

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

Contribution sur la modélisation pluie-débit par le modèle GR sur bassin versant de l'Oued sebaou (implémentation sous logiciel R) .

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 6-0034-17

APA Citation (توثيق APA):

Toudja, Asma (2017). Contribution sur la modélisation pluie-débit par le modèle GR sur bassin versant de l'Oued sebaou (implémentation sous logiciel R)[Thèse de master, ENSH].

The digital repository of the Higher National School for Hydraulics "Digital Repository of ENSH" is a platform for valuing the scientific production of the school's teachers and researchers.

Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...) and broadcasting it online.

Digital Repository of ENSH is built on the open DSpace software platform and is managed by the Library of the National Higher School for Hydraulics. <http://dspace.ensh.dz/jspui/>

المستودع الرقمي للمدرسة الوطنية العليا للري هو منصة خاصة بتقييم الإنتاج العلمي لأساتذة و باحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (أطروحات، مطبوعات، مبداعات، مقالات، البوريات، كتب....) و بنه على الخط.

المستودع الرقمي للمدرسة مبني على المنصة المفتوحة DSpace و يتم إدارته من طرف مديرية المكتبة للمدرسة العليا للري.

كل الحقوق محفوظة للمدرسة الوطنية العليا للري.

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE -ARBAOUI Abdellah-

**DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE URBAINE**

**MEMOIRE DE MASTER**

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

**Option: Alimentation en Eau Potable**

**THEME DU PROJET :**

**CONTRIBUTION SUR LA MODELISATION PLUIE-  
DEBIT PAR LE MODELE GR SUR BASSIN VERSANT  
DE L'OUED SEBAOU (IMPLEMENTATION SOUS  
LOGICIEL R)**

**PRESENTE PAR :**

M<sup>elle</sup> : TOUDJA Asma

**Devant les membres du jury**

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
M <sup>f</sup> : O.KHODJET-KESBA	Professeur	Président
M <sup>f</sup> : D.KAHLERRAS	M.C.B	Membre
M <sup>me</sup> : F.AMMOUR	M.A.A	Membre
M <sup>me</sup> : C.SALHI	M.A.B	Membre
M <sup>f</sup> : A.RASSOUL	M.C.A	Promoteur

**Avril 2017**

# *Dédicaces*

*A la suite de cette étape de ma vie j'aimerais porter une pensée et me rappeler de ces personnes qui ont partagé avec moi les bons moments de ma vie mais surtout les mauvais. Ces personnes qui m'ont aidé et soutenus sans conditions, qui m'ont aimé et crus en moi et à qui mon bonheur et ma joie reviennent de droit.*

*Je dédie ce modeste travail :*

*Avant tout à mes chers parents Mohamed et Hafida, Qui m'ont soutenu, motivé et encouragé durant toutes ces années de formation.*

*A mes frères Sid Ali et Zakaria qui m'ont soutenu et aidé de manière tant physique que morale.*

*A mes chères tantes, mes cousines et mes cousins.*

*A tous mes amis sans exception*

*J. Asma*

# *Remerciements*

*Avant tout, Je remercie Dieu le tout puissant, pour m'avoir donné la santé, le courage et la volonté d'étudier et pour m'avoir permis de réaliser ce modeste travail dans les meilleures conditions.*

*Je tiens à remercier vivement tous ceux qui m'ont apporté leur soutien pour l'élaboration de ce Projet de fin d'étude, particulièrement :  
A mon Promoteur **Mr RASSOUL Abdelaziz** pour avoir contribué à l'élaboration de cette présente thèse. Je leurs exprime mes vifs remerciements.*

*Aux membres du jury qui auront à juger et à apprécier ce travail.  
A tout le corps enseignant, l'administration et le personnel de L'ENSH.  
A tous ceux qui ont contribué de près ou de Loin à ma formation.*

## ملخص

إن عملية محاكاة تحويل الأمطار إلى تدفق على مستوى أحواض تجميع المياه عن طريق النماذج الرياضية عرفت نموا قويا منذ الستينيات وذلك بفضل زيادة دقة الحساب. يوجد اليوم العديد من النماذج التي تمثل العلاقة بين الأمطار والتدفق من خلال تغيير مواقع الخزانات. وكانت الدراسات المقارنة تطبق مثل هذه النماذج نتيجة لصعوبة تقييم خصائصها ونقاط ضعفها وذلك من خلال ممارسات بسيطة للمصادقة عليها

وكان الهدف من هذا العمل تقييم أداء النماذج الهيدرولوجية GR اليومية و الشهرية ، (GR6J GR5J GR4J ، (GR2M) التي طبقناها على حوض تجميع المياه سيباو

المرحلة الأولى من هذا العمل تمثلت في وصف النماذج التي يمكن أن تشكل العلاقة بين الأمطار والتدفق، بعدها سعينا لوصف بعض العوامل الجيومورفولوجية و المناخية و أخيرا طبقنا النموذج على حوض التجميع

## Abstract

Simulating the transformation of rainfall into runoff at the catchment scale using mathematical models has seen considerable developments since the early 1960s due to increasing computing capacities. There is today a large number of existing models that represent the link between rainfall and streamflow by a series of interconnected storages Comparative studies on these types of models have evaluated their strengths and weaknesses.

The objective is to evaluate the performance of the rainfall-flow models GR2M, GR4J, GR5J and GR6J, which we applied to the Oued Sébaou watershed.

The first phase of this work consists in the development of models that can account for the rainfall-flow relationship. In the second phase, we tried to characterize some factors; in particular geomorphological and hydroclimatic; governing the flow. Finally, we applied the GR model to our basin

## Résumé

La simulation de la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant par des modèles mathématiques a connu un fort essor depuis le début des années 60 grâce notamment à l'accroissement des capacités de calcul. Il existe aujourd'hui un grand nombre de modèles, représentent le lien entre la pluie et le débit par des agencements variés de réservoirs. Les études comparatives ayant impliqué de tels modèles ont été une réponse à la difficulté d'appréciation de leurs qualités et de leurs faiblesses respectives au travers de simples exercices de validation.

L'objectif de travail est l'évaluation des performances des modèles hydrologiques pluie-débit GR2M, GR4J, GR5J et GR6J que nous avons appliqué sur le bassin versant de Oued Sébaou.

La première phase de ce travail consiste à l'élaboration des modèles pouvant rendre compte de la relation pluie-débit, en deuxième temps, nous avons cherché à caractériser quelques facteurs en particulier géomorphologiques et hydroclimatiques régissant l'écoulement. La deuxième enfin nous avons appliqué le modèle GR sur notre bassin.

# SOMMAIRE

## INTRODUCTION GENERALE

### CHAPITRE I : L'ETAT DE L'ART DE LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

Introduction .....	3
I.1.L'hydrologie des bassins versant.....	3
I.1.1. Cycle de l'eau et le bilan hydrologique.....	3
I.1.2.Précipitations.....	4
I.1.3.Evapotranspiration.....	4
I.1.4.Débit.....	5
I.2.La modélisation hydrologique.....	6
I.2.1But de la modélisation hydrologique.....	6
I.2.2. Définition d'un modèle hydrologique.....	6
I.2.2.1. La modélisation comme outil de formation et de recherche.....	7
I.2.2.2. La modélisation comme outil de prévision.....	7
I.2.2.3. La modélisation comme outil d'extrapolation.....	7
I.3. Typologie des modèles hydrologiques.....	7
I.4.A quoi sert un modèle pluie-débit ?.....	8
I.5. Classification des modèles hydrologiques.....	10
Conclusion.....	14

### CHAPITRE II : PRESENTATION DE QUELQUES MODELES PLUIE- DEBIT

Introduction .....	15
II.1.Modèle pluie-débit.....	15
III.1.1. MIKE SHE .....	15
II.1.2. CEQUEAU.....	16
II.1.3. TOP MODEL.....	18
II.1.4. TOPMO.....	19
II.1.5. HEC HMS.....	20
II.1.6. IHACRES.....	21
II.2. Choix du modèle utilisé.....	22
II.3. Modèle GR.....	23
II.3.1. Historique.....	23
II.3.2. Présentation du modèle GR.....	23
II.3.2.1.Objectifs de développement.....	24
II.3.2.2. Mode de développement.....	24
II.3.2.3. Principales caractéristiques.....	25
II.3.3. Description du modèle pluie-débit annuel GR1A.....	25
II.3.3.1. Introduction.....	25
II.3.3.2. Description mathématique.....	26
II.3.3.3. Paramètre.....	26
II.3.4. Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M.....	26
II.3.4.1. Introduction.....	26
II.3.4.2. Description mathématique.....	27
II.3.4.2. Paramètres.....	30

II.3.5. Description du modèle pluie-débit journalier GR4J.....	31
II.3.5.1. Introduction.....	31
II.3.5.2. Description mathématique.....	31
II.3.6. Paramètres.....	36
II.3.7. Description des modèles pluie-débit journalier GR5J ET GR6J.....	36
II.4. Le calcul des simulations des débits.....	38
II.4.1. Introduction.....	38
II.4.2. Le calage du modèle.....	38
Conclusion.....	41

### **CHAPITRE III : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE**

III.1. Situation Géographique et topographique.....	42
III.2. Etude géomorphologique.....	43
III.2.1. Les grands ensembles morphologiques.....	43
III.2.1.1. La chaîne Djurdjura.....	44
III.2.1.2. Le massif de Kabylie.....	44
III.2.1.3. Le synclinale de Tizi-Ouzou.....	44
III.2.2. Lithologie.....	45
III.2.3. Végétation.....	45
III.2.4. Réseau hydrographique.....	46
III.2.5. Les paramètres physiques et géomorphologiques du bassin versant.....	48
III.2.5.1. Paramètre géométriques.....	48
III.2.5.2. Paramètre du relief.....	49
III.3. Etude hydroclimatologique.....	50
III.3.1. Précipitations.....	51
III.3.2. Vent.....	52
III.3.3. Température.....	52
III.3.4. Evapotranspiration.....	52
Conclusion.....	53

### **CHAPITRE IV : APPLICATION DE MODELE**

Introduction.....	54
IV.1. Présentation du logiciel R.....	54
IV.2. Package.....	55
IV.3. Package 'airGR'.....	55
IV.3.1. Description.....	55
IV.4. Avantage du logiciel.....	56
IV.5. Résultats de simulation de modèle GR.....	56
IV.5. Application du modèle GR sur le bassin versant Sébaou.....	56
IV.5.1. Modèle mensuel GR2M.....	57
IV.5.2. Modèle journalier GR4J.....	58
IV.5.3. Modèle journalier GR5J.....	60
IV.5.4. Modèle journalier GR6J.....	62
V.6 Discussion.....	63
Conclusion.....	64

CONCLUSION GENERALE.....	65
--------------------------	----

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1 : Valeur des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants.....	30
Tableau II.2 : Valeur des paramètres du modèle GR4J obtenues sur un large échantillon de bassins versants.....	36
Tableau III.1 : Répartition des superficies par sous bassin.....	49
Tableau III.2 : Paramètres de forme.....	50
Tableau III.3 : Moyenne mensuelles des vitesses des vents.....	52
Tableau III.4 : Répartition mensuelle de la température.....	52
Tableau IV.1 : Paramètres statistique du modèle GR2M.....	58
Tableau IV.2 Résultats obtenus pour les différentes valeurs des paramètres de modèle GR2M.....	58
Tableau IV.3 Paramètres statistique du modèle GR4J.....	59
Tableau IV.4 Résultats obtenus pour les différentes valeurs des paramètres de modèle GR4J.....	60
Tableau IV.5 Paramètres statistique du modèle GR5J.....	61
Tableau IV.6 Résultats obtenus pour les différents paramètres de modèle GR5J.....	61
Tableau IV.7 Paramètres statistique du modèle GR6J.....	63
Tableau IV.8 Résultats obtenus pour les différents paramètres de modèle GR6J.....	63



# LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Cycle hydrologique.....	4
Figure I.2 : Schéma d'un bassin versant.....	6
Figure I.3 : Représentation du fonctionnement d'un modèle hydrologique.....	8
Figure I.4 : Intérêt d'un modèle pluie-débit.....	10
Figure I.5 : Les différentes approches de modélisation.....	11
Figure II.1. Cycle de l'eau dans le logiciel MIKE SHI : processus modélisés.....	16
Figure II.2 : Fonction de production du modèle CEQUEAU.....	17
Figure II.3 : Fonction de transfert du modèle CEQUEAU.....	17
Figure II.4: Représentation schématique de TOPMODEL.....	19
Figure II.5 : Représentation schématique de TOPMO.....	20
Figure II.6 : Représentation schématique de IHACRES.....	22
Figure II.7 : Schéma de la structure du modèle GR2M.....	28
Figure II.8 : Schéma de la structure du modèle GR4J.....	32
Figure II.9 : Schéma synoptique des modèles GR5J et GR6J.....	37
Figure III.1 : Présentation géographique du bassin versant Sébaou (ANRH).....	42
Figure III.2 : Décomposition du bassin versant Sébaou.....	43
Figure III.4 : Réseau hydrographique du bassin versant du Sébaou.....	48
Figure III.5. Carte de la pluviométrie moyenne annuelle de la région d'étude.....	50
Figure III.6. Variation de précipitation annuelle pour la station étudiée.....	51
Figure IV.1 : Logiciel R (package airGR).....	56
Figure IV.2 Calage du modèle GR2M.....	57
Figure IV.3 Validation du modèle GR2M sur les données mensuelles.....	57

Figure IV.4 Calage du modèle GR4J.....	59
Figure IV.5 Validation du modèle GR4J sur les données journalières.....	59
Figure IV.6 Calage du modèle GR5J.....	60
Figure IV.7 Validation du modèle GR5J sur les données journalières.....	61
Figure IV.8 Calage du modèle GR6J.....	62
Figure IV.9 Validation du modèle GR6J sur les données journalières.....	62

***INTRODUCTION***  
***GENERALE***

## **INTRODUCTION GENERALE**

Chaque point d'un cours d'eau permet de définir un bassin versant, et les débits observés en ce point sont directement liés aux précipitations tombées sur ce bassin. A partir des observations faites en quantifiant la pluie tombée, on arrive à reproduire la réponse en débit du bassin. La simulation hydrologique du bassin versant, décrite comme la transformation de la pluie en débit passe par l'utilisation d'un modèle hydrologique. Le passage de la pluie au débit reste un problème complexe mais demande pour une utilisation simple un nombre de paramètres limité. La modélisation conceptuelle permet de limiter le nombre de paramètres entrant en jeu dans le modèle mais renonce à une connaissance minutieuse des différents phénomènes.

L'amélioration des outils de modélisation hydrologique est une thématique de recherche très active. Cette amélioration s'évalue grâce au calcul de la performance des modèles pluie-débit, donc la capacité d'un modèle à reproduire des débits observés, qui s'estime à l'aide des critères de performances. Cependant, une amélioration de simulation des débits observés sur un bassin donné peut ne pas être reproductible sur un autre bassin, que ce soit à cause des caractéristiques hydrologiques et des conditions climatiques variable dans le temps, ou de mauvais choix de modélisation par exemple.

Les modèles Génie Rural GR sont des modèles qui permettent, à partir des connaissances des pluies et températures passées, de simuler des débits en un point d'une rivière. Ces outils sont appliqués sur des bassins versants différents et sur des périodes différentes à des fins de généralisation des résultats. Ces modèles hydrologiques comportent un certain nombre de paramètres, qui doivent être déterminé par calage, donc on fait appel à une fonction dite fonction objectif qui est un critère numérique qu'on essaye d'optimiser, mesurant l'écart entre les observations et les simulations.

L'objectif principal du présent mémoire est de : Déterminer les paramètres de calage des modèles GR appliqués aux données «du bassin versant Sébaou », aux pas mensuel et journalier.

## ***Introduction générale***

En estimant par la suite la performance et la robustesse des modèles GR.

Dans ce contexte, notre étude s'articule autour de 4 chapitres :

**Chapitre I** : où, nous présentons l'état de l'art de la modélisation pluie-débit.

**Chapitre II** : Présente quelques modèles pluie-débit.

**Chapitre III** : présente le bassin versant Sébaou en traitant ses principales caractéristiques (situation, morphologie, hydroclimatologique, etc.) ;

**Chapitre IV** : correspond à la modélisation pluie – débit par l'application des modèles : GR2M, GR4J, GR5J et GR6J aux données du bassin versant Sébaou ;

Et enfin une Conclusion Générale qui présente une synthèse des résultats obtenus dans cette étude



***CHAPITRE I***  
***L'ETAT DE L'ART DE LA***  
***MODELISATION***  
***HYDROLOGIQUE***

## **Introduction**

Un des plus grand problèmes dans de nombreuses applications hydrologiques est la détermination de l'écoulement d'un cours d'eau à partir de données physiques comme : la pluie, la température, le vent et des caractéristiques du bassin. Cet écoulement est non seulement requis pour la prévision des crues, mais aussi pour la prédiction d'un effet d'un changement d'un bassin, et en générale pour l'aménagement des ressources en eau. (Edijano, 1987)

La modélisation hydrologique est devenue un outil indispensable, il s'agit d'une représentation mathématique simplifiée de tout ou partie des processus du cycle hydrologique par un ensemble de concepts hydrologiques exprimés en langage mathématique et reliés entre eux dans des séquences temporelles et spatiales correspondant à celles que l'on observe dans la nature.

### **I.1.L'hydrologie des bassins versants**

#### **I.1.1.Cycle de l'eau et le bilan hydrologique**

L'hydrologie est la science qui étudie la distribution et la circulation de l'eau à la surface de la terre, dans les sols, dans les souterrains et dans l'atmosphère. L'eau est indispensable à la vie des êtres vivants. Sur la planète, elle se retrouve sous trois états, appelés « les phases de l'eau » : liquide, solide ou gazeux. Le changement de phase de l'eau dépend de la température et de la pression.

L'ensemble des processus de transformation et de transfert de l'eau forme le cycle hydrologique (Figure I.1), qui est un ensemble des phénomènes naturels, composé par : les précipitations, l'évapotranspiration, le ruissellement de surface, l'infiltration, la percolation et le stockage dans les dépressions.



