



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DE BOUIRA

FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES APPLIQUEES
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

MEMOIRE PREPARE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME
DE MASTER EN HYDRAULIQUE

OPTION
Hydrotechnique

THEME

**Modélisation pluie –débit dans le
sous bassin de Lakhdaria**

Présenté par : SANA Bilal

: FERAHI Ali

Encadré par : M^{me} Elmeddahi Yamina

Soutenu le 19/09/2017

Devant le jury :

Président : Meridja Madani

Examineurs : Kara Ben ykhlef
Balloul Djouhra

Dédicaces

Je rends un grand hommage à travers et de reconnaissance envers :

Ce modeste travail, en signe de respect

Ma mère Fatma et Mon père Omar

*Pour leurs sacrifices, leurs confiances en moi ainsi leurs soutien tout au long de
mon parcours du primaire jusqu'à l'universitaire*

Je le dédie également à :

*Mes frères : Rabah, sa femme avec leurs petit Adam.
Ahmad.*

Mes sœurs : Sadjia, Hamida, Naima, Baya, Rahimaet leursmaris.

*A ses enfants : Ilyas-Amar, Wael-Farah-Mariam, Chayemaa- Marwa-
Mohamed- Mahmoud, Ritadje-Douaa, Abd'Elmouemén.*

Ama grande mère Khiraet ma grande famille

*Atous mes chères amies de tous les temps dont on ne peut citer les noms en
particulier les gens qui m'aiment et qui m'estiment.*



Dédicaces

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

✚ *Mes parents pour ces sacrifices afin d'atteindre mon but.*

✚ *Mes frères et mes sœurs.*

✚ *Toute ma famille.*

Tous mes amis.....

Al.F



Remerciements

En cette mémorable occasion, et avant toute chose, Nous tenons à remercier notre seigneur DIEU l'omniscient et l'omnipotent.

je remercie chaleureusement notre promotrice M^{me} Elmeddahi pour leur complaisance, aussi pour tous les efforts qu'elle est fourni pour m'encadrer et guider tout au long de ce travail.

Je remercie le président et les membres du jury qui me feront L'honneur de juger mon travail.

Je voudrais aussi remercier l'ensemble des professeurs de l'université de Bouira pour avoir veiller à notre formation.

Un grand merci tout spécial à ma famille, à mes parents qui m'ont permis de poursuivre mes études, à mes frères et sœurs et à tous mes amis qui n'ont cessé de me soutenir et de m'encourager tout au long de mes années d'études.

Enfin, nos sincères reconnaissances et gratitudes à toute personne ayant contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce mémoire.

SANA.B

SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| Dédicace | |
| Remerciements | |
| Sommaire | |
| Introduction générale..... | 1 |
| Chapitre I : l'état de l'art de la modélisation hydrologique | |
| I-1 Introduction..... | 3 |
| I-2 Définition d'un modèle..... | 3 |
| I-3 Objectif de la modélisation | 4 |
| I-4 Classification des modèles hydrologiques | 5 |
| I-4-1 Le modèle déterministe | 6 |
| I-4-2 Le modèle probabiliste | 6 |
| I-4-2-1 Le modèle statistique et stochastique | 7 |
| I-4-2-2 Le modèle événementiel | 7 |
| I-4-2-3 Le modèle global ou distribué | 7 |
| I-4-3 Classification basée sur la représentation des processus hydrologiques | 8 |
| I-4-3-1 La modélisation de type boîte noire | 8 |
| I-4-3-2 Un modèle hydrologique à base physique | 8 |
| I-4-3-3 Un modèle à réservoir | 8 |
| I-5 Mise en œuvre d'un modèle hydrologique | 9 |
| I-6 Evaluation de la robustesse du modèle | 12 |
| I-7 Choix du modèle | 13 |
| I-8 Quelques modèles hydrologiques existants..... | 13 |
| I-8-1 Modèle global (IHACRES)..... | 13 |
| I-8-2 Modèles semi-spécialisés (HEC, CEQUEAU & MIKE BASSIN)..... | 14 |
| I-8-3 Modèle physique spatialisé (MIKE SHE)..... | 20 |
| I-8-4 Modèle physique-conceptuel semi-spatialisé (TOPMODEL)..... | 22 |
| I-8-5 Modèles 'Cemagref Antony' ou 'GR' (GR : Génie Rural)..... | 23 |
| I-8-5-1 Le Modèle GR2M | 24 |
| I-9 Conclusion | 27 |
| Chapitre II : Présentation de la zone d'étude | |
| II-1 Introduction..... | 28 |
| II-2 Situation géographique de la zone d'étude (le s/b de Lakhdaria, appartient au moyen Isser | 28 |
| II-3 Topographie du bassin versant | 29 |
| II-4 Etude géologique | 31 |
| II-5 Etude hydrologique | 38 |
| II-5-1 Caractéristiques physiques du bassin versant | 38 |
| II-5-2 Climat | 41 |
| II-5-3 Hydrographie du bassin versant | 43 |
| II-5-3-1 Le réseau hydrographique..... | 43 |
| II-5-3-2 Répartition de réseau hydrographique..... | 44 |

SOMMAIRE

| | | |
|--|--|----|
| II-6 | Vegetation | 45 |
| II-7 | Conclusion | 45 |
| Chapitre III : Etude des paramètres hydrologiques | | |
| III-1 | Introduction..... | 46 |
| III-2 | Collecte des données, choix des stations, comblement des lacunes et homogénéisation des données climatiques..... | 46 |
| III-3 | Précipitations | 47 |
| III-3-1 | Données disponibles | 47 |
| III-3-2 | le choix des données | 48 |
| III-3-3 | Répartition de la pluie moyenne | 48 |
| III-3-4 | L'ajustement des pluies | 49 |
| III-3-4-1 | Ajustement de la série pluviométrique à la loi de GALTON (log-normale)..... | 49 |
| III-3-4-2 | Ajustement par la loi GEV (distribution des valeurs extrêmes généralisées)..... | 50 |
| III-4 | Les Débits | 52 |
| III-4-1 | Données disponibles | 52 |
| III-4-2 | le choix des données | 52 |
| III-4-3 | Répartition de la Débits moyens | 52 |
| III-4-4 | L'ajustement des débits | 53 |
| III-4-4-1 | Ajustement de la série des débits à la loi de GALTON (log-normale)..... | 53 |
| III-4-5-2 | Ajustement par la loi GEV (distribution des valeurs extrêmes généralisées)..... | 54 |
| III-5 | Evapotranspiration | 55 |
| III-6 | Conclusion | 55 |
| Chapitre IV : Application du modèle GR2M | | |
| IV-1 | Introduction..... | 56 |
| IV-2 | Modélisation par corrélation (précipitation / lame d'eau écoulée) | 56 |
| IV-2-1 | Corrélation annuelle | 56 |
| IV-2-2 | Corrélation mensuelle | 58 |
| IV-3 | Modélisation par le modèle GR2M | 60 |
| IV-3-1 | Choix des périodes de calage et de validation | 60 |
| IV-3-2 | Calage du modèle GR2M | 61 |
| IV-3-3 | Validation du modèle GR2M | 65 |
| IV-4 | Performance et robustesse du modèle en calage et validation..... | 68 |
| IV-5 | Choix du jeu de paramètres pour la simulation des chroniques de débits..... | 69 |
| IV-6 | Conclusion | 69 |
| | Conclusion générale..... | 70 |
| | Références bibliographiques..... | 71 |
| | Annexes..... | 76 |
| | Résumé | |

Liste des tableaux

| | | |
|-----------------------|---|----|
| Tableau I-1 | Exemple de caractéristiques des modèles pluie-débit..... | 06 |
| Tableau I-2 | Modélisation utilisée avec modèle hydrodynamique de MIKE SHE..... | 21 |
| | | |
| Tableau II-1 | Caractéristiques hydromorphométriques du bassin versant..... | 40 |
| Tableau II-2 | Répartition mensuelle de la température | 41 |
| Tableau II-3 | Nombre de jours de Gelée aux stations de Djebahia et Souagui | 42 |
| Tableau II-4 | Nombre de jours de sirocco aux stations Beni Slimane et Bir Ghbalou | 42 |
| | .. | |
| | | |
| Tableau III-1 | Identification des stations pluviométriques existant dans le bassin versant d'Isser..... | 47 |
| Tableau III-2 | les stations pluviométriques utilisées dans notre cadre d'étude | 48 |
| Tableau III-3 | Distribution moyenne mensuelle des pluies des cinq(05) stations pluviométriques | 48 |
| Tableau III-4 | Résultat de l'ajustement à la loi de Galton..... | 50 |
| Tableau III-5 | Résultats d'ajustement à la loi de GEV | 50 |
| Tableau III-6 | Identification des stations hydrométrique existant sur la cour d'eau principale du bassin versant d'Isser | 52 |
| Tableau III-7 | Distribution moyenne mensuelle des débits de la station hydrométrique..... | 52 |
| Tableau III-8 | Résultat de l'ajustement à la loi de Galton..... | 53 |
| Tableau III-9 | Résultats d'ajustement à la loi de GEV | 54 |
| Tableau III-10 | Distribution moyenne mensuelle d'ETP (mm) | 55 |
| | | |
| Tableau IV-1 | Résultats des différentes corrélations entre les deux paramètres pluie et la lame d'eau écoulée annuelle | 58 |
| Tableau IV-2 | Résultats des différentes corrélations entre les deux paramètres pluie et la lame d'eau écoulée mensuelle | 59 |
| Tableau IV-3 | Performances en phases de calage et de validation du modèle GR2M au sous- bassin de Lakhdaria..... | 61 |

Liste des figures

| | | |
|---------------------|---|----|
| Figure I-1 | Schématisation de simulation entre la réalité et la modélisation..... | 3 |
| Figure I-2 | Composants d'un modèle | 5 |
| Figure I-3 | Principe de fonctionnement des modèles globales pluies-débit..... | 9 |
| Figure I-4 | a) Schéma d'un modèle global ;b) Schéma d'un modèle semi-distribué..... | 10 |
| Figure I-5 | Principe de fonctionnement des modèles semi-distribués pluies débit..... | 10 |
| Figure I-6 | Structure du modèle IHACRES | 14 |
| Figure I-7 | Fonction de production du modèle hydrologique CEQUEAU | 16 |
| Figure I-8 | Fonction de transfert du modèle CEQUEAU | 17 |
| Figure I-9 | Structure du modèle SHE | 21 |
| Figure I-10 | Structure du modèle TOPMODEL | 22 |
| Figure I-11 | Architecture du Modèle GR2M | 26 |
| | | |
| Figure II-1 | Plan de situation du sous bassin de Lakhdaria et le bassin versant d'Isser. | 29 |
| Figure II-2 | Modèle Numérique de la Topographie du BV de Isser et compris notre zone d'étude ... | 30 |
| Figure II-3 | Position de la station hydrométrique de Lakhdaria sur le réseau hydrographique principal et les différents ouvrages hydrotechniques existant dans tout le BV Isser..... | 31 |
| Figure II-4 | Carte lithologique du bassin versant Isser..... | 33 |
| Figure II-5 | Délimitation de sous bassin (zone d'étude) et données morphométriques | 39 |
| Figure II-6 | Réseau Hydrographique du BV d'Isser et compris le sous bassin de lakhdaria | 44 |
| Figure II-7 | Carte schématique de végétation du bassin versant de l'Oued Isser..... | 45 |
| | | |
| Figure III-1 | Répartition moyenne mensuelle de la pluie..... | 49 |
| Figure III-2 | Représentation graphique de l'ajustement à loi de Galton..... | 51 |
| Figure III-3 | Représentation graphique de l'ajustement à la loi de GEV | 51 |
| Figure III-4 | Répartition moyenne mensuelle du débit | 53 |
| Figure III-5 | Représentation graphique de l'ajustement à loi de Galton..... | 50 |
| Figure III-6 | Représentation graphique de l'ajustement à la loi de GEV | 55 |
| | | |
| Figure IV-1 | Variation interannuelle des hauteurs des pluies moyennes (S/B de LAKHDARIA) et de lame d'eau écoulée..... | 56 |
| Figure IV-2 | Résultats de corrélations entre les pluies et la lame d'eau écoulée annuelle | 57 |
| Figure IV-3 | Variation mensuelle des hauteurs des pluies moyennes (S/B de LAKHDARIA) et des lames d'eau écoulées | 58 |
| Figure IV-4 | Résultats de corrélations entre les pluies et la lame d'eau écoulée mensuelle | 59 |
| Figure IV-5 | Calage du modèle GR2M pour la période 1978 à Aout 1993..... | 62 |
| Figure IV-6 | Calage du modèle GR2M pour la période Septembre1993 à 2001..... | 62 |
| Figure IV-7 | Variation du réservoir de production pour la période de calage 1978 à Aout 1993..... | 63 |

Liste des figures

| | | |
|---------------------|--|----|
| Figure IV-8 | Variation du réservoir de production pour la période de calage Septembre 1993 à 2001. | 63 |
| Figure IV-9 | Variation taux de remplissage du réservoir de routage pour la période de calage 1978 à Aout 1993..... | 64 |
| Figure IV-10 | Variation taux de remplissage du réservoir de routage pour la période de calage de Septembre 1993 à 2001..... | 64 |
| Figure IV-11 | Validation du modèle GR2M pour la période Septembre1993 à 2001..... | 65 |
| Figure IV-12 | Validation du modèle GR2M pour la période de 1978 à Aout1993..... | 65 |
| Figure IV-13 | Variation du réservoir de production pour la période de validation de Septembre 1993 à 2001..... | 66 |
| Figure IV-14 | Variation du réservoir de production pour la période de validation 1978 à Aout1993..... | 66 |
| Figure IV-15 | Variation taux de remplissage du réservoir de routage pour la période de validation Septembre 1993 à 2001..... | 67 |
| Figure IV-16 | Variation taux de remplissage du réservoir de routage pour la période de validation 1978 à Aout1993..... | 67 |

Introduction Générale

Introduction générale

L'eau en Algérie, comme dans la plupart des pays du monde, est un facteur limitant du développement et source de tensions sociales. La rareté est appréhendée en termes de stress hydrique et d'irrégularité de la ressource, deux facteurs susceptibles de s'accroître avec le changement climatique.

L'importance de l'eau en tant que support de vie et de facteur régulateur du développement d'un pays est universellement reconnue. Aussi est-il nécessaire de la quantifier et de la gérer aussi rigoureusement que possible.

Dans ce contexte, on comprend alors aisément la nécessité de mettre au point des outils d'aide à la gestion et à la décision. Parmi les outils disponibles pour tenter d'utiliser au mieux cette ressource et suivre son évolution dans le temps et l'espace, on a les modèles pluie-débit qui ont pour objectif de reproduire à l'échelle du bassin versant, les débits des fleuves et rivières à partir de la mesure ou de la simulation des pluies.

L'apparition et l'essor des modèles pluie-débit ont commencé dans les années soixante. (Nascimento, 1995). Le souci de la modélisation pluie-débit est de mettre à la disposition des aménageurs ou bien des ingénieurs un outil «simple» permettant l'estimation ou la prévision des débits pour une étude d'aménagement désirée (barrages, lacs, ponts, etc...).

Pour ce faire, nous allons appliquer le modèle du Génie rural (GR2M) sur le sous bassin versant de Lakhdaria (une partie de bassin versant d'Isser). L'objectif est de trouver les paramètres optimaux de ce modèle qui permettent une meilleure simulation afin d'apprécier les débits simulés pour la prévision.

Cette étude est structurée en quatre chapitres après une introduction générale :

- Le premier chapitre, donne un aperçu général sur la modélisation notamment leur définition, leur objectifs, les différentes classifications et une description générale du modèle choisi GR2M.
- Le second présente une description générale de la zone d'étude à travers une situation du sous- bassin versant, leurs caractéristiques morphologiques et une description géologique.
- Le troisième, sera consacré à l'étude climatique et les paramètres hydrologique du sous bassin.

- Le quatrième et dernier chapitre, porte sur l'application du modèle GR2M sur les données relatives au sous bassin versant de LAKHDARIA.

Et enfin, une conclusion générale résumera les principaux résultats obtenus.

Chapitre I :

L'état de l'art de la Modélisation hydrologique

I.1. Introduction

Les modèles hydrologiques sont des représentations simplifiées des éléments régissant le comportement hydrologique d'un bassin de drainage. Les modèles hydrologiques sont nombreux et constituent des outils indispensables de prévision et de gestion. Arriver à des modèles mathématiques scientifiquement et relativement simples, robustes et capables de produire à des échelles d'espace et de temps données, des résultats de simulations satisfaisants, est un des objectifs majeurs des recherches en hydrologie. L'apparition et l'essor des modèles pluie-débit a commencé dans les années soixante. (Nascimento, 1995). Le souci de la modélisation pluie-débit est de mettre à la disposition des aménageurs ou bien des ingénieurs un outil «simple» permettant l'estimation ou la prévision des débits pour une étude d'aménagement désirée (barrages, lacs, ponts, etc....).L'objectif mené dans ce chapitre, est présentation d'un aperçu général sur la modélisation notamment leur définition, leur but et leur relation avec le domaine hydrologie.

Enfin, on cite quelques modèles hydrologiques existants. La méthodologie a consisté d'évaluer le modèle utilisé sur le bassin test à partir des critères de performance et de robustesse, en utilisant le modèle GR2M (Génie Rural à 2 paramètres au pas de temps Mensuel). Après une présentation du concept et des idées de base des modèles GR, nous mènerons la réflexion en vue d'évaluer l'efficacité de GR2M dans le contexte du bassin d'Isser.

I.2. Définition d'un modèle

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

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

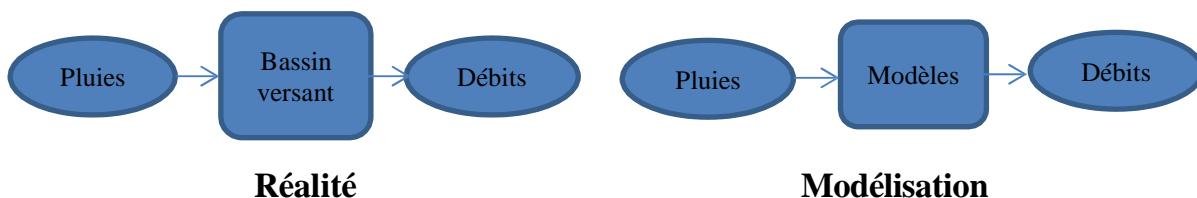


Figure I.1 : Schématisation de simulation entre la réalité et la modélisation

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

I.3. Objectif de la modélisation

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

- Simulation de débits, pour le comblement de lacunes dans des séries de données, la reconstitution de débits historiques (les données de pluie étant souvent disponibles sur des périodes beaucoup plus longues que les débits) ou pour permettre des traitements statistiques ;
- Prédétermination des débits de crue ou d'étiage (analyse fréquentielle) : pour savoir avec quelle fréquence des débits de crue (supérieurs à un seuil de risque par exemple) ou des faibles débits (en deçà d'un débit réservé par exemple) risquent de se produire, et sur quelle durée. Cette connaissance peut permettre le dimensionnement d'ouvrages et de réservoirs ou d'aménagements dans le lit (mineur à majeur) du cours d'eau ;
- Prévision des crues et des étiages : il s'agit d'évaluer par avance (avec un délai de quelques heures à quelques jours), connaissant l'état du bassin, les débits de crues susceptibles de présenter des risques (inondation) ou les débits d'étiages pouvant demander de mettre en place une gestion particulière de la ressource (par des barrages-réservoirs par exemple) pour assurer l'approvisionnement en eau ou la préservation de la vie halieutique.
- Influence d'aménagements sur l'hydrologie : c'est de prédire les changements de la réponse du bassin suite à des modifications des caractéristiques du bassin d'origine humaine ou à des changements environnementaux.

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

I.4. Classification des modèles hydrologiques

Si la modélisation pluie-débit représente un étroit domaine de l'hydrologie, elle n'en est pas moins féconde en termes de production de modèles. Le développement des moyens de calculs informatiques a certainement été l'un des facteurs majeurs ayant favorisé l'essor de ce secteur de recherche depuis le début des années 60, avec la création de dizaines de modèles. Aujourd'hui, de nouveaux modèles sont très souvent proposés dans la littérature. Ce foisonnement tient d'une part de la diversité des approches possibles, qui font appel à des concepts et des points de vue différents sur la manière de représenter la réponse d'un bassin versant à des événements de pluie.

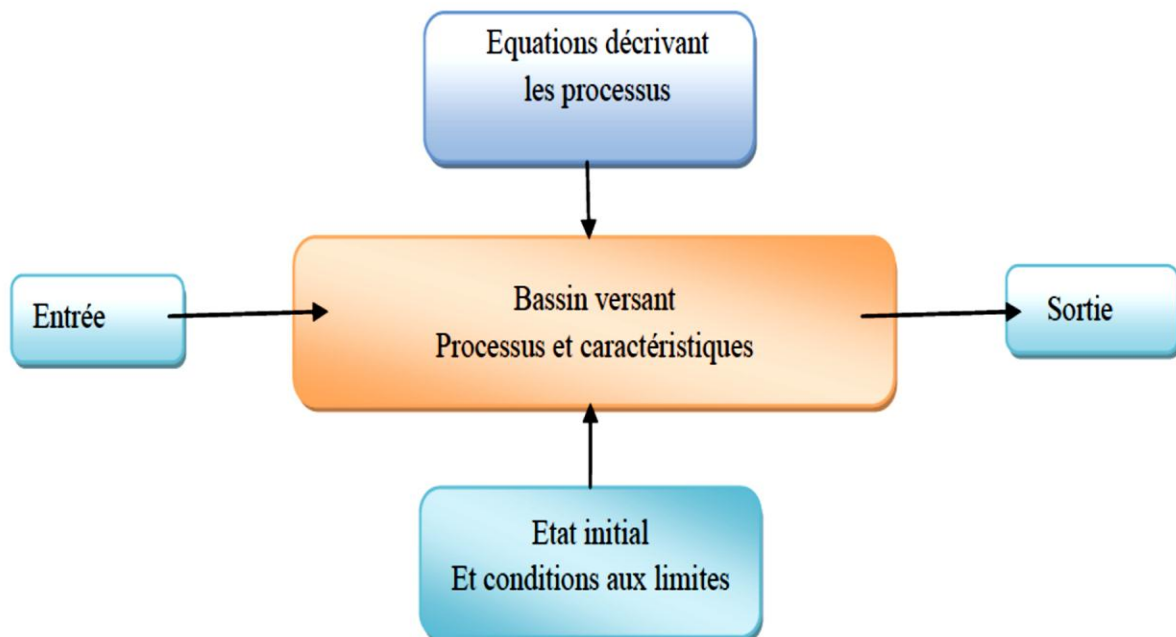


Figure I.2 : Composants d'un modèle (Singh, 1995).

Beaucoup de classifications des modèles ont été proposées. La difficulté de trouver une classification unifiée provient du fait que la grande diversité des approches entraîne une non moins grande diversité des caractéristiques des modèles (Perrin ; 2000).

Les différents types de modèles selon leurs caractéristiques sont classés et présentés dans le tableau I.1 (Clarke,1973 ; Ambroise, 1998 ; Andréassian, 2002 ; Perrin, 2002 ; Oudin, 2004).

Tableau I.1 : Exemple de caractéristiques des modèles pluie-débit

| Caractéristique | Type de modèle |
|---|--|
| Selon la nature de la variable | Modèle déterministe (variables non aléatoires) Modèle stochastique (variables aléatoires) |
| Traitement de l'espace (Homogénéité du bassin) | Modèle global Modèle semi-distribué (ou semi-global) Modèle spatialisé |
| Fondement théorique et approche de développement | Modèle empirique Modèle conceptuel Modèle à base physique |

I.4.1. Modèle déterministe

S'appuie sur la description du bassin versant et prend en compte une ou plusieurs de ses caractéristiques physiques (pente, superficie, type de sol, occupation du sol, ...). Les modèles déterministes ont pour application la prévision hydrologique pour la gestion des ouvrages hydrauliques ou pour la prévision des crues, la délimitation des zones inondables, la gestion du territoire, la quantification des impacts potentiels des changements climatiques. La méthode des crues maximales probables – PMP/PMF probable maximum précipitation, probable maximum flood (Dumas, 2006) – qui supposent l'existence d'une valeur maximale des précipitations sur une région donnée et donc des crues sur un bassin versant est une méthode déterministe.

Il y a aussi les modèles cinématiques (descriptifs) ou dynamiques (explicatifs), suivant que l'évolution temporelle du système est simplement décrite ou mise en relation avec les forces qui en sont la cause.

I.4.2. Modèle probabiliste

Sert à établir des critères de conception d'ouvrages (par exemple : dimensionnement des évacuateurs de crue des ouvrages hydrauliques grâce au calcul de la crue et de la cote de projet) ou à vérifier les performances d'ouvrages existants. La finalité du modèle probabiliste est de fournir des grandeurs statistiques de variables hydrologiques : débits maximum de pointe crue

d'une occurrence donnée, précipitations minimales d'une durée donnée et d'une période de retour donnée.

I.4.2.1. Modèle statistique et stochastique

Au sein des modèles probabilistes, on distingue les modèles statistiques – ajustement de lois statistiques, méthode du Gradex ... – et les modèles stochastiques qui représentent la nature aléatoire des phénomènes hydrométéorologiques à l'aide de distributions statistiques. Le générateur stochastique de pluie horaire de la méthode SHYPRE (Cernesson, 1993, Arnaud, 1997) permet ainsi la simulation de longues séries de précipitations grâce à la connaissance de lois de probabilité décrivant les phénomènes pluvieux (durée et nombre des averses, intensité maximale de l'averse, position du maximum, ...) et issues des observations.

I.4.2.2. Modèle événementiel

A pour objet la simulation d'un événement limité dans le temps. On modélise par exemple de manière événementielle une crue sur la durée de l'événement pluvieux l'ayant générée, augmentée du temps de concentration. Une telle modélisation nécessite la détermination des conditions initiales (débit de base au début de la simulation, humidité du sol) et néglige certains processus hydrologiques considérés comme mineurs par rapport au processus principal étudié. Dans le cas d'une modélisation événementielle de crues au pas de temps horaire, l'évaporation et l'évapotranspiration sont par exemple négligées et les écoulements de sub-surface ne sont pas modélisés. Une modélisation événementielle présente donc l'avantage théorique de prendre en compte un nombre réduit de variables d'entrée, avantage contrebalancé par le besoin d'une initialisation qui fait souvent l'objet d'un calage alors qu'elle est le résultat de processus continus (Fouchier, 2010).

I.4.2.3. Modèle global ou distribué

Selon comment sont considérés le territoire étudié et les processus hydrologiques, on parle de modèle global ou de modèle distribué. Le bassin est considéré comme une seule entité qui réagit dans son ensemble. Les caractéristiques physiques et les grandeurs météorologiques sont considérées comme uniformes à l'échelle du bassin versant assimilé à une unité ponctuelle. Il s'agit de valeurs moyennes applicables à tout le bassin versant. Les processus hydrologiques sont simulés pour l'ensemble du bassin versant.

