ed. Prentice Hall, New York.
- Henine, H., 2005. Interfaçage entre un modèle hydrologique/modèle hydrodynamique au sein d'un système d'information intégré sous web incluent les SIG. Mémoire de magister.
- Huien, H., Peter, F., 1997. Estimation of daily soil water evaporation using an artificial neural network. Journal of Arid Environments.
- Humphrey, G.B., Gibbs, M.S., Dandy, G.C., Maier, H.R., 2016. A hybrid approach to monthly streamflow forecasting: Integrating hydrological model outputs into a Bayesian
- Kabouya,M. 1990 :Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale .Thèse de doctorat , Cemagref.Antony, université paris sud , Laboratoire d hydrologie et de géochimie isotopique D'Orsay :374p.
- Kayri, M., 2016. Predictive Abilities of Bayesian Regularization and Levenberg–Marquardt Algorithms in Artificial Neural Networks: A Comparative Empirical Study on Social Data. MCA 21, 20. <https://doi.org/10.3390/mca21020020>.
- Laborde.j.p , 2000. Eléments d'hydrologie de surface, Université de Nice - Sophia Antipolis : U.M.R. 5651 "Espace" du C.N.R.S. Equipe "Gestion et Valorisation de l'Environnement".p3. Edition 2000.
- Legates, D. R., McCabe Jr, G. J. ,1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water resources research, 35(1), 233-241.

- Legates, D.R., McCabe, G.J., 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resour. Res.* 35, 233–241. <https://doi.org/10.1029/1998WR900018>.
- Li, X., Sha, J., Wang, Z., 2017. A comparative study of multiple linear regression, artificial neural network and support vector machine for the prediction of dissolved oxygen. *Hydrology Research* 48, 1214–1225. <https://doi.org/10.2166/nh.2016.149>.
- Lin, J.-Y., Cheng, C.-T., Chau, K.-W., 2006. Using support vector machines for long-term discharge prediction. *Hydrological Sciences Journal* 51, 599–612. <https://doi.org/10.1623/hysj.51.4.599>.
- Lubes-Niel., Lubès-Niel H., Paturel J.E., Seryat E., 2003. "study of parameter stability of a lumped hydrologic model in a context of climatic variability". *journal of hydrology*, 278 11-4, PP 211 - 228.
- Maftai, P.C., 2002. Etudes concernant les écoulements superficiels : modélisation spatialisée de l'écoulement sur le bassin versant de Voinești, Roumanie. Université Ovidius, Montpellier (FRA) ; Constanta : UM2 ;
- Makhlouf, Z., 1994. Compléments sur le modèle pluie-débit gr4j et essai d'estimation de ses paramètres (These de doctorat). Paris 11.
- Malik, A., Kumar, A., 2015. Pan Evaporation Simulation Based on Daily Meteorological Data Using Soft Computing Techniques and Multiple Linear Regression. *Water Resour Manage* 29, 1859–1872. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0915-0>.
- Marwala, T., 2007. Bayesian training of neural networks using genetic programming. *Pattern Recognition Letters* 28, 1452–1458. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2007.03.004>.
- Mébariki A., 2005. Hydrologie des bassins de l'Est Algérien : ressources en eaux, aménagement et environnement thèse de doctorat Univ. Mnetouri Constantine, 349 p.
- Mitchell, T.M., 1997. *Machine Learning*, volume 4 de McGraw-Hill Series in Computer Science. McGraw-Hill.

- Mouelhi.S., 2003 . Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, Engref, Cemagref Antony, France, 323 pp.
- Mouelhi.S., C. Michel, C. Perrin, and V. Andréassian .,2006. Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model, *J. Hydrol.*, 318, 200-214, doi:10.1016/j.jhydrol.2005.1006.1014.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).
- Nourani. V., Baghanam A. H., Rahimi A.Y. et Nejad F. H., 2014. Evaluation of wavelet-based de-noising approach in hydrological models linked to artificial neural networks. In: Islam T., Srivastava P. K., Gupta M. et al (eds) *Computational intelligence techniques in earth and environmental sciences*. Springer, Dordrecht, pp. 209– 241.
- Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation.*Journal of Hydrology*, 279: 275-289.
- Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., Flannery, B.P., 1992. *Numerical recipes in C* (2nd ed.): the art of scientific computing. Cambridge University Press, USA.
- Refsgaard, J.C., and Storm, B., 1996. Construction, Calibration And Validation of Hydrological Models. In *Distributed Hydrological Modelling*, (Springer, Dordrecht), pp. 41–54.
- Roche P. A., Miquel J. et Gaume .E., 2012. *Hydrologie quantitative: processus, modèles et aide à la décision*. Springer, Berlin.
- Rosenbrock ,H.H.,1960. "An automaic method for finding the greatest or least value of a fonction" . *Computer Journal* 3 : 175-184.
- Ruiz-Figueroa, J.E ., 1983. Les micro-organisations pelliculaires superficielles formées sous pluie siinu- lie sur des sols ferralliriaues de savane (Centre Nord de la Côte d'Ivoire). ComDortemenr hvdrodvnomiaire er mécanique de c;s pellicuh de battance en relation avec la te.Tture. la couverière du sol. et la hé Ju riz pluvial. Thèse Paris. 167p.
- Rumelhart, D.E., Hinton, G.E., Williams, R.J., 1986. Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition, Vol. 1, in: Rumelhart, David E.,

- McClelland, J.L., PDP Research Group, C. (Eds.), . MIT Press, Cambridge, MA, USA, pp. 318–362.
- Singh, V., 1995. Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications.
- Sun, F., Li, X., Liao, H., Zhang, X., 2017. A Bayesian least-squares support vector machine méthode for predicting the remaining useful life of a microwave component. *Advances in Mechanical Engineering* 9, 1687814016685963. <https://doi.org/10.1177/1687814016685963>.
- Tatar. H., 1997. Les éléments du climat et les risques d'incendie de forêts (cas de la côte orientale algérienne), *Rhumel n°5*, Université de Constantine, pp 53-61.
- Tikhamarine. Y., Malik. A., Souag-Gamane. D., Kisi. O., 2020. Artificial intelligence models versus empirical equations for modeling monthly reference evapotranspiration. *Environ Sci Pollut Res*. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08792-3>
- Touzet, C., 1992. Les réseaux de neurones artificiels, introduction au connexionnisme. *Ec2*. <https://doi.org/10/document>.
- Wang, W.-C., Chau, K.-W., Cheng, C.-T., Qiu, L., 2009. A comparison of performance of several artificial intelligence methods for forecasting monthly discharge time series. *Journal of Hydrology* 374, 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.019>.
- Werbos, P.J., 1982. Applications of advances in nonlinear sensitivity analysis, in: Drenick, R.F., Kozin, F. (Eds.), *System Modeling and Optimization, Lecture Notes in Control and Information Sciences*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 762–770. <https://doi.org/10.1007/BFb0006203>.