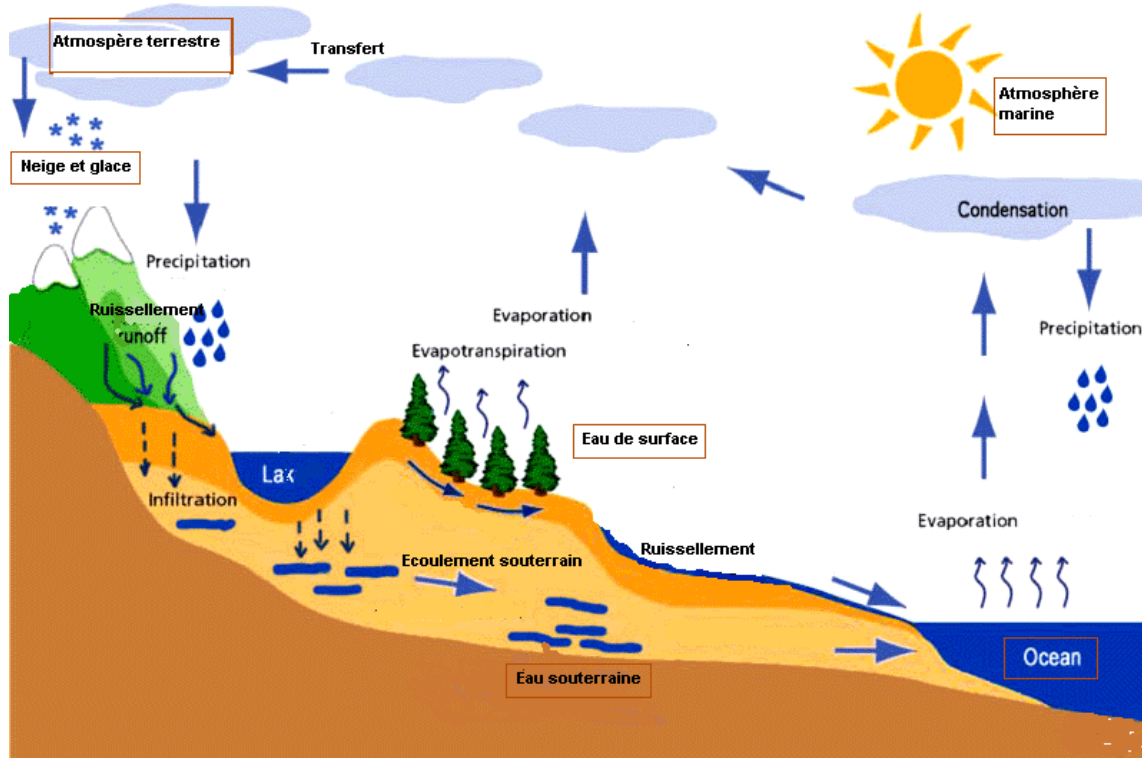


Figure I.1 : Cycle hydrologique

### I.1.2. Précipitations

Les précipitations sont une des composantes principales du cycle hydrologique. Elles représentent toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, sous forme liquide ou solide en provenance directe ou indirecte de la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique. Elles sont mesurées en millimètres le plus souvent grâce à des pluviomètres. Il existe plusieurs formes différentes de précipitations : la pluie, la pluie verglaçante, le grésil et la neige, qui dépendent de l'épaisseur des nuages, de leur taux d'humidité, de la température de l'air ambiant et de celle du sol, mais aussi de la pression atmosphérique.

### I.1.3. Evapotranspiration

L'évapotranspiration est la combinaison de l'évaporation directe à partir des surfaces d'eau libre, et de la transpiration végétale qui est un processus par lequel l'eau des végétaux est transférée dans l'atmosphère sous forme de vapeur. Elle dépend de cinq facteurs : la température, la pression atmosphérique, l'humidité, le vent, et la surface d'eau à l'air libre.

#### I.1.4.Débit

Le débit  $Q$  d'un cours d'eau, exprimé en  $m^3/s$  ou  $l/s$ , correspond au volume d'eau liquide traversant une section transversale de l'écoulement par unité de temps. Le débit reflète physiquement le comportement du bassin versant, et peut être interprété dans le temps et dans l'espace. À la station hydrométrique, on ne dispose pas d'une mesure directe et continue des débits, mais seulement d'un enregistrement des hauteurs d'eau en une section donnée. Le passage de la courbe des hauteurs d'eau en fonction du temps  $H=f(t)$  appelée « limnigramme » à celle des débits  $Q=f(t)$  appelée « hydrogramme » se fait par l'établissement d'une courbe de tarage  $Q=f(H)$  à l'aide d'un jaugeage.

#### I.1.5. Qu'est-ce qu'un bassin versant ?

Le bassin versant est l'échelle géographique adoptée pour gérer l'eau (Figure I.2). Il est délimité par les crêtes (ligne de points hauts d'un relief séparant deux versants opposés) au-delà desquelles les pentes dirigent les précipitations tombées vers un autre cours d'eau. Ces frontières sont appelées « lignes de partage des eaux ». Autrement dit, le bassin versant représente la zone irriguée par un réseau hydrographique dont toutes les précipitations reçues suivent une pente naturelle et se concentrent vers ce que l'on appelle un exutoire. Il est possible d'estimer les volumes et les distributions temporelles de ces précipitations à l'exutoire. Bien que le débit puisse techniquement être mesuré.

Il est caractérisé par :

- Ses entrées (les précipitations) ;
- Sa géométrie (pentes des versants), sa composition (géologie, pédologie, occupation des sols) et ses limites (lignes de partage des eaux) ;
- Ses états internes (humidité des sols, piézométrie) ;
- Ses sorties (évapotranspiration, débit à l'exutoire du bassin).

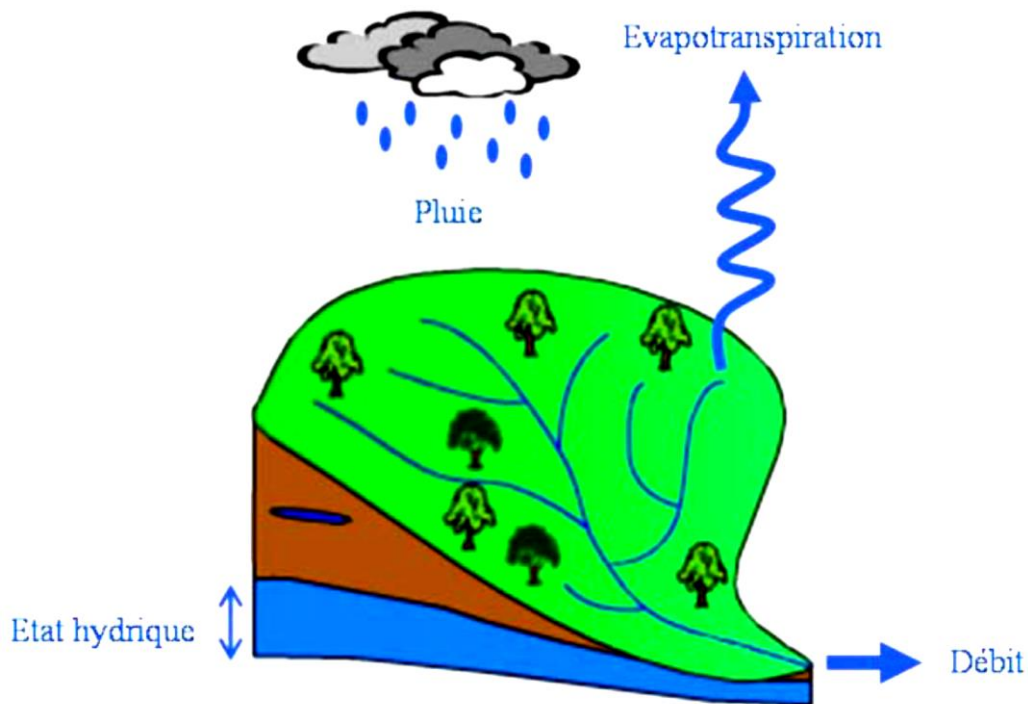


Figure I.2 : Schéma d'un bassin versant

## I.2. La modélisation hydrologique

### I.2.1 But de la modélisation hydrologique

La modélisation Pluie \_ Débit a pour but de rendre compte de la transformation des précipitations sur une aire donnée (le bassin versant) en débit qui en résulte à l'exutoire de ce bassin. Il s'agit au départ d'un exercice de simulation répondant à un objectif de compréhension scientifique c'est-à-dire expliciter les différents flux et phénomènes associés, voire les réduire à des phénomènes physiques plus fondamentaux. La simulation hydrologique peut également être motivée par un objectif pratique : rendre compte des séries temporelles de débits. (Berthet, 2010)

### I.2.2. Définition d'un modèle hydrologique

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 est une représentation sous une forme quelconque d'un objet, d'un processus, ou d'un système. Un modèle hydrologique est défini comme la représentation simplifiée de tout ou partie des processus du cycle hydrologique par un ensemble de concepts hydrologiques, exprimés en langage mathématique et reliés entre eux dans des séquences

temporelles et spatiales correspondant à celles que l'on observe dans la nature. (Mathevet, 2005)

On peut distinguer trois types d'utilisation des modèles mathématiques en hydrologie.

### **I.2.2.1. La modélisation comme outil de formation et de recherche**

La modélisation hydrologique est aujourd'hui une approche privilégiée pour décrire les processus physiques tels que la fonte de neige et des glaciers, le ruissellement et l'infiltration. La création de scénarios hydrologiques se révèle intéressante pour des bassins versants en cours d'urbanisation ou de mutation naturelle. Une telle démarche permet l'évaluation des ressources futures en regard de l'évolution croissante des besoins.

### **I.2.2.2. La modélisation comme outil de prévision**

Elle nous donne une anticipation des évolutions futures du débit d'un cours d'eau. Il s'agit de l'utilisation opérationnelle la plus courante des modèles hydrologique. Dans la plupart des cas cependant, les modèles développés sont basés sur des régressions linéaires entre les variables indépendantes (pluie, débit amont) et les variables dépendantes (débits aval), et font peu appel aux connaissances sur les processus hydrologique.

### **I.2.2.3. La modélisation comme outil d'extrapolation**

Reconstitution de séries de débits possibles. Dans certains cas, comme par exemple le dimensionnement de déversoirs de sécurité de barrages hydroélectriques ou encore la délimitation de zones inondables dans le cadre d'un plan de prévention des risques.

L'utilisation de longues séries de pluies éventuellement générées à l'aide d'un modèle stochastique de pluie couplées à un modèle hydrologique permet de reconstituer des scénarios rares.

## **I.3. Typologie des modèles hydrologiques**

Un modèle hydrologique pluie-débit est généralement défini par (Figure I.3) :

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

**2-ses variables de sortie (variables dépendantes) :** il s'agit des sorties du modèle, qui sont généralement les débits simulés à l'exutoire du bassin versant, mais qui peuvent parfois être aussi l'ETR, des niveaux piézométriques..etc ;

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

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

**5-ses performances** : il s'agit d'estimer l'amplitude des erreurs de modélisation, calculées généralement sur la base d'une mesure de l'écart entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées. (Mathevet, 2005)

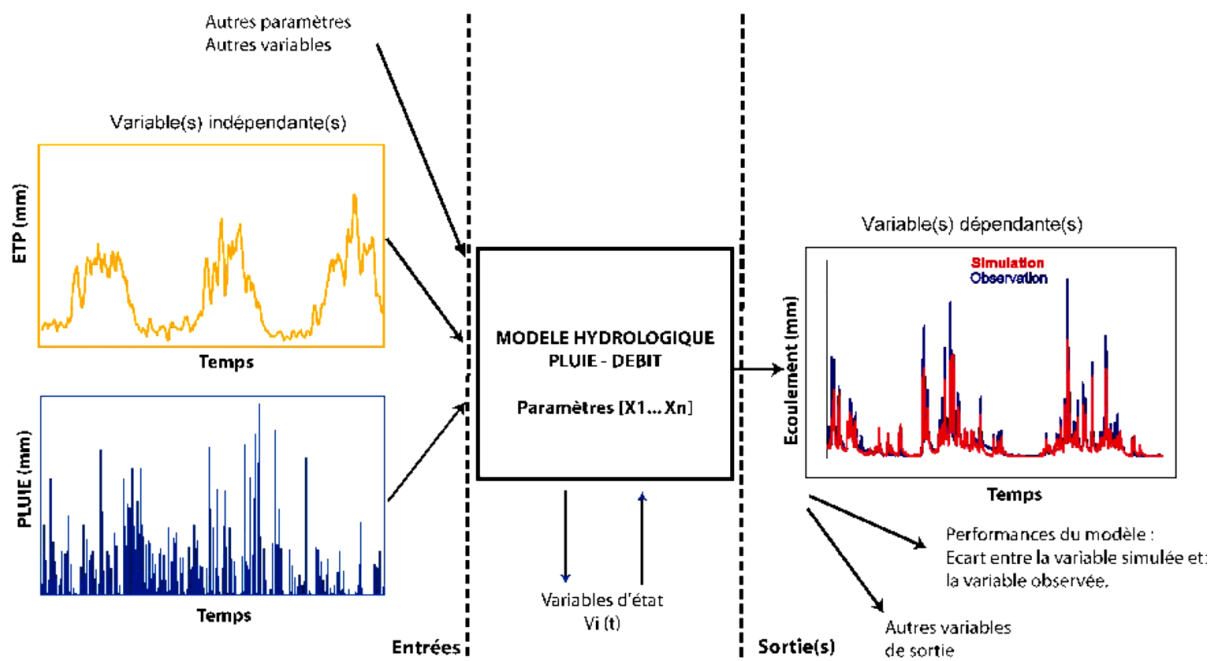


Figure I.3 : Représentation du fonctionnement d'un modèle hydrologique

#### I.4.A quoi sert un modèle pluie-débit ?

La figure I.4 montre que l'étude de la transformation de la pluie en débit est une des nombreuses disciplines hydrologiques. Un modèle pluie-débit sert à reproduire des débits, données relativement rares, à partir de données plus facilement disponibles comme les pluies et certaines caractéristiques du bassin.

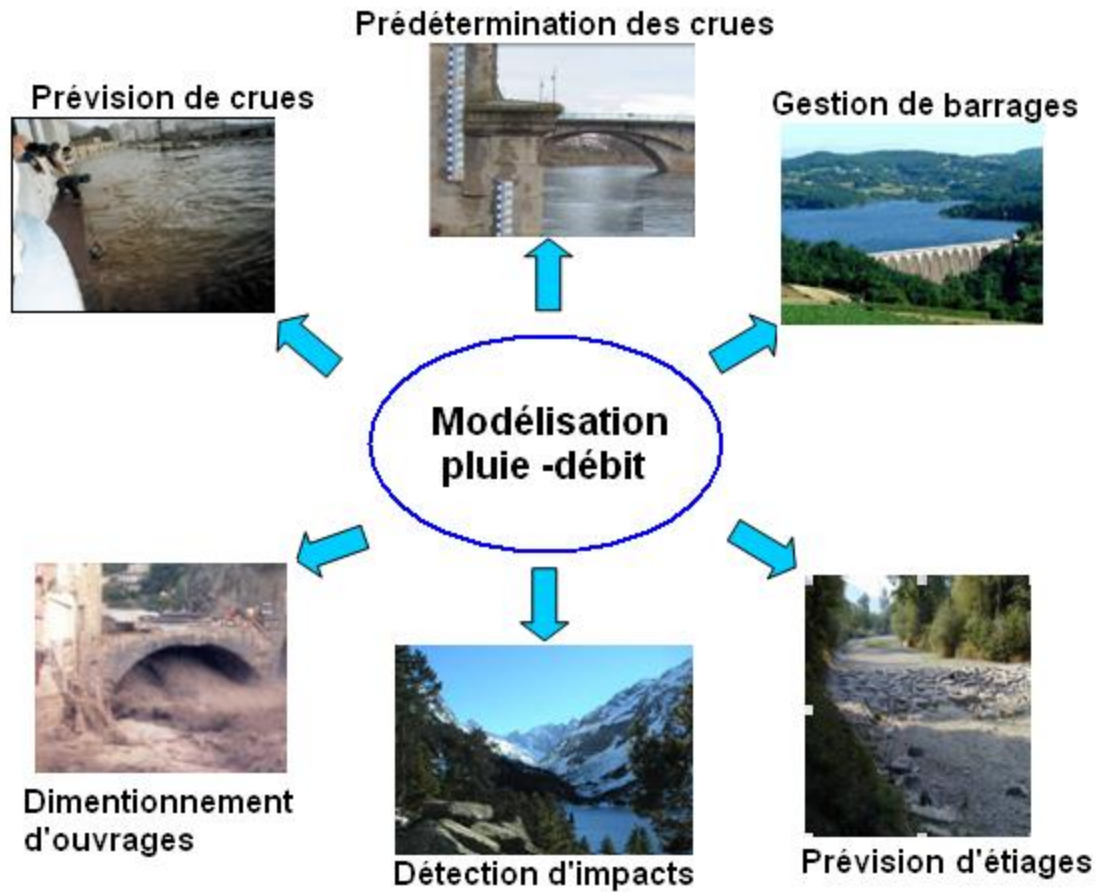
Il permet aussi de simuler les débits en dehors du domaine d'observation. Typiquement, un modèle pluie-débit pourra être utilisé pour :

**a) 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.

**b) Prédétermination des débits de crue ou d'étiage :** On désire savoir avec quelle fréquence des débits de crue supérieurs à un seuil de risque ou des faibles débits risquent de se produire, et sur quelle durée. On se place ici dans une démarche d'analyse fréquentielle. Cette connaissance peut permettre le dimensionnement d'ouvrages et de réservoirs ou des aménagements dans le lit du cours d'eau.

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

**d) Influence d'aménagements sur l'hydrologie :** On désire pouvoir prédire les changements de la réponse du bassin suite à des modifications d'origine humaine ou à des changements environnementaux. Ces problématiques font ressortir deux aspects importants, celui de l'évaluation du risque et celui de la gestion de la ressource. La pertinence des réponses que l'on peut leur apporter est conditionnée par celle du modèle dans sa représentation du bassin relativement aux objectifs fixés.