I.4.3. Classification basée sur la représentation des processus hydrologiques

Selon le degré de complexité avec lequel on souhaite traduire les processus hydrologiques, Perrin (2000) distingue trois types de modèles : ceux de type boîte noire, ceux à base physique et ceux à réservoirs.

I.4.3.1. Modélisation de type boîte noire

Propose un schéma sans lien direct avec la réalité. Elle ne fait appel qu'aux seuls variables d'entrée et de sortie d'un bassin sans faire intervenir de données sur sa nature physique. Elle fournit une description purement mathématique et globale de la transformation pluie-débit sans chercher à la décomposer en processus. Son objectif est uniquement d'obtenir des sorties les plus proches possibles des débits d'un bassin versant réel. Elle est représentée principalement par les modèles linéaires d'analyse de séries temporelles (Box et Jenkins, 1976) et les réseaux de neurones (Anctil, et al. 2004).

I.4.3.2. Modèle hydrologique à base physique

Met en œuvre des équations qui décrivent la physique des processus hydrologiques : infiltration avec l'équation de Green et Ampt ou le modèle de Philip, évapotranspiration avec la formule de Penman, écoulement dans les zones saturée et non saturée avec les équations de Bousines et de Richards ou encore écoulement à surface libre avec les équations de Barré de Saint-Venant. Ces équations s'appuient sur des paramètres physiques mesurables, comme la conductivité hydraulique des sols à saturation, qui ne nécessitent pas en théorie d'être calibrés.

On distingue aussi les modèles empiriques, conceptuels ou théoriques (fondés sur la physique), suivant les relations utilisées pour modéliser la transformation de la pluie en débit et suivant la représentation du système modélisé.

I.4.3.3. Un modèle à réservoir

Dans un modèle hydrologique dit à réservoirs, la transformation de la pluie en débit est décomposée en différentes composantes. Les équations qui les décrivent comportent des paramètres qui ne peuvent être mesurés et qui doivent être obtenus par calage (Fouchier, 2010).

Ces procédures prennent souvent la forme de réservoirs qui se remplissent et se vident au cours du temps.

I.5. Mise en œuvre d'un modèle hydrologique

La modélisation hydrologique respecte une méthodologie en plusieurs étapes. Cette partie vise à décrire en premier lieu les principes généraux de la modélisation pluie-débit, à travers les phases successives du calage, de la validation et de l'évaluation des performances.

- **Principes de base de la modélisation pluie-débit**

La majorité des modèles pluie-débit fonctionne selon le principe décrit dans la Figure I.2. Les modèles globaux considèrent le bassin comme une unité à part entière par rapport aux pluies, aux évapotranspirations et aux débits simulés à l'exutoire (Figure I.2).

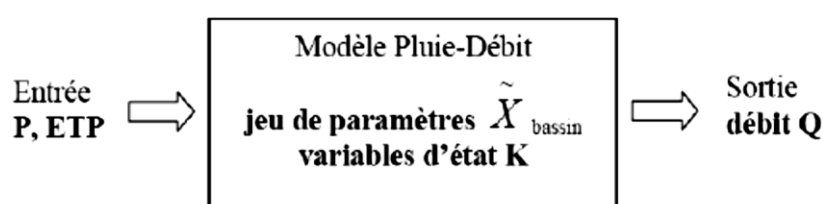


Figure I.3 : Principe de fonctionnement des modèles globaux pluie-débit

Les variables d'entrée du modèle sont ici des séries historiques de mesures des précipitations (P) et des estimations d'évapotranspiration potentielle (ETP). Les variables de sortie sont les débits simulés (Q). Le pas de temps des données à utiliser en entrée dépend de la structure du modèle, et il est le même pour les débits simulés. Le modèle dépend de variables d'état (K) qui caractérisent le système modélisé (niveau de réservoir, pluie nette, interception...), et d'un jeu de paramètres (X) s'adaptant à la série des débits mesurés pour retranscrire une série de débits simulés. Ces paramètres peuvent ou non avoir une interprétation physique.

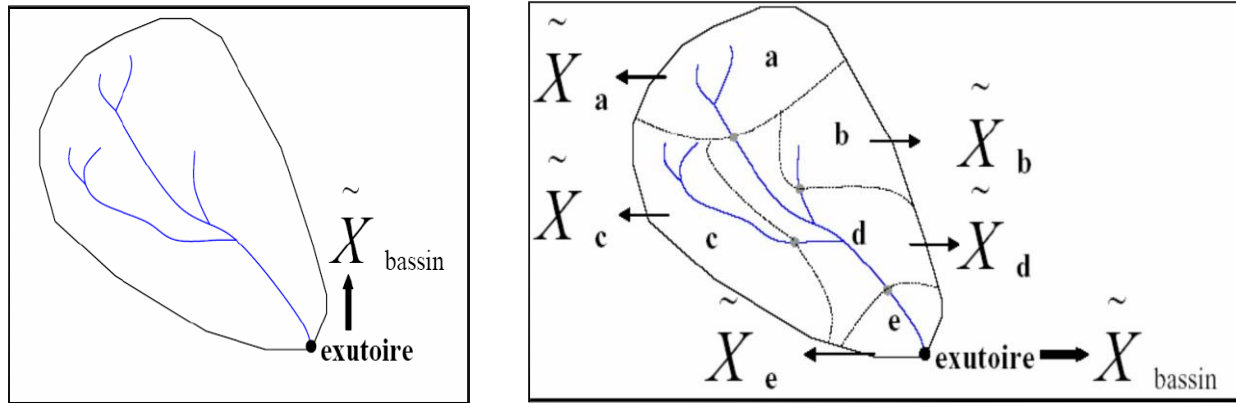


Figure I.4 : a) Schéma d'un modèle global b) Schéma d'un modèle semi-distribué

La Figure I.4-b montre un procédé classique de semi-distribution d'un modèle pluie-débit. Les variables d'entrée ne sont plus les pluies et les évapotranspirations du bassin entier, mais celles de sous-bassins {a, b, c, d, e} qui permettent de simuler indépendamment les débits aux différents exutoires, selon le schéma de la Figure I.5. La somme de ces débits est propagée jusqu'à l'exutoire du bassin entier par différentes méthodes d'agrégation ; le jeu de paramètres (X) du bassin est optimisé pour caler la série simulée sur la série de débits mesurés. Ce procédé s'oriente vers la mise en œuvre d'un modèle semi-distribué, dont les variables de sortie sont les débits simulés à l'exutoire du bassin versant Q (Abadie ; 2006).

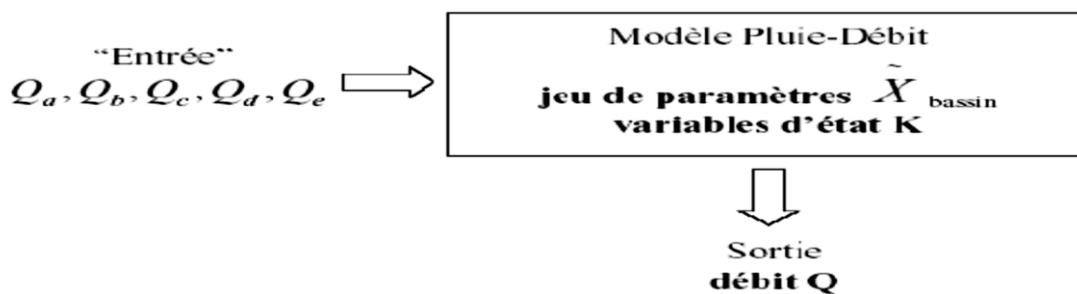


Figure I.5 : Principe de fonctionnement des modèles semi-distribués pluie-débit

Étape de calage

Certains paramètres sont souvent impossibles à mesurer ou à évaluer. Cette identification incomplète oblige à estimer les paramètres manquant par calage : il s'agit de rechercher quelles valeurs permettent de simuler au mieux, au vu d'un critère choisi, une série de données de référence sans modifier les paramètres déjà bien calés (Robinson, 2000). Pour les modèles pluie-débit, les paramètres sont ajustés de manière à ce que la simulation des débits corresponde

le plus étroitement possible avec la série de débits mesurés sur la période de calage. L'étape de calage, encore appelée calibration, joue plusieurs rôles (Robinson, 2000):

Le premier, explicite, l'estimation de paramètres non connus.

Le second, implicite, la compensation sur ces paramètres de toutes les erreurs liées au modèle ou aux données.

Le dernier, l'évaluation de la sensibilité du modèle aux différents paramètres.

Le processus du calage manuel peut être une tâche très pénible et très longue, dépendant du nombre de paramètre libre du modèle et de leur degré d'interaction (Madsen et al., 2002).

C'est pourquoi on leur préfère des procédures automatiques de calage plus objectives. Le choix de la période de référence est crucial pour la qualité du calage : plus la période est contrastée, plus la gamme de fonctionnement est représentative, et plus sont nombreuses les combinaisons de processus et facteurs qu'elle permet d'activer dans le modèle (Robinson, 2000)

- **Fonction objective**

La qualité du calage sur la période de référence est généralement évaluée en prenant comme critère la valeur d'une fonction objective. Pour un jeu de paramètres fixés, elle fournit une mesure globale de l'écart entre les séries des valeurs mesurées et simulées. Le calage revient à rechercher les valeurs des paramètres correspondant au minimum (ou maximum selon la formulation) de la fonction objective.

L'application des routines de calage automatique est basée sur une mesure objective de comparaison, encore appelée critère d'ajustement (Perrin et al., 2001). Le critère le plus communément utilisé est celui de Nash-Sutcliffe (Nash, Sutcliffe, 1970), calculé avec la formule suivante :

$$Nash(Q) = 100 \left[1 - \frac{\sum_i (Q_o^i - Q_c^i)^2}{\sum_i (Q_o^i - Q_m)^2} \right] \quad I.1$$

Q_o^i : Débit observé ; Q_c^i débit calculé et Q_m débit moyen observé.

La valeur du critère de Nash-Sutcliffe est comprise entre $-\infty$ et 100%. Le modèle est considéré comme performant quand les débits estimés se rapprochent des débits observés, c'est-à-dire quand la valeur du critère de Nash-Sutcliffe est proche de 100%. Ainsi, une performance supérieure ou égale à 60% peut être jugée satisfaisante (Perrin, 2000). Les performances en termes de critère de Nash-Sutcliffe sont l'image de l'adéquation du modèle et du jeu de paramètres calés au bassin étudié.

- **Étape de validation**

Cette phase vise à valider le réalisme des résultats, en vérifiant si le modèle calé simule correctement des séries de données de référence, non utilisées lors du calage.

La performance du modèle est jugée sur une période différente de celle ayant servi à ajuster ses paramètres. Comme le recommande Klemes (1986), cette validation (ou contrôle) devrait comporter les étapes itératives suivantes :

- calage sur une période et sur un bassin de référence, si possible pour plusieurs variables d'intérêt
- validation sur d'autres périodes pour le même bassin, sans modifier le jeu de paramètres estimés ou calés.

La qualité du modèle se mesure autant à la valeur du critère d'ajustement qu'à la différence de résultats entre la valeur prise par la fonction objective sur la période de calage et celle prise sur une période de contrôle différente. D'une manière générale, l'objectif des modélisateurs est de chercher à améliorer les valeurs des critères d'ajustement, traduisant les performances de leurs simulations (Abadie ; 2006).

I.6. Evaluation de la robustesse du modèle

L'une des techniques les plus utilisées, pour évaluer la robustesse d'un modèle dans des situations les plus proches possibles de celles dans lesquelles il est censé fonctionner, est la technique du double échantillon (Perrin, 2000 et Kouassi et al., 2011). Cette technique permet de tester l'adaptabilité des modèles quelle que soit leur complexité. Dans le cas où l'on disposerait d'observations se présentant comme des séries chronologiques (cas des pas de temps mensuel), il suffira de subdiviser la période d'observation de chaque bassin versant en sous-périodes, avec calage sur une période et contrôle sur le reste des observations, tout en veillant à réserver une période de mise en route. Cette tâche est répétée de façon à caler successivement sur toutes les sous-périodes.

La robustesse des différents modèles est évaluée par la différence des valeurs du critère de Nash-Sutcliffe en phase de calage et en phase de validation. Outre l'évaluation à l'aide d'un critère numérique, une analyse comparative des débits observés aux débits simulés a été réalisée. Le tracé de diagrammes de dispersion des débits simulés en fonction des débits observés a aussi permis d'apprécier la qualité de la modélisation effectuée.

I.7. Choix du modèle

Il n'y a pas de règles précises pour choisir le modèle le mieux adapté à une étude hydrologique particulière. Toutefois, certaines règles générales peuvent être énoncées pour guider ce choix (Luc ; 2000). Lindström *et al.* (1997) présentent les qualités suivantes comme règles de modélisation:

- ❖ Le modèle doit avoir des fondements scientifiques sains,
- ❖ Les besoins en données doivent être en accord avec la disponibilité de celles-ci sur la majorité des bassins,
- ❖ La complexité du modèle doit être justifiée en termes de performances,
- ❖ Le modèle doit être convenablement validé,
- ❖ Le modèle doit être compréhensible par les utilisateurs.

On peut ajouter à cela que le modèle doit apporter des réponses satisfaisantes aux questions posées et doit présenter des qualités de généralité et de robustesse.

I.8. Quelques modèles hydrologiques existants

De nombreux travaux ont porté sur l'étude des comportements hydrologiques par le biais d'outils de modélisation qui tout en intégrant des facteurs complexes du cycle de l'eau, décrivent le fonctionnement du bassin versant par une représentation plus ou moins simplifiée de la réalité. Dans la littérature on trouve un grand nombre de modèles hydrologiques que l'on classe selon différents.

Si l'on se base sur la nature des relations utilisées on peut classer ces modèles en trois catégories différentes allant de modèles purement mathématiques à des modèles physiques complexes.

I.8.1. Modèle global (IHACRES)

Le modèle IHACRES (Identification of unit Hydrograph Sand Component flow from Rainfall, Evaporation and Stream flow data) est le résultat d'une collaboration entre le CEH (Centre for Ecology and Hydrology) du Royaume-Uni et l'Université Nationale de l'Australie (ANU). Ce modèle peut être appliqué pour des investigations dans des petits bassins versants équipés pour des études spéciales ou pour des études régionales dans des grands bassins.

Le modèle IHACRES utilise la fonction de transfert à partir de trois modules de calcul, en séries, comme indiqué sur la figure I.5, il permet la simulation des écoulements continus ou instantanés pour n'importe quel bassin versant n'importe quelle donnée temporelle supérieure ou égale à 1 min.

Des études publiées (Maftai02), (Henine05) ont démontré qu'on peut aller d'un intervalle de 6 min pour des bassins versants de 1ha (0.01km^2) aux données mensuelles pour des bassins versants de 10000 km^2 .

Dans son mode des épurations des hydrogrammes, le modèle IHACRES comporte trois modèles de stockages conceptuels: Le modèle non-linéaire qui détermine les précipitations effectives et deux modèles de stockage en parallèle (stockage de surface et souterrain) qui assure le transfert des précipitations effectives au cours d'eau (voir la figure ci-dessous).

Ce modèle demande peu de données: les précipitations, un hydrogramme (pour le calage), la température ou l'ETP, et les dimensions du bassin versant. En sortie du modèle on récupère un hydrogramme de crue modélisé, l'humidité du bassin et les incertitudes indicatives associées aux paramètres d'hydrogramme unitaire.

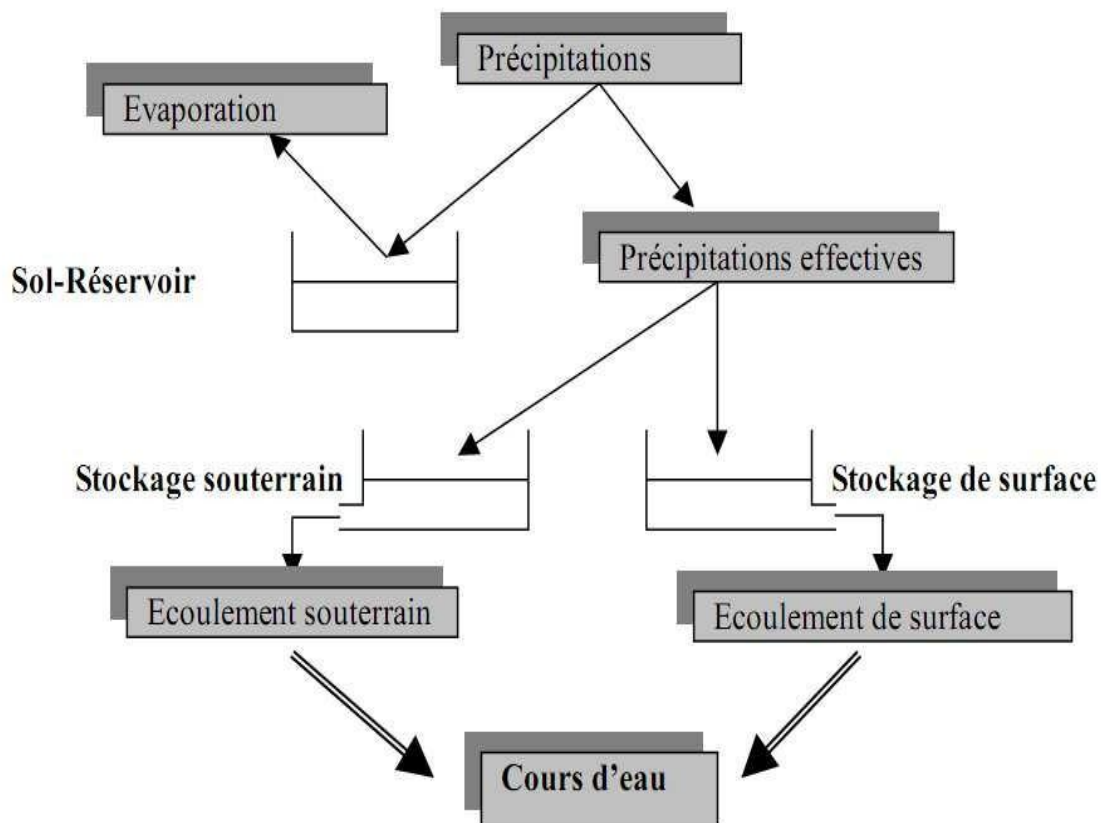


Figure.6 : Structure du modèle IHACRES

I.8.2. Modèles semi-spécialisés (HEC, CEQUEAU & MIKEBASSIN)

Il existe plusieurs modèles semi-distribués (ou semi-spatialisés), l'ensemble des modèles sélectionnés peut être utilisé avec succès dans le cadre du projet, l'avantage que présentent les modèles semi-distribués est qu'ils disposent d'une structure à base physique et il demande témoins de données que les modèles distribués. Le modèle HEC-HMS est un exemple de ce type de modèles connu par ses performances de calcul et par la qualité de ses résultats; il est disponible gratuitement dans le domaine public.

A) Le Modèle HEC-HMS

Le HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) est un modèle qui simule le comportement hydrologique d'un Bassin Versant suite à des événements pluvieux prédéterminés, développé par Hydrologic Engineering Center(HEC) du corps de l'armée américaine des ingénieurs.

B) Le modèle CEQUEAU

Le modèle hydrologique CEQUEAU, développé à l'Institut National de la Recherche Scientifique-Eau (INRS-Eau) depuis 1971, est un modèle déterministe distribué à bilan, qui prend en compte les caractéristiques physiques du bassin versant par le découpage de celui cinglements de même dimension. Cette discrétisation spatiale du bassin versant permet des cuivres l'évolutions patio- temporelle des phénomènes, de prévoir l'effet de toute modification physique du bassin versante de prendre en compte des réservoirs réels ou fictifs.

Le découpage dans l'espace d'un bassin versant peut être très varié dans sa forme et sa densité .Pour le modèle CEQUEAU, le bassin versant est découpé en surfaces carrées de dimensions semblables appelées «carreaux entiers» c'est le premier découpage. Un deuxième est ensuite nécessaire pour reproduire le cheminement de l'eau entre les carreaux entiers et vers la rivière.

- Le premier découpage délimite le bassin versant en surfaces élémentaires que nous appellerons "carreaux entiers". La dimension à donner aux "carreaux entiers" dépend principalement de la superficie du bassin versant étudié, des données météorologiques disponibles, de la topographie du terrain, etc. Les données physiographiques nécessaires pour chaque "carreau entier" sont l'altitude, les pourcentages de forêts, de lacs et de marais. Ces données sont déterminées à partir des cartes topographiques du bassin versant étudié ou à l'aide d'un système d'information géographique.

- Le deuxième découpage consiste à subdiviser les carreaux entiers en carreaux partiels. Ces éléments sont le résultat de la subdivision des "carreaux entiers" en fonction des lignes de partage des eaux. On compte jusqu'à quatre "carreaux partiels" par "carreau entier". Les données nécessaires pour ces éléments partiels sont : Le sens d'écoulement de l'eau et son pourcentage de superficie par rapport au "carreau entier" qu'il subdivise.

Le modèle compte deux parties principales visant à décrire le mieux possible l'écoulement de l'eau vers l'exutoire du bassin versant. La première partie concerne l'écoulement vertical de l'eau appelée fonction de production qui transforme les précipitations réelles en précipitations utiles sur chaque carreau entier et à chaque pas de temps.

La schématisation de ce processus est représentée par un ensemble de réservoirs communiquant entre eux à l'aide de relations mathématiques reproduisant, à l'échelle du pas de temps de la simulation, les différents transferts de masse. Et la deuxième partie concerne le transfert de l'écoulement dans le réseau de drainage appelé fonction de transfert qui assure le cheminement de l'eau entre les carreaux partiels.

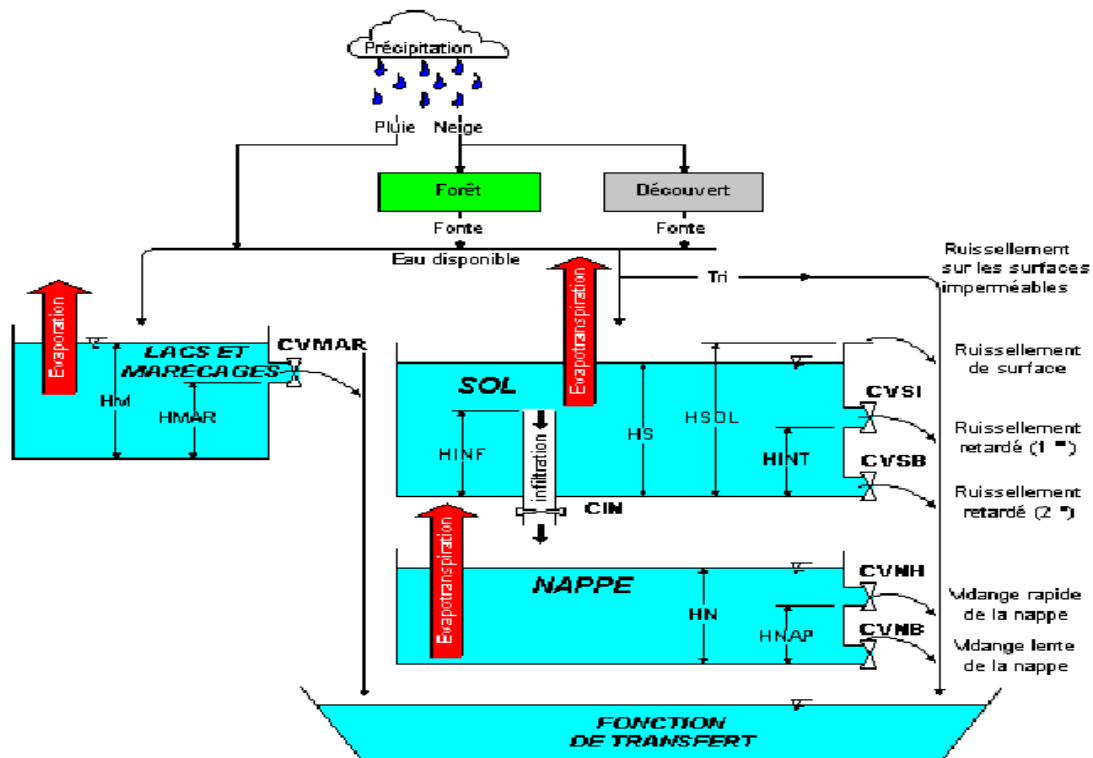


Figure I.7: La fonction de production du modèle hydrologique CEQUEAU

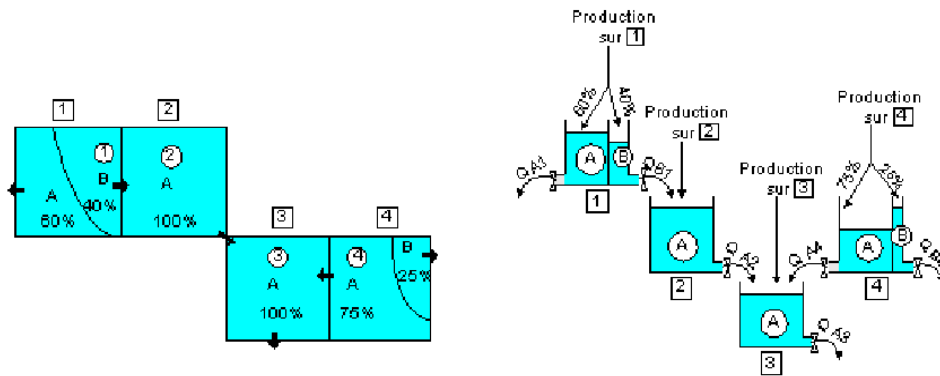


Figure I.8 : La fonction de transfert du modèle CEQUEAU

Le modèle CEQUEAU dispose d'une interface graphique conviviale. Les informations nécessaires à la simulation (données physiographiques et hydrométéorologiques ainsi que tous les paramètres reliés à la simulation) sont structurées sous la forme de projets pouvant être sauvegardés sur le disque. Chaque projet réfère à un ou plusieurs bassins versants et peut comprendre plusieurs séries de simulation. Ce concept permet une gestion aisée des données d'entrée du modèle ainsi que des résultats de simulation que l'utilisateur désire conserver.

Les dernières modifications apportées pour la version 4.0 ont permis de faciliter et d'améliorer grandement l'utilisation de ce logiciel, cette version permet de:

- Choisir la langue d'affichage ;
- De simuler pour des pas du temps de 1,2,3,4,5,6,8,12 heures ou journaliers;
- Prévoir des débits en temps réel avec mise à jours ;
- Traiter plusieurs bassins versants simultanément;
- Offrir un nombre accru de types de graphiques permettant une analyse et une visualisation plus éclaircies des résultats et par conséquent une meilleure prise de décisions;
- Introduire la variation spatiale des principaux paramètres de la fonction de production.

▲ Les données météorologiques

En plus des données physiographiques des carreaux entiers, le modèle requiert sur chacun de ces carreaux, à chaque pas de temps, les données suivantes: les précipitations liquide ou solide ainsi que les températures maximales et minimales de l'air.

Ces données n'étant disponibles qu'à un nombre limité de stations, le modèle permet l'utilisation de différentes méthodes d'interpolation de données et combler ainsi les lacunes. Les méthodes d'interpolation utilisées avec le logiciel CEQUEAU sont : la régression, la pondération et la méthode des polygones de Thiessen.

