

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

Simulation des écoulements mensuels par le modele GR2M Cas du bassin de l'isser.

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 6-0028-17

APA Citation (APA توثيق):

Ferrah, Nadia (2017). Simulation des écoulements mensuels par le modele GR2M Cas du bassin de l'isser[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Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...)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 بتمكين الإنتاج العلمي لأساتذة و باحثي المدرسة.

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



Département Hydraulique Urbaine

MEMOIRE DE MASTER

Pour l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique

OPTION : Alimentation en eau potable

THEME :

**Simulation des écoulements mensuels par le modèle
GR2M
Cas du bassin de l'Isser**

Présenté par :

M^{elle} : FERRAH Nadia

DEVANT LES MEMBRES DU JURY

Nom et Prénom	Grade	Qualité
M ^r KHODJET-KESBA Omar	Professeur	Président
M ^r KAHLERRAS Djillali	M.C.B	Examineur
M ^{eme} AMMOUR Fadila	M.A.A	Examinatrice
M ^{eme} SALHI Chahrazed	M.A.B	Examinatrice
M ^r BENKACI Ali Tarik	M.C.B	Promoteur

Mars 2017

Remerciements

Au terme de ce projet, fruit de mes années de labeur, je tiens à remercier sincèrement Dieu, de m'avoir octroyé les moyens et les personnes qui m'ont aidé dans son élaboration

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à :

Mon promoteur M^r BENKACI.T de m'avoir orienté et pour ces conseils judicieux, ses riches enseignements et sa constante disponibilité dans le but de mener à bien ce master.

Toute la gratitude à nos professeurs et enseignants qui nous ont guidés au cours de la formation master, et nos respects aux membres de jury qui nous feront l'honneur d'apprécier ce travail.

Mon dernier remerciement, mais non le moindre s'adressent à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

L. Ferrah

Dédicace

Je tiens avant tout à remercier le dieu tout puissant qui m'a donné beaucoup de courage et de volonté pour que je puisse arriver à finir ce modeste travail.

Je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé

tout au long de mon travail, particulièrement à :

Mes chers parents pour les encouragements qu'ils ont manifestés tout au long de mon parcours.

Mon promoteur Mr T.BENKACI pour son encadrement et ses orientations judicieuses qui nous ont été infiniment utiles.

A mes frères A ma sœur Nabila

A la mémoire des étudiants martyrs de l'EPST Tlemcen.

A tous mes ami(e)s à Bouira , EPST et ENSH .

A tous ceux qui m'ont apporté de l'aide, de près ou de loin.

L.Ferrah

ملخص

إن دراسة العلاقات التي تربط التساقط بالجريان في الاودية عملية ذات أهمية خاصة و ذلك في العديد من التطبيقات في مجال تسيير الموارد المائية. و بغرض معرفة و فهم أوضح لهيدرولوجيا الحوض المائي لوادي ايسر قمنا بتطبيق نموذج التساقط- جريان مياه التدفق GR2M وهو النموذج الشامل للخران أو نموذج الهندسة الريفية على حوض ايسر . في هذه الدراسة , ارتأينا أن نركز على تطبيق نموذج الهندسة الريفية GR2M قمنا بالحسابات و ذلك على المدى الشهري و حيث أدخلنا عامل التبخر كأحد المعطيات بالإضافة الى عاملي التساقط و التدفق. وتشير النتائج إلى أن النموذج يأخذ بعين الاعتبار التبادلات المختلفة (الغلاف الجوي وتحت الأرض) وسعة خزان.

RESUME

Pour une meilleure compréhension du comportement hydrologique du bassin versant de l'Isser, nous avons tenté dans ce travail l'application de la modélisation pluie-débit en utilisant un modèle global à réservoir : le modèle du Génie rural « GR2M ».

Les modèles hydrologiques globaux permettent la transformation de la pluie en débit à travers des réservoirs simulant le cycle hydrologique. Ces dernières années, ces modèles ont vu leurs applications dans le domaine de la prévision et de gestion de la ressource en eau.