*Figure I.4 : Intérêt d'un modèle pluie-débit*

### **I.5. Classification des modèles hydrologiques**

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

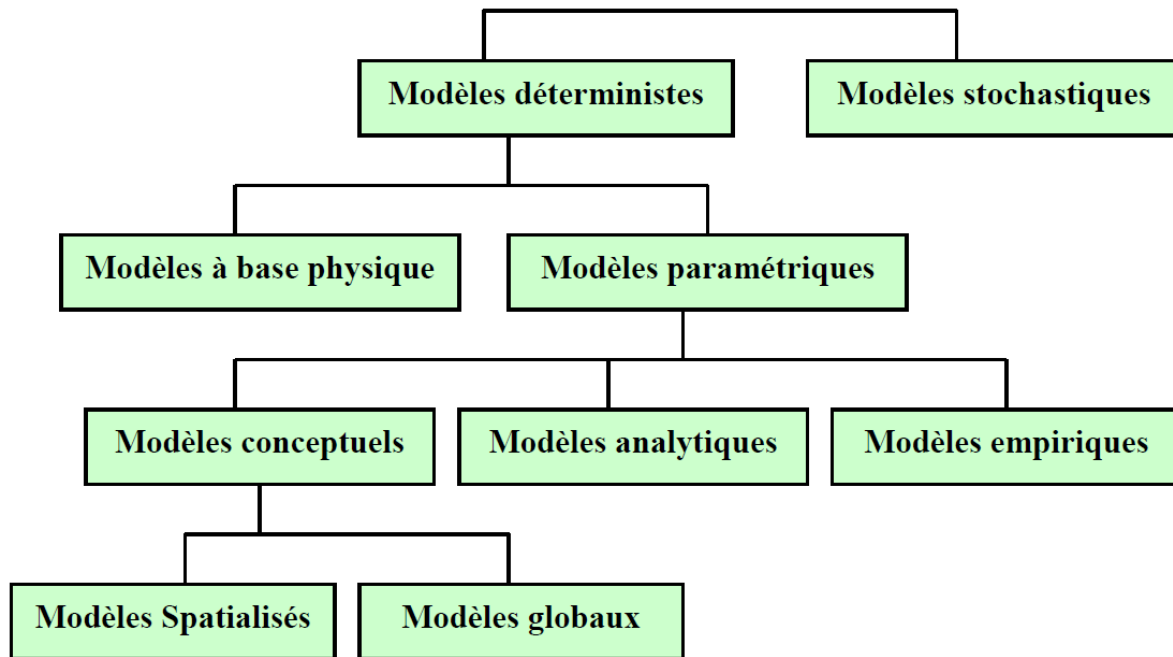


Figure I.5 : Les différentes approches de modélisation

### 1. Modèles stochastiques

La modélisation stochastique peut être envisagée toutes les fois qu'il y a des incertitudes sur les données ou parfois même sur les processus mis en jeu. On considère que l'approche stochastique est un moyen rationnel de traiter la caractérisation spatiale de la variabilité, et d'établir un lien entre les incertitudes des paramètres et celles des prédictions. Toutefois cette approche, bien qu'elle soit le meilleur moyen de caractériser la variabilité des grandeurs, nécessite la connaissance des lois de probabilité les plus courantes pour la variabilité considérée ou au moins de leurs premiers moments. (Makhlouf, 1994)

### 2. Modèles déterministes

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



**a. Modèles à base physique**

Le modèle à base physique est basé uniquement sur des équations de la physique, et ne comportant idéalement aucun paramètre. Il n'existe pas de modèle à base physique au sens strict en hydrologie. Certains modèles comme le SHE (système hydrologique européen) tendent à s'en rapprocher. L'importance de l'hétérogénéité spatiale dans la réponse hydrologique des bassins versants rend cependant difficile voire impossible l'utilisation de tels modèles.

**b. Modèles paramétriques**

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

**b.1 . Modèles empiriques**

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

**b.2 Modèles analytiques**

Ce sont des modèles pour lesquels les relations entre les variables d'entrée ont été établies par analyse de séries de données mesurées. L'exemple type est celui des modèles linéaires : les paramètres de ces modèles sont liés aux coefficients de corrélation entre les variables. Notons que l'analyse des données peut conduire au choix de relations non linéaires entre variables. (Gaume, 2002)

**b.3 .Modèles conceptuels**

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

Ce type de modèle reproduit donc au mieux le comportement d'un système, plutôt qu'il n'avance d'explications causales sur son comportement. Le modèle CEQUEAU (Morin, 1991) est un exemple de ce modèle.

#### ❖ **Modèles globaux**

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

#### ❖ **Modèles Spatialisés**

Actuellement plusieurs modèles spatialisés correspondant à différentes écoles hydrologiques sont en phase avancée de développement. En principe, les modèles spatialisés sont des modèles qui utilisent des entrées et des sorties où les caractéristiques des bassins versants sont distribués dans l'espace. La spatialisation peut être arbitraire ou basée sur des divisions morphologiques naturelles (découpage en sous bassins) ou hydrologiques (aires contributives)

Les modèles spatialisés peuvent être classés en trois grands types :

- Modèles conceptuels spatialisés ou semi-spatialisés ;
- Modèles physiques spatialisés ;
- Modèles physiques conceptuels semi-spatialisés.

**Conclusion**

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

Le modèle hydrologique est un outil très important dans la compréhension de la dynamique d'un bassin versant.

Les modèles conceptuels ou empiriques 'à réservoirs' semblent les plus en mesure de faire avancer la compréhension des systèmes réels (les bassins versants). Ceci dit, les modèles conceptuels globaux nous apparaissent comme étant les plus en adéquation avec le niveau actuel de compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin.

***CHAPITRE II***  
***PRESENTATION DE***  
***QUELQUES MODELES***  
***PLUIE-DEBIT***

**Introduction**

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

Dans ce chapitre nous avons présenté quelque modèle pluie-débit existant avec une description pour chaque modèle.

**II.1.Modèle pluie-débit****II.1.1. MIKE SHE : la modélisation hydrologique complète**

Ce modèle a été conçu en collaboration entre l'INRS EAU Canada et Laboratoire d'Hydrologie et Modélisation de Montpellier (Fortin et al. 1995), dans le but de créer un outil capable d'intégrer et de gérer la spatialisation des données et des processus physiques. Il utilise ainsi les données issues de la télédétection et les SIG. Il se décompose en 2 modules :

PHYSITEL (pour le traitement du MNT en vue de la détermination des unités hydrologiques du bassin et de son réseau de drainage) et HYDROTEL (pour la simulation hydrologique). Ce dernier module intègre, en plus des résultats de PHYSITEL, le type de sol, sa profondeur racinaire, la pluie (sous forme de pluviographes), l'occupation des sols et les caractéristiques de la végétation (albédo, indice foliaire). Il simule l'ETP, la fonte des neiges, le ruissellement superficiel (par l'onde cinématique), la propagation de la crue dans la rivière avec l'onde cinématique ou l'onde diffusante. Ce modèle présente l'avantage d'intégrer l'imagerie satellite, d'utiliser des équations physiques pour modéliser les processus de genèse et de propagation de crues et de se présenter sous la forme d'une interface conviviale. Toutefois, il nécessite une grande quantité d'informations pour son calage initial. De plus, son pas de temps horaire est très limitatif pour la prévision des crues éclair. (Boursali, 2015)

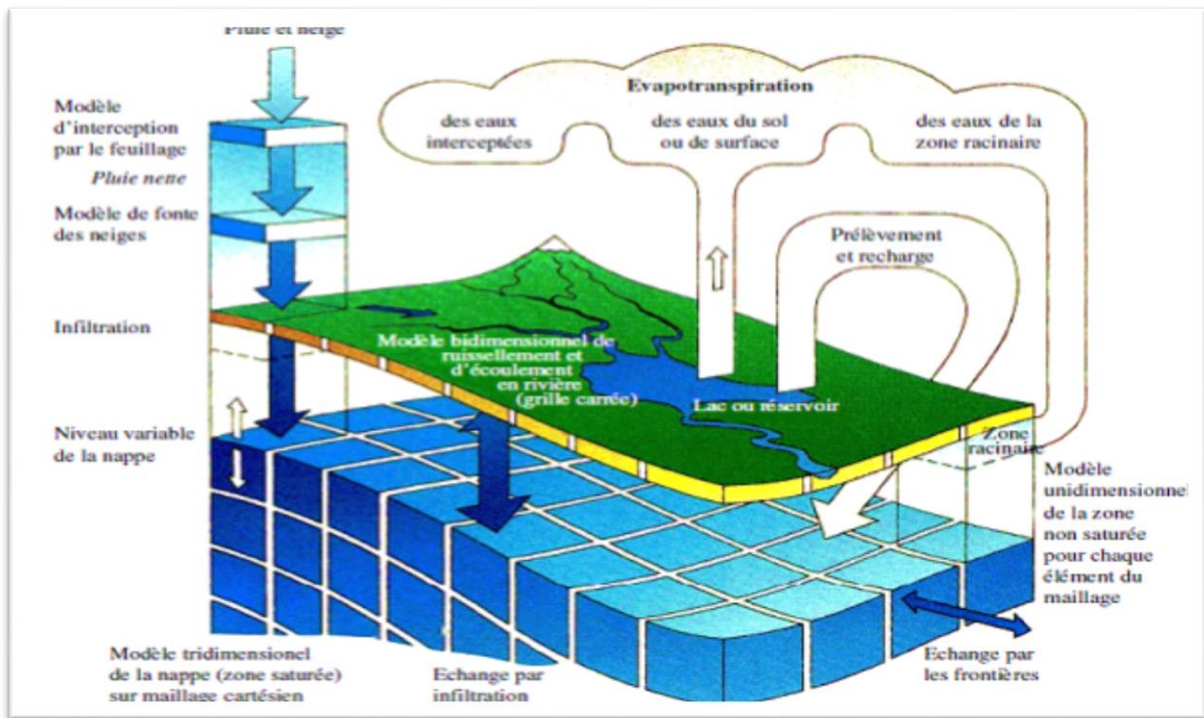


Figure II.1. Cycle de l'eau dans le logiciel MIKE SHI .

### II.1.2. CEQUEAU

CEQUEAU est un modèle hydrologique conceptuel spatialisé ou, comme le décrivent ses concepteurs, un modèle paramétrique matriciel à bilan développé depuis 1971 par l'Institut de la Recherche Scientifique Eau et environnement du Canada (Charbonneau *et al.*, 1977 in Agosta, 2007).

Cela sous-entend trois choses :

- au sein de ce modèle, le cycle hydrologique est décomposé en éléments (précipitation, évapotranspiration, fonte des neiges, infiltration, ...)
- le bassin est subdivisé en éléments et les lames d'eau produites sur chacun d'eux sont transférées sur les suivants ;
- le but de ce modèle est la représentation la plus réaliste possible des bilans des volumes d'eau.

Le bassin versant est doublement découpé. Un premier découpage en carreaux entiers homogènes (Figure II.2) et un second, permettant de tenir compte de la topographie, et donc du sens d'écoulement de l'eau (Figure II.3). Les transferts sont assurés par la fonction de

production, qui transforme les précipitations réelles en précipitations utiles pour le bassin (injectées dans le modèle, après épururation de l'évapotranspiration et répartition en fonction des différentes couches du sol), et par la fonction de transfert qui assure alors le cheminement de l'eau entre les carreaux partiels.

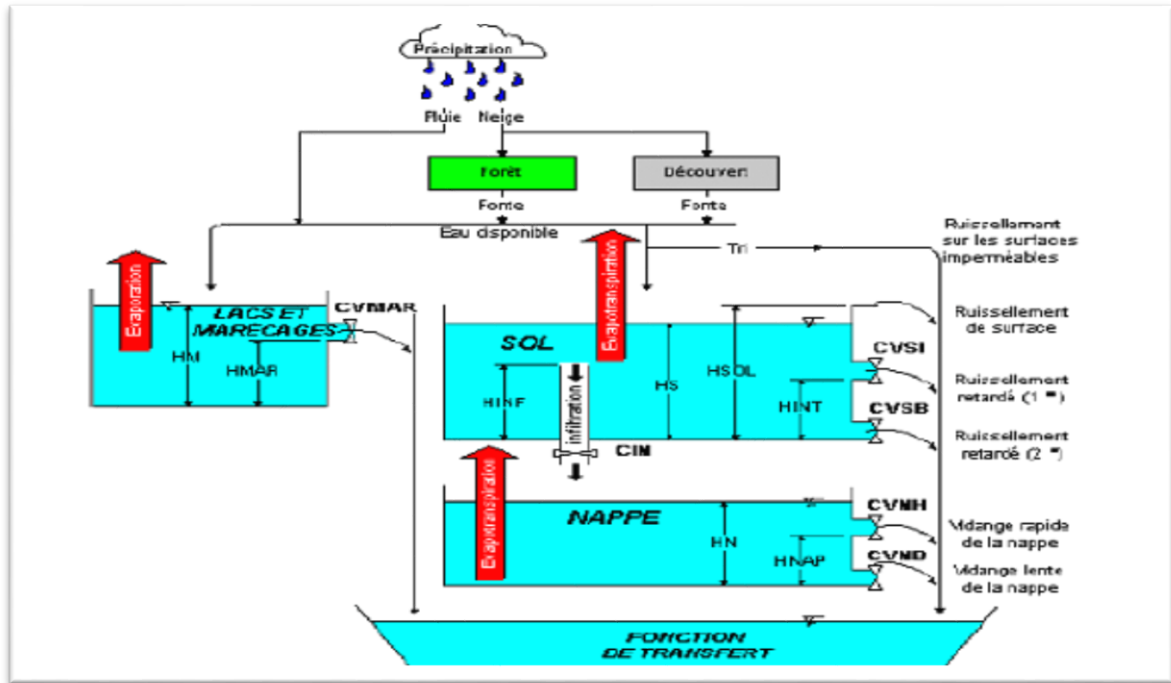


Figure II.2 : Fonction de production du modèle CEQUEAU.

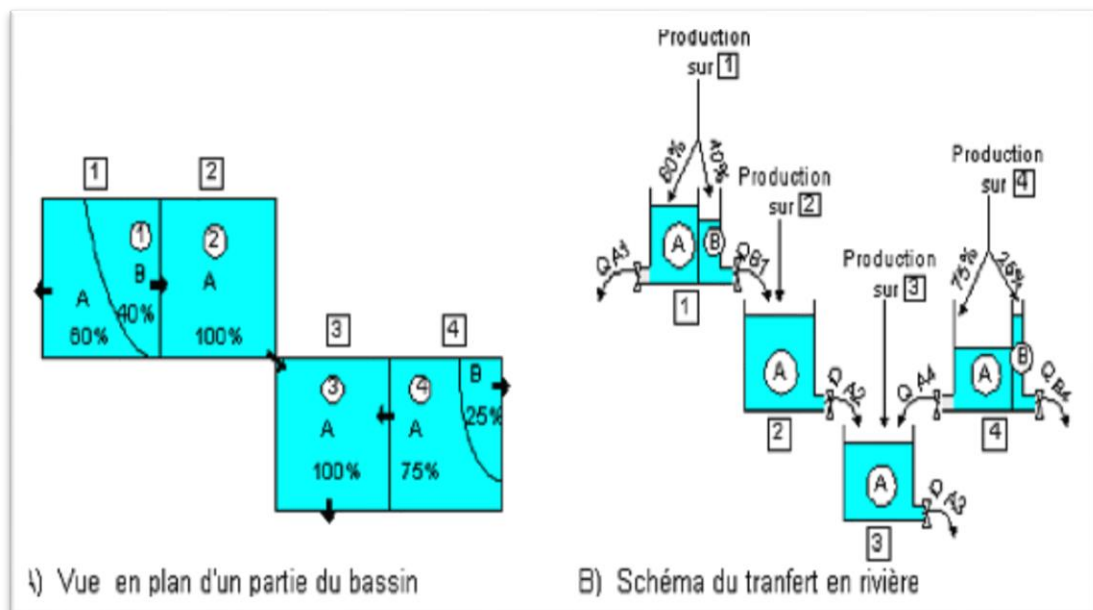


Figure II.3 : Fonction de transfert du modèle CEQUEAU.

Ce modèle nécessite un certain travail à l'amont comprenant l'acquisition des données météorologiques et topographiques et la mise en forme de celles-ci, il faut le signaler, n'est pas d'une complexité insurmontable. Il a été utilisé notamment au Canada où il a été conçu, en Amérique, en Europe et en Afrique, ce qui lui confère une certaine renommée.

De plus, ce modèle est relativement simple à manipuler pour un utilisateur ayant des notions suffisantes en analyse hydrologique.

Toutefois CEQUEAU est un modèle très intéressant pour des bassins de grandes tailles, au pouvoir intégrateur important, mais n'est que peu fiable sur de plus petites surfaces, ce qui n'est d'ailleurs pas sa vocation. Ceci provient du fait que CEQUEAU fonctionne avec des pas de temps trop importants pour certains phénomènes qui, à grande échelle ne sont guère notables mais s'avèrent de toute première importance pour des modélisations plus fines.

### **II.1.3. TOP MODEL**

TOPMODEL est un modèle semi-distribué destiné à reproduire le comportement hydro-morphologique d'un bassin versant. Ce modèle est encore utilisé et amélioré car sa relative simplicité et les bons résultats qu'il fournit sont autant de motivations à son développement. Ce modèle prédit, à chaque pas du temps, la distribution spatiale 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 quelques années, la participation des écoulements souterrains aux variations des débits des rivières, même en période de fortes précipitations a été reconnue comme étant capitale (Maison.2000).

L'index topographique est utilisé pour déterminer, en fonction de la topographie du bassin, la quantité d'eau destinée au ruissellement et celle restant pour l'infiltration. La structure de ce modèle est illustrée sur (figure II.4) avec  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  : niveaux dans les réservoirs ;  $m$  : un des paramètres du modèle ( Beven et Kirkby, 1979 in Perrin, 2000).



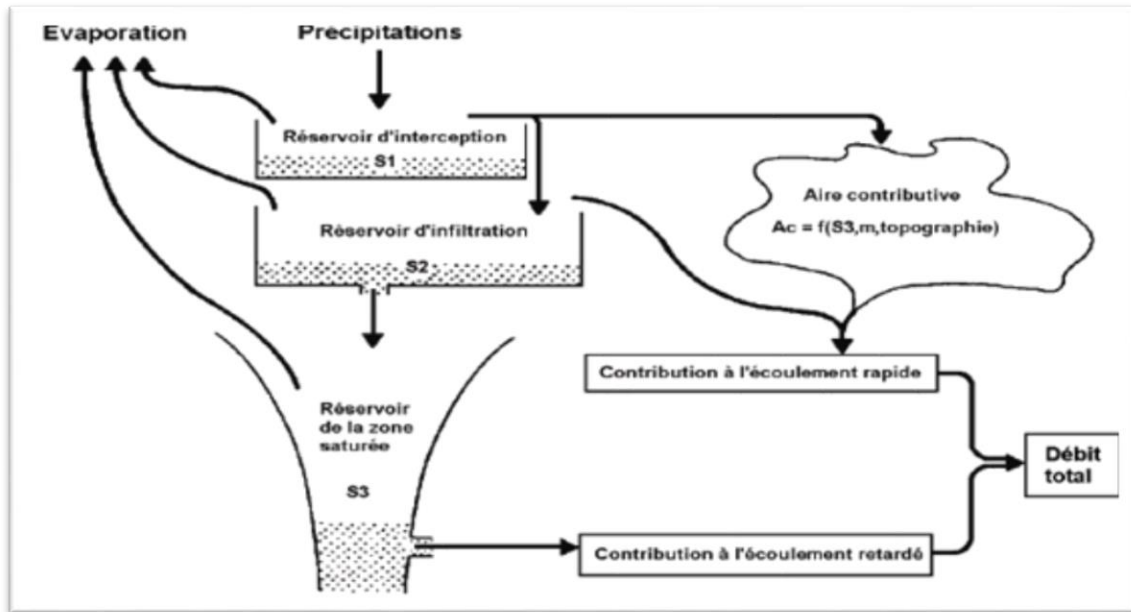


Figure II.4 : Représentation schématique de TOPMODEL

#### II.1.4. TOPMO

TOPMO est une variante du modèle TOPMODEL tel qu'il est décrit par Beven et Kirkby (1979). TOPMO est un modèle ne dépassant pas 8 paramètres libres.