En général, les données dont nous aurons besoin sont :

La simulation :

- Les températures maximales et minimales de l'air ;
- Les précipitations liquides ou solides ;
- Débits observés pour les besoins de calibrage du modèle.

La prévision à court terme :

- Les prévisions de la température de l'air aux stations météorologiques ou en des points de grille ou moyennes sur le bassin versant ;
- Les prévisions des précipitations aux stations météorologiques ou en des points de grille ou moyennes sur le bassin versant.

La prévision à moyen terme :

- Données météorologiques (température de l'air et précipitation) historiques moyennes du bassin versant.

C) Le modèle MIKEBASSIN

Le modèle MIKE BASSIN a été élaboré au Danich Hydraulique Institute. C'est un instrument de gestion des ressources en eau fondé sur une forte représentation par bassin versant des points d'eau et des utilisateurs d'eau potentiels (Henine05).

Ce modèle permet d'optimiser la gestion de l'utilisation des ressources en eau disponibles en relation avec les contraintes environnementales liées au sol, à la terre, à l'agriculture, à l'ingénierie et à la société. MIKEBASSIN permet d'effectuer une modélisation simple et intuitive des processus hydrologiques et hydrauliques à l'échelle du bassin versant. La modélisation hydrologique est basée sur une transformation pluie-débit. L'outil permet de décrire les demandes multi sectorielles (domestique, industrielle, agriculture, production d'électricité, navigation, environnementale...) ainsi que les règles de priorité entre chacune de ces différentes utilisations.

a- L'interface sous Système d'Information Géographique

MIKE BASSIN fonctionne sur la base d'un réseau fluvial digitalisé généré directement sur l'écran dans le logiciel Arcview. Toutes les informations relatives à la configuration du réseau fluvial, des barrages, de la position des utilisateurs d'eau, des prises d'eau ainsi que les prises de retours ont également données à l'écran.

b- Les données de base

Les données de base du modèle consistent en des séries chronologiques du ruissellement en chaque branche (rivière) générée par les sou-bassin drainant. Les autres données relatives aux caractéristiques de barrage et aux règles des fonctionnements de chaque réservoir, aux séries chronologiques des données météorologiques et aux données pertinentes à chaque schéma d'approvisionnement en eau ou de périmètre d'irrigation telles que les exigences de dérivation et autres informations sur les débits de retour sont fournies par des fichiers complémentaires.

Sachant que le modèle MIKE BASIN est une extension de Arcview, les informations géographiques du bassin peuvent être incluses dans la simulation des ressources en eau, la structure du modèle du bassin est éditée par Arcview.

I.8.3. Modèle physiques partialisé (MIKESHE)

Ce modèle d'inspiration mécaniste, a été élaboré au Danish Hydraulic Institute (DHI). MIKESHE (Système Hydrologique Européen) a pour objectif la modélisation de la partie continentale du cycle de l'eau et peut être en théorie, appliqué à des surfaces s'allant de la parcelle à la totalité du bassin versant. Par miles domaines d'application de MIKESHE, nous retrouvons l'étude classique de la dynamique du bassin versant, ainsi que le suivi des impacts relatifs aux modifications du bassin (occupation des sols, aménagement, types des sols...), ou de scénarios climatiques (sécheresse, fortes pluies...).

Le caractère mécaniste de ce modèle provient de l'utilisation de différents modèles mathématiques pour décrire chacune des composantes du cycle hydrologique et du cycle des polluants (Henine05).

De ce fait, la discrétisation du bassin versants' effectue classiquement par un découpage en strates horizontales et en colonnes homogènes tridimensionnelles. La structure de ce modèle est présentée sur la figure I.9.

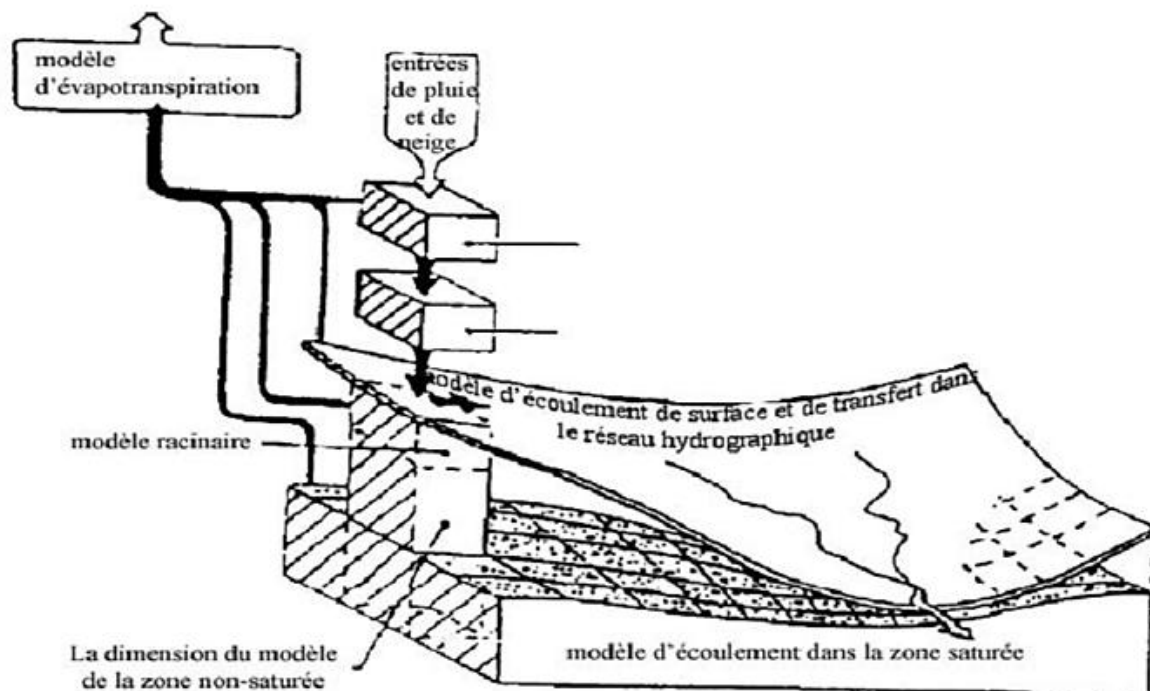


Figure I.9 : Structure du modèle SHE

Le tableau I.2 ci-après montre globalement les modèles utilisés dans le cadre de l'hydrodynamique de MIKESHE.

Tableau I.2: Modélisation utilisée avec modèle hydrodynamique de MIKESHE

| | |
|--|-------------------|
| Interception et Evapotranspiration | Kristonet |
| Ecoulement en zone non saturée | Richart(1931) |
| Ecoulement en zone saturée | Boussineq(1904) |
| Ruissellement | Ondesdiffusive |
| Ecoulement dans le réseau hydrographique | SaintVenant(1871) |

Le transfert des polluants, les cinétiques, les processus d'adsorption/désorption ou encore les prélèvements racinaires sont modélisés de manière classique (cinétique du premier ordre, isotherme d'adsorption...).

Du fait du caractère fortement mathématique de ce modèle, la connaissance préalable de nombreuses données s'avère indispensable. Nous notons entre autre la pluviométrie, les températures, l'occupation des sols, le type de culture, la texture des sols, les usages des sols, la topographie. Toutefois, MIKESHE dispose de nombreuses bases de données intégrées, ce qui lui confère un certain intérêt car la mise en place de campagne d'acquisition n'est pas indispensable que si l'utilisateur ou Haite enrichir le plus possible la modélisation. Dans un premier temps, l'utilisation des banques de données peut serévérer suffisante.

I.8.4. Modèle physique-conceptuel semi-spatialisé (TOPMODEL)

TOPMODEL est un modèle semi-distribué des linéaire produire le comportement hydro morphologique d'un bassin versant. Ce modèle est encore utilisé et amélioré car sa relatives implicite et les bons résultats qu'il fournit sont autant de motivations à son développement. Ce modèle prédit, à chaque pas du temps, la distribution partielle du contenu en eau au sein des différentes mailles du modèle numérique de terrain (MNT) du bassin versant considéré. Il est basé sur les concepts originaux de déficit en eau du sol par rapport à la saturation et à l'index topographique. Cette idée provient du fait que, depuis quel que années, la participation des écoulements souterrains aux variations des débits des rivières, même en période de fortes précipitations on tété reconnue comme étant capitale (Henine05).L'index topographique est utilisé pour déterminer, en fonction de la topographie du bassin, la quantité d'eau des tinées au ruissellement etc. elle restant pour l'infiltration. La structure de ce modèle est illustrée sur la figure I.9.

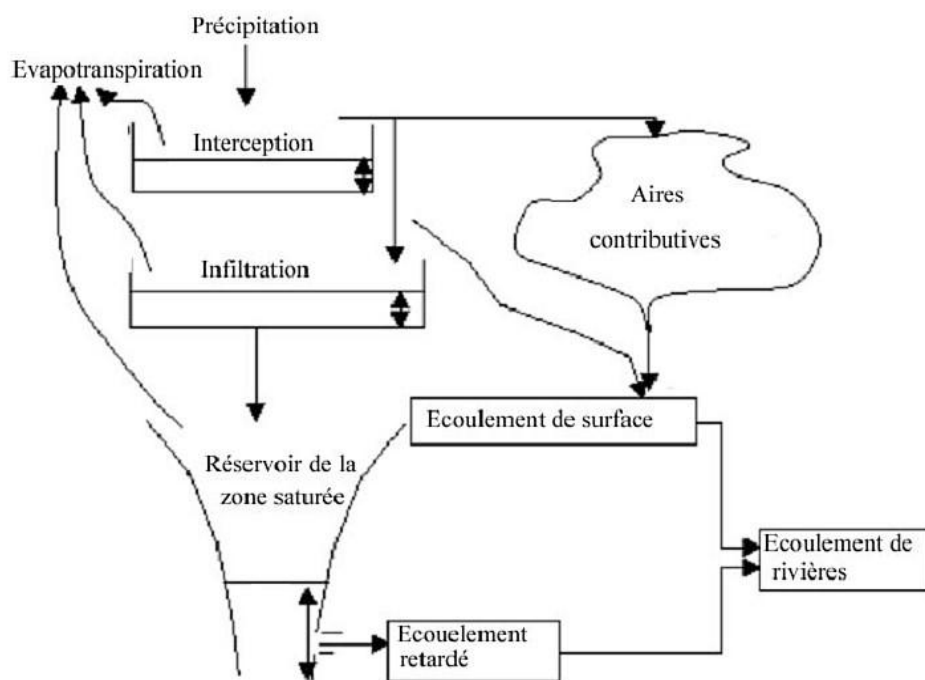


Figure I.10: Structure du modèle TOPMODEL

TOPMODEL repose sur un découpage du bassin versant en sous-bassins homogènes (mailles carrées). Le sol et le sous-sol sont représentés par des réservoirs successifs, d'où le caractère conceptuel de ce modèle. Ce modèle, relativement puissant nécessite toutefois, bien évidemment, un certain nombre de données pour fonctionner, par miles quelles, nous notons les pluies horaires, l'évapotranspiration potentielle une cartographie de la transmisivité T_0 et

de la conductivité hydraulique verticale mesurée en surface, K_0 . En effet, le modèle utilise une loi de décroissance de la conductivité avec la profondeur du type :

$$K_s(z) = K_0 e^{-fz} \quad \text{I.2}$$

Où,

L'axe Z : est orienté positivement vers le bas ;

f : est un facteur de décroissance.

I.8.5. Modèles 'Cemagref Antony' ou 'GR' (Génie Rural)

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

L'idée s'est développée alors, en partant du modèle le plus élémentaire possible (un unique paramètre lié à un unique réservoir) et en ne compliquant cette architecture que pour faire face aux difficultés à reproduire les débits réels et non pour satisfaire des conceptions a priori sur le cycle hydrologique. Cette démarche a débouché sur un modèle simple à deux paramètres GR2J (Michel, 1983). Nous soulignons que :

-Au pas de temps journalier, la version la plus performante (GR4J) est celle proposée par Perrin (2000). Elle semble la plus robuste,

-La version GR3J (Edijatno, 1987 ; Edijatno et Michel, 1989) a servi, principalement, comme modèle de base pour l'élaboration des autres versions au pas de temps journalier ainsi qu'au pas de temps mensuel. GR2 (Edijatno et Michel, 1989), GR3 (Michel, 1989), GR3M (Kabouya, 1990) et GR2M (Makhlouf, 1994), représentent en quelque sorte des 'dérivés' du modèle journalier GR3J (Edijatno, 1991)

I.8.5.1. Modèle GR2M

Dans cette partie, nous développerons plus particulièrement la description de ce modèle qui nous utiliserons pour le bassin d'Oued Isser.

1. Description

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) est un modèle conceptuel et empirique global élaboré par Michel (1983) du CEMAGREF. Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement par Kabouya (1990), Kabouya et Michel (1991), Makhoul et Michel (1994), Mouelhi (2003) et Mouelhi et al. (2006b), qui a permis d'améliorer progressivement les performances du modèle. La version présentée ici est celle de Mouelhi et al. (2006b) qui paraît être la plus performante. Ce modèle a déjà été appliqué sur plusieurs bassins en Afrique, en France et en Algérie.

Le modèle GR2M est constitué d'un réservoir sol qui régit la fonction de production et qui est caractérisé par sa capacité maximale X_1 , correspondant à la capacité de rétention en eau du sol et d'un réservoir de routage d'eau gravitaire qui régit la fonction de transfert caractérisée par un coefficient d'échange souterrain X_2 ($0 < X_2 < 1$). Pour utiliser GR2M sur un bassin donné, les informations suivantes sont nécessaires pour les calculs : la superficie du bassin en kilomètres carrés, les chroniques mensuelles de pluie (P) sur le bassin en millimètres, les chroniques mensuelles d'évapotranspiration potentielle (E) en millimètres et les valeurs initiales des taux de remplissage du réservoir de production (X_1).

La principale donnée de « sortie » du modèle est l'écoulement à l'exutoire (Q).

1. 2. Description mathématique

La fonction de production du modèle repose sur un réservoir de suivi d'humidité du sol, très similaire à celui existant dans le modèle GR4J (figure I.11). Du fait de la pluie P , le niveau S dans le réservoir devient S_1 défini par :

$$S_1 = \frac{S + X_1 \varphi}{1 + \varphi \frac{S}{X_1}} \quad \text{I. 1} \quad \text{où} \quad \varphi = \tanh\left(\frac{p}{X_1}\right) \quad \text{I. 2}$$

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

$$P_1 = P + S + S_1 \quad \text{I. 3}$$

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

$$S_2 = \frac{S_1 (1 - \psi)}{1 + \psi \left(1 - \frac{S_1}{X_1}\right)} \quad \text{I. 4} \quad \text{où} \quad \psi = \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right) \quad \text{I. 5}$$

Le réservoir se vidange ensuite en une percolation P_2 et son niveau S , prêt pour les calculs du mois suivant, est alors donné par :

$$S = \frac{S_2}{\left[1 + \left(\frac{S_2}{X_1}\right)^3\right]^{1/3}} \quad \text{I.6}$$

$$P_2 = S_2 - S \quad \text{I.7}$$

La pluie totale P_3 qui atteint le réservoir de routage est donnée par :

$$P_3 = P_1 + P_2 \quad \text{I.8}$$

Le niveau R dans le réservoir devient alors R_1 :

$$R_1 = R + P_3 \quad \text{I.9}$$

Un terme d'échange en eau est alors calculé par :

$$F = (X_2 - 1) \cdot R_1 \quad \text{I.10}$$

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

$$R_2 = X_2 \cdot R_1 \quad \text{I.11}$$

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

$$Q = \frac{R_2^2}{R_2 + 60} \quad \text{I.12}$$

Et le niveau du réservoir est enfin mis à jour par

$$R = R_2 - Q \quad \text{I.13}$$

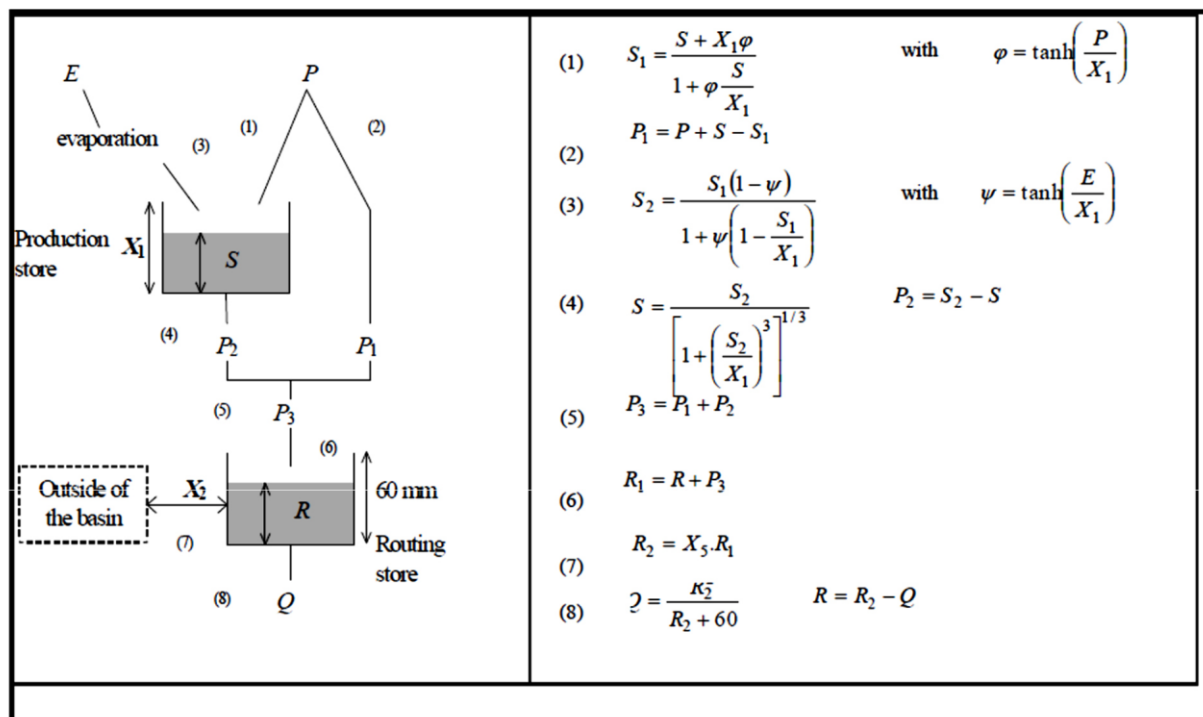


Figure I.11 : Architecture du Modèle GR2M

3. Mise en œuvre du modèle

Il semble essentiel de distinguer, par miles séries de données disponibles pour chaque bassin versant, deux périodes distinctes, d'égale importance ; la première servant au calage, la deuxième à son contrôle (validation).

Initialisation et période de mise en route du modèle

GR2M nous restitue les débits calculés (Q_c) à condition de connaître l'état initial au début de la période simulée. Au fur et à mesure que le modèle fonctionne, il s'effectue un ajustement progressif des états du système. Compte tenu du caractère inéluctablement arbitraire de l'initialisation, les premières valeurs de Q_c ne sont pas fiables et par conséquent ne sont pas prises en compte dans le calcul de la fonction critère (Ardoin, 2000). On utilise donc de façon systématique une période de deux ans de mise en route du modèle, dont les résultats ne sont pas comptabilisés (Makhlouf, 1994). Cette période de mise en route se produit dans les phases de calages et de validations.

La détermination des paramètres optimaux nécessite le choix d'un critère d'évaluation.

➤ **Approche qualitative**

La méthode la plus simple pour évaluer les performances du modèle consiste à évaluer graphiquement les valeurs observées et les valeurs simulées.

➤ **Approche quantitative**

Le critère de Nash est le critère de qualité retenu dans cette étude (Nash&Sutcliffe, 1970).

I.9. Conclusion

Le modèle hydrologique est un outil incontournable dans la compréhension de la dynamique d'un bassin versant, dans l'utilisation rationnelle des ressources en eau de ce bassin et dans la lutte contre les catastrophes naturelles liées aux crues. Grâce aux progrès importants réalisés dans le domaine de l'informatique et des Systèmes d'Informations Géographiques les modèles hydrologiques proposés dans la littérature, sont nombreux. Il n'y a pas de règles précises pour choisir le modèle le mieux adapté à une étude hydrologique particulière.

Chapitre II :

Présentation de la zone d'étude

II.1. Introduction

L'objectif dans ce chapitre est d'identifier les paramètres morpho métriques, géométriques et les reliefs d'une façon général dans notre zone d'étude, ces caractéristiques jouent un rôle très important et essentiel dans la diagnostique de bassin versant notamment leur comportement hydrologiques.

II.2. Situation géographique de la zone d'étude (le s/b de Lakhdaria, appartient au moyen Isser)

Le bassin versant de lakhdaria est apprtient au bassin versant Isser qui est situé environ à 70 Km au Sud Est d'Alger. Il est présenté sensiblement la forme d'un quadrilatère d'orientation Sud –Ouest /Nord-Est, avec une forme allongée

Le bassin versant de lakhdaria occupe une superficie de 3615 km² pour un périmètre de 270 km. Il est limité comme suit

- Au Nord par le Massif de BeniAmrane;
- Au sud par le Médea et Souk el Khemis
- A l'Est par l'oligocène de Drâa ElMizane;
- A l'Ouest par les formations oligocènes du DjebelBouZegza.

La figure II.1 représente bien la situation géographique de la zone d'étude (sous bassin de Lakhdarian°(04) pour cinq sous bassin qui compose le bassin d'Isser.

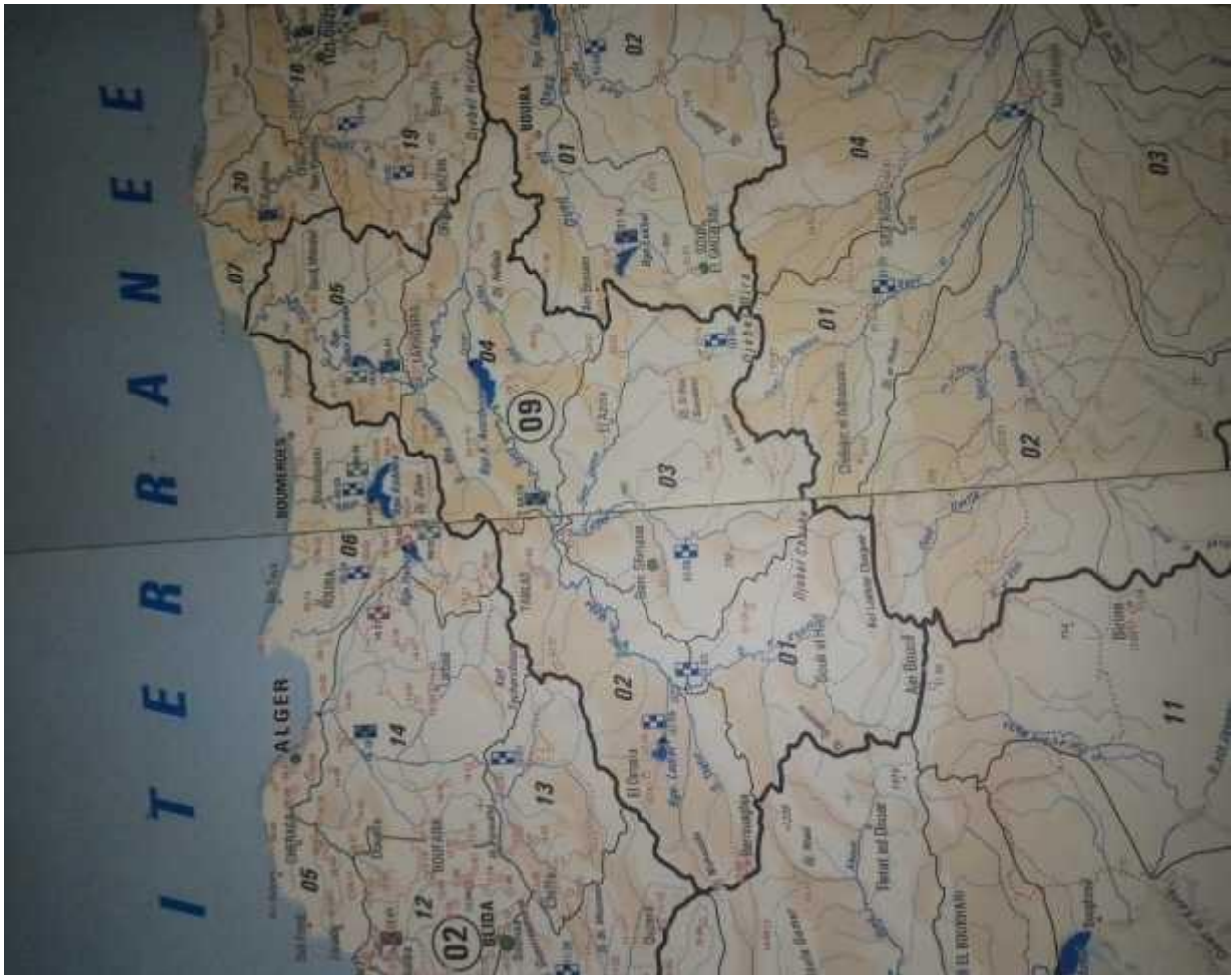


Figure II.1 : Plan de la situation du sous bassin de Lakhdaria (N°04) et le bassin versant d'Isser (N°09). (ANRH)

II.3. Topographie du bassin versant

D'après des données de l'(ANRH) le bassin versant est de type montagneux, se trouve à une altitude moyenne de 1020 m.

Le relief est plus au moins accentué. Il se situe entre l'altitude 710 m à la station de LAKHDARIA à 1265m au BJEBLEFOUDA.

Et pour bien expliquer et montrer la topographie de notre zone d'étude la figure suivante nous a donné un Modèle Numérique de la Topographie de tout bassin versant d'Isser et compris notre zone d'étude.