Ce travail basé sur la modélisation pluie-débit à l'échelle mensuelle; est appliqué au bassin versant de l'Isser.

Les résultats de simulation ont montré des performances assez élevées pour le bassin de l'Isser, et peut exploiter dans d'autres bassins versant pour une meilleure gestion des ressources en eau.

ABSTRACT

For a better understanding of the hydrological behavior of the Isser watershed, we have attempted to apply rainfall-flow modeling using a global reservoir model: the "GR2M" rural engineering model.

Global hydrological models allow the transformation of rainfall into flow through reservoirs simulating the hydrological cycle. In recent years, these models have been applied in the field of forecasting and management of water resources.

This work is based on month-scale rain-flow modeling; Is applied to the Isser catchment.

The simulation results showed quite high performances for the Isser basin and can be used in other watersheds for better management of water resources.

Sommaire

Chapitre I : Les processus de génération des écoulements

Introduction Générale	1
Introduction	3
I.1 Le cycle hydrologique de l'eau	3
I.1.1. Définition	3
I.1.2 Composition du cycle de l'eau	4
I.2 Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant	5
I.2.1 Notion de Bassin Versant	5
I.2.2 Bilan hydrologique	5
I.3 Etude des processus hydrologiques	6
I.3.1 Généralités	6
I.3.2 Les facteurs de génération des débits	7
I.3.3 Typologie des écoulements	8
I.3.3.1 Ecoulements superficiels.....	8
I.3.3.2 Ecoulement hypodermique	9
I.3.3.3 Les processus souterrains	9
I.3.4 Variabilité des écoulements	10
I.3.4.1 Mesure des écoulements	10
I.3.4.2 Difficulté de la mesure des écoulements.....	11
I.5 Influence des cycles de sécheresse sur les régimes d'écoulement.....	11
I.5.1 L'impact de la sécheresse.....	12
I.5.1.1 Problème d'approvisionnement en eau	12
I.5.1.2 La surexploitation des aquifères.....	13
I.6 Gestion des ressources en eau : Enjeux et contraintes	13
I.6.1 Nécessité de la prévision des apports	13
I.7 Conclusion	14

Chapitre II : Etude des modèles pluie-débit en hydrologie

Introduction	15
II.1 Définition d'un modèle	15
II.1.1 Propriétés requises des modèles	16
II.1.2 Objectifs de la modélisation pluie-débit.....	16
II.2 Les modules hydrologiques d'un modèle pluie-débit	17
II.3 Représentation des processus hydrologiques	18
II.4 Typologie des modèles.....	19
II.4.1 Les modèles empiriques et/ou boîte noire.....	19
II.4.1.1 Les modèles régressifs et autorégressifs de type ARMA	19
II.4.1.2 Les modèles basés sur l'intelligence artificielle	20
II.4.2 Les modèles conceptuels	21
II.4.3 Les modèles déterministes et/ou physiquement fondés.....	21
II.4.4 Modèles en fonction de la Représentation de l'espace.....	21

II.5 Nécessite du calage et de la validation.....	22
II.5.1 Calage.....	22
II.5.2 La validation	23
II.6 Critères d’appréciation des modèles.....	23
II.7 Optimisation des modèles pluie-débit	24
II.7.1 Les méthodes locales.....	24
II.7.2 Les méthodes globales.....	24
II.8 Etude des modèles conceptuels a réservoirs.....	25
II.9 Présentation de quelques modèles hydrologiques.....	25
II.9.1Le modèle GR4J.....	25
II.9.2 Le modèle TOPMODEL.....	26
II.10 Conclusion.....	28

Chapitre III : Simulation des écoulements par un modèle pluie- débit Cas des bassins de l’Isser