P et E sont reçus par un réservoir d'interception dont la capacité maximale est le paramètre X3. Si ce réservoir déborde, il s'ensuit un écoulement Pn. Si au contraire, le contenu du réservoir ne permet pas de satisfaire la demande potentielle E, la différence En est reportée sur le réservoir S qui joue un rôle central dans le modèle. L'écoulement Pn est réparti selon le niveau du réservoir S entre ce dernier et un réservoir de routage quadratique R (paramètres X5 et X6). La demande En n'est satisfaite qu'à hauteur de Es en fonction du remplissage de S (paramètres X7 et X8). S se vidange selon une loi de type exponentiel, dépendant du paramètre X2, pour donner Qs. Le réservoir de routage R se vidange selon une loi quadratique, dépendant du paramètre X1, pour donner Qr. Un retard X4 est appliqué à la somme de Qs et de Qr pour donner le débit de sortie Q. (Berthier, 2005)

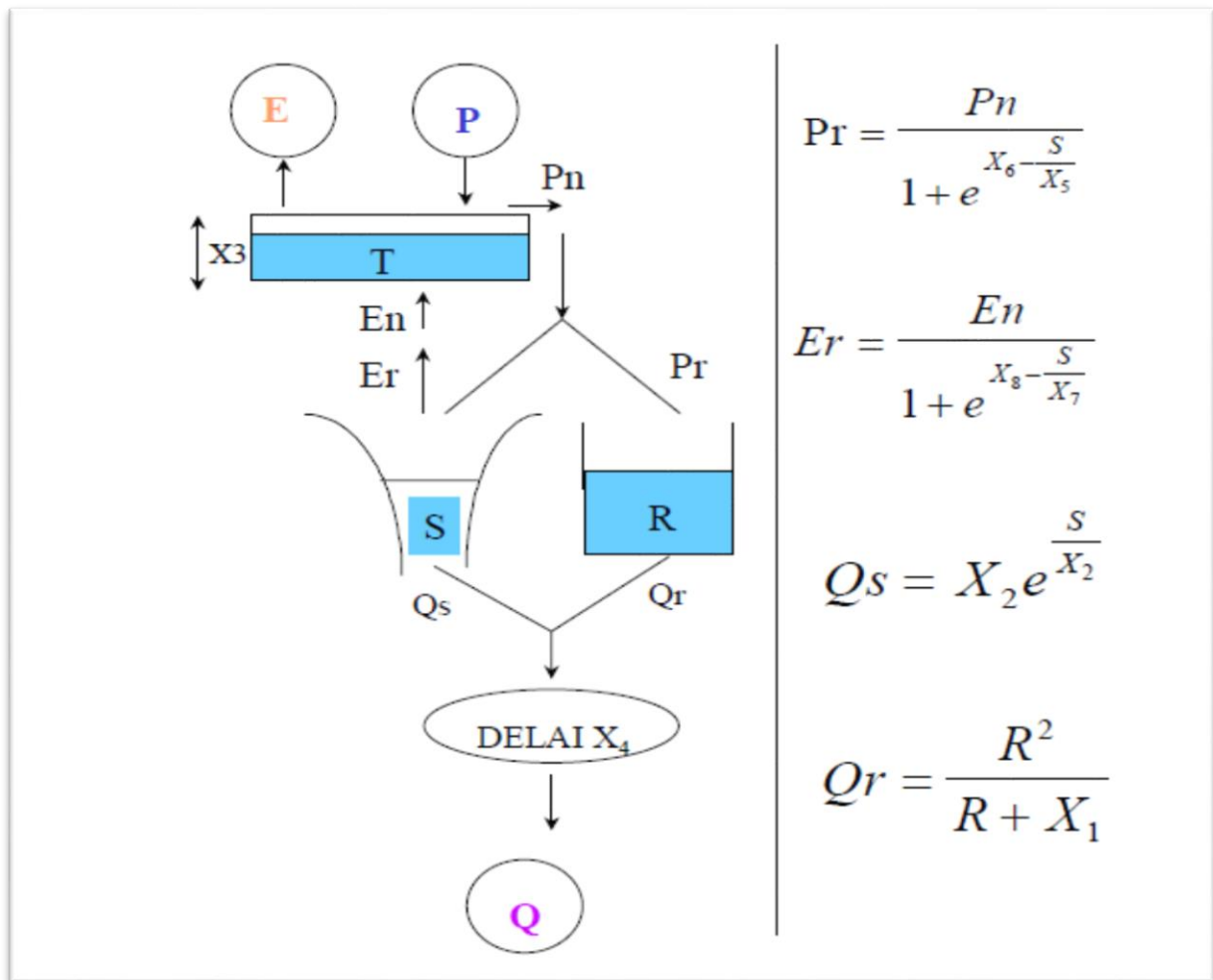


Figure II.5 : Représentation schématique de TOPMO

### II.1.5. HEC HMS

Ce logiciel a été développé par le HEC (Hydrologic Engineer Center) des USA my corps of Engineers. La première version de ce logiciel est apparue en 1995. Il s'agit d'un modèle pluie-débit, constitué par un ensemble de modèles hydrologiques qui permettent de décrire le fonctionnement d'un bassin versant de manière spatialisée. La géométrie du bassin versant peut être conceptualisée par un ensemble de sous unités hydrologiques liées entre elles par des éléments hydrauliques. Cette description se fait à l'aide d'outils géométriques prédéfinis. La description des pluies se fait par l'introduction d'observations faites sur des pluviographes ou bien de pluies synthétiques. Chacune des unités hydrologiques ainsi que chacun de ces éléments de liaison sont caractérisés par de multiples modèles de simulation hydrologique et hydraulique. Parmi ces modèles, on trouve :

- Les modèles de pertes par infiltration, retenue ou évapotranspiration qui permettent d'évaluer le ruissellement : modèle de perte initiale et a taux constant, modèle à déficit et a taux de perte constant, modèle basée sur le Curve Number (CN), modèle de Greenet Ampt.
- les modèles de ruissellement direct sur les versants : les modèles lies à la méthode de l'hydrogramme unitaire, le modèle de l'onde cinématique.
- les modèles des écoulements souterrains : le modèle constant, le modèle a récession exponentielle, le modèle à réservoir linéaire.
- les modèles d'hydrologie fluviale dont les équations de base sont celles des écoulements à surface libre : le modèle Muskingum, le modèle du décalage (la model), le modèle de l'onde cinématique, le modèle de Muskingum-Cunge, ces modèles prennent en compte la géométrie des tronçons (bifurcations, confluences)

#### **II.1.6. IHACRES**

Le modèle original (Jakeman et al.1990) n'ayant que six paramètres, ce modèle a été peu modifié par rapport au modèle initial. Un changement a toutefois été nécessaire pour pouvoir substituer l'évapotranspiration potentielle  $E$  à la température journalière utilisée dans le modèle original. Dans ces conditions on peut décrire le fonctionnement du modèle de la façon suivante : Un indice de saturation ( $s$ ) définit la quantité  $Pr$  orientée vers l'écoulement, en fonction d'un paramètre  $X2$ . La demande évaporatoire est satisfaite en fonction de ce même indice  $s$  (à l'aide d'un paramètre  $X6$ ).  $Pr$  est partagée en deux parties (fractions  $X5$  et  $1 - X5$ ), chacune transitant par un réservoir linéaire, ce qui permet de différencier l'écoulement généré par le bassin en une composante lente (paramètre  $X1$ ) et une composante rapide (paramètre  $X1 * X2$ , avec  $X2 > 1$ ). Les débits en sortie de ces deux réservoirs subissent un retard  $X4$  avant de former le débit à l'exutoire. Ces indications sont reprises dans la figure suivante.

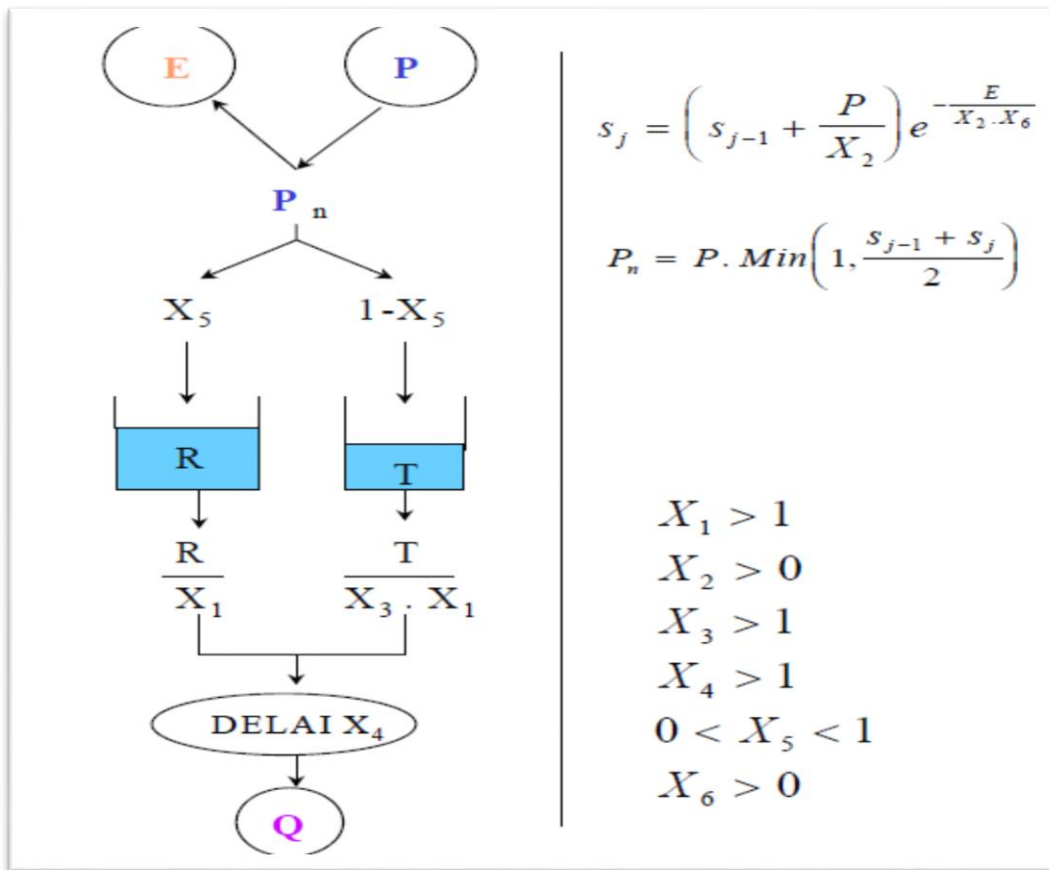


Figure II.6 : Représentation schématique de IHACRES

## II.2. Choix du modèle utilisé

Compte tenu de cette étude des modèles analysés et vu l'insuffisance de données spatialement réparties, la qualité moyenne de quelques mesures météorologiques disponibles, et puisque même les données disponibles ne donnent une idée que d'une partie du bassin, là où se trouve la station hydrométrique 021605.

Face à cette pénurie de données nous avons opté pour une approche conceptuelle globale et le choix du modèle hydrologique du Génie Rural (GR). En effet le modèle GR est un modèle pluie-débit qui a été testé dans les régions arides et semi-arides, avec un intérêt particulier sur la gestion et l'exploitation rationnelle des ressources en eau.

Les objectifs de ce modèle sont nombreux citons à titre d'exemple :

- le modèle GR est un modèle complet et simple, donc adapté théoriquement à n'importe quel type de climat et notamment à celui des zones arides et semi arides, en plus il a la capacité de simuler aussi les pertes, l'écoulement de surface et l'écoulement souterrain;

- la fiabilité des résultats obtenus lors de son application à des sous bassins versants méditerranéens (Tafna (Bouanani, 2010), Mekerra, (Bourek, 2010), Bassin de Oued Sikkak (Bouanani et al., 2010) et Algérie septentrionale (Kabouya, 1990) nous a encouragés à appliquer ce modèle.

Pour cela, nous allons présenter dans ce qui suit, le modèle du Génie Rural (GR), que nous appliquerons sur les données du bassin de l'Oued Sébaou.

### **II.3. Modèle GR**

#### **II.3.1. Historique**

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

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

La version GR3J (Edijatno, 1987 ; Edijatno et Michel, 1989) a servi, principalement, comme modèle de base pour l'élaboration des autres versions au pas de temps journalier ainsi qu'au pas de temps mensuel. GR2 (Edijatno et Michel, 1989), GR3 (Michel, 1989), GR3M (Kabouya, 1990) et GR2M (Makhlouf, 1994) Les versions qui semblent les plus performantes et la plus robuste est (GR4J) proposée par Perrin (2000), GR5J (Le Moine 2008) et GR6J. (Pushpalatha 2013)

#### **II.3.2. Présentation du modèle GR**

Les modèles globaux offrent à l'utilisateur un choix très attractif, car il présente une structure très simplifiée, il ne demande pas trop de données, faciles à utiliser et à calibrer. La représentation du processus hydrologique est très simplifiée. Il peut souvent mener à des résultats satisfaisants. Un exemple de ce type de modèle est le modèle GR (Génie Rural) (CEMAGREF) que nous allons utiliser dans cette étude. C'est un modèle à réservoir, il

fonctionne pour différents pas de temps annuel GR1A, mensuel GR2M et journalier GR4J, GR5J et GR6J.

Pour cela, nous allons présenter dans ce qui suit, le modèle du Génie Rural (GR), que nous appliquerons sur les données de notre bassin. (Gherissi, 2012)

### **II.3.2.1. Objectifs de développement**

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

### **II.3.2.2. Mode de développement**

Bien que ces modèles soient parfois apparentés à des modèles conceptuels du fait de leur structure à réservoirs, ce sont en fait des modèles empiriques: leur construction s'est faite sur la base de grands jeux de données et en découvrant progressivement la structure permettant de reproduire au mieux le comportement hydrologique du bassin versant (c'est-à-dire sa réponse aux pluies).

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

- représentation globale du bassin versant ;
- approche empirique de développement sans recours a priori à la physique des écoulements ;
- augmentation progressive de la complexité de la structure du modèle en partant de structures simples;
- justification de la complexité de la structure d'un modèle par ses performances;

- recherche de structures de modèle générales (applicables à des bassins variés);
- utilisation de larges échantillons de bassins versants pour tester les performances des modèles (Andréassian *et al.*, 2006);
- évaluation d'un modèle par comparaison à d'autres structures du modèle.

### **II.3.2.3. Principales caractéristiques**

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

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

- au niveau de l'espace : les modèles GR sont globaux, c'est-à-dire que, tout en reconnaissant l'extraordinaire hétérogénéité de tout bassin versant, ils considèrent le bassin versant comme un tout. Les tentatives de distribution progressive n'ont, jusqu'à présent, pas abouti à des résultats intéressants. C'est le comportement de la moyenne spatiale qui est étudié en priorité ;

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

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

### **II.3.3. Description du modèle pluie-débit annuel GR1A**

#### **II.3.3.1. Introduction**

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

gestion de la ressource en eau. La principale version, que nous présentons ici, est celle proposée par Mouelhi (2003) et Mouelhi *et al.* (2006a).

**II.3.3.2. Description mathématique**

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

$$Q_k = P_k \left\{ 1 - \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{0.7P_k + 0.3P_{k-1}}{X.E} \right)^2 \right]^{0.5}} \right\} \dots\dots\dots \text{(II.1)}$$

Où X est l'unique paramètre du modèle.

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

**II.3.3.3. Paramètre**

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

**II.3.4. Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M**

**II.3.4.1. Introduction**

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



$X_2$ , coefficient d'échanges souterrains (mm). Le modèle est à pas de temps mensuel. Il fonctionne autour de deux réservoirs, un de production (ou réservoir sol) et un de routage sur lesquels les ajustements et interception se font différemment sur les entrées. Le modèle utilise en entrées la pluie moyenne et l'ETP, et fournit en sortie le débit (Sossou, 2011). Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1980, avec des objectifs d'applications dans le domaine des ressources en eau et des étiages.

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

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

#### II.3.4.2. Description mathématique

Un schéma de la structure est donné à la (Figure : II.7).  $P_k$  est la pluie mensuelle du mois  $k$  et  $E$  l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même mois calendaire. Les équations qui régissent le modèle sont les suivantes :

##### ➤ Production

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

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

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

$$P_1 = P - P_s \dots\dots\dots(\text{II.3})$$

et le contenu du réservoir est actualisé :

$$S' = S_k + P_s \dots\dots\dots(\text{II.4})$$

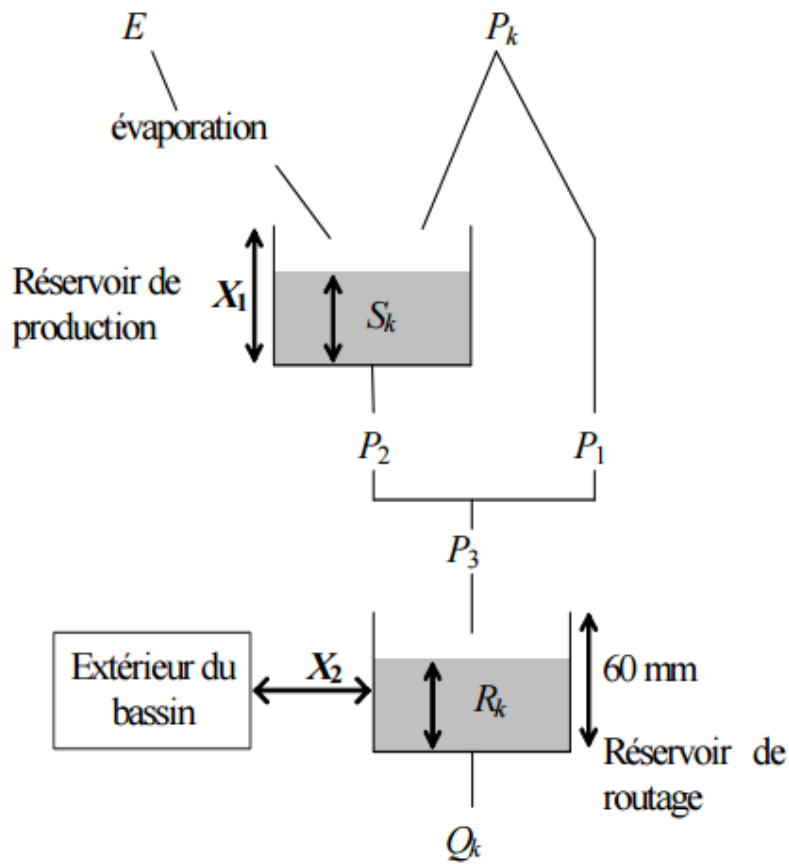


Figure II.7 : Schéma de la structure du modèle GR2M.