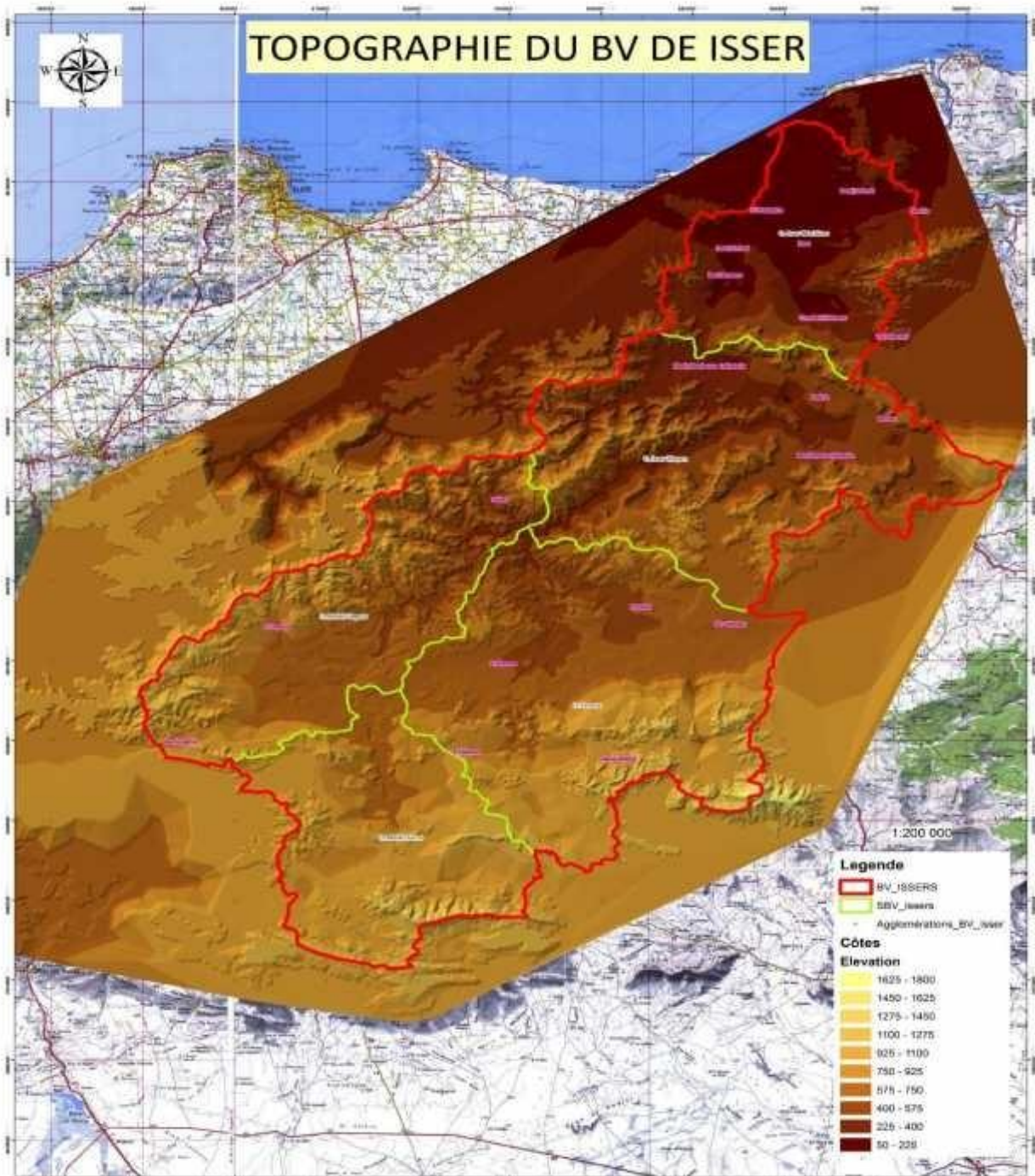


Figure II.2 : Modèle Numérique de la Topographie du BV de Isser et compris notre zone d'étude (mémoire d'ingénieur).

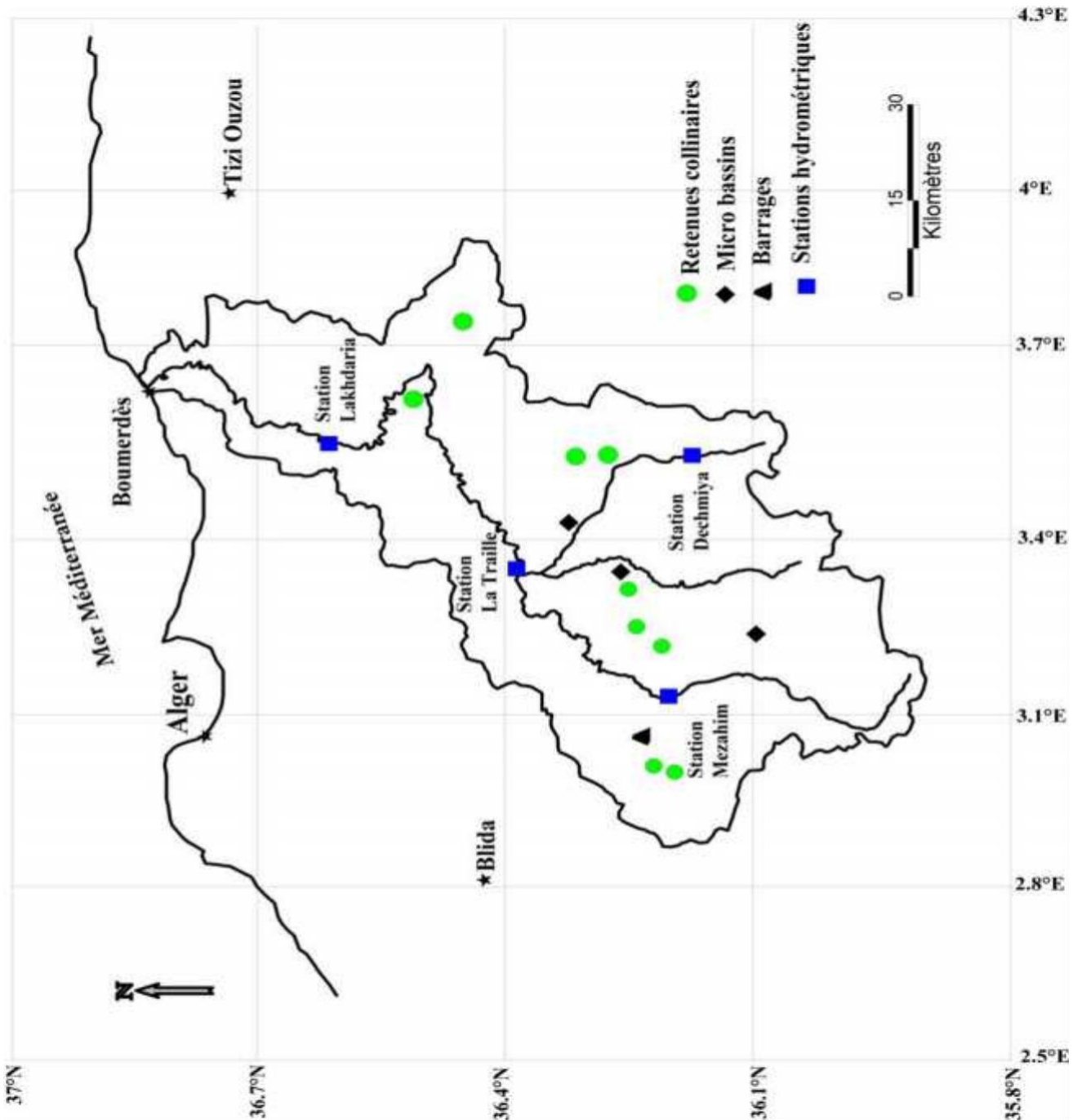


Figure II.3 : la position de la station hydrométrique de Lakhdaria sur le réseau hydrographique principal et les différents ouvrages hydrotechniques existant dans tout le BV Isser.

II.4. Etude géologique

1. La feuille de Palestro comprend une région accidentée dont l'arête saillante, formée de terrains éocènes avec pointement de calcaires liasiques, n'est autre que le prolongement, affaibli vers l'Ouest, de la chaîne du Djurjura. Cette ligne de crêtes, entaillés par les profonds coupures de l'Isser et de l'Oued Kadarra_a pour sommets culminants le Bou-Zagza

(1032 mètres) et le Tegrимount (1028 mètres) ; Elle sépare deux régions distinctes : au Nord, le massif ancien avec ses dépressions tertiaires; au Sud, les contreforts créacés, qui sont une dépendance de l'Atlas Méridjien , et se rattachent au massif de Tablat.

Le massif schisteux des Khaclma se compose d'une série de contreforts dont le mamelon culminant ne dépasse pas (630 mètres) (Iri• Zenahir);c'est une réduction du massif kabyle, auquel il se rattache à l'Est par la chaîne cristalline des Flissa. Plusieurs dépressions interrompent la continuité ; à l'Ouest, la vallée du Corso, occupée par le créacé supérieur et des lambeaux démantelés de terrains miocènes ; à l'Est, c'est la zone des collines de l'oued Djemâ, qui se prolonge par la vallée de Drâ• el• Mizan Jusqu'au pied du Djurjura central.

2. La description lithologique du bas ISSER et moyen ISSER a été extraite de la carte de géologie.

Les schistes argileux, les marnes grises et schisteuses avec des couches de grés occupent 70% du moyen ISSER. Ces formations appartiennent au créacé inférieur, moyen et supérieur.

On rencontre l'oligocène marin dont les formations sont présentées par des conglomérats, grés et marnes constituent 13.41% de la superficie totale de bassin.

Le miocène inférieur est représenté par des grés et marnes; ces formations constituent 4% du bassin.

Les alluvions du quaternaire continentales occupent 6,90% de la superficie totale. (Figure II.3). On note la présence des traces de trias marin ou lagunaire formant 0,6% du bassin.

Le moyen ISSER présente en général des formations meubles, facilement érodables.

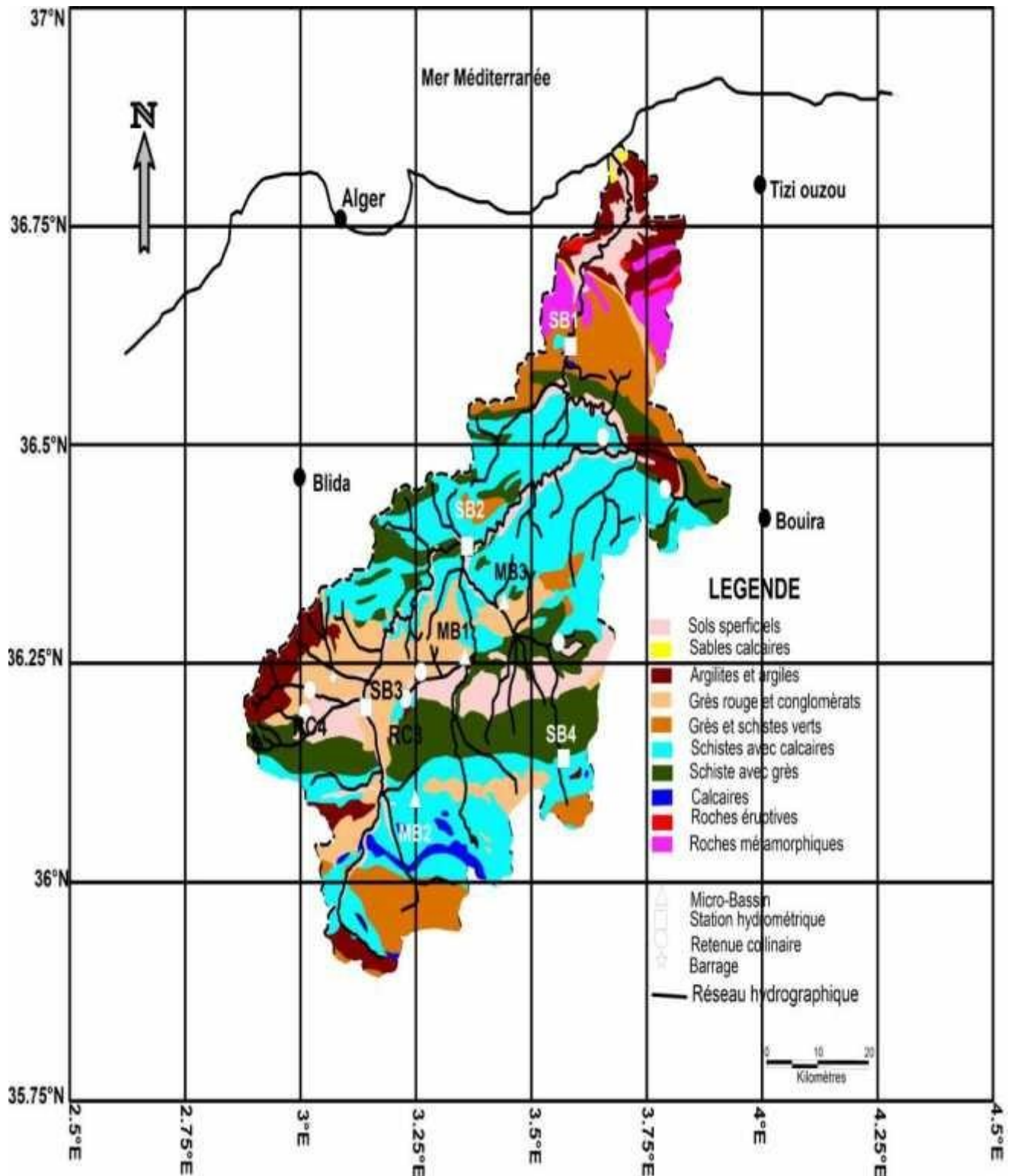


Figure II.4 : Carte lithologique du bassin versant Isser. (ANRH)

II.5. Etude hydrologique

III.5.1. Caractéristiques physiques du bassin versant

Caractéristiques géométriques

1-Superficie

Le bassin versant étant l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les débits vont être en partie reliés à sa surface.

2-Périmètre

Il correspond à la longueur de la limite extérieure du bassin.

A- Caractéristiques hydro morphologiques

La forme d'un bassin versant influence l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin versant.

1. 1. Indice de compacité de Gravelius K_C

Défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface, Cet indice se détermine à partir d'une carte topographique en mesurant le périmètre du bassin versant et sa surface.

$$K_C = \frac{P}{P_C} = \frac{P}{2\pi R} ; R = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad P_C = 2\pi R = 2\pi \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad \text{II.1}$$

$$K_C = \frac{P}{2\pi \sqrt{\frac{S}{\pi}}} = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}} \quad \text{II.2}$$

P : périmètre du bassin versant (Km)

S : surface du bassin versant (Km²)

Si $K_C = 1,128 \Rightarrow$ bassin ramassé

Si $K_C > 1,128 \Rightarrow$ bassin allongé

Selon la valeur de K_C on pourra dire que notre bassin est de forme allongée.

2. Coefficient d'allongement

Ce coefficient est obtenu par la relation suivante :

$$K_P = \frac{P^2}{S} \quad \text{II.3}$$

3. Rectangle équivalent

On assimile notre bassin à un rectangle défini par sa longueur "L", sa largeur "l" est la même superficie du bassin versant "S». (Figure N°III.5)

$$P = 2*(L + l) \text{ et } S = L * l \rightarrow (1) \quad \text{II.4}$$

La longueur L et la largeur l en Km sont données par la résolution de P et S :

$$K_C = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}} \rightarrow (2) \quad \text{II.5}$$

De (1) et (2) on obtient une Equation de 2^{ème} degré admet deux solutions $L_r ; l_r$:

$$L_r = \frac{K_C \sqrt{S}}{1,128} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{K_C} \right)^2} \right) \quad \text{II.6}$$

$$l_r = \frac{K_C \sqrt{S}}{1,128} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{K_C} \right)^2} \right) \quad \text{II.7}$$

Avec L_r : longueur du rectangle équivalent en (Km)

l_r : largeur du rectangle équivalent en (Km)

4. Altitude moyenne du bassin versant

Celle-ci est donnée par la formule suivante :

$$H_{moy} = \sum \frac{S_i \cdot H_i}{S_{bv}} \quad \text{II.8}$$

Avec :

S_i : surface partielle entre deux courbes de niveau (Km²)

H_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau successive (m)

S_{bv} : Superficie du bassin versant (Km²)

5. Indices

Le but de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin versant et de permettre des comparaisons et des classifications. Les indices de pente se déterminent à partir de la connaissance de la répartition hypsométrique sur le bassin.

☞ indices de pente

✓ Indice de pente de Roche I_p

I_p est la moyenne de la racine carrée des pentes mesurées sur le rectangle équivalent, et pondérée par les surfaces comprises entre deux courbes de niveau H_i et H_{i-1} .

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_i^n \overline{S_i} (H_i - H_{i-1}) \quad \text{II.9}$$

L : Longueur de rectangle équivalent (m)

S_i : Surface partielle correspondante (%).

✓ Indice de pente globale I_g : (P.Dubreuil, 1974)

$$I_g = \frac{D}{L} \quad \text{II.10}$$

Ou D = Dénivelée entre $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$

On prend : $D = H_{5\%} - H_{95\%}$ pour notre bassin versant, on a donc

Avec ; $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$: sont les altitudes correspondantes à $S_{5\%}$ et $S_{95\%}$

L : la longueur du rectangle équivalent (km)

✓ Indice de pente moyenne du bassin versant (I_m)

Il est donné par la formule suivante :

$$I_m = \frac{\Delta H \cdot (0,5l_1 + l_2 + l_3 + \dots + 0,5l_n)}{S} \quad \text{II.11}$$

Avec :

ΔH : Dénivelée (m).

l_i : Longueur de la courbe de niveau d'ordre 1, 2, 3, ..., n.

S : Surface du bassin versant (Km^2).

A- Caractéristiques physiographiques

1) Densité de drainage D_d

C'est le rapport entre la longueur total de tous les talwegs « L_i » du bassin versant, à la surface « S » Elle reflète la dynamique du bassin, la stabilité du chevelu hydrographique et le type de ruissellement de surface .Elle est exprimée en Km/Km^2 .

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{S} \quad \text{II.12}$$

Avec :

$\sum_{i=1}^n L_i$: La longueur totale de tous les cours d'eau égale à 28,22 Km.

S : Superficie du bassin versant en (Km^2).

2) Densité du thalweg élémentaire

$$F_1 = \frac{N_1}{S} \quad \text{II.13}$$

N_1 : Nombre de thalwegs d'ordre 1.

S : Superficie du bassin versant.

3) Coefficient de torrentialité

Il est défini comme étant :

$$C_t = D_d \cdot F_1 \quad \text{II.14}$$

* D'après les résultats obtenus ci-dessus, on peut conclure que le chevelu hydrographique est dense, ce qui traduit que notre bassin est bien drainé.

4) Temps de concentration du bassin versant t_c

Le temps de concentration t_c des eaux sur un bassin versant se définit comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point du bassin et l'exutoire de ce dernier.

- Formule de GIANDOTTI(1973)

$$t_c = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L_{cp}}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \quad \text{II.15}$$

Avec :

S : surface du bassin versant (Km^2) ;

L_{cp} : longueur de cours d'eau principal (Km) ;

T_c : temps de concentrations exprimé en heure

H_{moy} : altitude moyenne (m) ;

H_{min} : altitude minimale (m) ;

5) Vitesse de ruissellement

On entend par ruissellement, l'écoulement par gravité à la surface du sol, suivant la pente du terrain, et dans le micro-réseau hydrographique, des eaux météoriques qui ont échappé à l'infiltration, à l'évaporation et au stockage superficiel.

Cette vitesse est déterminée par la formule suivante :

$$V_r = \frac{L}{T_c} \quad \text{II.16}$$

L : Longueur du thalweg principal (Km)

T_c : Temps de concentration (h)

▲ Le tableau suivant récapitule les différentes caractéristiques hydromorphométriques de notre zone d'étude.

Tableau II.1 : Caractéristiques hydromorphométriques du bassin versant

| DESIGNATION | | SYMBOLE | UNITES | VALEUR |
|-------------------------------|----------|------------------|--------------------|--------|
| Superficie | | S | km ² | 3615 |
| Périmètre | | P | km | 270 |
| Longueur du thalweg principal | | L | km | 200,00 |
| Indice de compacité | | K _C | | 1,26 |
| Coefficient d'allongement | | K _P | | 20.17 |
| Rectangle équivalent | longueur | L _r | km | 98,20 |
| | largeur | l _r | Km | 37.23 |
| Altitudes | maximale | H _{max} | m | 1810 |
| | moyenne | H _{moy} | m | 710 |
| | médiane | H _{med} | m | 802 |
| | minimale | H _{min} | m | 90 |
| Indice de pente de Roche | | I _P | m/Km | 0,11 |
| Indice de pente globale | | I _g | m/Km | - |
| Indice de pente moyenne | | I _m | m/Km | - |
| Densité de drainage | | D _d | Km/Km ² | 36,00 |
| Coefficient de torrentialité | | C _t | Km ⁻³ | 29,50 |
| Temps de concentration | | T _c | h | 19.47 |
| Vitesse de ruissellement | | V _r | Km/h | 10.27 |

II.5.2. Climat

D'après **Sogetha-Sogreah(1962)**, la région de l'oued Isser est soumise à un climat de l'atlas tellien, présentant des degrés de continentalité qui croît très rapidement en s'éloignant de la mer.

La température moyenne annuelle décroît de 17°C à 10°C par effet orographique. L'amplitude moyenne mensuelle passe de 16°C à 20 °C du Nord au Sud de cette région du fait principalement des minima observés en hiver.

On peut observer des gelées blanches, pendant 1 à 50 jours par an de Novembre en Mars et la neige persiste plus de 20 jours par an sur les cimes au-dessus de 1000 m d'altitude.

II.5.2.1. Température

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 neige et le climat Tellien de plaine plus relativement chaud présentant de forts écarts de température. Le bassin versant de l'oued ISSER est caractérisé par une température relativement humide d'octobre au mois d'Avril et sèche de Mai à Septembre. Le tableau suivant exprime la fourchette (le max et le min) de la température, ainsi que la moyenne.

Tableau II.2 : Répartition mensuelle de la température (A.N.R.H)

| MOIS | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|----------|-----|-----|----|-----|-----|----|----|-----|----|----|----|-----|
| Minimale | 1 | 1 | 3 | 6.5 | 9.5 | 16 | 16 | 17 | 14 | 10 | 5 | 3 |
| Maximale | 8 | 12 | 15 | 20 | 22 | 28 | 30 | 32 | 26 | 24 | 15 | 10 |
| Moyenne | 4.5 | 6.5 | 9 | 13 | 16 | 22 | 23 | 24. | 20 | 17 | 10 | 6.5 |

II.5.2.2. Gelée

La gelée est enregistrée du mois de novembre au mois de mai, le nombre moyen de jour par mois en enregistré aux stations de Djebahia et Souagui donné dans le tableau II.3 ci-dessus ;

TableauII.3 : Nombre de jours de Gelée aux stations de Djebahia et Souagui
(A.N.R.H)

| Station | Altitude (m) | sept | Oct | Nov | Jan | Fév | Mars | Avril | Mai | Juin | Juil | Août | Total annual |
|----------|-----------------|------|-----|-----|-----|-----|------|-------|-----|------|------|------|-----------------|
| Djebahia | 320 | 0 | 0 | 1 | 5 | 6 | 3 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 19 |
| Souagui | 810 | 0 | 0 | 3 | 11 | 11 | 8 | 5 | 4 | 1 | 0 | 0 | 13 |

II.5.2.3. Vents

Les vents chargés d'humidité sont de direction Nord-Sud à Nord-Ouest sud- Est alors que les vents desséchants ont de direction Sud –Nord. Le sirocco souffle sur tout le bassin, le nombre moyen de jour de sirocco par an enregistré sur la station de **Souagui** et **Bsibsa** est donnée par le tableau II.4 :

TableauII.4 : Nombre de jours de sirocco aux stations SOUAGUI et BSIBSA.
(A.N.R.H)

| Station | Altitude (m) | sept | Oct | Nov | Jan | Fév | Mars | Avril | Mai | Juin | Juil | Aout | Total annual |
|---------|-----------------|------|-----|-----|-----|-----|------|-------|-----|------|------|------|-----------------|
| Souagui | 810 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 5 | 6 | 8 | 25 |
| Bsibsa | 820 | 3 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 5 | 4 | 18 |

II.5.3. Hydrographie du bassin versant

II.5.3.1. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Le réseau hydrographique est l'une des plus importantes caractéristiques d'un bassin versant.

Le réseau hydrographique peut prendre une multitude de formes. La différenciation du réseau hydrographique d'un bassin est due à quatre facteurs principaux, que sont:

1. Géologie

Qui de par sa plus ou moins grande sensibilité à l'érosion, la nature du substratum influence la forme du réseau hydrographique. La structure de la roche, sa forme, ses failles, ses plissements, forcent le courant à changer de direction.

2. Climat

Le réseau hydrographique est dense dans les régions montagneuses très humides et tend à disparaître dans les régions désertiques.

3. Pente du terrain

Elle détermine si les cours d'eau sont en phase érosive ou sédimentaire.

Dans les zones plus élevées, les cours d'eau participent souvent à l'érosion de la roche sur laquelle ils s'écoulent. Au contraire, en plaine, les cours d'eau s'écoulent sur un lit où la sédimentation prédomine.

4. Présence humaine

Le drainage des terres agricoles, la construction de barrages, l'endiguement, la protection des berges et la correction des cours d'eau modifient continuellement le tracé originel du réseau hydrographique.

II.5.3.2. Répartition de réseau hydrographique

Le sous bassin de Lakhdaria (Moyen Isser) est drainé par les Oueds :

DJEMAA à l'est.

BOU-HAMMOUD à l'ouest.

ISSER au milieu.

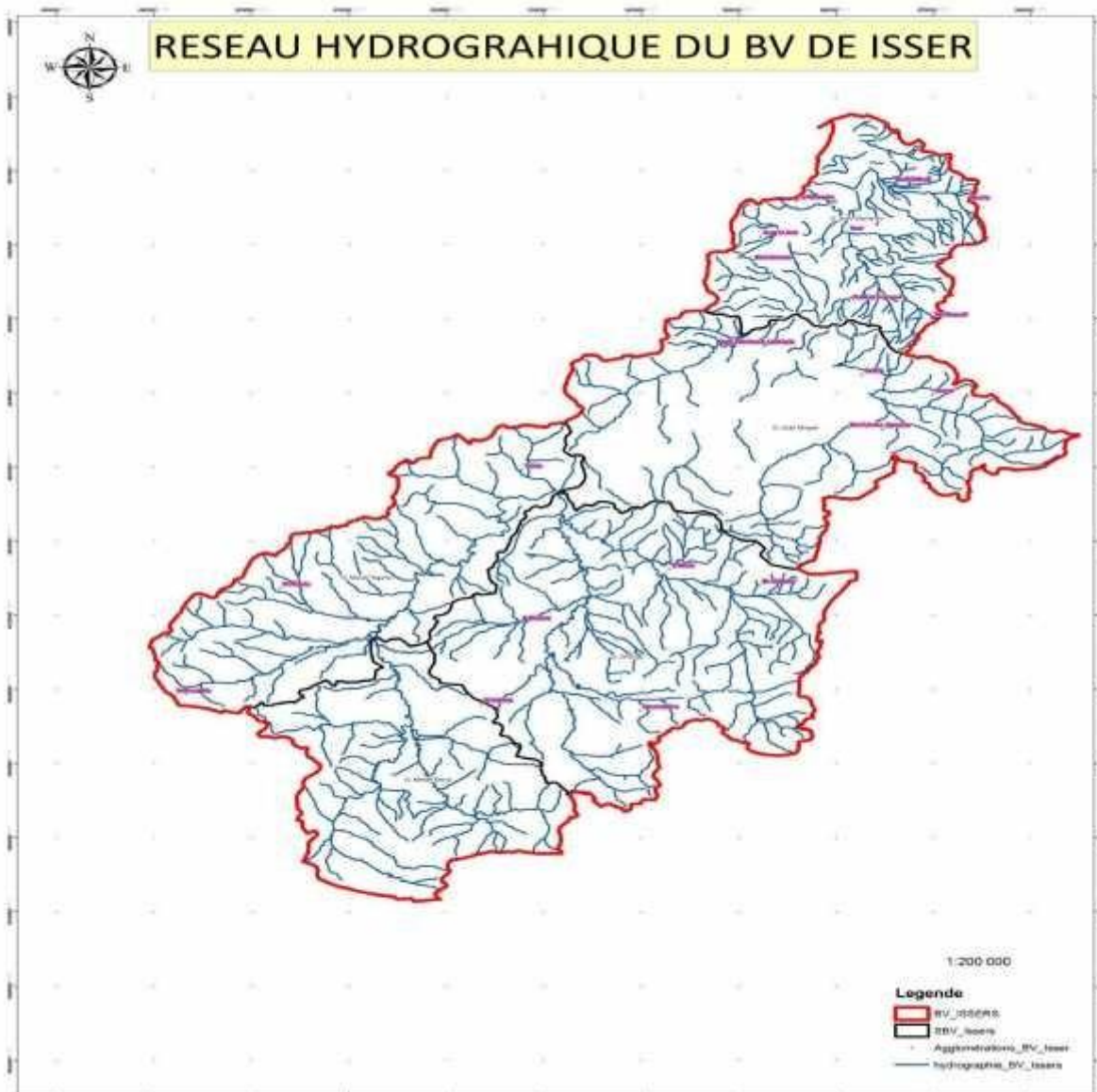


Figure II.6 : Réseau Hydrographique du BV d'Isser et compris le sous bassin de lakhdaria

II.6. Végétation

Les cultures annuelles occupent la quasi-totalité des terres agricoles de moyen ISSER (sous bassin de lakhdaria), Les plaines, tout en long d'oued ISSER sont couvertes des cultures maraîchères et d'arboricultures fruitières. Les collines sont occupées par la céréaliculture et l'arboriculture.