Introduction.....	28
III.1. Présentation de la zone d’étude : le bassin versant de l’Isser.....	28
III.2 Géologie de la zone d’étude	29
III.3 Hydrologie du bassin de l’Isser.....	30
III.3.1 Caractéristiques morphométriques.....	31
III.4 Etude de la pluviométrie.....	32
III.4.1 Choix de la station pluviométrique.....	32
III.4.2 Ajustement des pluies annuelles à la loi de Gauss (loi normale).....	33
III.5 Etude hydrométrique.....	35
III.5.1 Apports liquides du bassin de l’Isser.....	36
III.5.2 Caractérisation des transports solides de la zone d’étude.....	37
III.6 Modélisation de la relation pluie débit par le modèle GR2M.....	38
III.6.1 Données et Méthodologie	38
III.7 Critères de validation des modèles pluie-débit.....	42
III.7.1 Le critère de Nash.....	42
III.7.2 Méthodes d’optimisation des modèles pluie-débit.....	43
III.7.3 Mise en œuvre des modèles : le langage Matlab.....	44
III.7.4 Résultats de simulation.....	46
III.7.5 Paramètres optimisés des modèles.....	47
III.8 Conclusion.....	48
Conclusion générale.....	49

Liste des tableaux

Chapitre III : Simulation des écoulements par un modèle pluie- débit

Cas des bassins de l'Isser

Tableau III.1 Répartition altimétrique du bassin versant d'Isser.....	32
Tableau III.2 : caractéristiques hydrologiques du bassin d'Isser.....	33
Tableau III.3 : Caractéristiques des stations pluviométriques.....	33
Tableau III.4 : Répartition mensuelle des pluies annuelles.....	34
Tableau III.5 : Résultats de l'ajustement avec la loi normale.....	36
Tableau III.6 : les caractéristiques de la série des Apports liquides du bassin de l'Isser.....	37
Tableau III.7 : Résultats de l'ajustement des apports avec la loi log normale.....	37
Tableau III.8 : Calcul du transport solide (Tonnes/an).....	39
Tableau III.9 : les caractéristiques de la série des débits mensuels.....	39
Tableau III.10 . Durées des périodes de calage et de test des modèles utilisés.....	43
Tableau III.11 : Performances du modèle GR2M.....	47
Tableau III-12 : Paramètres optimisés du modèle GR2M.....	48

Liste des figures

Chapitre I : Les processus de génération des écoulements

Figure I-1 : Schématisation du cycle d'eau.....	4
Figure I-2 : Processus de génération des débits.....	6
Figure I.3 : Processus de génération d'écoulement.....	9

Chapitre II : Etude des modèles pluie-débit en hydrologie

Figure II-1 : Les variables d'un modèle hydrologique.....	18
Figure II-2 : Structure et variable type d'un modèle hydrologique.....	18
Figure II-3 : Structures des réseaux de neurones de type perceptron multicouche.....	20
Figure II-4 : Schéma de la structure du modèle GR4J	26
Figure II-5 : Structure du Modèle TOPMODEL.....	27

Chapitre III : Simulation des écoulements par un modèle pluie- débit

Cas des bassins de l'Isser

Figure III.1 : Bassins versants du Nord Algérien.....	30
Figure III.2 : Carte de Situation du bassin de l'Isser.....	31
Figure III.3 : Courbe hypsométrique du bassin d'Isser.....	32
Figure III.4 : Localisation des stations pluviométriques Isser.....	34
Figure III.5 Ajustement des pluies annuelles a la loi Normale.....	35
Figure III.6 : Stations hydrométriques (Bassin d'Isser).....	36
Figure III.7 Ajustement des apports liquides a la loi Log-Normale.....	37
Figure III.8: Schéma de la structure du modèle GR2M.....	42
Figure III-9: Simulation des débits phase de Validation Calage	47
Figure III-10 : Simulation des débits phase de Validation	48
Figure III.11 Simulation de nouvelles valeurs.....	49

Introduction Générale

Les bassins versants sont des systèmes complexes, à cause des processus qui se déroulent au sein de ces derniers. La simulation des débits à l'exutoire d'un bassin versant est nécessaire pour 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., donc il est nécessaire de comprendre, par une approche dynamique, le fonctionnement du bassin, la nature et le rôle des processus mis en jeu.