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

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

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

$$S'' = S' - E_s \dots\dots\dots(\text{II.6})$$

➤ **Percolation**

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

$$P_2 = S'' \cdot \left\{ 1 - \left[ 1 + \left( \frac{S''}{X_1} \right)^3 \right]^{-1/3} \right\} \dots\dots\dots(\text{II.7})$$

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

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

➤ **Routage et échange avec l'extérieur non atmosphérique**

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

$$P_3 = P_1 + P_2 \dots\dots\dots(\text{II.9})$$

Le niveau  $R_k$  dans le réservoir devient alors  $R'$  :

$$R' = R_k + P_3 \dots\dots\dots(\text{II.10})$$

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

$$F = (X_2 - 1) \cdot R' \dots\dots\dots(\text{II.11})$$

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

$$R'' = X_2 - R' \dots\dots\dots(\text{II.12})$$

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

$$Q_k = \frac{R''^2}{R'' + 60} \dots\dots\dots(\text{II.13})$$

Le contenu du réservoir est enfin actualisé par :

$$R_{k+1} = R'' + Q_k \dots\dots\dots(\text{II.14})$$

**II.3.4.2. Paramètres**

Le modèle a deux paramètres optimisables :

**X<sub>1</sub>** : capacité du réservoir de production (mm)

**X<sub>2</sub>** : Coefficient d'échanges souterrains (-)

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

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

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

### II.3.5. Description du modèle pluie-débit journalier GR4J

#### II.3.5.1. Introduction

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

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

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

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

#### II.3.5.2. Description mathématique

Un schéma de la structure est donné à la (Figure : II.8).  $P_k$  est la pluie journalière du jour  $k$  et  $E$  l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même jour calendaire.

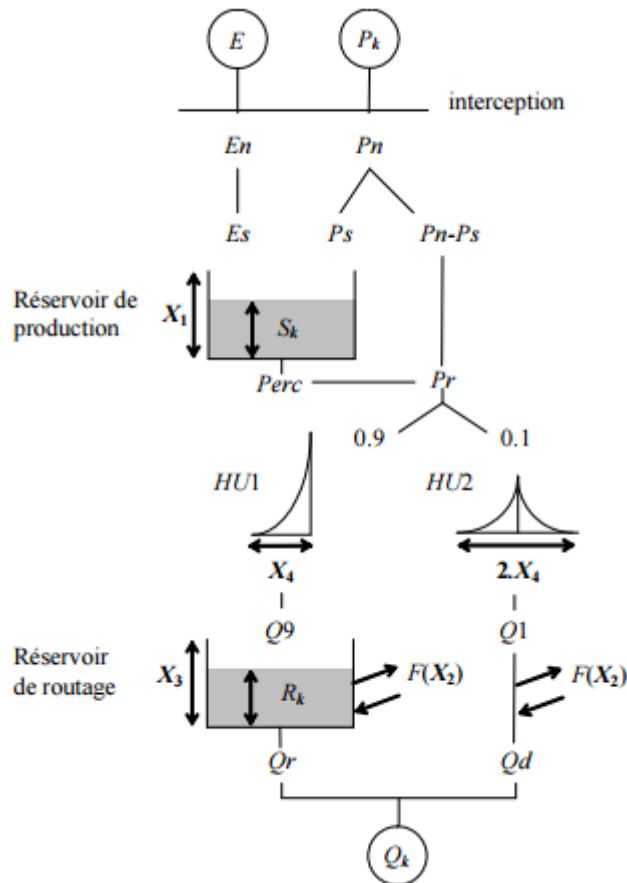


Figure II.8 : Schéma de la structure du modèle GR4J.

➤ **Neutralisation**

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

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

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

➤ **Fonction de rendement**

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

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

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

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

$$Es = \frac{S'_k \cdot \left( 2 - \frac{S_k}{X_1} \right) \cdot \tanh \left( \frac{En}{X_1} \right)}{1 + \left( 1 - \frac{S_k}{X_1} \right) \cdot \tanh \left( \frac{En}{X_1} \right)} \dots\dots\dots(\text{II.18})$$

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

$$S' = S'_k + P_s - E_s \dots\dots\dots(\text{II.19})$$

➤ **Percolation**

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

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

Par suite, le contenu du réservoir devient :

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

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

$$Pr = Perc + (Pn - P_s) \dots\dots\dots(\text{II.22})$$

➤ **Hydrogrammes unitaires**

$P_r$  est divisée en deux composantes d'écoulement, 90 % étant routés par un hydrogramme unitaire  $HU1$  et un réservoir de routage et 10 % par un hydrogramme unitaire symétrique  $HU2$ .  $HU1$  et  $HU2$  dépendent du même paramètre  $X_4$ , temps de base de  $HU1$  exprimé en jours.

Les ordonnées des hydrogrammes sont calculées à partir des courbes en S notées respectivement  $SH1$  et  $SH2$ , qui correspondent aux fonctions cumulées de l'hydrogramme.  $SH1$  est définie en fonction du temps par :

Pour  $t \leq 0$ ,  $SH1(t) = 0$  .....(II.23)

Pour  $t \ 0 < t < X_4$ ,  $SH1(t) = \left(\frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}}$  .....(II.24)

Pour  $t \geq X_4$ ,  $SH1(t) = 1$  .....(II.25)

$SH2$  est définie de façon similaire par :

Pour  $t \leq 0$ ,  $SH2(t) = 0$  .....(II.26)

Pour  $t \ 0 < t \leq X_4$ ,  $SH2(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}}$  .....(II.27)

Pour  $X_4 < t < 2.X_4$ ,  $SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}}$  .....(II.28)

Pour  $t \geq 2.X_4$ ,  $SH2(t) = 1$  .....(II.29)

Les ordonnées de  $HU1$  et  $HU2$  sont alors calculées par :

$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j - 1)$  .....(II.30)



$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j-1) \dots\dots\dots(II.31)$$

A chaque pas de temps  $k$ , les sorties  $Q9$  et  $Q1$  des deux hydrogrammes correspondent à la convolution des pluies antérieures par la clé de répartition donnée par l'hydrogramme discrétisé et sont calculées par :

$$Q9(k) = 0.9 \cdot \sum_{j=1}^l UH1(j) \cdot Pr(k-j+1) \dots\dots\dots(II.32)$$

$$Q1(k) = 0.1 \cdot \sum_{j=1}^l UH2(j) \cdot Pr(k-j+1) \dots\dots\dots(II.33)$$

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

➤ **Fonction d'échange avec l'extérieur non atmosphérique**

Un échange souterrain en eau est calculé par :

$$F = X_2 \cdot \left( \frac{R_k}{X_3} \right)^{7/2} \dots\dots\dots(II.34)$$

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

➤ **Réservoir de routage**

Le niveau dans le réservoir de routage est modifié en ajoutant la sortie  $Q9$  de l'hydrogramme  $HU1$  et  $F$  :

$$R' = \max(0; R_k + Q9(k) + F) \dots\dots\dots(II.35)$$

Il se vidange ensuite en une sortie  $Qr$  donnée par :

$$Qr = R' \cdot \left\{ 1 - \left[ 1 + \left( \frac{R'}{X_3} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\} \dots\dots\dots(II.36)$$

Le niveau dans le réservoir devient :

$$R_{k+1} = R' - Qr \dots\dots\dots(\text{II.37})$$

➤ **Ecoulement total**

La sortie Q1 de l'hydrogramme HU2 est soumise au même échange pour donner la composante d'écoulement Qd :

$$Qd = \max (0 ; Q1(k) + F) \dots\dots\dots(\text{II.38})$$

Le débit total Q est alors donné par :

$$Q_k = Qr + Qd \dots\dots\dots(\text{II.39})$$

**II.3.6. Paramètres**

Le modèle GR4J ne comporte que quatre paramètres à caler :

**X1** : capacité du réservoir de production (mm)

**X2** : coefficient d'échanges souterrains (mm)

**X3** : capacité à un jour du réservoir de routage (mm)

**X4** : temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 (j)

Sur un large échantillon de bassins versants, Andreassian *et al.*, 2007 ont obtenu les valeurs données dans le Tableau II.2 suivant.

*Tableau II.2 : Valeur des paramètres du modèle GR4J obtenues sur un large échantillon de bassins versants.*

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

**II.3.7. Description des modèles pluie-débit journalier GR5J ET GR6J**

Les modèles GR5J (Le Moine 2008) et GR6J (Pushpalatha 2013) sont des évolutions du modèle GR4J. Ils sont donc basés sur la même structure, à savoir une association des deux

réservoirs de production et de routage, de deux hydrogrammes unitaires et une fonction d'échange souterrain. Il existe des différences au niveau de la fonction d'échange. Pour le modèle GR5J, un paramètre libre adimensionnel  $X_5$  est ajouté à cette fonction d'échange ; ce paramètre indique le sens de l'échange avec la nappe et dépend du niveau  $R$  du réservoir de routage. Le paramètre ajouté au modèle GR6J est lié à l'ajout d'un réservoir exponentiel  $R_2$  ; il s'agit de sa capacité en mm.

$X_5$  : fonction d'échange en eau améliorée.

$X_6$  : coefficient de vidange exponentielle du second réservoir de routage.

Le modèle GR5J, grâce à son paramètre supplémentaire, prend mieux en compte les effets d'échange d'eau avec la nappe par rapport au modèle GR4J, tandis que le modèle GR6J réalise de meilleures simulations en étiage grâce à son réservoir exponentiel, que GR4J.

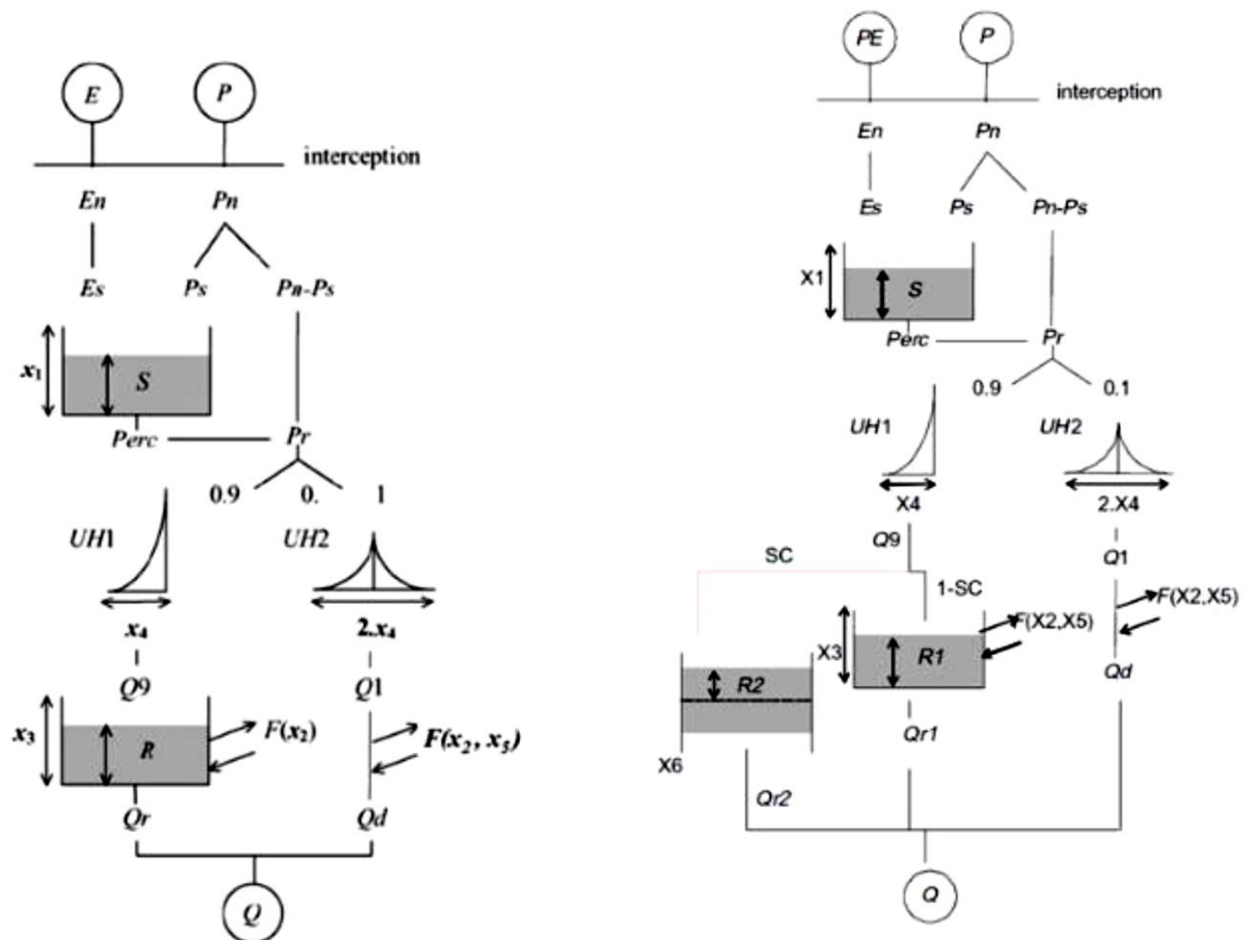


Figure II.9 : Schéma synoptique des modèles GR5J et GR6J .

## **II.4. Le calcul des simulations des débits**

### **II.4.1. Introduction**

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

### **II.4.2. Le calage du modèle**

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

- **Le calage**

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

- **Le contrôle**

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

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

Les erreurs calculées donnent une estimation des performances du modèle.

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

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

$$Eq = \sum_{t=1}^n (Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t))^2 \dots\dots\dots(\text{II.40})$$

Avec :

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

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

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t))^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})^2} \dots\dots\dots(\text{II.41})$$

Tel que :

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

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

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

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \dots\dots\dots(\text{II.42})$$

Avec :

- $\alpha = \frac{\sqrt{(\overline{Q_{sim}(t)} - \overline{Q_{sim}(t)})^2}}{\sqrt{(\overline{Q_{obs}(t)} - \overline{Q_{obs}(t)})^2}}$  présente le rapport des écarts types,
- $\beta = \frac{\overline{Q_{sim}}}{\overline{Q_{obs}}}$  est le biais,
- r est la corrélation entre Qobs et Qsim, donnée par :

$$r = \frac{1}{n} \sum \frac{(\overline{Q_{obs}(t)} - \overline{Q_{obs}(t)})(\overline{Q_{sim}(t)} - \overline{Q_{sim}(t)})}{\sigma_{obs}\sigma_{sim}} \dots\dots\dots(\text{II.43})$$

Où :

- $\sigma_{obs}$  est la variance des débits observés,
- $\sigma_{sim}$  est la variance des débits simulés.

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

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

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs}}(t) - Q_{\text{sim}}(t))^2}{n}} \dots\dots\dots (\text{II.44})$$

Pour la validation nous avons plusieurs critères de validation :

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

## Conclusion

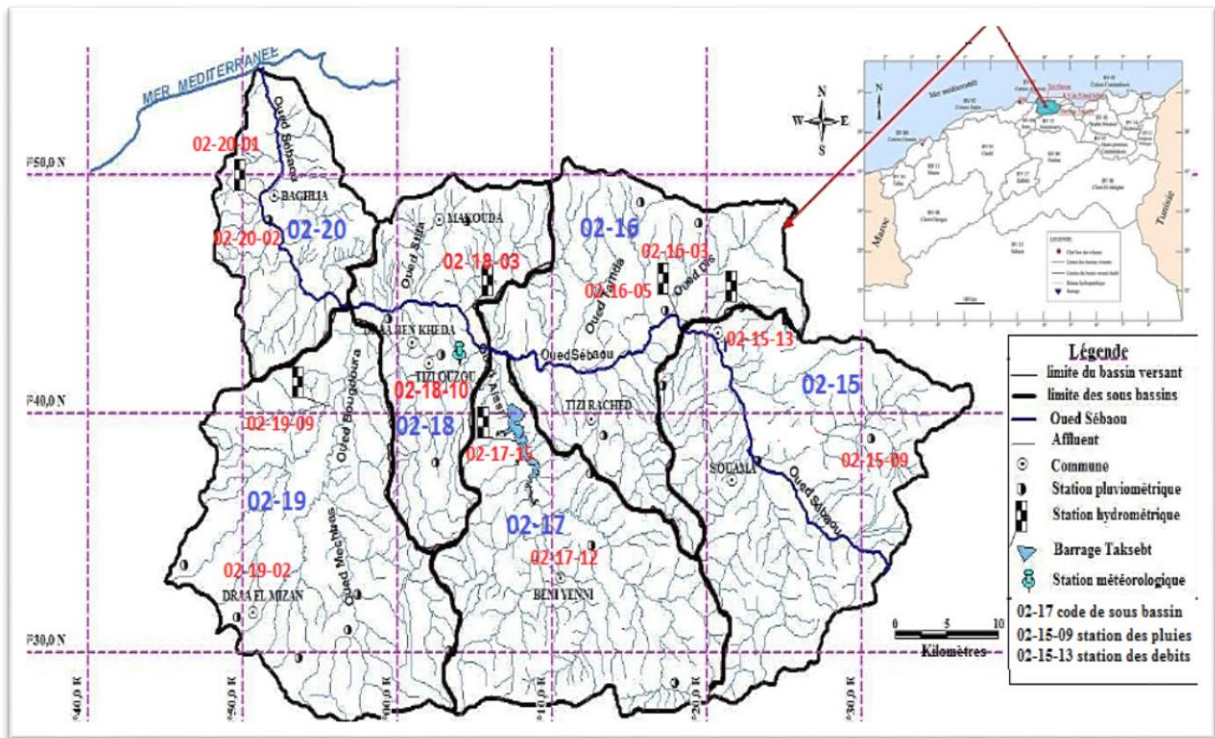
Les modèles conceptuels globaux sont les modèles les plus utilisés en modélisation pluie-débit, ils utilisent une description de plus en plus complète du bassin versant et des termes du cycle hydrologique. Cependant, du fait du grand nombre de paramètres qui interviennent dans les processus hydrologiques et la complexité de ces bassins, cette approche pointue n'apporte pas forcément des résultats meilleurs. C'est pourquoi nous avons choisi un modèle hydrologique global, comportant peu de paramètres et pouvant rendre compte du comportement hydrologique du bassin. Les modèles du CEMAGREF, GR1A, GR2M , GR4J, GR5J et GR6J ont été retenus. L'objectif est de déterminer les paramètres caractéristiques de chacun de ces modèles pour un bassin versant donné.