On note que le moyen ISSER manque d'un couvert végétal forestier dense, seuls subsistes les forêts au sud du bassin, mais souvent dégradées.

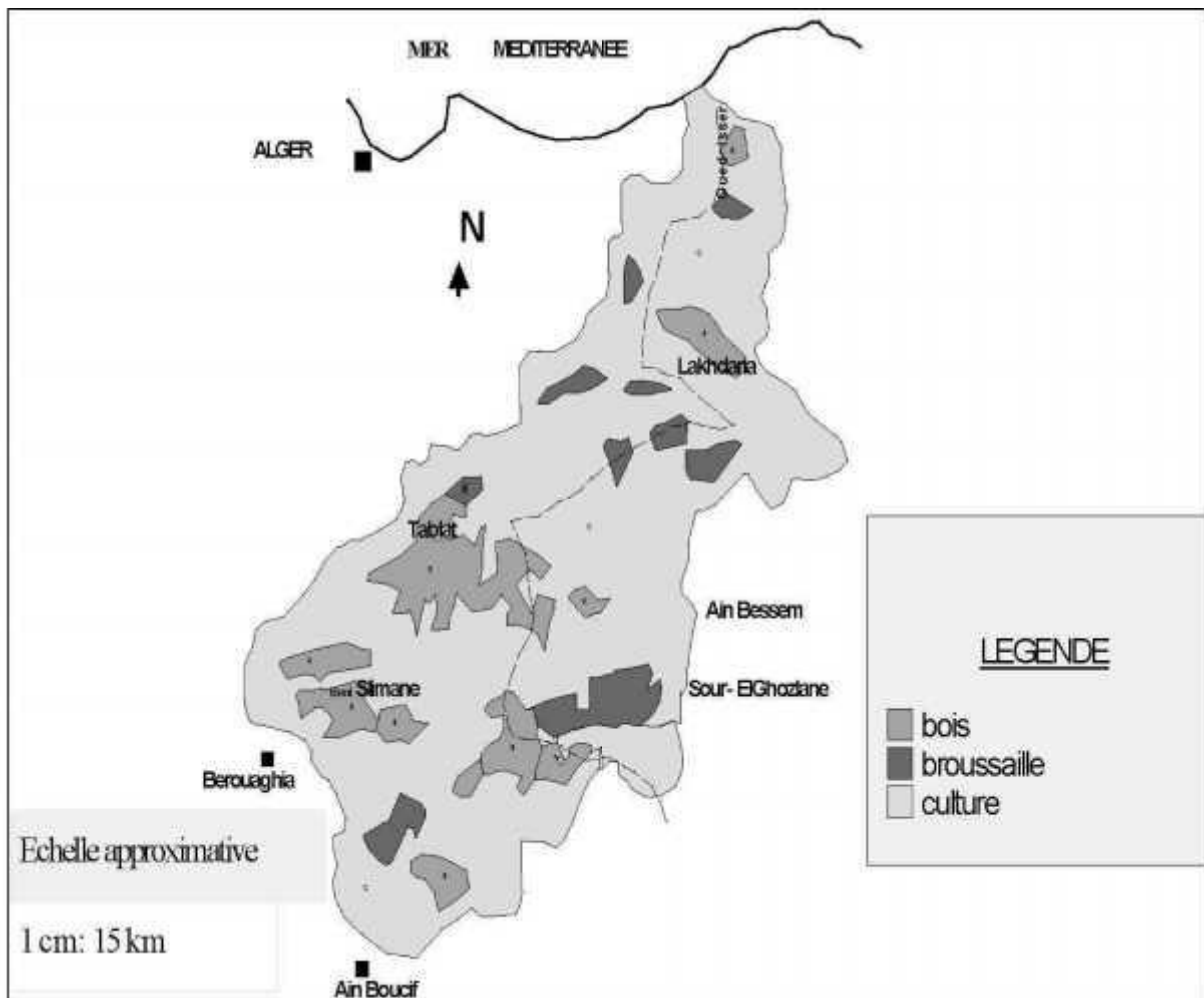


Figure II.7 : Carte schématique de végétation du bassin versant de l'Oued Isser

II.7. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de déterminer les données nécessaires concernant la zone d'étude du point de vue géographique, topographie, géologie, hydrologique, climatologique ainsi que la situation végétal. Ces données nous serviront pour entamer notre étude du projet.

Chapitre III :

Etude des paramètres hydrologique

III.1. Introduction

Ce chapitre décrit les démarches qui ont permis de donner un aperçu général sur l'aspect hydrologique de notre zone d'étude d'étudier. Les alternances pluviométriques et des écoulements ont été analysées en s'appuyant sur les données annuelles et mensuelles des précipitations et débits des stations pluviométriques et hydrométriques représentatives qui possèdent de longues séries de mesures.

III.2. Collecte des données, choix des stations, comblement des lacunes et homogénéisation des données climatiques

Les données traitées sont les totaux annuels et mensuels des précipitations obtenues auprès de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) et de l'Office National de la Météorologie (ONM).

Les données recueillies sont entachées d'erreurs, cette constatation impose une critique de ces données. Les lacunes dans les séries de précipitations mensuelles ont dû être comblées afin de les homogénéiser au mieux et de faciliter ensuite la détection d'éventuelles une station narités.

La méthode de comblement proposée par Laborde (2000), qui permet de combler rapidement et simplement les lacunes avec la partie la plus fiable des données disponibles a été utilisée dans notre étude. De manière succincte, cette méthode consiste à évaluer les valeurs manquantes d'un tableau de données à partir d'Analyses en Composantes Principales (ACP) effectuées de manière itérative sur celui-ci. Le logiciel HYDROLAB (Laborde et Mouhous, 1998) permet d'implémenter cette méthode de comblement des lacunes et de suivre l'évolution des estimations des valeurs manquantes en fonction du nombre d'itérations effectuées.

III.3. Précipitations

III.3.1. Données disponibles

Pour notre zone d'étude, on a plusieurs stations pluviométriques disponibles puis que le réseau pluviométrique du bassin versant de l'oued Isser comporte 21 stations pluviométriques. Seules 17 stations sont prises en considération. Leur identification et donnée dans le tableau III.1.

Tableau III.1: Identification des stations pluviométriques existant dans le bassin versant d'Isser

| N° | Station | Code | X | Y | Z | Equipement |
|----|--------------------|--------|--------|--------|-----|------------|
| 1 | Khemisti | 011004 | 233.50 | 263.45 | 935 | PV |
| 2 | Souk El Djemâa | 050103 | 576.90 | 304.15 | 830 | PV+PG |
| 3 | Djouab | 090301 | 566.95 | 315.55 | 825 | PV |
| 4 | El Omaria | 090201 | 530.20 | 329.20 | 790 | PV+PG |
| 5 | El Omaria Pep | 090205 | 533.05 | 327.45 | 659 | PV |
| 6 | Dechmya | 090314 | 578.50 | 316.35 | 850 | PV+PG |
| 7 | Khabouzia | 090401 | 579.15 | 334.35 | 720 | PV |
| 8 | Mahtere | 090202 | 542.85 | 342.50 | 875 | PV+PG |
| 9 | Tablat Drs | 090203 | 554.75 | 345.80 | 450 | PV |
| 10 | Ouled Touati | 090413 | 576.65 | 347.50 | 831 | PV |
| 11 | Souk El khemis | 090402 | 584.00 | 343.40 | 782 | PV |
| 12 | Djebahia | 090409 | 599.20 | 389.35 | 410 | PV |
| 13 | Tizi Ghenif | 090506 | 596.30 | 366.10 | 415 | PV+PG |
| 14 | Chabet El Amour | 090512 | 588.85 | 371.40 | 260 | PV+PG |
| 15 | Ouled Bouhaddada | 090503 | 574.55 | 372.30 | 425 | PV |
| 16 | B Menaiel Pepin | 090510 | 591.00 | 390.25 | 27 | PV |
| 17 | Souagui | 090104 | 548.95 | 312.4 | 810 | PV |
| 18 | Bsibsa | 090419 | 570.25 | 354.5 | 820 | PV |
| 19 | Pont de la trailla | 090304 | 559.15 | 343.00 | 370 | PV+PG |

Avec :

PV : Pluviométrie

PG : Pluviographe

III.3.2. le choix des données

Pour le choix, on prend les données des stations appartenant au sous bassin N°04 (LAKHDARIA) ; on plus on prend les séries des données fiables et les lacunes moins. Dans le Tableau ci-après, on représente les stations utilisées dans notre cadre d'étude.

Tableau III.2: les stations pluviométriques utilisées dans notre cadre d'étude

| N° | Station | Code | X | Y | Z | Equipement |
|----|----------------|--------|--------|--------|-----|------------|
| 1 | Khabouzia | 090401 | 579.15 | 334.35 | 720 | PV |
| 2 | Souk El khemis | 090402 | 584.00 | 343.40 | 782 | PV |
| 3 | Djebahia | 090409 | 599.20 | 389.35 | 320 | PV |
| 4 | Souagui | 090104 | 548.95 | 312.4 | 810 | PV |
| 5 | Bsibsa | 090419 | 570.25 | 354.5 | 820 | PV |

III.3.3. Répartition de la pluie moyenne

Le tableau (III.3) reproduit les valeurs des pluies moyennes mensuelles pour notre durée d'étude qui est entre (1978/79-2000/01). C'est une série de vingt-trois (23) ans, ainsi que leur répartition dans l'année.

Les données de pluie max journalier pour les cinq stations (moyenne) sont regroupés dans l'ANEXE N°1.

Tableau III.3 : Distribution moyenne mensuelle des pluies des cinq(05) stations pluviométriques

| Mois | Sep | oct | nov | Déc | jan | fév | mar | avr | mai | juin | juil | Août | Pan (mm) |
|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|----------|
| Moy | 26.9 | 41.39 | 52.43 | 76.12 | 67.56 | 55.09 | 49.57 | 47.84 | 36.72 | 8.07 | 4.47 | 7.52 | 473.69 |
| % | 5.68 | 8.74 | 11.07 | 16.07 | 14.26 | 11.63 | 10.46 | 10.10 | 7.75 | 1.70 | 0.94 | 1.59 | 100.00 |

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

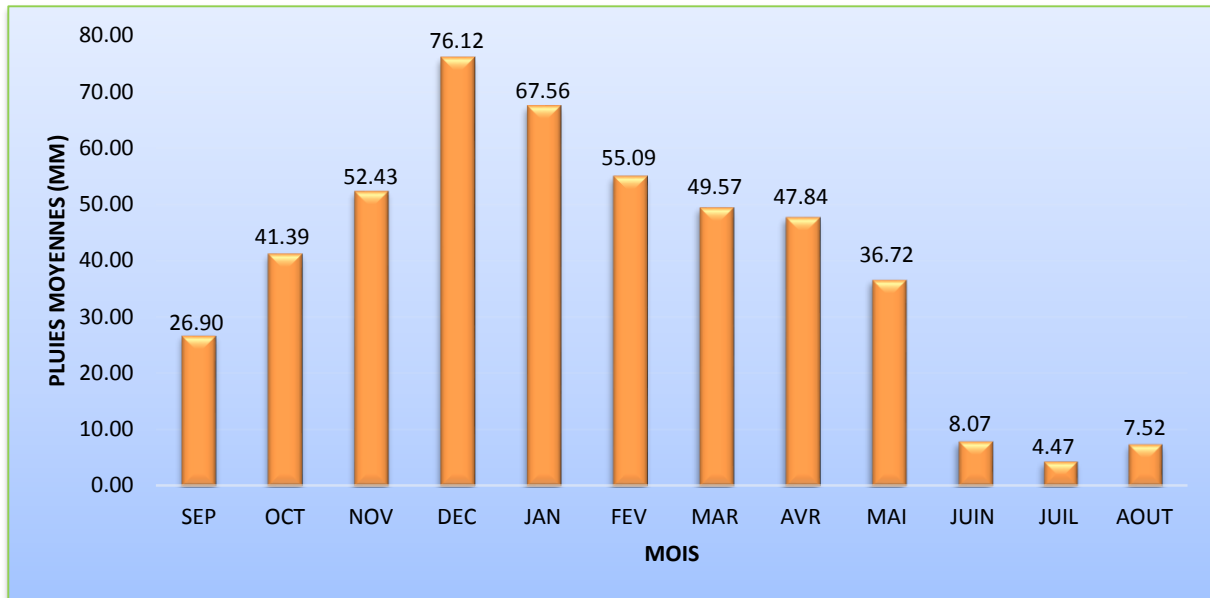


Figure III.1 : Répartition moyenne mensuelle de la pluie

III.3.4. Ajustement des pluies

Comme il existe plusieurs méthodes d'ajustement des séries pluviométrique, l'efficacité d'une méthode d'estimation dépend de la loi de probabilité, de la taille de l'échantillon et de certaines caractéristiques de l'échantillon. Toutefois, de nombreuses études comparatives, autant empiriques que théoriques, ont été menées afin de déterminer dans quelles circonstances une méthode d'estimation est la plus efficace pour une loi donnée.

Dans notre étude on va utiliser les deux lois suivantes :

- 1) la loi de GALTON (log-normal2).
- 2) la loi de GEV

III.3.4.1. Ajustement de la série pluviométrique à la loi de GALTON (log-normale)

Le procédé d'ajustement est identique à celui établi pour la loi de Gumbel, seul la représentation graphique change ou elle est faite sur du papier log-normale, comme le montre la figure III.7.

La loi de GALTON a une fonction de répartition qui s'exprime selon la formule suivante :

$$F(X) = \frac{1}{\sqrt{2\Pi}} \int_u^{+\infty} e^{-\frac{1}{2}u^2} du \quad \text{III. 1}$$

$$\text{Ou : } u = \frac{X_i - \bar{x}}{\sigma_x} \quad (\text{variable réduite de GAUSS})$$

L'équation de la droite de GALTON est la suivante :

$$\text{Log } x(p \%) = \overline{\text{Log } x} + \square \text{Log } u(p \%) \quad \text{Log } X = \frac{\sum_{i=1}^{433} \text{Log } X_i}{N} \quad \text{III.2}$$

Les résultats de l'ajustement par la loi de Log- Normal « Galton » sont résumées dans le tableau III.2. Le tracé des droites est représenté sur papier log-normal comme le Figure III.2.

Tableau III.4 : Résultat de l'ajustement à la loi de Galton

| Période de retour | fréquence | Valeurs théoriques | écart type | Intervalle de confiance |
|-------------------|-----------|--------------------|------------|-------------------------|
| T (ans) | Q | XT | δ | 95(%) |
| 10000 | 0.9999 | 465 | 37.3 | 391 - 538 |
| 2000 | 0.9995 | 417 | 30.2 | 358 - 476 |
| 1000 | 0.9990 | 397 | 27.2 | 344 - 450 |
| 200 | 0.9950 | 349 | 20.7 | 308 - 389 |
| 100 | 0.9900 | 328 | 18.0 | 292 - 363 |
| 50 | 0.9800 | 306 | 15.4 | 276 - 336 |
| 20 | 0.9500 | 276 | 12.1 | 253 - 300 |

III.3.4.2. Ajustement par la loi GEV (distribution des valeurs extrêmes généralisées)

La distribution des valeurs extrêmes généralisées est la synthèse de trois fonctions de distribution que l'on a souvent employées en hydrologie, cette distribution à trois paramètres et la fonction de distribution de la loi de GEV s'écrit :

$$F_x(x) = \exp \left\{ -1 \left[1 - \frac{k(x-\varepsilon)}{\alpha} \right]^{1/k} \right\} \quad \text{III.3}$$

Tableau III.5 : Résultats d'ajustement à la loi de GEV

| Période de retour | fréquence | Valeurs théoriques | écart type | Intervalle de confiance |
|-------------------|-----------|--------------------|------------|-------------------------|
| T (ans) | Q | XT | δ | 95(%) |
| 10000 | 0.9999 | 258 | 174 | N/D |
| 2000 | 0.9995 | 180 | 92.1 | N/D |
| 1000 | 0.9990 | 154 | 68.5 | N/D |
| 200 | 0.9950 | 107 | 32.0 | N/D |
| 100 | 0.9900 | 90.6 | 22.2 | N/D |
| 50 | 0.9800 | 76.8 | 14.8 | 47.7 - 106 |
| 20 | 0.9500 | 61.3 | 8.25 | 45.1 - 77.5 |

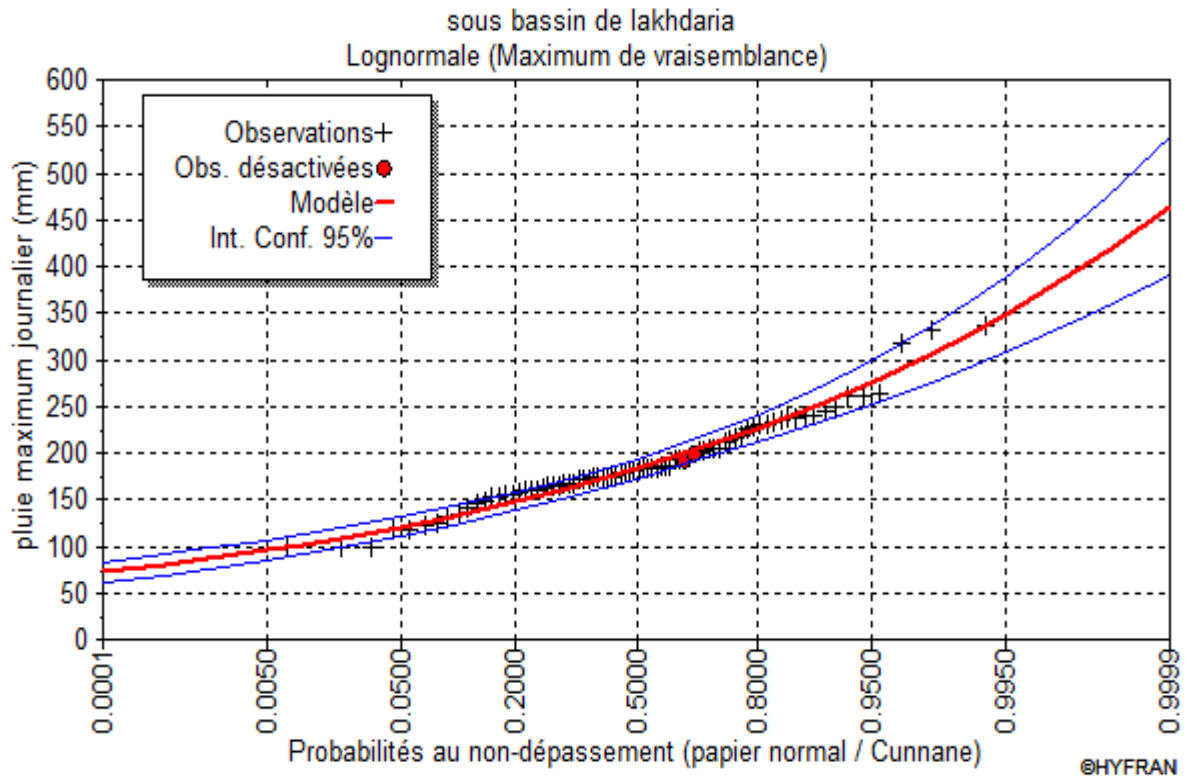


Figure III.2 : Représentation graphique de l’ajustement à loi de Galton

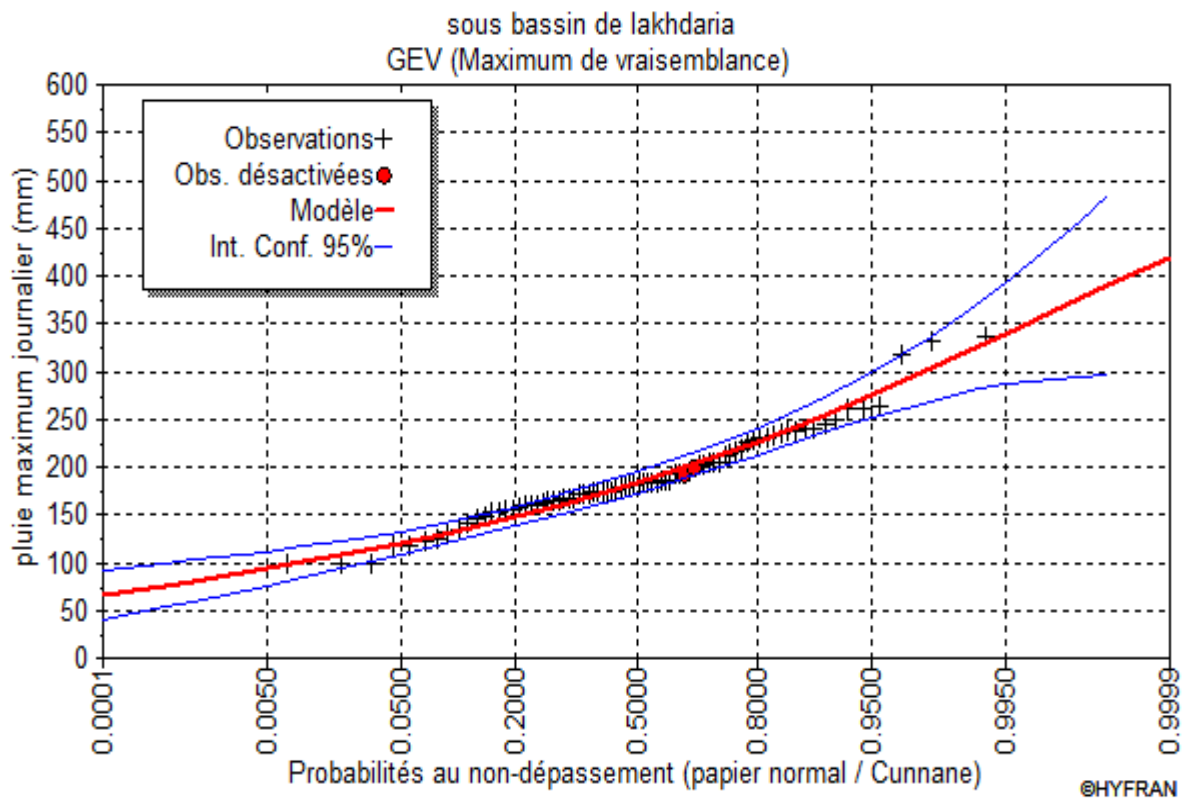


Figure.III.3 : Représentation graphique de l’ajustement à la loi de GEV

III.4. Débits

III.4.1. Données disponibles

- Dans le bassin versant de l'oued Isser sont installées six (06) stations hydrométriques.
- De l'aval vers l'amont, nous avons :

Lakhdaria, Gare Aomar, Mezahim, Béni Slimane, la traille et Dechmia.

- Sur la cour d'eau principale, on trouve trois (03) stations hydrométriques que l'on peut utiliser.

Le tableau suivant regroupe les trois (03) stations hydrométriques existant et leurs caractéristiques :

Tableau III.6: Identification des stations hydrométrique existant sur la cour d'eau principale du bassin versant d'Isser

| N | Station | Code | X | Y | Z | Equipement |
|---|------------|--------|--------|--------|-----|------------|
| 1 | LAKHDARIA | 090501 | 579.10 | 369.75 | 710 | PV |
| 2 | MEZAHIM | 090101 | 584.00 | 343.40 | 782 | PV |
| 3 | LA TRAILLE | 090408 | 559.15 | 343.00 | 370 | PV |

III.4.2. Choix des données

Pour notre choix, on prend les données de la station de **LAKHDARIA (090501)**

III.4.3. Répartition de la Débits moyens

Le tableau (III.7) reproduit les valeurs des débits moyens mensuels pour notre durée d'étude qui est entre (1978/79-2000/01). C'est une série de vingt-trois (23) ans, ainsi que leur répartition dans l'année.