Un moyen pour arriver à comprendre la génération des débits et pour établir des simulations est de remonter jusqu'à leur cause première, les pluies, pour permettre ainsi, de construire des modèles permettant d'obtenir une représentation simplifiée et facilement utilisable de ce lien entre pluie et débit.

Cependant, comme d'autres disciplines s'attachant à comprendre et représenter des systèmes naturels, la modélisation pluie-débit et plus généralement l'hydrologie continentale sont confrontées à la difficulté d'appréhension des systèmes étudiés du fait de leur complexité intrinsèque.

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

Dans notre étude il est question d'appliquer un modèle conceptuel (Modèle Génie rural GR2M) sur le bassin versant de l'oued Isser situé au Nord de Algérie.

L'objectif est de trouver les paramètres optimaux du modèle qui permet une meilleure simulation afin d'apprécier les débits simulés pour la prévision et/ou la prédétermination.

Cette recherche est structurée en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons une bibliographie sur les processus de génération des écoulements à l'exutoire d'un bassin versant.

Dans le second chapitre, une recherche bibliographique sur les modèles en hydrologie et leurs caractéristiques.

Introduction Générale

Dans le troisième chapitre, on donne une présentation du site d'étude, et un aperçu géologique et hydrologique sur le bassin versant, ainsi qu'une application du modèle GR2M sur les données relatives au bassin versant de l'oued l'Isser.

Chapitre I : Les processus de génération des écoulements

Introduction

L'hydrologie est l'étude de la distribution et de la circulation de l'eau dans la nature. Cette discipline intègre pour partie ou en totalité un certain nombre d'autres disciplines des sciences de la terre et de la vie consacrées à la science de l'eau; sciences dont les approches sont à la fois physiques, chimiques et biologiques. Dans les faits, l'hydrologie s'intéresse plutôt à la partie continentale du cycle de l'eau et aux flux d'eau. (**Musy, 2005**)

Elle étudie le cycle hydrologique sur la Terre et les eaux des continents ; les eaux superficielles et souterraines, les neiges et les glaces, de même que les processus physiques, chimiques et biologiques les concernant, leurs rapports avec le climat et avec d'autres facteurs physiques et géographiques de même que les interrelations existant entre elles ; l'érosion et la sédimentation et leurs relations avec le cycle de l'eau.

L'hydrologie est cependant bien plus qu'une discipline de recherche scientifique .Elle vise aussi à fournir des méthodes et outils indispensables à la résolution de problèmes concrets liés à l'estimation de la ressource en eau et à l'estimation des risques associés, (**Benoit Hingray et al, 2009**).

I.1 Le cycle hydrologique de l'eau :

I.1.1. Définition :

Le cycle de l'eau, appelé aussi cycle hydrologique, est l'ensemble des cheminements que peut suivre une particule d'eau. Ces mouvements, accompagnés de changements d'état, peuvent s'effectuer dans l'atmosphère, à la surface du sol et dans le sous-sol. Chaque particule n'effectue qu'une partie de ce cycle et avec des durées très variables : une goutte de pluie peut retourner à l'océan en quelques jours alors que sous forme de neige, en montagne, elle pourra mettre des dizaines d'années. (**Laborde, 2009**).

Sous l'effet du rayonnement solaire, l'eau évaporée à partir du sol, des océans et des autres surfaces d'eau, entre dans l'atmosphère. L'élévation d'une masse d'air humide permet le refroidissement général nécessaire pour l'amener à saturation et provoquer la condensation de la vapeur d'eau sous forme de gouttelettes constituant les nuages, en présence de noyaux de condensation.

Puis la vapeur d'eau, transportée et temporairement emmagasinée dans les nuages, est restituée par le biais des précipitations aux océans et aux continents.

Chapitre I : Les processus hydrologiques

Une partie de la pluie qui tombe peut être interceptée par les végétaux puis être partiellement restituée sous forme de vapeur à l'atmosphère. La pluie non interceptée atteint le sol. Suivant les conditions données, elle peut alors s'évaporer directement du sol, s'écouler en surface jusqu'aux cours d'eau (ruissellement de surface) ou encore s'infiltrer dans le sol.