***CHAPITRE III***  
***PRESENTATION DE LA***  
***ZONE D'ETUDE***



### III.1. Situation Géographique et topographique

Le bassin versant de l'oued Sébaou appartient au Tell septentrional. Il se positionne entre les latitudes Nord ( $36^{\circ}30'$  et  $37^{\circ}00'$ ) et les longitudes Est ( $03^{\circ}30'$  et  $04^{\circ}30'$ ), à une centaine (100) de kilomètres à l'Est-Sud -Est d'Alger .Il s'intègre dans les bassins versants côtiers Algérois de code (02), selon la nomenclature de l'agence nationale des ressources hydriques (ANRH) (FigureIII.1).

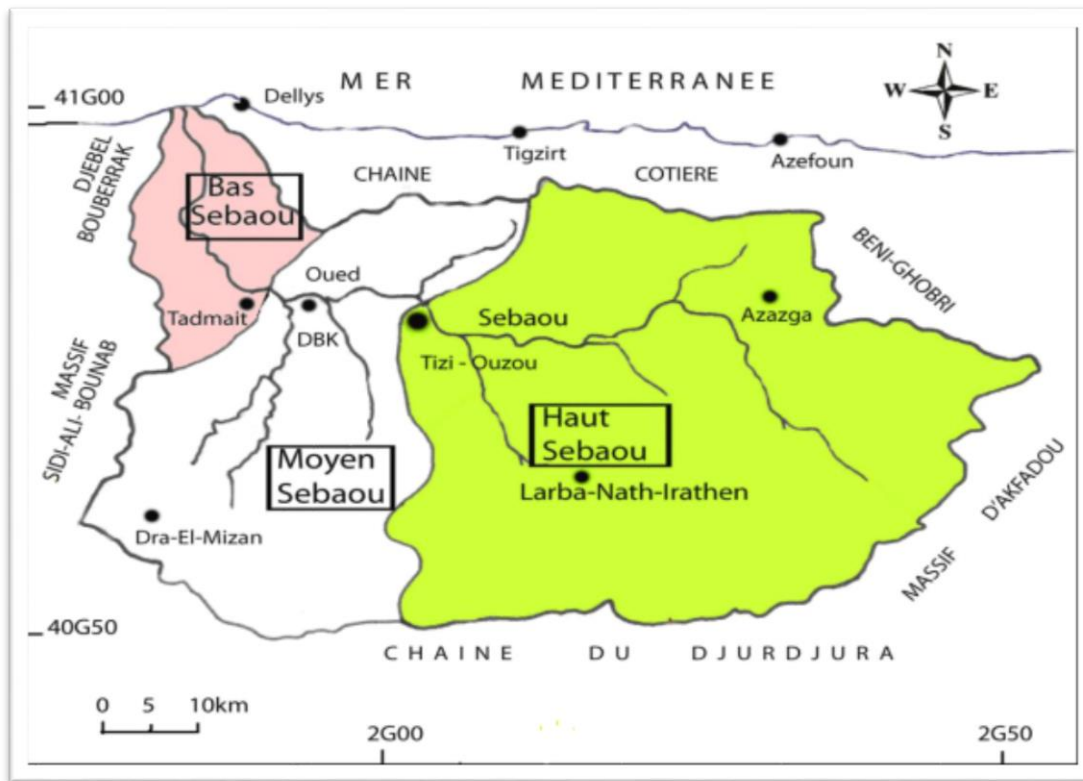


Source ANRH

Figure III.1 : Présentation géographique du bassin versant Sébaou

Il s'étend sur une superficie de 2500 km<sup>2</sup> dont 80% environ de celle-ci correspondent à la surface issue du nouveau découpage administratif de la wilaya de Tizi-Ouzou.

Le Bassin Versant de l'oued Sébaou (FigIII.1) est limité : Au Nord par la chaîne côtière du méditerranéenne, au Sud par la chaîne du Djurdjura (wilaya de Bouira, à l'Est par les massifs d'Akfadou et de Béni-Ghobri (wilaya de Bejaia) et à l'Ouest par le massif de Sidi Ali Bounab et Djebel bouberak (wilaya de Bumerdes). Comprend trois grand sous bassin : Haut Sebaou contient les Sb : 02-15, 02-16, 02-17). Moyenne Sebaou contient les Sb 02-18, 02-19. Et le Bas Sebaou représenté par le Sb : 02-20 (FigIII.2).



Source ANRH

Figure III.2 : Décomposition du bassin versant Sébaou

### III.2. Etude géomorphologique

La climatologie, l'hydrologie de surface et souterraine sont étroitement tributaires des caractéristiques physiques, morphologiques de reliefs et morphométriques des bassins versants. Aussi, il apparaît nécessaire voir indispensable de quantifier ces paramètres.

#### III.2.1. Les grands ensembles morphologiques

Le paysage de la région d'étude est diversifié, caractérisé par un relief montagneux très accidenté. Les chapelets de surélévations rudes et accentuées apparaissent dans toute la région.

Le grand bassin de Sébaou est limité au Nord par la chaîne littorale et au sud par le massif Kabyle. Cette double masse surélevée délimite un couloir étroit d'orientation générale Est-Ouest, formant la vallée de l'oued de Sébaou, qui s'étend d'Azazga à l'Est jusqu'au Dellys à l'Ouest. Nous distinguons trois unités morphostructurales nettement différenciées :

### **III.2.1.1. La chaîne Djurdjura**

Elle fait partie de la dorsale calcaire des Maghribides , délimite au sud notre domaine d'étude et représenté par un ensemble morphologique très compétant d'âge secondaire et tertiaire .

Cette chaîne culmine au sommet de Lalla Khedidja (2308m) et au Ras Timedouine (2503m) sous forme d'un arc, très peu tendu et étroit qui s'achève à l'est par un élément isolé, le massif de Chellata.

Elle se compose de quatre unités qui se succèdent du Nord ver le Sud :

- L'unité des kouriet.
- L'unité de res Timadouine et de Tikjda.
- L'unité d'Ajiba.
- L'unité de Lalla Khedidja.

Les unités d'Ajiba et Lalla Khedidja proviennent d'une zone située au nord des kouriet. Elles se sont déplacées vers le sud entre le Priabonien et l'Oligocène supérieur, et ont recouvert les unités méridionales de Ras Timadouine et de Tikjda. Des écaillages ultérieurs ont abouti au pincement de ces unités.

### **III.2.1.2. Le massif de Kabylie**

Morphologiquement, le massif de la grand kabylie constitue un ensemble homogène, qui domine le bassin de Tizi-Ouzou au nord et assure une transition la chaîne de Djurdjura au sud. Il est limité à l'est par l'affleurement des flysch du haut Sébaou et à l'ouest par les flysch supra-kabyles.

Les sommets forment un bombement à grand rayon de courbure selon l'axe orienté Est-Ouest et les altitudes se relèvent d'Ouest 600m en Est 1278m.

Cet ensemble morphologique est caractérisé par des formations plus au moins tendres et compartimentées d'âges récents aux anciens.

### **III.2.1.3. Le synclinale de Tizi-Ouzou**

C'est le seul matériel autochtone dans la région, représenté essentiellement par les grés et les limons du miocène 'Post-nappe' (M.Ben Hassainne ,1980).

Dans sa partie médiane s'allonge une série de chaînons de socle aligné, que l'oued Sébaou traversent orthogonalement, il s'agit de :

Alignement Nord :

- Massif de Naciria l'Ouest ;
- Massif de Draà Karouche à l'Est ;
- Alignement Sud :
- Sidi Ali Bounab, Belloua à l'Ouest ;
- massif d'Aïssa Mimoun à l'Est ;

Et à l'intérieur de cette cuvette, s'étale la plaine alluviale du Sébaou, qui se présente sous forme d'une bande étroite à fond plat orienté E-W, constituée d'un remplissage alluvionnaire d'âge quaternaire.

Et à l'intérieur de cette cuvette, s'étale la plaine alluviale du Sébaou, qui se présente sous forme d'une bande étroite à fond plat orienté E-W, constituée d'un remplissage alluvionnaire d'âge quaternaire.

### **III.2.2. Lithologie**

La perméabilité du sol et de sous-sol d'un bassin versant est liée à la nature géologique qui conditionnera l'infiltration, le ruissellement ainsi que l'évaporation.

Mises à part les formations perméables de la chaîne calcaire de la plaine alluviale de l'oued Sébaou, les autres formations telles que celles du socle Kabyle, de Miocène post nappe et des flysch qui occupent la majeure partie du bassin versant, sont généralement "imperméable".

### **III.2.3. Végétation**

Dans notre secteur d'étude la végétation est de type méditerranéen. Le couvert végétal joue un rôle important dans l'amortissement des crues en réduisant et en freinant le ruissellement superficiel, ainsi la perméabilité des terrains est liée à leur nature lithologique

La végétation de la région d'étude est de type méditerranéen, caractérisée dans son ensemble par trois étages bioclimatiques bien distincts :

- **Les cultures** : elles sont concentrées dans la plaine et représentées par l'arboriculture et les mirifiques champs des cultures maraîchères, auxquelles s'ajoutent laurier rose et le roseau dominant les zones incultes et inondables.
- **Les maquis** : caractérisant en particulier les zones intermédiaires, constitués essentiellement de très denses champs d'oliviers parcelles de figuiers et par quelque peuplement de chêne liège et de chêne vert, complète par une végétation arbustive assez basse qui reflète l'état de dégradation de la végétation dans la région.
- **Les forêts** : occupant les zones montagneuses et représentées généralement par le chêne vert, le chêne liège et le pin d'alpe.

Malgré sa diversification, le couvert végétal de notre région d'étude demeure très dégradé et n'occupe que 19%(soit 55025 ha) de la surface totale. Cette dégradation due indubitablement à l'activité humaine (défrichement, coupes, incendies.....) expose la région à une forte érosion et une déperdition accélérée des sols fertiles surtout en haute montagne.

#### **III.2.4. Réseau hydrographique**

Le bassin versant du Sébaou représente un réseau hydrographique très développé. Le drainage très dense s'effectue par une multitude de torrents plus ou moins long.

Les torrents de rive droite proviennent de la chaîne littorale au nord du bassin versant et ne dépassent pas une quinzaine de kilomètres de long. L'oued Dis qui présente le plus fort débit prend sa source au Dj .Tamgout à 1278m d'altitude et débouche dans l'oued Sébaou juste après le premier coude majeur de l'oued à hauteur du village de Freha.

Les torrents de la rive gauche naissant dans le socle de la grande Kabylie :

- L'oued Sébaou lui-même et ses deux principaux affluent sud .prennent naissance dans la chaîne du Djurdjura.
- L'oued Bougdoura prend sa source à 1900m d'altitude. le profil longitudinal très relevé dans la section amont, s'abaisse rapidement, et au contact de la plaine, s'insinue entre les inters fleuves.
- L'oued Aissi prend sa source à 2000m d'altitude. C'est l'affluent qui a le plus fort débit et qui est responsable des modifications du tracé du lit de l'oued Sébaou. En effet l'oued Aussi débouche dans l'oued Sébaou juste en amont des gorges du Belloua.

- L'oued Sébaou débute à l'Est de la chaîne du Djurdjura par l'intermédiaire de quatre torrents qui naissent entre le col de Tirourda à 2200m d'altitude le col de Chellata à 2100m d'altitude.

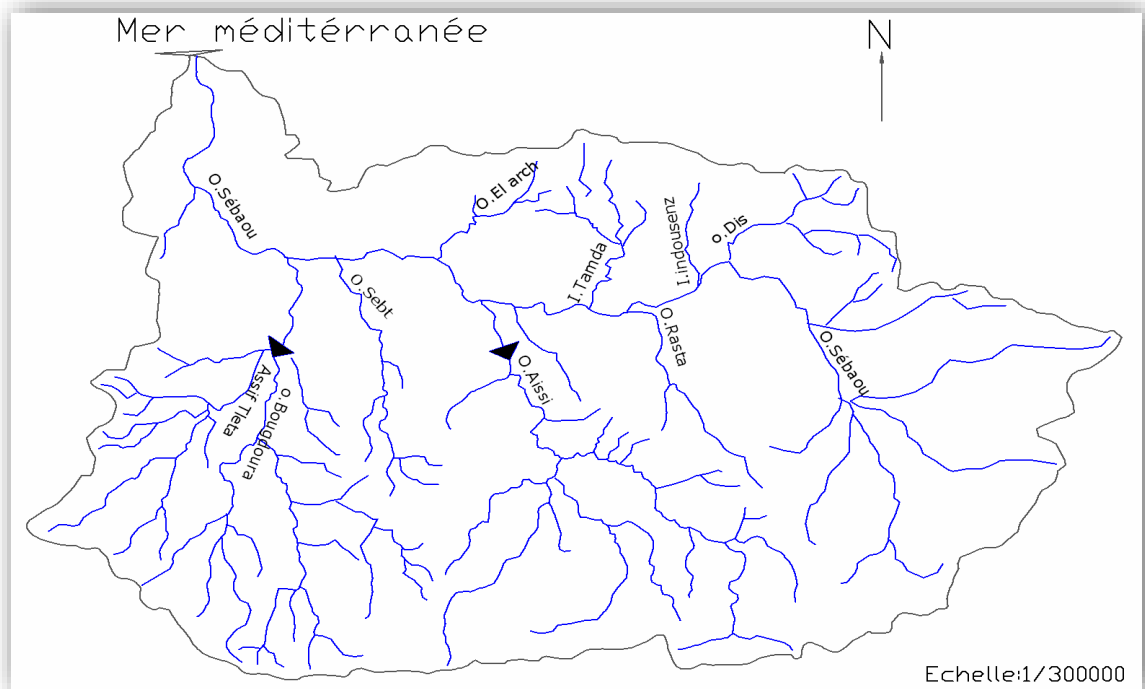
Les quatre torrents confluent après cinq kilomètres de parcours pour former le haut Sébaou, que les kabyles nomment Acif n'Boubhir.

Dans la haute vallée, l'oued suit une direction SSE-NNW, jusqu'à un premier coude majeur, localisé entre Azzazga et Freha.

Dans la moyenne vallée, l'oued coule suivant une direction Est-Ouest dans le synclinal Miocène de Tizi-Ouzou.

Dans la basse vallée, on assiste à une nouvelle orientation du tracé. Vers Tadmait l'oued effectue un nouveau coude majeur et se met à couler suivant une direction parallèle à celle de sa direction amont, pour déboucher en mer, à l'Ouest de Dellys.

Dans cette section la terrasse la plus basse extrêmement étendue envahit toute la plaine alluviale, l'oued n'est plus adapté à la structure géologique dans cette région car il coupe en travers la chaîne littorale, et les chaînons côtiers (Benhassaine, 1980).



Source ANRH

Figure III.4 : Réseau hydrographique du bassin versant du Sébaou

### III.2.5. Les paramètres physiques et géomorphologiques du bassin versant

Chaque cours d'eau draine une certaine surface de terrain appelée bassin versant. Le bassin versant fonctionne donc comme un collecteur chargé de recueillir les précipitations et de les transporter par écoulement vers le point le plus bas appelé exutoire. Cette transformation est plus ou moins rapide suivant les caractéristiques physiques du bassin.

La morphométrie du bassin fait partie des facteurs permanents, leur variation influe sur les modalités des écoulements superficiels et leurs analyse permettra une meilleure compréhension des causes de variation des régimes hydrogéologiques.

#### III.2.5.1. Paramètre géométriques

Le bassin versant de la vallée de Sébaou (code 02 au répertoire de l'ANRH) subdivisé en 06 sous bassin réparties de façon inégale sur le Haut, Moyen, le Bas Sébaou figure 04 Cette répartition est représentée dans le tableau n°01.

**a) La surface :**

La surface d'un bassin versant est l'aire géographique délimitée par la ligne de crêtes bordant le bassin. A l'intérieur de cette surface l'eau précipitée est drainée et orientée par un réseau hydrographique vers l'exutoire. la surface influe sur le processus de la formation de l'écoulement.

Le bassin versant de la vallée de Sébaou couvre une superficie  $S = 2500 \text{ km}^2$ .

**b) Le Périmètre :**

Le périmètre est défini par la ligne de crêtes formant le contour du bassin versant. Le périmètre du bassin versant de l'oued Sébaou est  $P = 250.4 \text{ km}$ .

Tableau III.1 : Répartition des superficies par sous bassin

	Code des sous bassins versant de sébaou	Superficie en $\text{km}^2$	Périmètre en km
Haut Sébaou	02-15	532	102,4 112 98,6
	02-16	432	
	02-17	468	
Moyen Sébaou	02-18	304	82
	02-19	544	94,2
Bas Sébaou	02-20	220	62,6

Source ANRH

**III.2.5.2. Paramètre du relief****✓ Indice de compacité de Gravelius**

Cet indice caractérise la forme du bassin versant (allongé, ramassé).



$$K_c = \frac{0.28P}{\sqrt{S}} \dots\dots\dots(III.1)$$

$K_c$  : Indice de compacité ;

$P$ : Périmètre du bassin versant en km ;

$S$  : superficie du bassin versant en  $Km^2$  ;

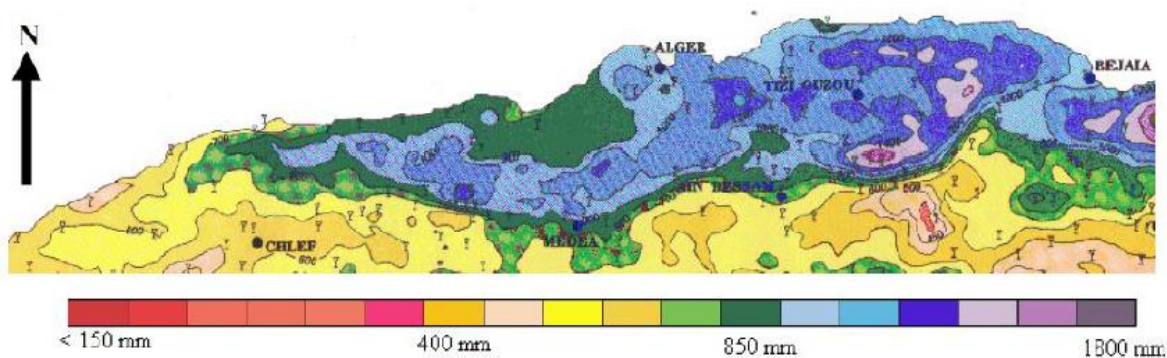
La valeur de  $K_c$  pour l'ensemble du bassin versant de Sébaou est mentionnée dans le tableau suivant :

Tableau III.2 : Paramètres de forme

Sous bassin	Station	Code	S ( $Km^2$ )	P(km)	$K_c$
Oued Sebaou	Friha	021605	2500	250.4	1.4

**III.3. Etude hydroclimatologique :**

Le climat de la région est un climat type méditerranéen, pluvieux en hiver, sec en été avec une pluviométrie moyenne avoisinant les 900 mm par an, comme le montre la carte pluviométrique de l'ANRH.