Tableau III.7 : Distribution moyenne mensuelle des débits de la station hydrométrique

| Mois | Sep | oct | nov | Déc | jan | fév | mar | avr | mai | juin | juil | Aoû | Qan (m ³ /s) |
|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|----------------------------|
| Moy | 2.03 | 2.82 | 3.11 | 9.85 | 13.08 | 11.83 | 10.69 | 5.53 | 4.54 | 1.09 | 0.50 | 0.32 | 65.38 |
| % | 3.11 | 4.31 | 4.75 | 15.07 | 20.00 | 18.10 | 16.35 | 8.45 | 6.94 | 1.67 | 0.76 | 0.49 | 100.00 |

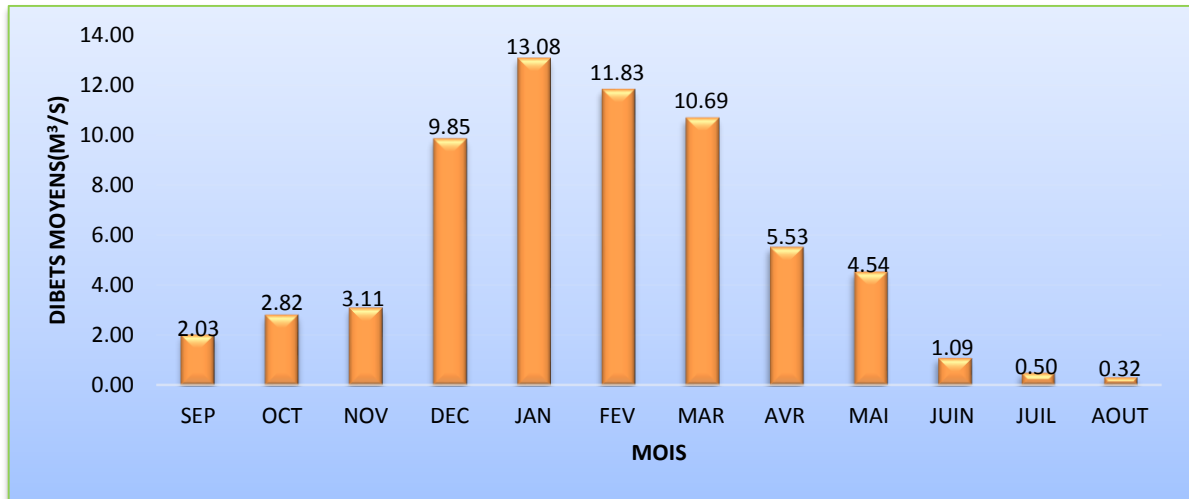


Figure III.4 : Répartition moyenne mensuelle du débit

III.4.4. Ajustement des débits

On opte les deux ajustements précédents qui sont la loi de GALTON et loi de GEV

III.5.4.1. Ajustement de la série des débits à la loi de GALTON (log-normale)

Tableau III.8 : Résultat de l’ajustement à la loi de Galton

| Période de retour | fréquence | Valeurs théoriques | écart type | Intervalle de confiance |
|-------------------|-----------|--------------------|------------|-------------------------|
| T (ans) | Q | XT | δ | 95(%) |
| 10000.0 | 0.9999 | 465 | 37.3 | 391 - 538 |
| 2000.0 | 0.9995 | 417 | 30.2 | 358 - 476 |
| 1000.0 | 0.9990 | 397 | 27.2 | 344 - 450 |
| 200.0 | 0.9950 | 349 | 20.7 | 308 - 389 |
| 100.0 | 0.9900 | 328 | 18.0 | 292 - 363 |
| 50.0 | 0.9800 | 306 | 15.4 | 276 - 336 |
| 20.0 | 0.9500 | 276 | 12.1 | 253 - 300 |

III.5.4.2. Ajustement par la loi GEV (distribution des valeurs extrêmes généralisées)

Tableau III.9 : Résultats d'ajustement à la loi de GEV

| Période de retour | fréquence | Valeurs théoriques | écart type | Intervalle de confiance |
|-------------------|-----------|--------------------|------------|-------------------------|
| T (ans) | Q | XT | δ | 95(%) |
| 10000.0 | 0.9999 | 420 | 64.5 | N/D |
| 2000.0 | 0.9995 | 390 | 48.2 | 296 - 485 |
| 1000.0 | 0.9990 | 376 | 41.4 | 295 - 457 |
| 200.0 | 0.9950 | 339 | 27.2 | 286 - 393 |
| 100.0 | 0.9900 | 322 | 21.8 | 279 - 364 |
| 50.0 | 0.9800 | 303 | 17.0 | 269 - 336 |
| 20.0 | 0.9500 | 275 | 11.9 | 252 - 299 |

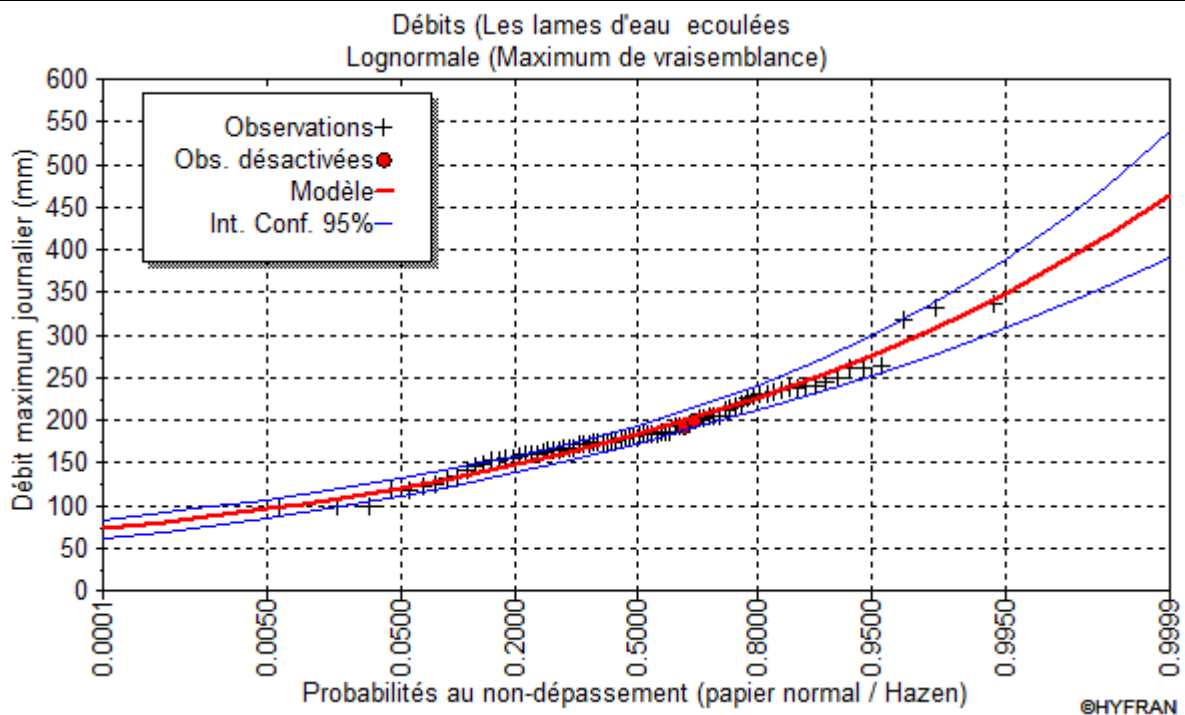


Figure III.5 : Représentation graphique de l'ajustement à loi de Galton

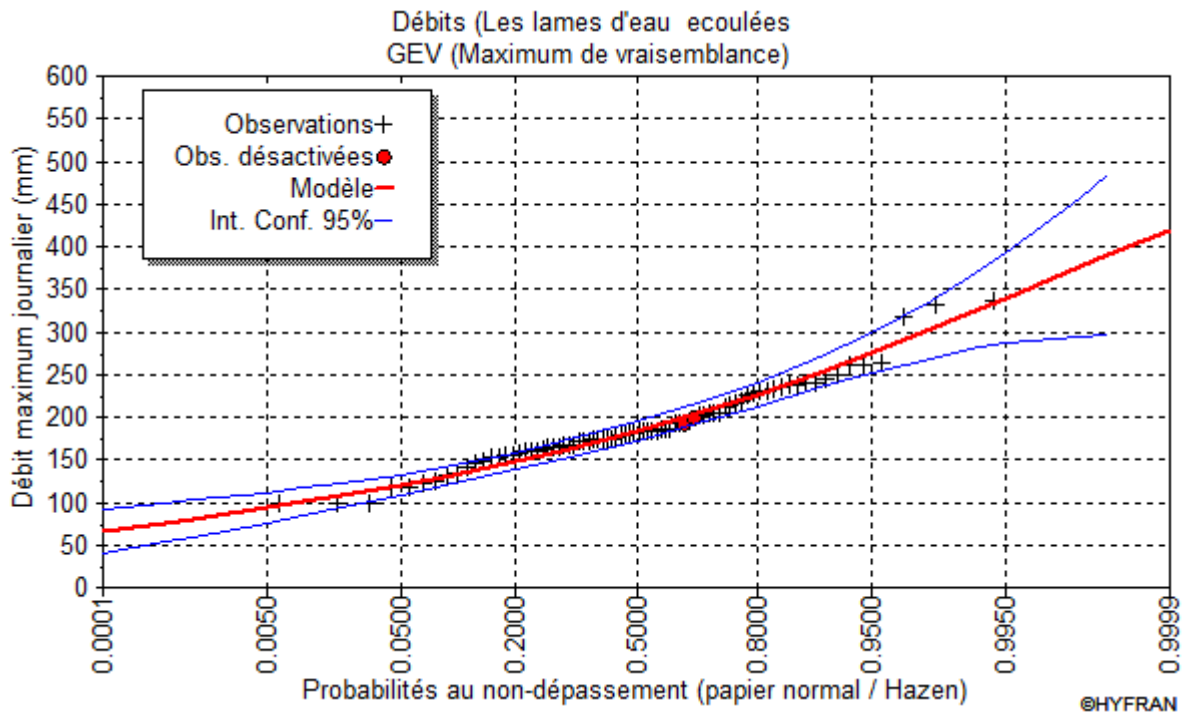


Figure.III.6 : Représentation graphique de l’ajustement à la loi de GEV

III.5. Evapotranspiration

Pour l’évapotranspiration, on a collaboré entre les données de deux stations climatologique (les disponibles) à partir des données fourni par de l’ONM, afin d’avoir de données fiable.

Le tableau suivant représenté l’évapotranspiration moyenne pour tous la durée de l’étude qui est de (23 ans).

Tableau II.10 : Distribution moyenne mensuelle d’ETP (mm) (ONM)

| Mois | Sep | oct | nov | Déc | jan | fév | mar | avr | mai | juin | juil | Août |
|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Moy | 100.89 | 66.66 | 44.68 | 30.05 | 32.49 | 40.28 | 67.55 | 87.40 | 116.06 | 147.71 | 165.84 | 147.95 |

Les données d’évapotranspiration qui sont calculés par la méthode de PENMAN-MONTEITH au niveau de l’ONM a partir des données des stations climatologique convenable a notre zone d’étude sont regroupés dans l’ANEXE N°2.

III.6. Conclusion

L’identification des paramètres hydrologique dans ce chapitre nous a permis de déterminer et d’évaluer les paramètres nécessaires pour l’application de modèle hydrologique (GR2M) qui sont considérés comme données entrantes pour ce modèle.

Chapitre IV :

Application du modèle GR2M

IV.1. Introduction

La modélisation pluie-débit a de nombreuses applications (Michel, 1989) parmi lesquelles on peut citer :

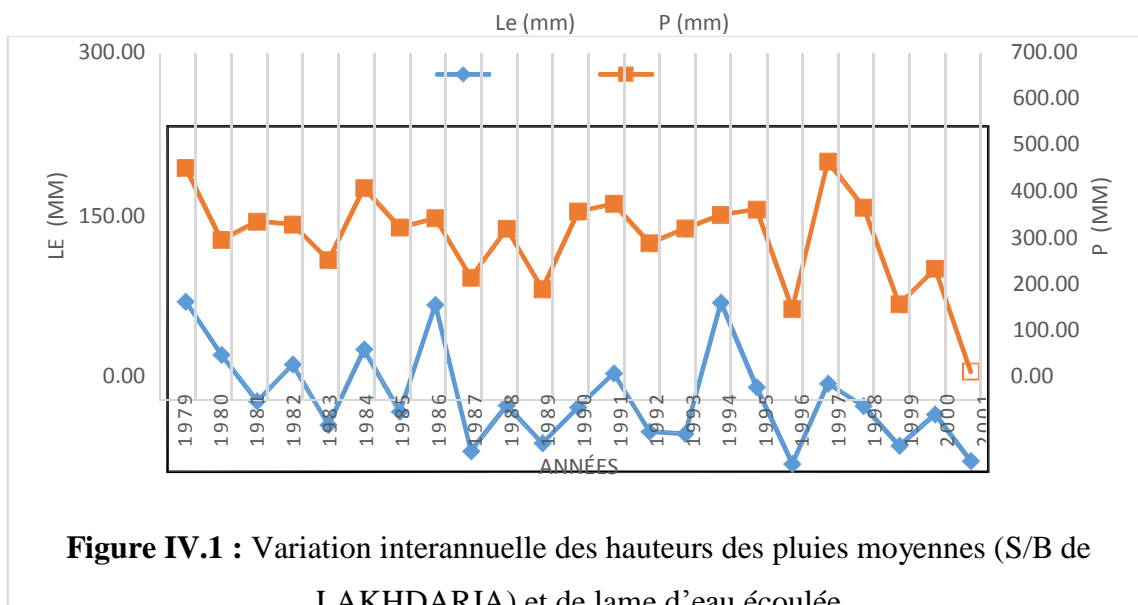
- ❖ Estimation des débits de rivières pour des sites non jaugés ;
- ❖ Dimensionnement des ouvrages d'art (barrages, ponts, déversoirs de sécurité...);
- ❖ Délimitation des zones inondables ;
- ❖ Simulation des débits pour des reconstitutions historiques ;
- ❖ Prévision des crues ;
- ❖ Détection de l'influence des changements d'occupation du sol ;
- ❖ Simulation de l'impact du changement climatique ;
- ❖ Pré-détermination des débits de crue ou d'étiage (fréquence et durée) ;
- ❖ Prévision des étiages.

Devant ces problématiques, l'application de la modélisation en hydrologie est indispensable. Nous essayons donc, dans cette partie du chapitre ; d'appliquer la modélisation par corrélation et le modèle GR2M sur notre bassin d'étude.

IV.2. Modélisation par corrélation (précipitation / lame d'eau écoulée)

IV.2.1. Corrélation annuelle

Pour notre étude, on préfère de faire une corrélation simple entre les précipitations moyennes des stations choisies d'une part, et d'autre part avec les lames d'eau écoulées (débits en mm) en aval du bassin versant avant l'application du modèle du Génie Rural.



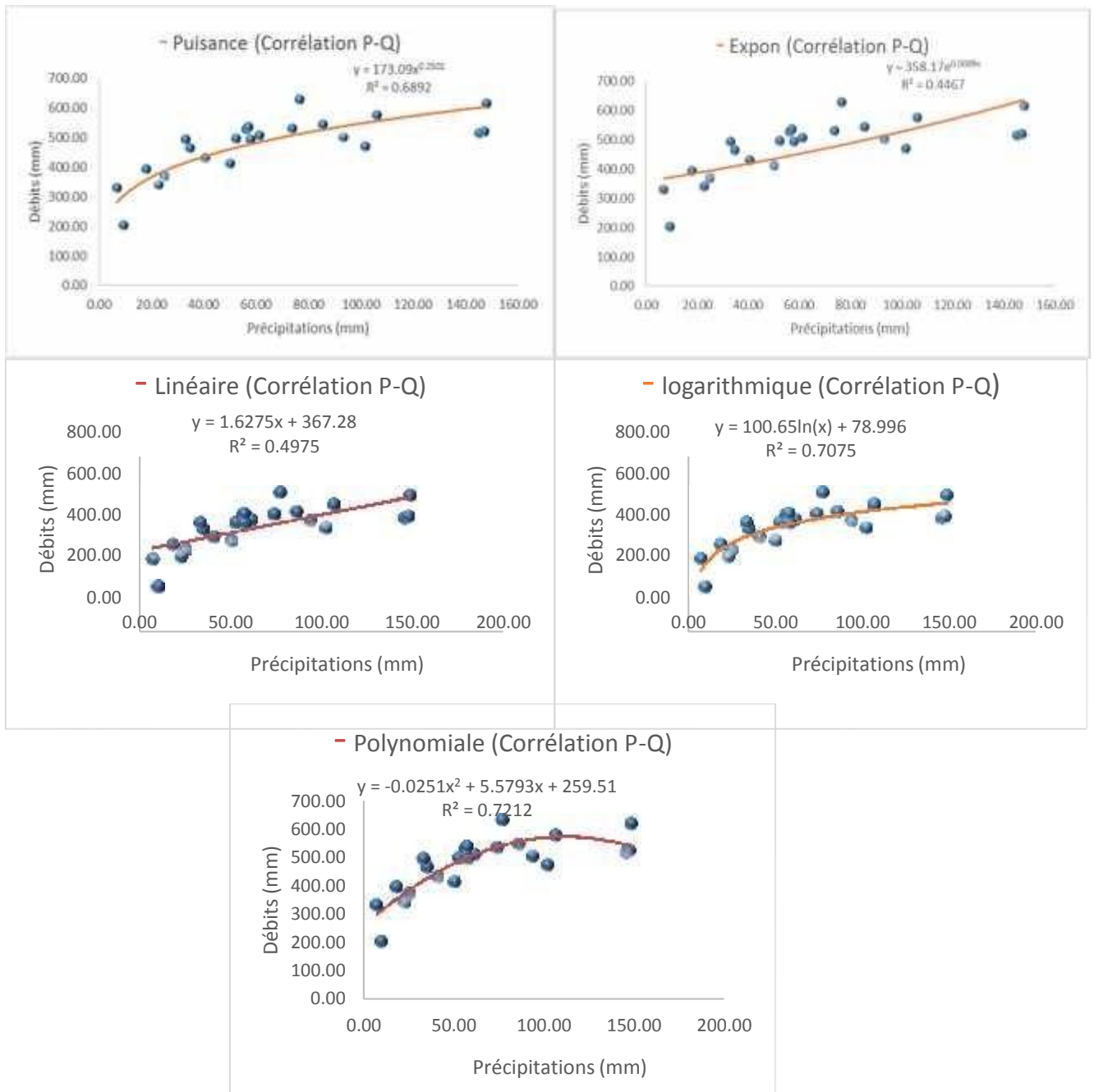


Figure IV.2 : Résultats de corrélations entre les pluies et la lame d'eau écoulee annuelle

La modélisation par corrélation des données annuelles donne des coefficients de corrélation pratiquement satisfaisants notamment Logarithmique, polynomial et puissance.

Le tableau suivant montre les différents résultats du coefficient de détermination et le modèle qui relie les paramètres pluies – débits.

Tableau IV.1. Résultats des différentes corrélations entre les deux paramètres pluie et la lame d'eau écoulée annuelle

| STATION | Linéaire | exponentielle | Logarithmique | polynomial | puissance |
|---------|--|---|---|---|--|
| P-Q | $y = 1.6275x + 367.28$ $R^2 = 0.4975$ | $y = 358.17e^{0.0039x}$ $R^2 = 0.4467$ | $y = 100.65\ln(x) + 78.996$ $R^2 = 0.7075$ | $y = -0.0251x^2 + 5.5793x + 259.51$ $R^2 = 0.7212$ | $y = 173.09x^{0.2502}$ $R^2 = 0.6892$ |

IV.2.2. Corrélation mensuelle

On utilise la moyenne des données de chaque mois pour toute la durée de notre série qui est de septembre 1978 jusqu'à août 2001 pour les cinq stations pluviométrique et la station hydrométrique.

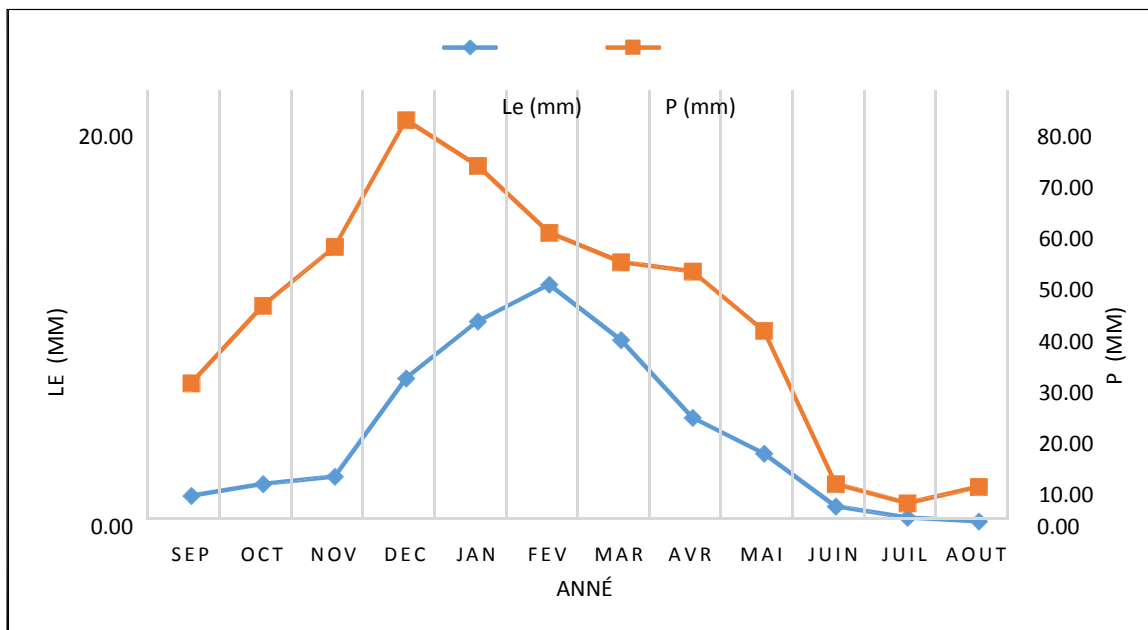


Figure IV.3 : Variation mensuelle des hauteurs des pluies moyennes (S/B de LAKHDARIA) et des lames d'eau écoulées

Le tableau suivant présente les différentes corrélations pluie et lame d'eau écoulée mensuelles (débits en mm). Les résultats obtenus, permettent de constater que la modélisation par corrélation mensuelle donne des coefficients bonne et acceptable, et que les modèles les plus adéquats sont la puissance et l'exponentiel et même puissance.

Tableau IV.2 : Résultats des différentes corrélations entre les deux paramètres pluie et la lame d'eau écoulee mensuelle

| STATION | Linéaire | exponentielle | Logarithmique | polynomial | puissance |
|---------|--|---|---|---|--|
| P-Q | $y = 0.1285x - 0.6808$ $R^2 = 0.6106$ | $y = 0.4077e^{0.0467x}$ $R^2 = 0.7972$ | $y = 2.9095\ln(x) - 5.4309$ $R^2 = 0.5164$ | $y = 1E-04x^2 + 0.1212x - 0.5968$ $R^2 = 0.6108$ | $y = 0.0518x^{1.1578}$ $R^2 = 0.8062$ |

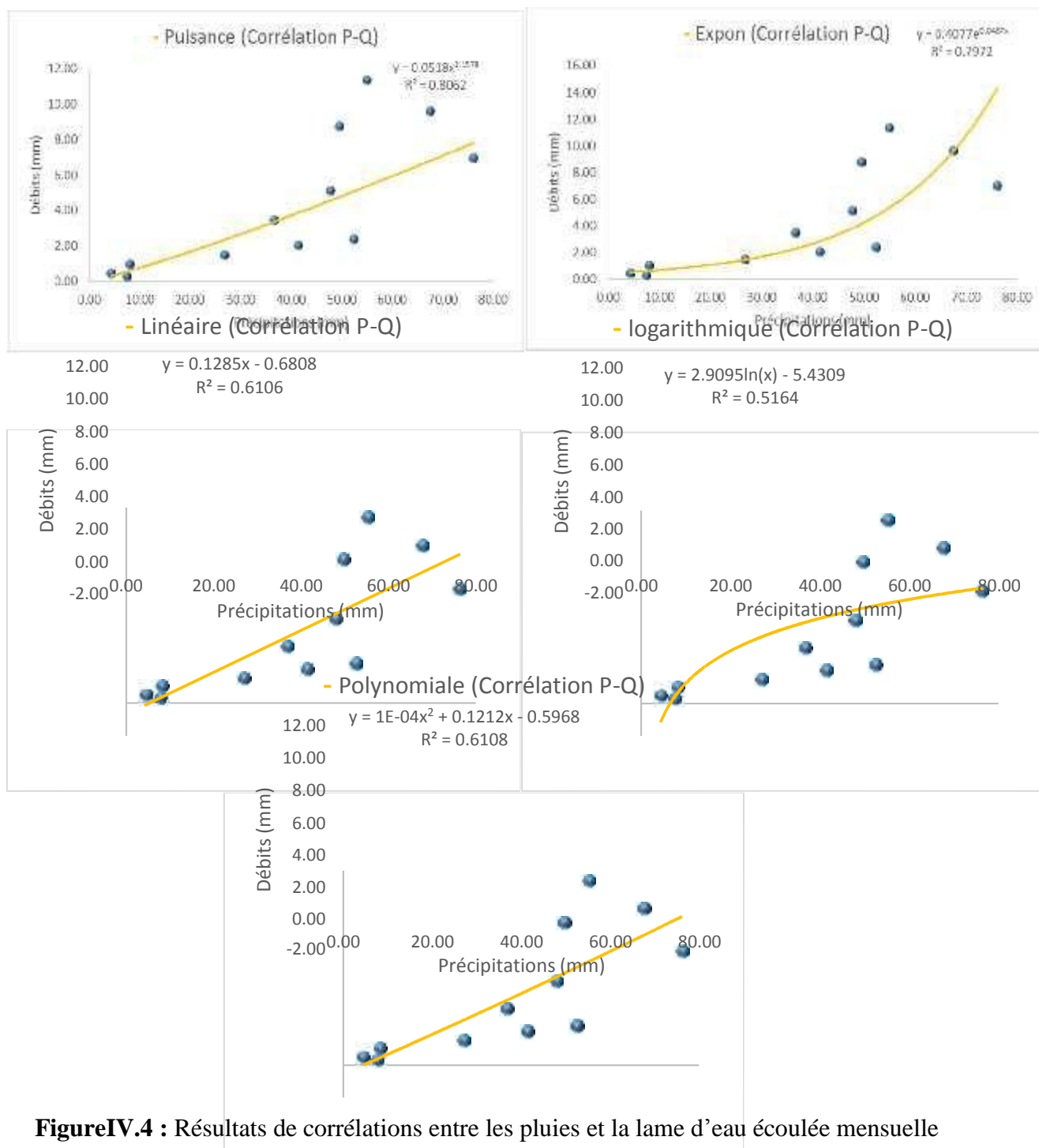


Figure IV.4 : Résultats de corrélations entre les pluies et la lame d'eau écoulee mensuelle

Les modèles corrélatifs donnent des résultats moyennement acceptables puisque La majorité des Coefficients de corrélation calculés sont supérieur à 50%) mais ils restent toujours moins fiable parce qu'ils ne tiennent pas en compte des paramètres qui régissent l'écoulement en particulier la dépendance chronologique des débits successifs avec les pluies de la période k et $k-1$ de même qu'ils ne prennent pas en compte les phénomènes d'échange avec l'atmosphère ou les bassins voisins.

Nous soulignons que les principaux Facteurs qui conditionnent le phénomène sont Les caractéristiques physiques, la taille, la géologie, la structure des bassins, associés à l'intensité et la répartition spatio-temporelle des précipitations.

IV.3. Modélisation par le modèle GR2M

Dans cette étude, pour prédire le débit on utilise à l'entrée du modèle des valeurs de pluies mensuelles observées (mm), des données des ETPobtenues auprès l'Office National de la Météorologie d'Alger (ONM), sont calculées par la méthode de PENMAN-MONTEITH et des débits mensuels (exprimés en lames d'eau écoulées) observés au niveau de la station de Lakhdaria qui se trouve en aval du bassin versant Lakhdaria.

A cause des contraintes rencontrées lors des consultations des données pluviométriques et des débits ; la période choisie pour l'étude est celle allant de 1978 à 2001. La version que nous avons utilisée est la version Excel de Mouelhi et al. (2006b) disponible dans le site du CEMAGREF et qui paraît être la plus performante.

C'est pour ces raisons que nous avons choisi pour la modélisation pluie- débits un modèle à réservoir (GR) qui tient compte aussi bien du pas de temps choisi ainsi que d'autres paramètres d'échange entre le bassin et l'atmosphère d'une part et entre les bassins voisins entre eux d'autre part. En plus les modèles GR n'exigeant que peu de données et peu de paramètres à caler.