Il peut aussi y avoir emmagasinement temporaire de l'eau infiltrée sous forme d'humidité dans le sol, que peuvent utiliser les plantes. Il peut y avoir percolation vers les zones plus profondes pour contribuer au renouvellement des réserves de la nappe souterraine. Un écoulement à partir de cette dernière peut rejoindre la surface au niveau des sources ou des cours d'eau. L'évaporation à partir du sol, des cours d'eau, et la transpiration des plantes complètent ainsi le cycle (Musy, 2005).

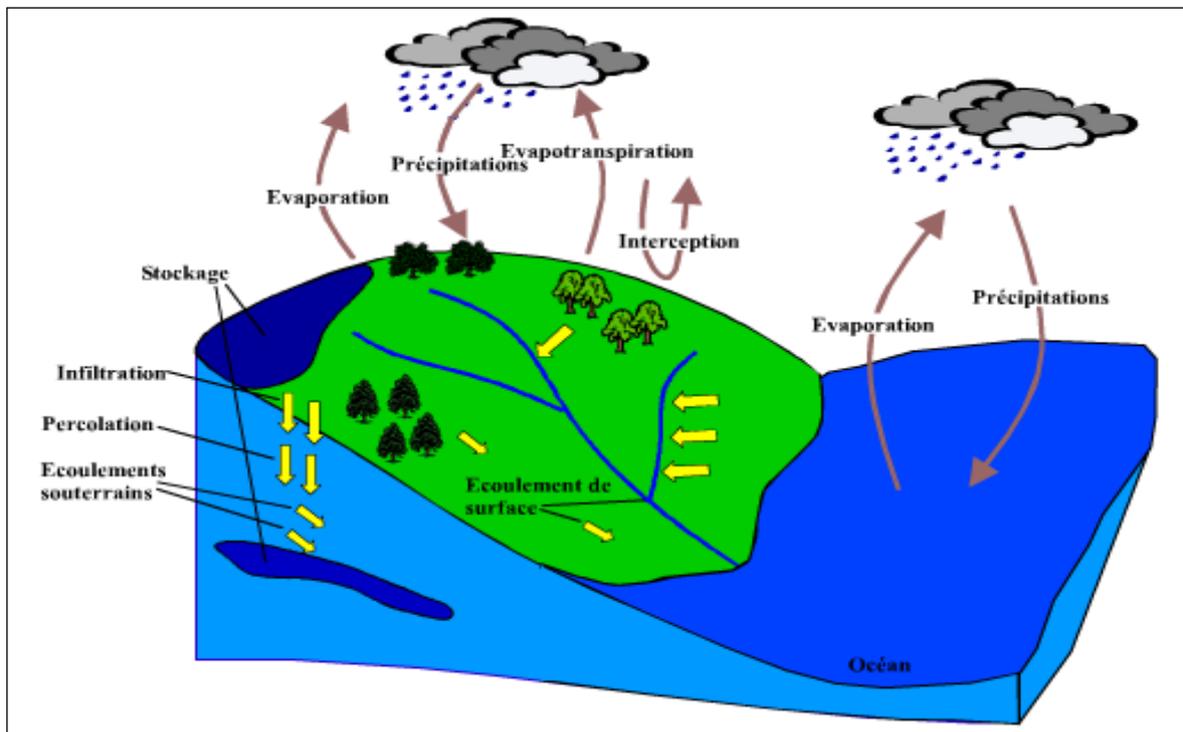


Figure I-1 : Schématisation du cycle d'eau (Musy, 2005)

I.1.2 Composition du cycle de l'eau

Le cycle de l'eau est composé de plusieurs phases :

1- l'évaporation

Chauffé par le soleil, l'eau des océans, des mers, des rivières et des lacs va s'évaporer et monter dans l'atmosphère. Les végétaux et les êtres vivants transpirent et rejettent eux aussi de la vapeur.