Source ANRH

Figure III.5. Carte de la pluviométrie moyenne annuelle de la région d'étude

On voit clairement la prédominance de la couleur bleue dans notre zone d'étude donc à un potentiel pluviométrique assez important.

### III.3.1. Précipitations

Les précipitations constituent la composante fondamentale de l'hydrologie et la connaissance de cet apport d'eau au sol est essentielle pour appréhender l'état des réserves en eau du sol, la recharge des nappes et le régime des cours d'eau.

Le bassin du Sébaou reçoit en général deux formes de précipitation bien distinctes :

- La première est la pluie, la forme la plus répandue dans tout le bassin ;
- La seconde est la neige, la forme la plus localisée dans le temps et dans l'espace, elle se produit principalement sur les reliefs montagneux du Djurdjura au sud, la chaîne littorale au nord.

L'utilité avantageuse de la neige apparaît surtout dans l'écoulement, elle le ralentit relativement et laisse le sol s'imbibber d'une façon continue et donc l'eau a largement le temps de s'infiltrer.

Malgré cet intérêt indéniable qu'apporte aux sources en eau, la neige reste le facteur le moins étudié dans le bassin du Sébaou en l'absence de station d'observation appropriée en hautes montagnes (pluviomètre totaliseur).

- La pluviométrie moyenne interannuelle observée dans notre station est de l'ordre de 1000 mm. Les pluviométries sont représentées dans le tableau suivant :

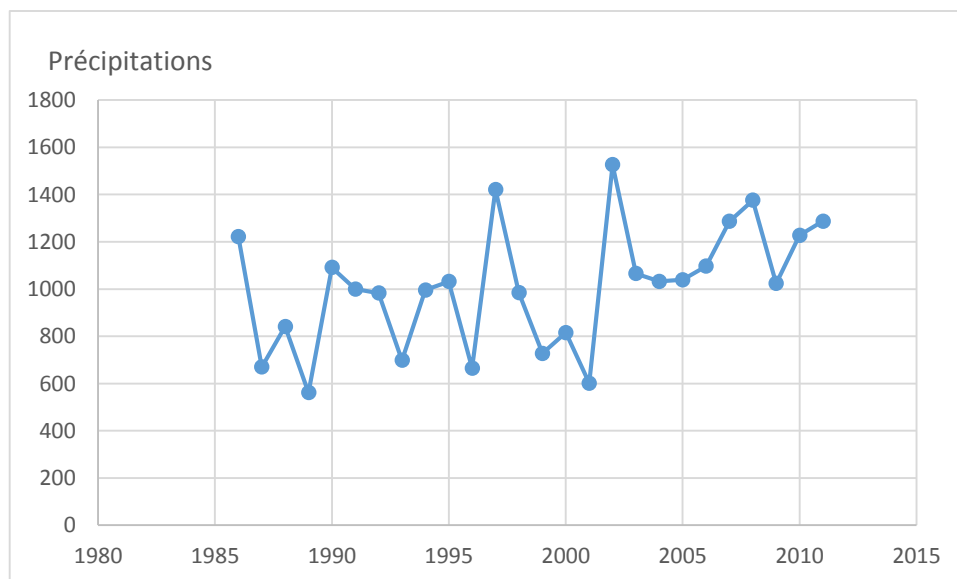


Figure III.6. Variation de précipitation annuelle pour la station étudiée.

### III.3.2. Vent

Est l'un des éléments caractéristiques du climat régissant l'évaporation à la surface du sol et de la végétation. Les résultats des moyennes mensuelles de la vitesse du vent enregistré au niveau de la station de Tizi-Ouzou sont présentés dans le tableau III.3.

Tableau III.3 : Moyenne mensuelles des vitesses des vents.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Vitesse (km/h)	1.92	1.63	1.45	1.75	1.57	1.63	1.57	1.85	2.13	2.63	2.21	2.07

Source ANRH

D'après les données de l'ONM on constate que les vents dans la zone d'étude sont généralement d'orientation Ouest à Sud-Ouest.

### III.3.3. 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 6.5sec relativement chaud et présentant de forts écarts de température. Le bassin versant est caractérisé par une température relativement humide d'octobre au mois d'Avril et sèche de Mai à Septembre. La température moyenne annuelle est de l'ordre de 14 ° c.

Tableau III.4 : Répartition mensuelle de la température.

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	24.5	20	17	10	6.5

Source ANRH

### III.3.4. Evapotranspiration

On désigne sous le nom d'évaporation une perte en eau subie par les surfaces d'eau libres. L'évapotranspiration est la somme de toutes les pertes par retour à l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau. Elle résulte de deux phénomènes l'un est physique (évaporation) l'autre biologique (transpiration).

Plusieurs formules permettent d'évaluer l'ETP à partir de différentes mesures climatologiques. Dans notre cas, nous avons utilisé la formule de Turc.

### Formule de Turc

La formule de Turc, qui dérive en la simplifiant de la formule de Penmann, ne nécessite que la connaissance des températures de l'air et de la radiation globale ou de la durée d'insolation. Cette formule est la suivante :

$$ETP = 0,4(Ig + 50)k^{\frac{t}{t+15}}$$

avec:

*ETP* : Evapotranspiration potentielle mensuelle (mm d'eau).

*t* : Température moyenne mensuelle de l'air (°C).

*Ig* : Radiation globale moyenne mensuelle reçue au sol (calorie/cm<sup>2</sup>/jour).

*K* : Coefficient égal à 1 si l'humidité relative *hr* est supérieure à 50 % (généralement le cas sous nos climats).

Si la radiation globale *Ig* n'est pas mesurée, on pourra l'évaluer à partir de la durée d'insolation *h* par la formule :

$$Ig = IgA(0,18 + 0,62\frac{h}{H})$$

Avec :

*IgA* : Radiation globale théorique (calorie/cm<sup>2</sup> /jour).

*H* : Durée théorique des jours du mois.

### Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes caractéristiques Géographique, topographique hydrographie et hydroclimatologique de notre bassin. Ces caractéristiques sont très importantes pour le développement de notre travail.

Les chroniques du précipitation, d'évapotranspiration et débit constituent l'information de base pour caractériser les variations des écoulements. Il convient de définir ce que représentent ces débits.

***CHAPITRE IV***  
***APPLICATION DE***  
***MODELE***

## Introduction

L'amélioration des outils de modélisation hydrologique est une thématique de recherche très active. Cette amélioration s'évalue grâce au calcul de la performance des modèles pluie-débit, donc la capacité d'un modèle à reproduire des débits observés, qui s'estime à l'aide des critères de performances.

Ces modèles hydrologiques comportent un certain nombre de paramètres, qui doivent être déterminé par calage, donc on fait appel à une fonction dite fonction objectif qui est un critère numérique qu'on essaye d'optimiser, mesurant l'écart entre les observations et les simulations.

L'objectif de ce chapitre est de trouver des tests statistiques, qui sont des outils intéressants afin de renforcer la confiance que l'on peut avoir en des expérimentations, pour étudier la différence entre plusieurs ensembles des performances. Ces ensembles de performances représentant typiquement des critères de performances pour les différents modèles, sur un bassin versant.

### IV.1. Présentation du logiciel R

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

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

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

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

Un grand nombre de fonctions, contenus dans différents packages, sont installés dans la version de base du logiciel R. Il est possible d'installer des packages supplémentaires.

## **IV.2. Package**

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

## **IV.3. Package 'airGR' :**

### **IV.3.1. Description**

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

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

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

IV.4. Avantage du logiciel

Modèle simple ; possibilité de recoder par des experts en hydrologie

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

IV.5. Résultats de simulation de modèle GR

IV.5. Application du modèle GR sur le bassin versant Sébaou

L'application du modèle GR a été effectuée sur les débits mensuels pour GR2M, et les débits mesurés journaliers pour le GR4J, GR5J et GR6J.

Dans cette étude, on utilise à l'entrée des valeurs de pluies observées (mm), des valeurs de l'ETP calculées par la méthode de Turc (mm) et des débits (exprimés en lames d'eau écoulées) observés. Pour cela les données de pluies (mm) mesurées au niveau de la station de Friha relatives aux périodes (1986-2012) sont utilisées.

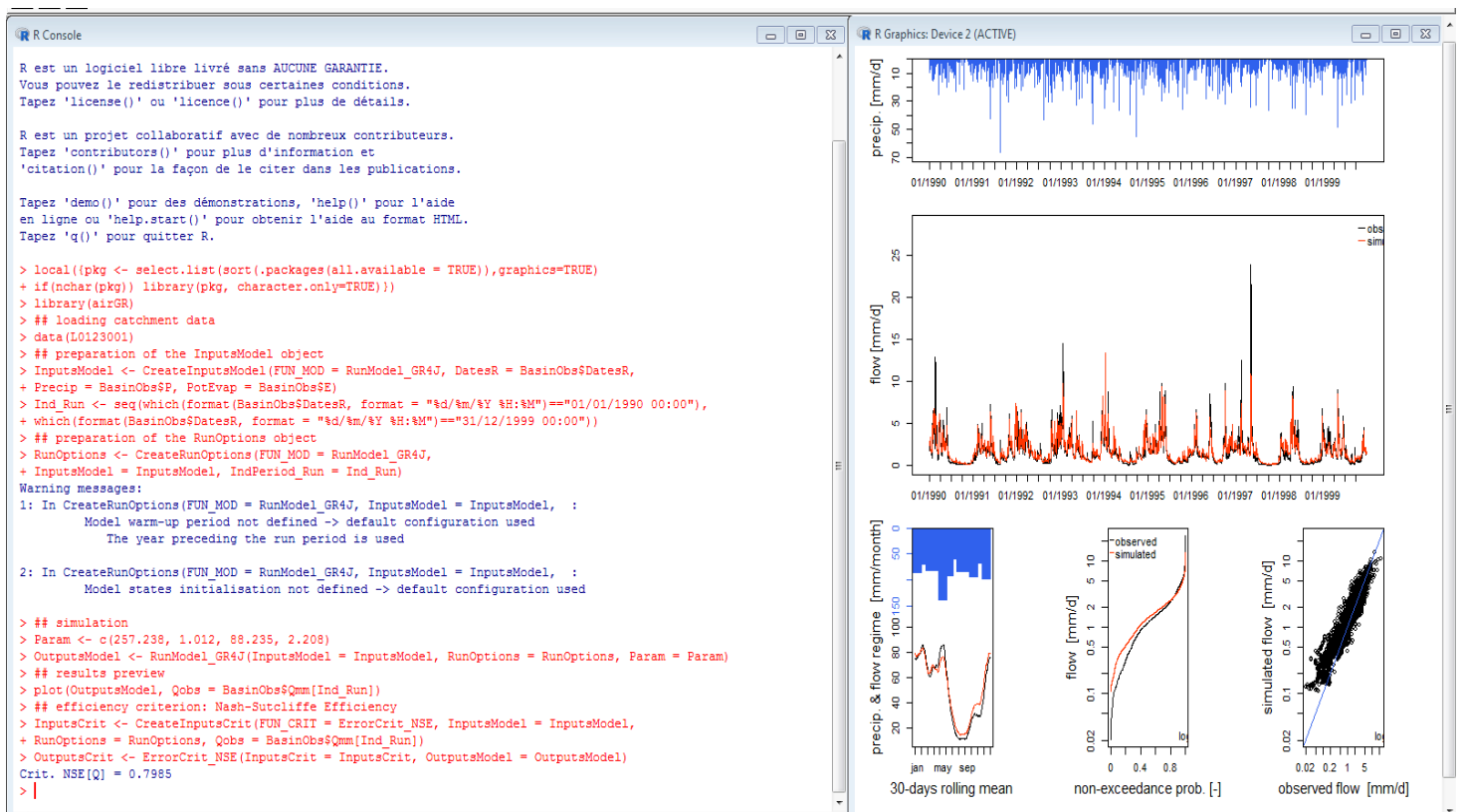


Figure IV.1 : Logiciel R (package airGR)



**IV.5.1. Modèle mensuel GR2M**

Pour la phase de calage, nous avons utilisé les données d'entrée du modèle (pluie, ETP, lame d'eau écoulee observée) correspondant à la période 1986/2002 alors que pour la validation nous avons pris la série de 2002/2012.

La comparaison des débits simulés aux débits observés sur la station suivant le mode calage automatique sur plusieurs évènements est montré à la (Figure IV.2).

Pour la validation du modèle de nouvelles données des précipitations et d'évapotranspiration correspondant à la période (2002/ 2012) et qui n'ont pas été utilisées lors du calage sont introduites. Les valeurs trouvées des débits sont alors comparées aux valeurs observées est montré sur les figures suivantes.

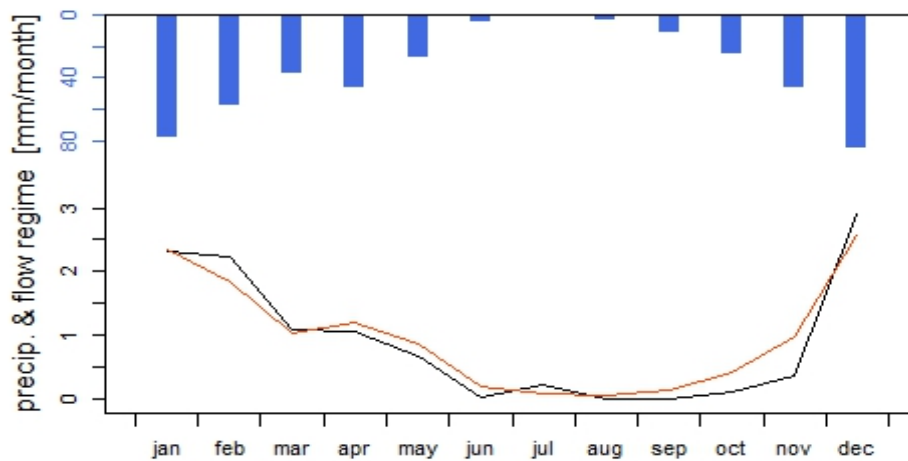


Figure IV.2 Calage du modèle GR2M

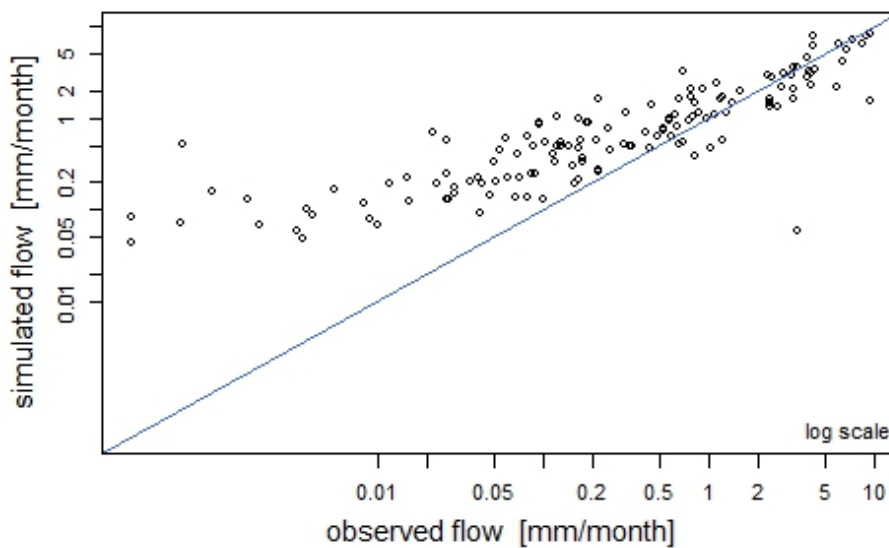


Figure IV.3 Validation du modèle GR2M sur les données mensuelles

Les paramètres statistiques de calage et de validation du modèle sont dans le tableau suivant :

*Tableau IV.1 Paramètres statistique du modèle GR2M.*

Calage	Validation
0.75	0.78

Les paramètres du modèle GR2M est donnés dans le tableau suivant :

*Tableau IV.2 Résultats obtenus pour les différentes valeurs des paramètres de modèle GR2M*

Paramètre	Valeur de calage
X1	607.894
X2	0.41

#### **IV.5.2. Modèle journalier GR4J**

Pour la phase de calage, nous avons utilisé les données d'entrée du modèle (pluie, ETP, lame d'eau écoulee observée) correspondant à la période 1986/2002 alors que pour la validation nous avons pris la série de 2002/2012.

La comparaison des débits simulés aux débits observés sur la station suivant le mode calage automatique sur plusieurs évènements est montré à la (Figure IV.3).

Pour la validation du modèle de nouvelles données des précipitations et d'évapotranspiration correspondant à la période (2002/ 2012) et qui n'ont pas été utilisées lors du calage sont introduites. Les valeurs trouvées des débits sont alors comparées aux valeurs observées est montré sur les figures suivantes.