IV.3.1. Choix des périodes de calage et de validation

La procédure de calage a consisté de déterminer les paramètres optimisés à partir des différents critères de qualité ; nous avons donc cherché à caler les paramètres X1 et X2 du modèle. En modifiant ces paramètres jusqu'à l'obtention d'un critère de Nash optimum avec une valeur supérieur ou égal à 70% et un coefficient de corrélation acceptable. Nous avons défini des périodes de longueur de deux tiers (2/3) de l'échantillon et sur le tiers (1/3) de l'échantillon de données disponibles de débits de sous- bassin versant. L'ajustement du modèle a été utilisé pour une période de calage puis validé sur l'autre période et inversement.

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau IV.3 et représentés dans les figures IV.5 et IV.6.

Tableau IV.3: Performances en phases de calage et de validation du modèle GR2M au sous-bassin de Lakhdaria.

| Sous bassin | Sous bassin de Lakhdaria | |
|------------------------------|---------------------------------|-----------|
| Période d'observation | 1978-2001 | |
| Période de calage | 1978-1993 | 1993-2001 |
| X1 | 5.38 | 5.25 |
| X2 | 0.68 | 0.65 |
| Nash % (calage) | 78.5 | 89.1 |
| R² (%) | 77 | 81 |
| Bilan | 93.8 | 89.2 |
| Période de validation | 1993-2001 | 1973-1993 |
| Nash Validation | 88.4 | 82.9 |
| R² (%) | 80 | 76 |
| Bilan | 92.1 | 96 |

IV.3.2. Calage du modèle GR2M

D'après les valeurs du critère de Nash et les coefficients de détermination, ainsi que la bonne superposition des courbes des lames d'eaux écoulées simulés et mesurés (Tableau IV.3 et les figures IV5, IV6, IV7 et IV.8), le calage paraît correct pour l'ensemble des deux périodes (1978 à Aout1993 et deSeptembre 1993 à 2001).

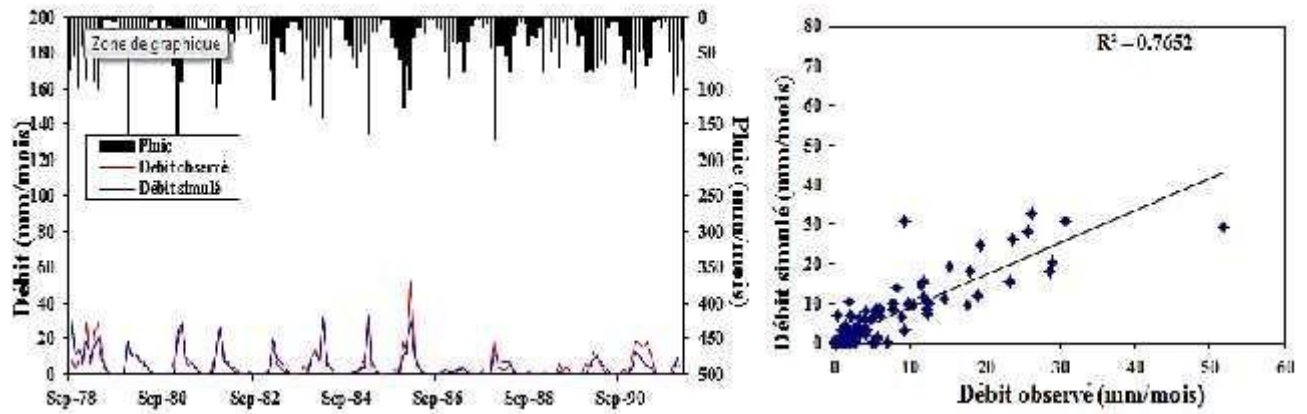


Figure IV.5. Calage du modèle GR2M pour la période 1978 à Aout 1993

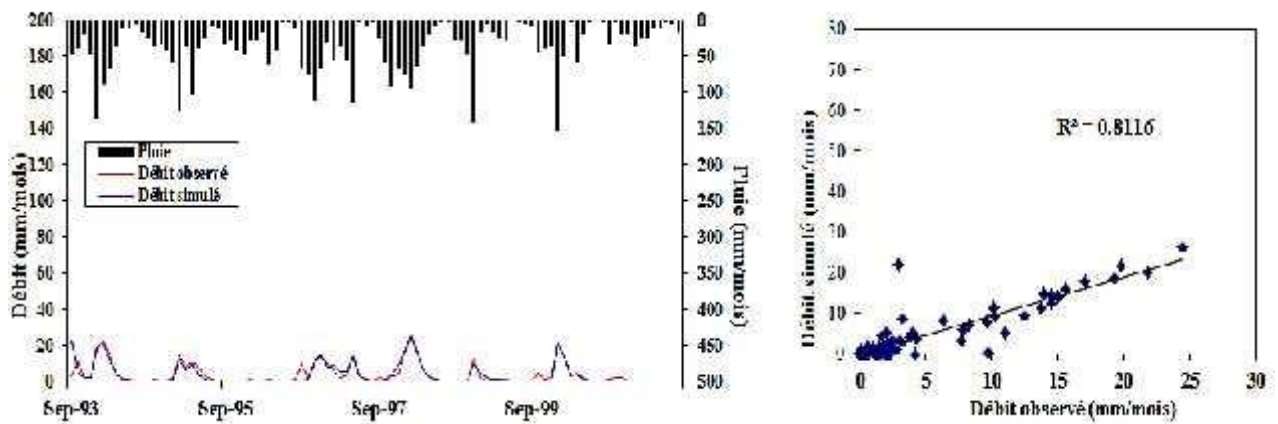


Figure IV.6. Calage du modèle GR2M pour la période Septembre 1993 à 2001

Les valeurs de critère de Nash de calage sont de façon générale bonne pour l'ensemble des deux périodes, la valeur maximum de Nash est de 89.2 % pour la période d'observation de Septembre de 1993 à 2001, avec un coefficient de corrélation R^2 de l'ordre de 81 % pour la même période.

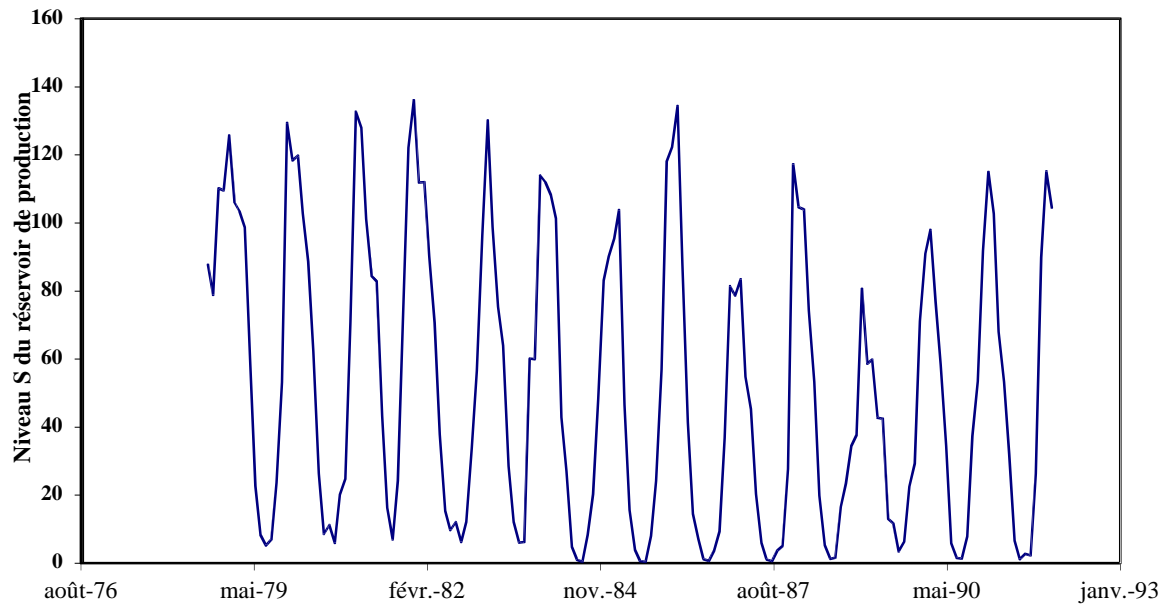


Figure IV.7 : Variation du réservoir de production pour la période de calage 1978 à Aout 1993

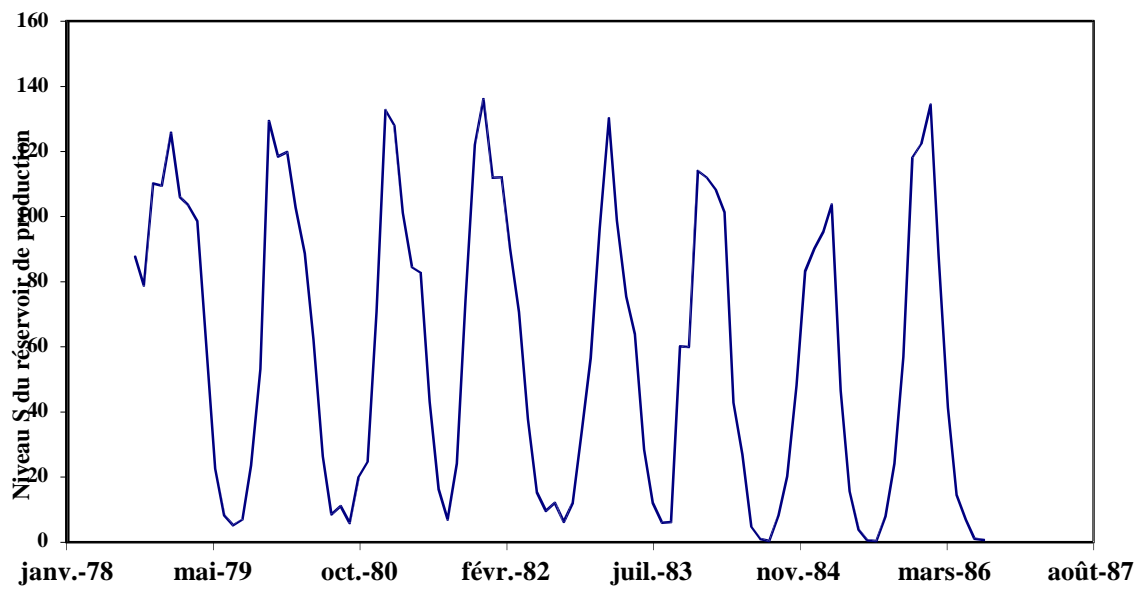


Figure IV.8 : Variation du réservoir de production pour la période de calage Septembre 1993 à 2001

La variation du réservoir de production est très importante (entre 0.35 à 136 mm) pour la période de 1978 à Aout 1993. Elle est aussi importante que la première période de calage, elle varie entre 0.29 à 120.46 mm pour la deuxième période.

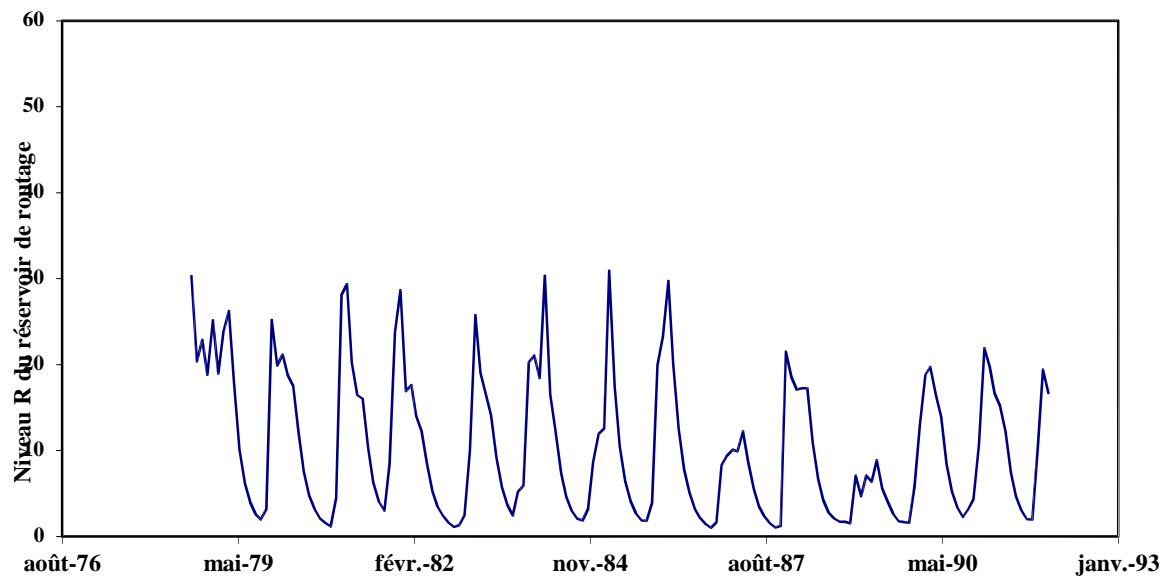


Figure IV.9 : Variation taux de remplissage du réservoir de routage pour la période de calage 1978 à Aout 1993

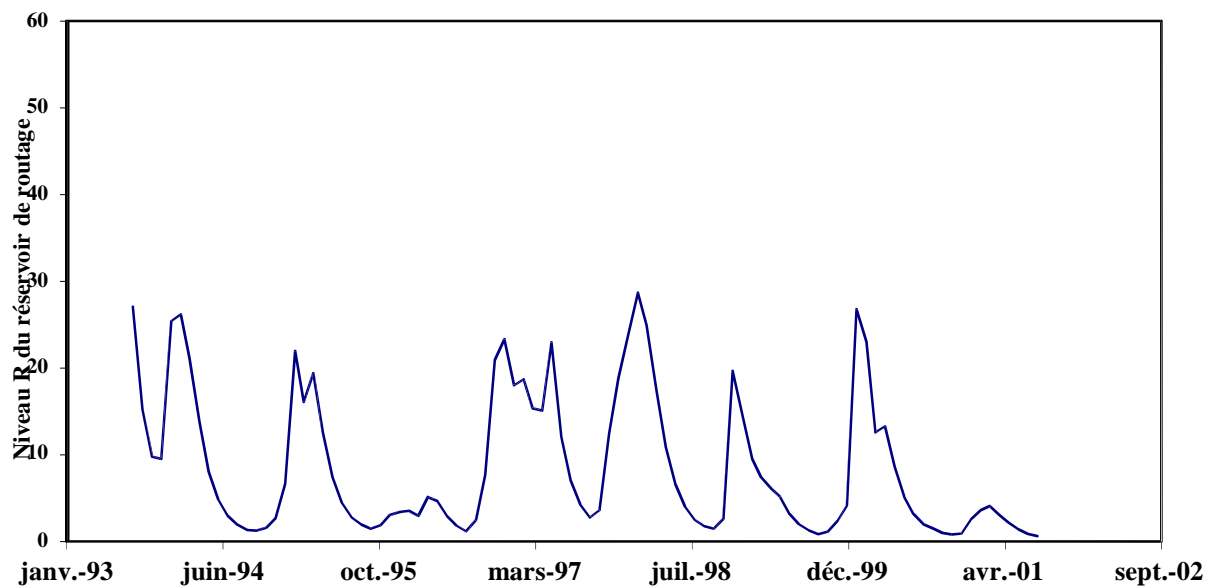


Figure IV.10 : Variation taux de remplissage du réservoir de routage pour la période de calage de Septembre 1993 à 2001

L'évolution du taux de remplissage du réservoir de routage reste assez instable à partir de la fin des années 80, elle comprise entre 1.22 à 30 mm pour la période de 1978 à Septembre 1993. Elle reste assez instable pour toute la période de calage et comprise entre 0.82 à 28.65mm.

IV.3.3. Validation du modèle GR2M

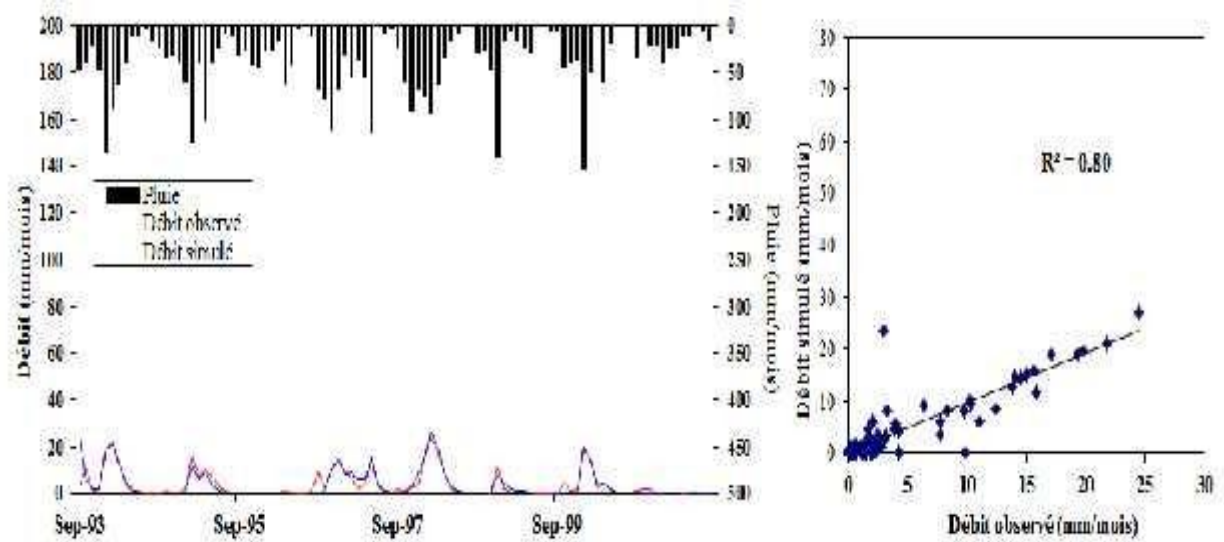


Figure IV.11. Validation du modèle GR2M pour la période Septembre 1993 à 2001

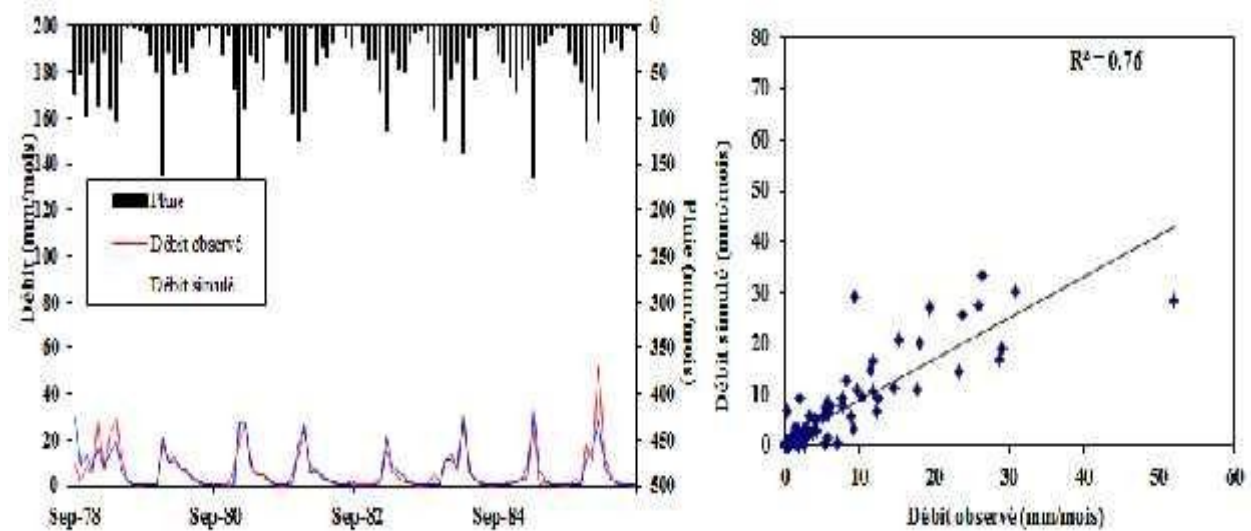


Figure IV.12. Validation du modèle GR2M pour la période de 1978 à Aout 1993

Pour le Nash en validation, on enregistre des résultats similaires pour la même période que calage. Le meilleur Nash a été constaté pour la période de validation de Septembre 1993 à 2001 en enregistrant 88.4 avec un coefficient de corrélation de l'ordre de 80 %.

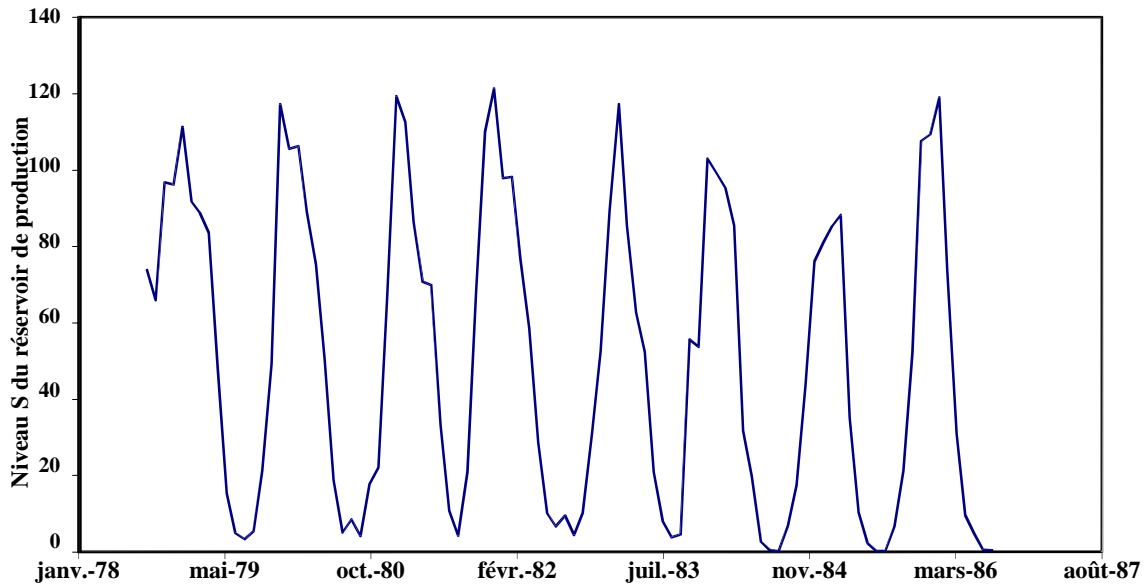


Figure IV.13 : Variation du réservoir de production pour la période de validation de Septembre 1993 à 2001

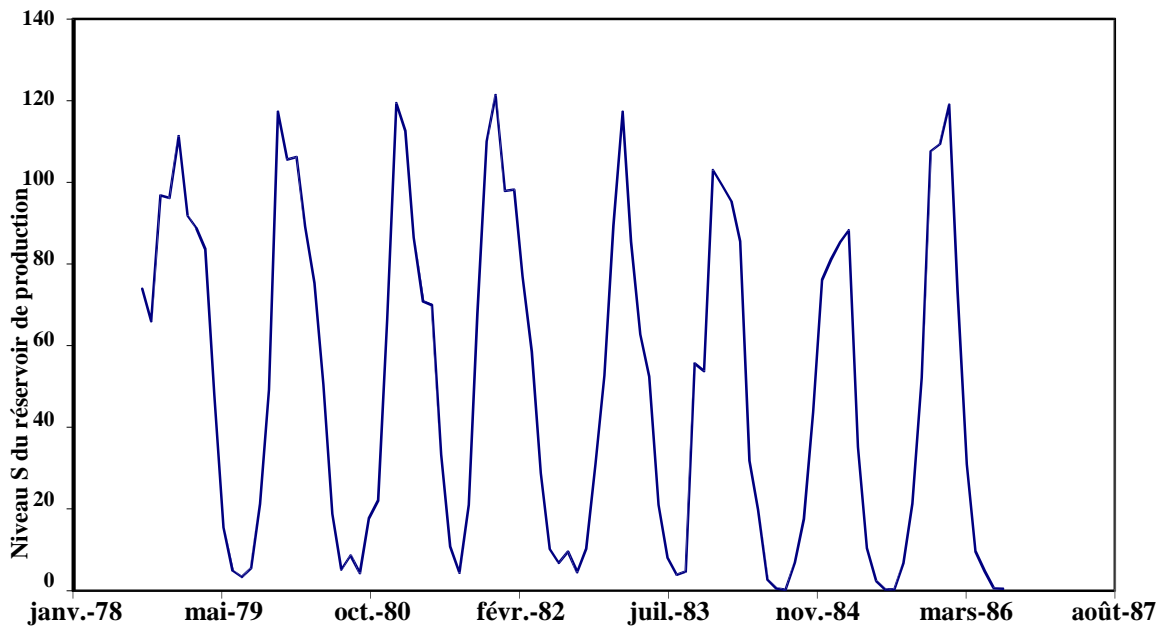


Figure IV.14 : Variation du réservoir de production pour la période de validation 1978 à Aout 1993

La variation du réservoir de production est aussi importante que la première période de calage, elle varie entre 0.29 à 120.46 mm pour la période de Septembre 1993 à 2001 et varie entre 0.26 à 121.32 mm pour la première période.