2- la condensation :

Au contact des couches d'air froid de l'atmosphère, la vapeur d'eau se condense en minuscules gouttelettes, qui poussées par le vent se rassemblent et forment des nuages.

3- la précipitation :

Les nuages déversent leur contenu sur la terre, sous forme de pluie, de neige, de grêle, selon la pression atmosphérique.

4- le ruissellement :

Ces pluies et neiges s'écoulent vers les plaines pour alimenter les nappes souterraines.

I.2 Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant :

Le fonctionnement de tout bassin versant suit quelques grands principes physiques, dont la prise en compte explicite permet de faciliter grandement son analyse et sa compréhension comme pour tout système, ce fonctionnement se manifeste par l'évolution au cours du temps et dans l'espace de certaines grandeurs décrivant les propriétés du milieu.

I.2.1 Notion de Bassin Versant

Le bassin versant en une section d'un cours d'eau est défini comme la surface drainée par ce cours d'eau et ses affluents en amont de la section. Tout écoulement prenant naissance à l'intérieur de cette surface doit donc traverser la section considérée, appelée exutoire, pour poursuivre son trajet vers l'aval. Les différents paramètres du bassin versant (forme, altitude, pente, relief....etc) interviennent dans les différents écoulements (**Laborde ,2009**).

I.2.2 Bilan hydrologique

Dans tous les cas c'est l'aspect comptable du terme bilan qui prévaut en hydrologie, que ce soit au niveau des bilans hydriques ou hydrologiques. Trop souvent confondus, le bilan hydrologique se situe à l'échelle du bassin versant et concerne une démarche hydrologique, le bilan hydrique se situe à l'échelle de la plante et participe d'une démarche agronomique.

Le bilan hydrique et le bilan hydrologique visent tous les deux à établir le budget entre les entrées et les sorties en eau d'une unité hydrologique définie pendant une période de temps donné, (**Ambroise, 1998**).

Dans sa formulation la plus générale, il s'écrit:

$$P+S=R+E+(S+-\Delta S) \quad (I-1)$$

Avec:

P : précipitations (liquide et solide) [mm] ou [m³] ;

S : ressources disponible à la fin de la période précédente (eaux souterraines, humidité du sol, neige, glace) [mm] ;

R : ruissellement de surface et écoulements souterrains [mm] ;

E : évaporation (y compris évapotranspiration) ;

S+-ΔS : ressources accumulées à la fin de la période étudiée [mm].

I.3 Etude des processus hydrologiques

I.3.1 Généralités

Les travaux menés sur le terrain dans de nombreux milieux, notamment à l'échelle de petits bassins versants de recherche, ont permis d'identifier les principaux processus pouvant contribuer à la redistribution tant verticale que latérale des précipitations incidentes et à la genèse des différentes composantes du bilan hydrologique d'un bassin versant. Deux grands types de processus sont identifiés et présentés séparément : les processus de surface et les processus de subsurface :