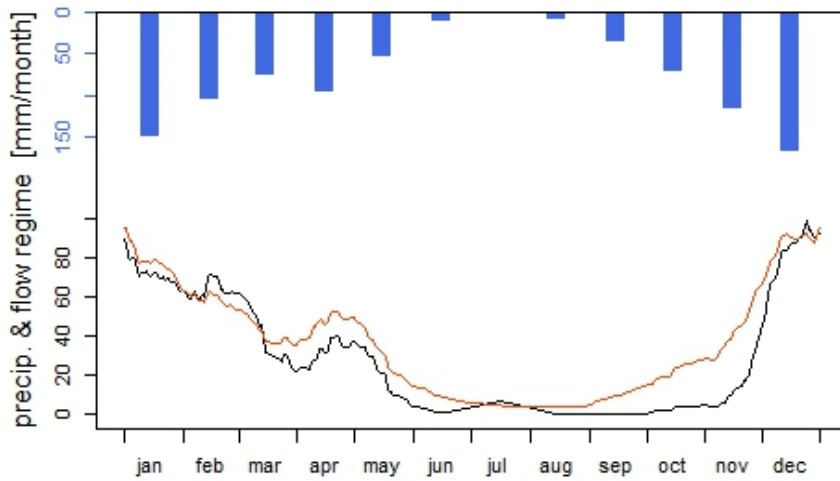


Figure IV.4 Calage du modèle GR4J

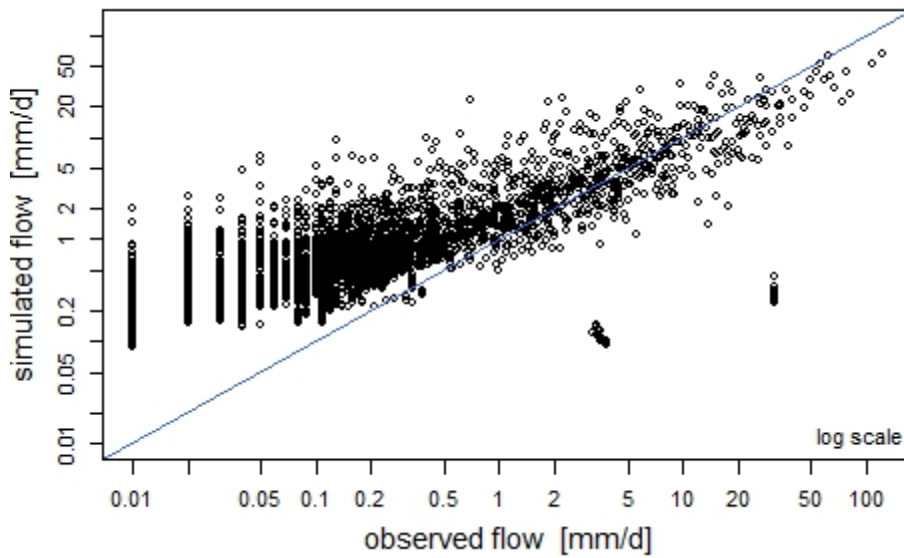


Figure IV.5 Validation du modèle GR4J sur les données journalières

Les paramètres statistiques de calage et de validation du modèle sont dans le tableau suivant :

Tableau IV.3 Paramètres statistique du modèle GR4J.

Calage	Validation
0.63	0.62

Le paramètre du modèle GR4J est donnés dans le tableau suivant :

Tableau IV.4 Résultats obtenus pour les différentes valeurs des paramètres de modèle GR4J

Paramètre	Valeur de calage
X1	257.238
X2	-4.914
X3	41.679
X4	1.398

### IV.5.3. Modèle journalier GR5J

Pour la phase de calage, nous avons utilisé les données d'entrée du modèle (pluie, ETP, lame d'eau écoulee observée) correspondant à la période 1986/2002 alors que pour la validation nous avons pris la série de 2002/2012.

La comparaison des débits simulés aux débits observés sur la station suivant le mode calage automatique sur plusieurs évènements est montré à la (Figure IV.4).

Pour la validation du modèle de nouvelles données des précipitations et d'évapotranspiration correspondant à la période (2002/ 2012) et qui n'ont pas été utilisées lors du calage sont introduites. Les valeurs trouvées des débits sont alors comparées aux valeurs observées est montré sur les figures suivantes.

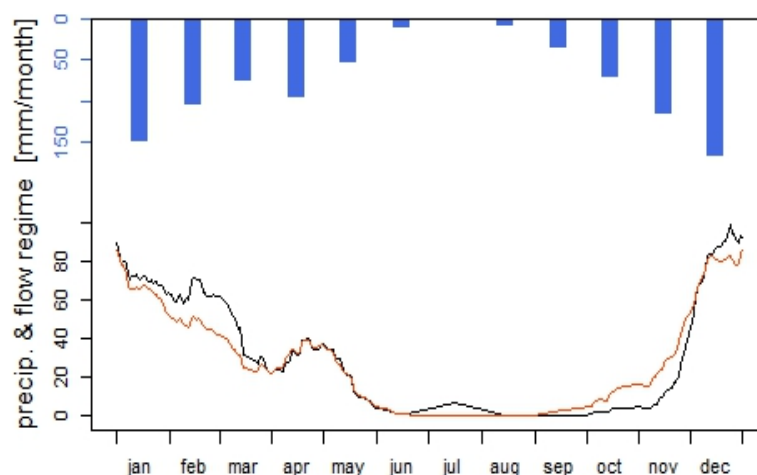


Figure IV.6 Calage du modèle GR5J

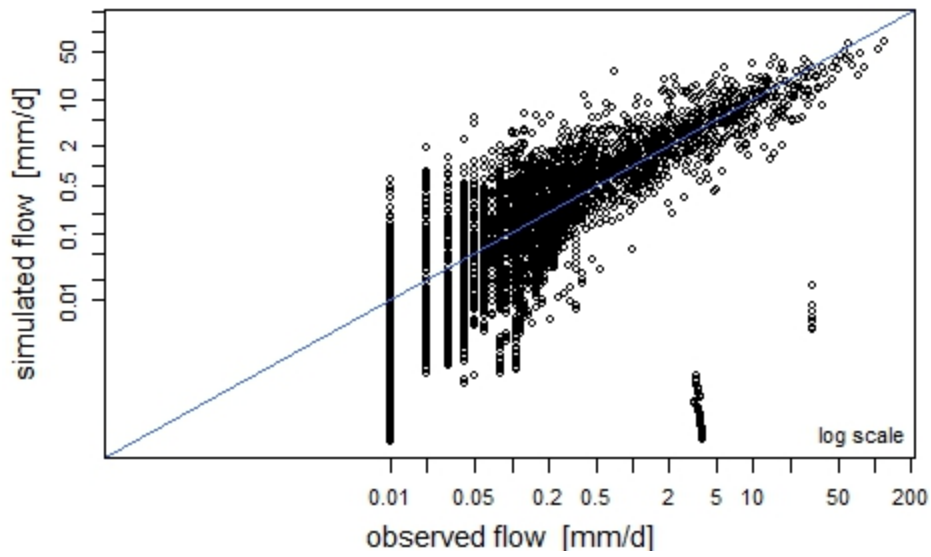


Figure IV.7 Validation du modèle GR5J sur les données journalières

Les paramètres statistiques de calage et de validation du modèle sont dans le tableau suivant :

Tableau IV.5 Paramètres statistique du modèle GR5J.

Calage	Validation
0.66	0.67

Le paramètre du modèle GR5J est donnés dans le tableau suivant :

Tableau IV.6 Résultats obtenus pour les différents paramètres de modèle GR5J

Paramètre	Valeur de calage
X1	270.670
X2	-3.302
X3	37.589
X4	1.024
X5	1.027

#### IV.5.4. Modèle journalier GR6J

Pour la phase de calage, nous avons utilisé les données d'entrée du modèle (pluie, ETP, lame d'eau écoulee observée) correspondant à la période 1986/2002 alors que pour la validation nous avons pris la série de 2002/2012.

La comparaison des débits simulés aux débits observés sur la station suivant le mode calage automatique sur plusieurs évènements est montré à la (Figure IV.5)

Pour la validation du modèle de nouvelles données des précipitations et d'évapotranspiration correspondant à la période (2002/ 2012) et qui n'ont pas été utilisées lors du calage sont introduites. Les valeurs trouvées des débits sont alors comparées aux valeurs observées est montré sur les figures suivantes.

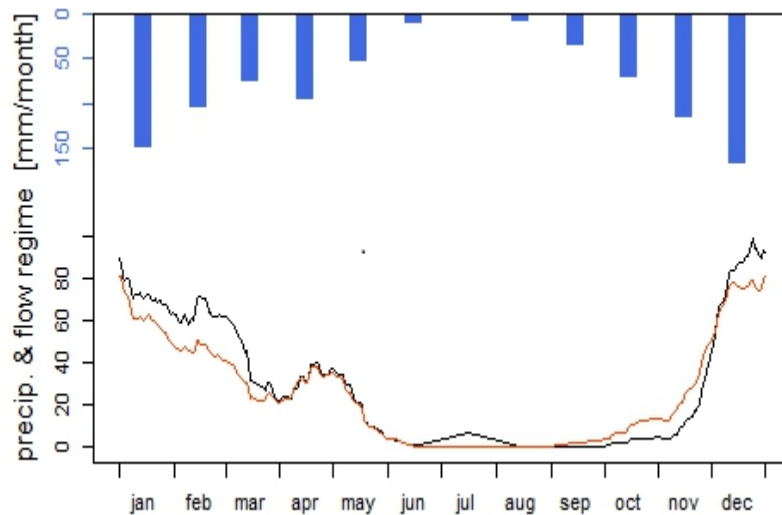


Figure IV.8 Calage du modèle GR6J

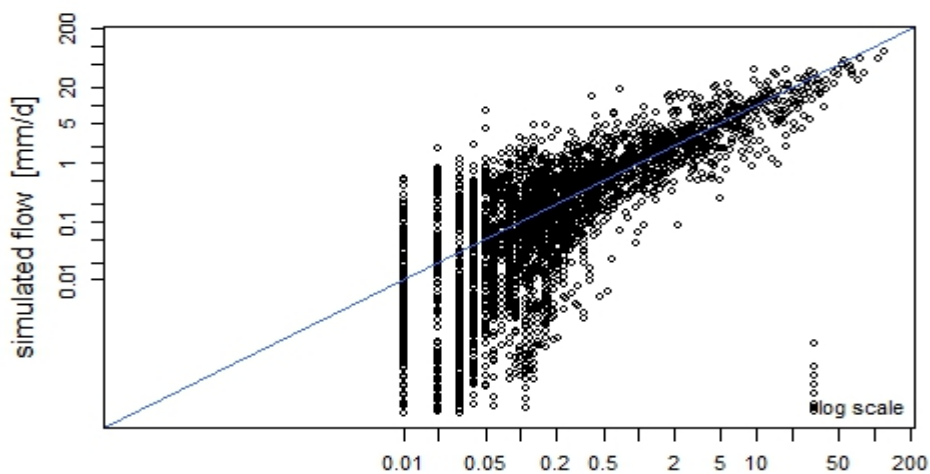


Figure IV.9 Validation du modèle GR6J sur les données journalières

Les paramètres statistiques de calage et de validation du modèle sont dans le tableau suivant :

*Tableau IV.7 Paramètres statistique du modèle GR6J.*

Calage	Validation
0.7	0.68

Le paramètre du modèle GR6J est donnés dans le tableau suivant :

*Tableau IV.8 Résultats obtenus pour les différents paramètres de modèle GR6J*

Paramètre	Valeur de calage
X1	145.474
X2	-1.175
X3	29.964
X4	1.310
X5	-0.260
X6	1.246

## **V.6 Discussion**

L'évaluation des modèles mensuel et journalier GR2M ,GR4J,GR5J et GR6J porte sur la démonstration des valeurs de performance traduit par le critère de Nash-Sutcliffe et par la configuration des tracés des hydrogrammes observés et simulés en phase de calage et en validation.

L'application des modèles du Genie Rural aux données du bassin versant Sebaou donne des résultats satisfaisants et ceci pour les deux pas de temps utilisés (Mensuel et Journalier) .

Les résultats issus du calage des modèles GR2M , GR4J,GR5J et GR6J dans le bassin versant d'Oued Sebaou sont acceptables.

**Conclusion**

La modélisation de la relation pluie-débit par l'utilisation du modèle de GR, présente aux pas de temps mensuel et journalier des résultats satisfaisants pour les données pluviométriques de notre bassin. Les performances obtenues en calage comme en validation sont en général supérieures à 62%. Ces résultats témoignent de la performance et de la robustesse de modèles (GR2M, GR4J, GR5J et GR6J) dans le bassin versant Sébaou. Cette performance et cette robustesse ont été également démontrées par ces modèles dans des autres bassins versants de l'Algérie (le bassin versant de la Tafna sur les Oueds Bou Messaoud, et Lakhdar) ce qui indique l'adaptation des modèles GR dans les bassins méditerranéens à climat semi-aride.



# ***CONCLUSION GENERALE***

## **CONCLUSION GENERALE**

L'objectif de cette étude était d'effectuer une étude de modélisation hydrologique Pluie Débit du bassin versant de l'Oued Sebaou.

Nous avons entamé l'application du modèle génie rural au pas du temps mensuel (GR2M) et journalier (GR4J, GR5J et GR6J). Il s'agit de présenter une recherche bibliographique détaillée sur ce modèle et de vérifier sa fiabilité à générer des données de débit à l'échelle : mensuelle et journalière.

Nous avons commencé le travail par des généralités sur la modélisation hydrologiques. Ensuite on a fait une synthèse bibliographique sur quelques modèles « pluie-débit » existants et présentation du modèle « GR ».

L'étude de la modélisation montre que la genèse du débit à partir de la pluviométrie dépend de plusieurs facteurs et plus précisément du bassin versant lui-même, dans cette ordre nous avons défini l'ensemble des paramètres, géomorphologiques et climatiques, suivi d'une étude détaillée sur la pluviométrie et l'écoulement dans les sous bassin étudiés a été établi.

La modélisation de la relation pluie-débit par l'utilisation du modèle de GR, présente aux pas de temps annuel, mensuel et journalier des résultats satisfaisants pour les données pluviométriques de notre bassin.

Les performances obtenues en calage comme en validation sont en général supérieures à 60%. Ces résultats témoignent de la performance et de la robustesse de modèles (GR2M, GR4J, GR5J et GR6J) dans le bassin versant Sebaou ce qui indique l'adaptation des modèles GR dans les bassins méditerranéens à climat semi-aride.

Pour une meilleure maîtrise du phénomène dans la région il est nécessaire de faire une mise en place d'un réseau hydrométrique où les séries d'observation disponibles seraient longues et bien renseignées pour permettre une estimation aussi précise que possible des flux moyens entrants et sortants du bassin versant.

Enfin, nous espérons, que cette étude fera l'objet d'autres travaux qui vont servir à mieux comprendre l'utilisation du modèle GR, et ce qui se passe dans la génération des débits au différent pas de temps (mensuel et journalier) en termes de statistique fréquentielle.

***REFERENCES***  
***BIBLIOGRAPHIQUES***

## Références Bibliographique

**B, MASSECK & S, SOSSOU** « 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, p.6.

**C, MAFTEI** « Etude concernant les écoulements superficiels, modélisation spatialisée de l'écoulement sur le bassin versant de Voines-ti-Roumani. », 2002, p.75.

**C, MICHEL** « Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre ? », La Houille Blanche (1), 1983, p. 39-44.

**C, MICHELE** « Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. », La Houille Blanche, (2), 1989, p.113-122.

**C, PERRIN** « Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. », La Houille Blanche, 2002, p. 84-91.

**E, GAUME** « Un parcours dans l'étude des phénomènes extrêmes en hydrologies », Mémoire H.D.R., Ecole National des Ponts et Chaussées, 2002, p .269.

**I, BOURSALI** « Application de la fonction pluie-débit au bassin versant de la TAFNA Cas de l'oued Khemis-TLEM-CEN (NW Algérie) », 2016.

**G, Morin & P, Paquet** « Le modèle de simulation de quantité et de qualité CEQUEAU. », Guide de l'Utilisateur Version 2, 1995.

**K, BEVEN & M, KIRKBY** « A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant », Hydrological Sciences Journal, 24(1), 1979, p.43-69.

**L, BERTHET** « Prévion des crues à pas de temps fin : comment mieux assimiler l'information de débit dans un modèle Pluie-Débit », Paris, 2010.

**L, GERARD & L, BERTHET** « Sensibilité des performances d'un modèle de prévision des crues au critère de calage. » Mémoire de Master, Eau Environnement, INP Toulouse, 2010.

**M, BENHASSAINE** « Recherches sur les modelés du relief et les formations superficielles dans la vallée de l'oued Sébaou (Grande Kabylie, Algérie) », 1980.

**M, DELAIGUE, A.LAFOURCADE & M, THIREL** « Les tests statiques de significativité appliqués à l'hydrologie ».

**M, KABOUYA** « Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale », 1990.

**R, BOUANANI** « Modélisation de la fonction pluie - débit. Application au bassin versant de la Tafna (NW Algérie) », Mémoire de Magister, Université de Tlemcen, 2010.

**R, BOUREK** « Modélisation pluie – débit. Application au bassin versant de la Mactaa (NW Algérien) », Mémoire de Magister, Université de Tlemcen.

**R, CHARBONNEAU, J, FORTIN & G, MORIN** « The CEQUEAU model: description and examples of its use in problems related to water resource management », Hydrological Sciences Journal, 22(1), 1977, p.193-202.

**R, GHERISSI** « Hydrologie et modélisation pluie-débit : cas du bassin versant de l'oued Lakhdar (ex : chouly) Tafna-NW Algérien », 2012.

**R, PUSHPALATHA** « Low-flow simulation and forecasting on French river basins: a hydrological modelling approach », AgroParisTech, 2013.

**S, AMIAR** « Modélisation Pluie-Débit : Outil De Prévision Des Crues Le Mieux Adapté Par Le Modèle Hydrologique GR », 2014.

**S, MOUELHI** « 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, 2003, p. 323.

**S, MOUELHI S. C, MICHEL. C, PERRIN. & V, ANDRÉASSIAN** « Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. », Journal of Hydrology n° 318(1-4), 2006, p. 200-214.

**T, BERREZOUG** « Modélisation pluie-débit par le modèle GR du bassin versant de l'oued Sarno (Mekkeria NW Algérie », 2013.

**T, MATHEVET** « 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, 2005, p.463.

**V, ANDREASSIAN .P, CHARLES & M, CLAUDE** « Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR)-Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés », 2007.

**Y, CORMARY & A, GUILBOT** « Etude des relations pluie-débit sur trois bassins versants d'investigation », In Proceedings of the IAHS Madrid Symposium, IAHS, 1973, p. 265-279.

**Z, MAKHLOUF** « Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. » Thèse de Doctorat, Université de Paris XI Orsay, 1994, p. 426.

**Sites internet :**

<https://odelaigue.github.io/airGR/index.html>

<https://cran.r-project.org/web/packages/airGR/airGR.pdf>

<https://www.r-project.org/>

<https://webgr.irstea.fr/activites/airgr/>