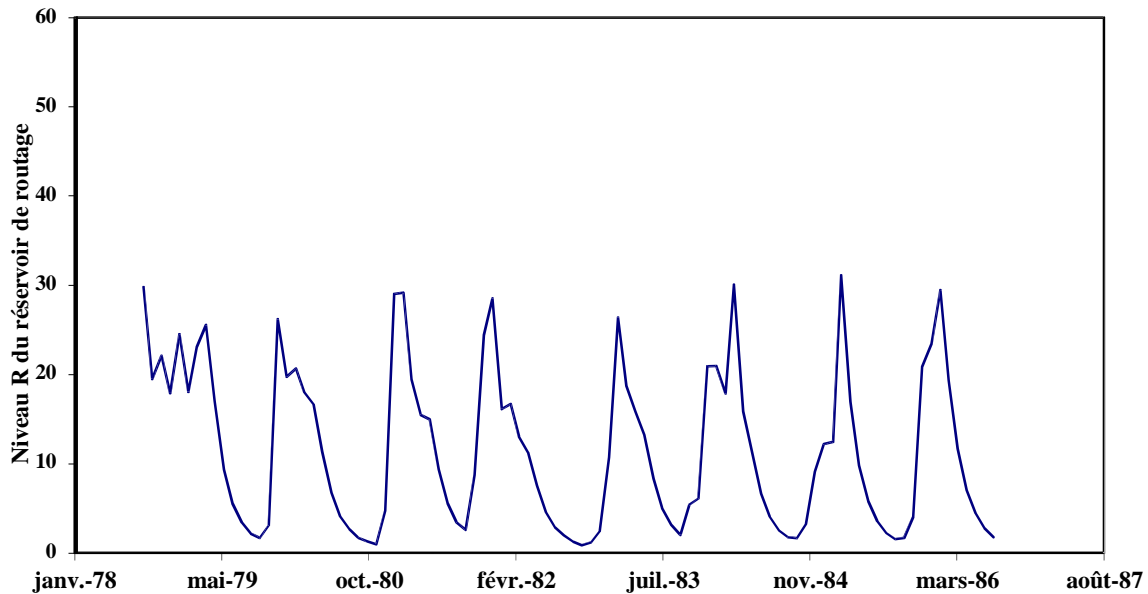


Figure IV.15 : Variation taux de remplissage du réservoir de routage pour la période de validation Septembre 1993 à 2001

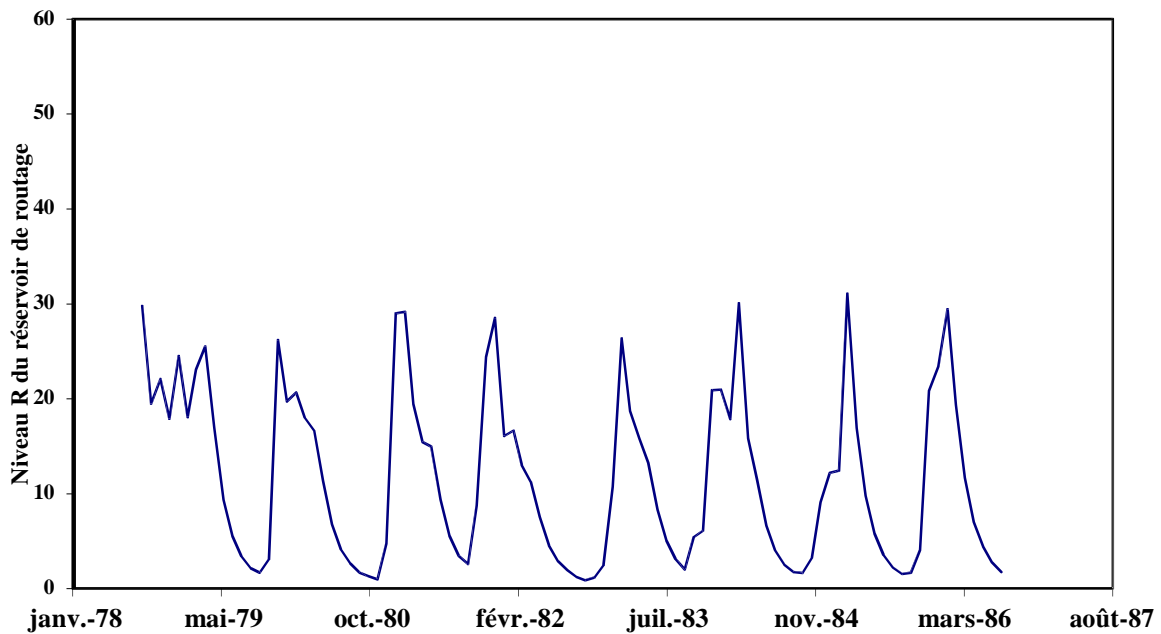


Figure IV.16 : Variation taux de remplissage du réservoir de routage pour la période de validation 1978 à Aout 1993

L'évolution du taux de remplissage du réservoir de routage reste assez stable pour les deux périodes. Elle est comprise entre 0.85 à 31 mm entre 0.82 à 28.65 mm pour 1978 à Aout 1993 et Septembre 1993 à 2001.

IV.4. Performance et robustesse du modèle en calage et validation

Les valeurs de critère de Nash de calage et validation sont de façon générale bonne pour l'ensemble des deux périodes.

L'objectif de cette procédure de calage-validation du modèle est de choisir le jeu de paramètres qui représente au mieux le fonctionnement du bassin versant, afin notamment de l'utiliser pour la simulation des chroniques de débits.

Les valeurs du critère de robustesse traduisant les écarts de variation entre les performances moyennes du calage à la validation en valeur absolue, sont comprises entre 9.9 et 6.2 % pour les deux tiers (2/3) et un tiers (1/3) de la période d'observation respectivement. En effet, le critère de robustesse du modèle est acceptable. Il est en moyenne inférieur à 10% pour les deux découpages, ce qui traduit la robustesse du modèle GR2M sur le sous- bassin versant de Lakhdaria.

IV.5. Choix du jeu de paramètres pour la simulation des chroniques de débits

Le tableau IV.3 regroupe les bons résultats obtenus pour les deux périodes sur la base de la méthodologie décrite ci-dessus. Ces résultats nous permettent de choisir les paramètres calés sur la période de Septembre 1993-2001 qui représente le mieux le comportement du sous-bassin versant de Lakhdaria. Les figures IV.5 et IV.6 correspondent aux hydrogrammes observés et simulés, montrent que le modèle reproduit d'une manière satisfaisante la forme des hydrogrammes observés.

Les débits de pointes calculés sont bien situés dans le temps mais parfois sous-estimés particulièrement. Les étiages par contre sont parfaitement reconstitués et on observe une bonne superposition des hydrogrammes des débits observés et calculés. On observe néanmoins que le modèle a du mal à reproduire les pics de crue et parfois les incertitudes demeurent importantes. Le bilan est important pour la période de validation de Septembre 1993 à 2001 en enregistrant 96 mm.

Le modèle GR2M est donc performant et robuste sur la zone d'étude, ces résultats confirment les résultats obtenus dans les sous bassins Algériens (Elmeddahi et al, 2016).

IV.6. Conclusion

La modélisation pluie-débit par corrélation à l'échelle annuelle et mensuelle est pratiquement satisfaisante.

Les résultats de simulation obtenus avec le modèle GR2M sur le sous bassin versant d'Isser sont satisfaisants et traduisent de sa capacité à simuler les écoulements au niveau du bassin versant de la zone d'étude. L'observation des valeurs du critère de Nash-Sutcliffe montrent que le GR2M a été performant sur les sous- bassin de Lakhdaria. En effet, les valeurs du critère de Nash-Sutcliffe obtenues sont supérieures à 70% en calage (89.1 %) comme en validation (88.4 %). La robustesse du modèle est acceptable. Elle est en moyenne de -9.9 à 6.2 % dont la valeur absolue est inférieure à 10%, ce qui traduit la robustesse du modèle GR2M.

Les hydrogrammes obtenus sont également de bonne qualité dans l'ensemble. La dynamique des écoulements étant bien respectée. En général, les débits de pointe sont bien situés dans le temps mais parfois sous-estimés. Les étiages par contre sont parfaitement reconstitués et on observe une bonne superposition des hydrogrammes des débits observés et calculés. Le bilan est important pour la période de validation de Septembre 1993 à 2001 en enregistrant

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les modèles hydrologiques sont nombreux et constituent des outils indispensables de prévision et d'aide à la décision en matière de bonne gestion des ressources en eaux, notamment en ce qui concerne la détermination des débits de projets pour les aménagements hydrauliques et autres. Arriver à des modèles mathématiques scientifiquement et relativement simples, robustes et capables de produire à des échelles d'espace et de temps données, des résultats de simulations satisfaisants, est un des objectifs majeurs des recherches en hydrologie. Nous ne nous intéresserons pas aux multiples classifications qui existent, mais plutôt aux modèles globaux de type conceptuels élaborés à partir d'équation de bilan. Ce choix repose en grande partie sur la disponibilité des données.

L'étude actuelle met en évidence des irrégularités dans les tendances générales des précipitations dans le sous bassin de Lakhdaria et que l'analyse statistique de ces précipitations et de débits suit la Loi GEV.

La modélisation pluie-débit par corrélation à l'échelle annuelle sont pratiquement satisfaisants notamment le modèle Logarithmique, polynomial et puissance, et que les modèles les plus adéquats sont la puissance et l'exponentiel pour la corrélation mensuelle.

Les résultats de simulation obtenus avec le modèle GR2M sur le sous bassin versant d'Isser sont satisfaisants et traduisent de sa capacité à simuler les écoulements au niveau du bassin versant de la zone d'étude. L'observation des valeurs du critère de Nash-Sutcliffe montrent que le GR2M a été performant sur les sous- bassin de Lakhdaria. En effet, les valeurs du critère de Nash-Sutcliffe obtenues sont supérieures à 60% en calage (78.5% à 89.1 %) comme en validation (82.9 à 88.4 %). La robustesse du modèle est acceptable. Elle est en moyenne de -9.9 à 6.2 % dont la valeur absolue est inférieure à 10%, ce qui traduit la robustesse du modèle GR2M.

Les hydrogrammes obtenus sont également de bonne qualité dans l'ensemble. La dynamique des écoulements étant bien respectée. En général, les débits de pointe sont bien situés dans le temps mais parfois sous-estimés. Les étiages par contre sont parfaitement reconstitués et on observe une bonne superposition des hydrogrammes des débits observés et calculés. On observe néanmoins que le modèle a du mal à reproduire les pics de crue et parfois les incertitudes demeurent importantes. Le bilan est important pour la période de validation de Septembre 1993 à 2001 en enregistrant 96 mm.

Références bibliographiques

- Ambroise, B. (1998). La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant - Processus, Facteurs, Modèles. *H*G*A* (Ed.), Bucarest, 200 p.
- Andreassian V, Charles P et Claude M (2007). Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR)-Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés, 16 p.
- Arnaud P. (1997). Modèle de prédétermination de crues basé sur la simulation. Extension de sa zone de validité, paramétrisation du modèle horaire par l'information journalière et couplage des deux pas de temps. Thèse de doctorat, Université des sciences et technique du Languedoc. 251 p.
- Cernesson F. (1993). Modèle simple de prédétermination des crues de fréquences courante à rare sur petits bassins versants méditerranéens. Thèse de doctorat, Université des sciences et technique du Languedoc. 240 p.
- Clarke R.T. (1973). A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use. *Journal of Hydrology*, 19, 1-20.
- Deleau A (2007) : Modélisation pluie – débit sur le bassin versant du Lez pour la prévision des crues. Université Montpellier 2. 39p.
- Dumas A. (2006). Méthode de maximisation : estimation des crues maximales probables (CMP). *La Houille Blanche*, n° 5, 74-79.
- Edijatno, Michel, C. (1989). Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*(2), 113-121.
- Edijatno, Nascimento, N.O., Yang, X., Makhlof, Z. et Michel, C. (1999). GR3J: a daily watershed model with three free parameters. *Hydrological Sciences Journal* 44(2), 263-277.

- Elmeddahi .Y, Remaoun M, Abaidia S et Issaadi. A (2016) : Variabilité climatique et détection de tendance dans la relation pluie - débit pour l'évaluation des risques de sécheresse dans le bassin de l'Oued Ouahrane (Algérie), TSM, <https://doi.org/10.1051/tsm/201611141>
- Emma H (2003) : Modélisation mensuelle pluie/débit / apports de la spatialisation –cas des données des sols Université Montpellier 2. Ecole Doctorale des Sciences de l'Eau et de la Terre. 90p.
- Fouchier C. (2010). Développement d'une méthodologie pour la connaissance régionale des crues. Thèse De Doctorat De L'université Montpellier II. Sciences Et Techniques Du Languedoc. Thèse préparée au sein du Groupe de Recherche en Hydrologie, Cemagref, Aix-en-Provence., P266.
- François M (2007) : Modélisation couplée pluie/débit débit/débit : Développement et application aux bassins non jaugés .Université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris & École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, 53p.
- Gherissi R. (2012). Hydrologie et modelisation pluie-debit : cas du bassin versant de l'oued lakhdar (ex : chouly) tafna-nw algerien. Mem, Magister, Université Tlemcen, 143p.
- [HENINE05] HENINE Hocine (2005). Interfaçage entre un modèle hydrologique/modèle hydrodynamique au sein d'un système d'information intégré sous web incluent les SIG Mémoire de magister .
- Kabouya M., (1990). Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale. Thèse de Doctorat, Université Paris Sud Orsay, 347 pp.
- Kabouya M. et Michel, C. (1991). Estimation des ressources en eau superficielle aux pas de temps mensuel et annuel, application à un pays semi-aride. Revue des Sciences de l'Eau 4(4), 569-587.
- Klemeš, V. (19986a). Diletantism in hydrology: transition or destiny? Water Resources Research, 22(9), 177S-188S.

- Klemeš, V. (1986b). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1), 13-24.
- Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M. et Bergström, S. (1997). Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology*, 201, 272-288.
- Medane Kh (2012) : Hydrologie et modélisation pluie – débit : Cas du bassin versant de l'oued Boumessaoud (TAFNA NW- ALGERIEN). Université Abou Bekr Belkaid–Tlemcen.121p.
- Madsen H. (2000). - Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. *Journal of Hydrology* 235 pp.276-288.
- Makhlouf Z., (1994). Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de Doctorat, Université Paris XI Orsay, 426 pp.
- [MAFTAI02].C.P. MAFTEI (2002). Etudes concernant les écoulements superficiels modélisation spatialisée de l'écoulement sur le bassin versant de Voinesti-Roumanie.
- Makhlouf Z. et Michel, C., (1994). A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology* 162, 299-318.
- Mathevet T., (2005). Quels modèles pluie-débit globaux pour le pas de temps horaire ? Développement empirique et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants. Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris), Cemagref (Antony), France, 463 pp.
- Michel C (1983) : Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre. *La Houille Blanche* (1), 39-44.
- Michel C., (1989). Hydrologie appliquée aux petits bassins versants ruraux, Cemagref, Antony.

- Mouelhi S, Michel C, Perrin C et Andréassian V (2006b): Stepwise development of a two parameter monthly water balance model, *Journal de l'Hydrologie*, vol. 318,200-214.
- Mouelhi S., Michel, C., Perrin, C. et Andreassian, V., (2006a). Linking stream flow to rainfall at the annual time step: the Manabe bucket model revisited. *Journal of Hydrology* 328, 283-296, doi:10.1016/j.jhydrol.2005.12.022.
- 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.
- Nascimento N.O., (1995). Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'action anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. Thèse de Doctorat, CERGRENE/ENPC, Paris, 550 pp.
- Nash, J.E. et Sutcliffe, J.V., (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 27(3), 282-290.
- Nddiaye J (1997) : Modélisation pluie – débit des apports de bassins versant du sud-ouest de Burkina-faso. Ecole Inter-Etat d'ingénieurs de L'Equipement Rural de Ouagadougou Burkina faso. 98p.
- Oudin L., (2004). Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris) / Cemagref (Antony), 495 pp.
- Perrin C., (2000). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat, Cemagref. Antony, Institut National Polytechnique de Grenoble: 530 p.
- Perrin C (2002) : Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche Comparative. *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau*, EDP Sciences, pp.84-91.

Refsgaard, J.C. et Abbott, M.B. (1996). The role of distributed hydrological modelling in water resources management - Chapter 1. In: Distributed Hydrological modelling, M. B. Abbott et J. C. Refsgaard (Ed.), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1-16.

Robson, A (2000): Analysis guidelines, in Detecting trend and other changes in hydrological data. World meteorol, 49-65.

Sossou S., Masseck B., Badji Ansou M., Edmond Nicaise .M., Ansoumana B., Kuruma M., Mariko A., Bamba F., Dacosta H., malou R., Barry A., Kane A., Fall awan., HamAdoun S. (2011). Calage et validation des modèles hydrologiques GR4J et GR2M sur le bassin du Bafing en amont de Bafing-Makana : vers l'étude de l'impact du climat sur les ressources en eau de la retenue de Manatali. Journées scientifiques du 2iE, 6ème édition 2011, Compus 2iE Ouagadougou, 6 p., 4 fig.

Thomas, G., (1985), Géodynamique d'un bassin intra-montagneux, le bassin du bas Cheliff occidental (Algérie) durant le Mio-Plio-Quaternaire, Thèse d'Etat, Univ. Pau, 594 pp.

Touibia, B. (2004) Manuel pratique d'hydrologie, ENSH Blida.

Turc L., (1955). Le bilan d'eau des sols. Relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. Ann. Agr. 6, 5-131.

Site internet :

<http://www.cemagref.fr/webgr>.

<http://fr.wikipedia.org>

Annexe N°1 : la pluie moyenne de cinq (05) stations utilisées

| | SEP | OCT | NOV | DEC | JAN | FEV | MAR | AVR | MAI | JUIN | JUIL | AOÛT |
|----------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|
| moy1979 | 73.7 | 54.1 | 97.7 | 37.7 | 87.2 | 28.8 | 89.0 | 102.3 | 39.5 | 0.0 | 1.2 | 4.6 |
| moy1980 | 7.7 | 32.3 | 49.8 | 161.8 | 28.2 | 52.7 | 40.1 | 49.8 | 22.9 | 4.5 | 0.4 | 19.7 |
| moy1981 | 1.5 | 29.6 | 11.2 | 67.7 | 163.7 | 88.9 | 29.8 | 39.8 | 57.2 | 12.9 | 1.2 | 3.9 |
| moy1982 | 38.3 | 94.1 | 126.4 | 91.7 | 1.0 | 41.6 | 22.8 | 33.9 | 16.5 | 0.0 | 13.0 | 22.3 |
| moy1983 | 0.0 | 16.9 | 36.6 | 36.1 | 72.1 | 114.6 | 29.1 | 46.5 | 50.4 | 16.0 | 7.2 | 3.6 |
| moy1984 | 16.7 | 87.8 | 33.3 | 123.2 | 57.7 | 39.4 | 140.2 | 13.2 | 58.3 | 1.6 | 2.7 | 1.3 |
| moy1985 | 30.1 | 38.4 | 56.0 | 71.1 | 48.6 | 36.7 | 164.7 | 20.1 | 18.7 | 8.9 | 0.4 | 1.8 |
| moy1986 | 27.6 | 42.9 | 60.4 | 125.6 | 67.0 | 103.1 | 29.0 | 16.1 | 14.0 | 24.1 | 1.4 | 3.0 |
| moy1987 | 12.6 | 18.1 | 49.8 | 84.4 | 34.9 | 36.2 | 34.8 | 74.3 | 33.9 | 11.7 | 0.8 | 2.3 |
| moy1988 | 13.5 | 8.1 | 43.2 | 170.2 | 38.5 | 41.1 | 53.8 | 75.7 | 25.9 | 10.4 | 4.1 | 8.1 |
| moy1989 | 38.6 | 25.3 | 27.4 | 14.5 | 75.1 | 0.0 | 48.3 | 28.8 | 70.4 | 4.4 | 36.7 | 1.0 |
| moy1990 | 16.5 | 40.6 | 26.5 | 74.5 | 73.4 | 77.7 | 70.8 | 59.5 | 63.4 | 12.2 | 7.5 | 5.1 |
| moy1991 | 25.3 | 64.2 | 45.2 | 74.5 | 97.5 | 47.6 | 44.5 | 65.5 | 55.7 | 6.4 | 1.7 | 15.0 |
| moy1992 | 6.2 | 50.2 | 106.0 | 81.6 | 30.9 | 47.5 | 33.2 | 62.5 | 34.8 | 2.9 | 0.3 | 7.4 |
| moy1993 | 49.7 | 44.4 | 31.4 | 72.5 | 145.3 | 40.9 | 50.5 | 27.6 | 1.2 | 21.4 | 0.0 | 8.4 |
| moy1994 | 45.7 | 38.6 | 20.1 | 47.3 | 135.9 | 89.3 | 63.9 | 37.7 | 11.5 | 10.7 | 3.8 | 16.5 |
| moy1995 | 23.8 | 33.8 | 33.2 | 40.2 | 58.7 | 124.6 | 37.8 | 101.0 | 38.7 | 23.3 | 6.4 | 10.3 |
| moy1996 | 32.4 | 25.7 | 41.6 | 44.6 | 26.4 | 27.2 | 16.2 | 61.5 | 41.4 | 2.5 | 0.3 | 10.1 |
| moy1997 | 66.5 | 76.3 | 111.3 | 68.0 | 31.1 | 56.0 | 36.5 | 56.0 | 114.7 | 1.6 | 7.7 | 3.4 |
| moy1998 | 23.9 | 58.8 | 90.7 | 67.9 | 75.0 | 95.5 | 63.7 | 34.2 | 16.6 | 6.8 | 0.3 | 2.2 |
| moy1999 | 29.3 | 26.6 | 48.8 | 139.9 | 15.8 | 4.5 | 16.0 | 23.6 | 29.2 | 0.0 | 0.1 | 5.7 |
| moy2000 | 5.8 | 43.7 | 38.9 | 35.8 | 152.8 | 49.6 | 2.1 | 59.4 | 19.6 | 2.1 | 0.0 | 1.9 |
| moy2001 | 33.6 | 1.5 | 20.6 | 20.0 | 37.3 | 23.6 | 23.1 | 11.1 | 10.4 | 1.2 | 5.6 | 15.4 |

Annexe N°2 : l'ETP calculé par la formule de PENMAN-MONTEITH (source : ONM)

| | SEP | OCT | NOV | DEC | JAN | FEV | MAR | AVR | MAI | JUIN | JUIL | AOUT |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 1979 | 81.4 | 66.6 | 38.4 | 25.7 | 29.1 | 40.1 | 62.1 | 74.4 | 101.0 | 117.5 | 118.8 | 101.1 |
| 1980 | 68.8 | 57.9 | 35.7 | 27.3 | 23.9 | 26.6 | 46.6 | 60.5 | 71.6 | 111.7 | 128.7 | 105.0 |
| 1981 | 84.2 | 65.1 | 26.8 | 26.3 | 30.8 | 40.4 | 50.3 | 58.7 | 59.2 | 98.3 | 116.5 | 119.2 |
| 1982 | 71.8 | 49.3 | 32.8 | 22.5 | 23.1 | 26.1 | 47.0 | 67.3 | 101.4 | 104.1 | 121.1 | 110.3 |
| 1983 | 73.2 | 72.5 | 41.8 | 22.3 | 22.8 | 27.1 | 55.6 | 77.5 | 79.8 | 123.5 | 123.4 | 107.3 |
| 1984 | 143.1 | 95.21 | 54.57 | 39.84 | 43.42 | 93.66 | 125.32 | 159.92 | 189.06 | 203.96 | 197.27 | 1.3 |
| 1985 | 30.1 | 38.4 | 56.0 | 71.1 | 48.6 | 36.7 | 164.7 | 20.1 | 18.7 | 8.9 | 0.4 | 1.8 |
| 1986 | 27.6 | 42.9 | 60.4 | 125.6 | 67.0 | 103.1 | 29.0 | 16.1 | 14.0 | 24.1 | 1.4 | 3.0 |
| 1987 | 12.6 | 18.1 | 49.8 | 84.4 | 34.9 | 36.2 | 34.8 | 74.3 | 33.9 | 11.7 | 0.8 | 2.3 |
| 1988 | 13.5 | 8.1 | 43.2 | 170.2 | 38.5 | 41.1 | 53.8 | 75.7 | 25.9 | 10.4 | 4.1 | 8.1 |
| 1989 | 38.6 | 25.3 | 27.4 | 14.5 | 75.1 | 0.0 | 48.3 | 28.8 | 70.4 | 4.4 | 36.7 | 1.0 |
| 1990 | 129.6 | 84.3 | 59.3 | 39.6 | 46.2 | 54.0 | 90.6 | 101.3 | 150.6 | 235.1 | 240.0 | 176.9 |
| 1991 | 137.9 | 76.3 | 49.5 | 29.4 | 39.6 | 47.2 | 93.5 | 109.1 | 145.6 | 200.0 | 219.3 | 197.2 |
| 1992 | 151.9 | 79.8 | 35.5 | 28.9 | 33.4 | 47.7 | 76.7 | 118.1 | 144.5 | 179.4 | 192.3 | 195.0 |
| 1993 | 113.6 | 96.6 | 37.8 | 29.6 | 24.8 | 38.3 | 82.9 | 113.3 | 150.3 | 176.4 | 197.0 | 154.1 |
| 1994 | 131.9 | 33.1 | 46.1 | 33.7 | 44.7 | 63.3 | 95.3 | 124.5 | 192.2 | 209.6 | 237.5 | 226.0 |
| 1995 | 127.7 | 73.5 | 64.9 | 48.2 | 43.5 | 61.0 | 85.3 | 116.8 | 194.3 | 194.0 | 237.8 | 228.8 |
| 1996 | 141.8 | 87.1 | 78.4 | 48.5 | 53.9 | 44.1 | 86.6 | 119.7 | 149.8 | 175.7 | 236.4 | 211.1 |
| 1997 | 74.4 | 53.3 | 31.0 | 28.6 | 37.2 | 38.8 | 56.9 | 60.1 | 95.2 | 130.5 | 126.7 | 115.0 |
| 1998 | 87.3 | 50.7 | 33.2 | 23.2 | 28.9 | 31.3 | 51.1 | 67.1 | 63.4 | 105.1 | 137.3 | 116.8 |
| 1999 | 88.9 | 73.3 | 75.9 | 26.1 | 22.9 | 27.0 | 52.8 | 70.1 | 103.5 | 119.5 | 128.3 | 122.7 |
| 2000 | 79.9 | 51.7 | 39.9 | 28.7 | 22.9 | 41.0 | 57.1 | 84.9 | 97.2 | 109.6 | 130.9 | 122.1 |
| 2001 | 70.8 | 62.1 | 32.6 | 22.2 | 24.7 | 30.8 | 58.0 | 62.4 | 73.5 | 121.1 | 127.2 | 106.6 |

لمخص :

إن دراسة العلاقة التي تربط تساقط الأمطار بجريان الأودية عملية ذات أهمية كبيرة في البحث العلمي في التحكم في تسيير الموارد المائية.

ويهدف فهم أوضاع التركيبة الهيدرولوجية للحوض المائي للأخضرية، قمنا بتطبيق نموذج الهندسة الريفية، بحيث أخذنا عاملي التساقط والتبخر كمعطيات أولية وعامل التدفق كنتيجة ومخرج للعملية. النتائج المحصل عليها كانت مقبولة جدا في مرحلة الضبط ومرحلة الإثبات. نجاعة النموذج المختار في مقارنة التدفقات بواسطة تحليل عامل "الناس" أعطت نتائج مرضية جدا (أكثر من 70%).

الكلمات المفتاحية: الهيدرولوجيا، نموذج الهندسة الريفية، واد يسر، الحوض المائي للأخضرية.

Résumé :

L'étude de la relation entre les précipitations et les débits des cours d'eau a une grande importance dans la recherche scientifique et la maîtrise de la gestion des ressources en eau.

Pour une meilleure comparaison du comportement hydrologique du sous-bassin de Lakhdaria, le modèle GR2M a été appliqué, dont les paramètres d'entrées sont les précipitations et l'évapotranspiration (ETP) au pas du temps mensuelle et le paramètre de Sortie est constitué par les lames d'eau écartées.

Les résultats obtenus, sont très appréciables en phase de calage et de validation.

L'efficacité du modèle à simulé les débits par l'analyse de critère de NASH, a donnée des valeurs satisfaisantes (supérieures à 70%)

Mots Clés : Hydrologie ; GR2M ; oued Isser ; bassin de lakhdaria

Summary:

The study of the relationship between precipitation and stream flow is of great importance in scientific research and in the management of water resources management.

For a better comparison of the hydrological behavior of the Lakhdaria sub-basin, the GR2M model has been applied in the input parameters Sant precipitation and evapotranspirations (ETP) at the monthly time interval and the Satie parameter is constituted by the spaced apart.

The results obtained, Sant very appreciable in phase of calibration and validation.

The efficiency of the model to simulate flows by NASH criterion analysis, yielded satisfactory (over 70%)

Key words : hydrology ; rural engineering model ; wadi Isser ; lakhdaria basin.