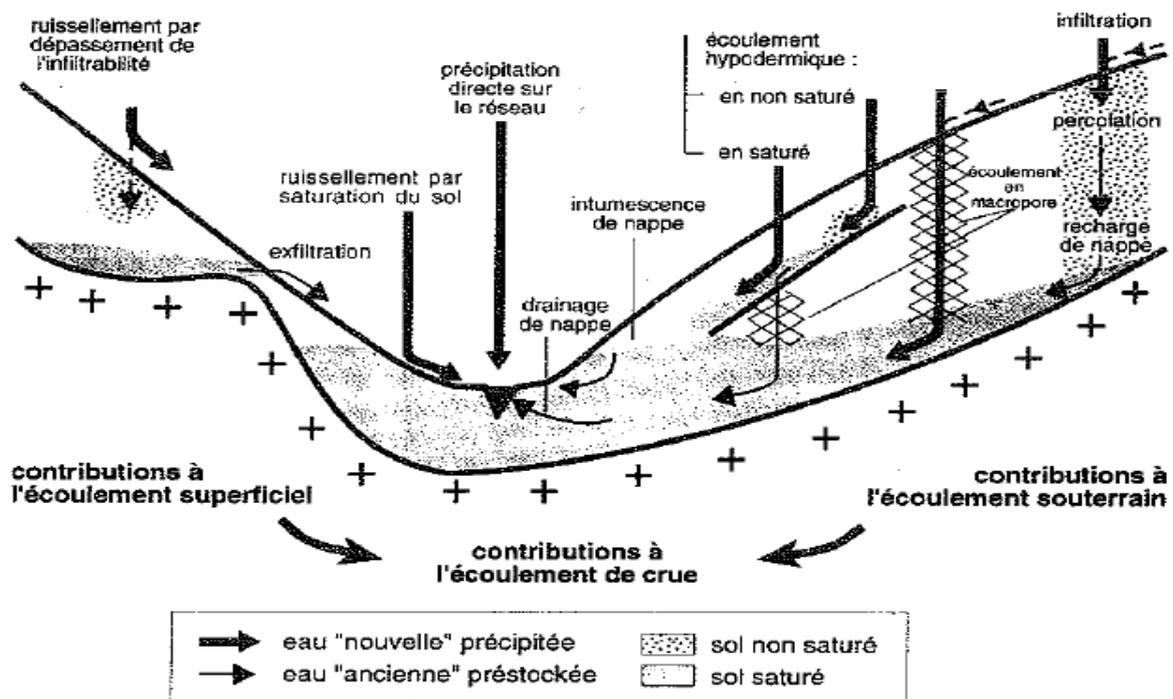


Figure I-2 : Processus de génération des débits (Ambroise, 1998).

I.3.2 Les facteurs de génération des débits

Dans chaque bassin les processus actifs et leurs interactions ne sont pas quelconques, mais dépendent de la combinaison d'un ensemble de facteurs contrôlant leur variabilité spatio-temporelle.

a-Les précipitations : le premier facteur intervenant dans les débits, durant une averse le volume et la forme de l'hydrogramme des crues, dépendent à la fois de l'apport total des précipitations, mais aussi de son intensité et de sa durée (**Papy et Douyer, 1991**).

b-Les conditions initiales (état hydrique et hydrologique du bassin) : jouent un rôle majeur sur l'intensité des crues. Pour un même apport d'eau et d'énergie, ne correspond pas forcément le même débit. L'état initial hydrique et hydrologique du bassin influe fortement sur la réponse du bassin à l'exutoire, ainsi que la transformation de la pluie en débit contrôlé par les intensités, durées, fréquences et séquences des épisodes pluvieux et évaporant précédents. Cette non-linéarité des réponses en fonction des conditions initiales résulte de différences dans les combinaisons et intensités des processus actifs.

c-La variabilité spatio-temporelle pédologique, la répartition et l'occupation de la végétation constituent un facteur prédominant de la réponse du bassin aux conditions hydrologiques. Ces caractéristiques vont déterminer de façon directe les propriétés des bassins quant aux différents mécanismes intervenants directement dans les processus de génération des débits. Les types de végétation et de sols, leurs structure et texture, leur organisation spatiale dans un bassin, constituent ainsi des facteurs permanents ou semi-permanents importants, tandis que la structure pédologique du sol détermine les propriétés hydromécaniques du sol, et donc sur l'infiltration et le ruissellement de l'eau des pluies vers l'exutoire, (**Ambroise, 1998**).

d-Caractéristiques géométriques : Topographie et morphométrie

Le dernier facteur important de la genèse des débits est la topographie avec la morphométrie associée du bassin, qui joue à différentes échelles spatiales : ainsi, le ruissellement sur un versant dépend tout à la fois de sa pente et forme générales qui l'entraînent, du réseau de collecteurs (rigoles, fossés, sillons, traces de roues, chemins) plus ou moins incisés qui le concentrent (**Ludwig et al. 1996**), de la microtopographie qui le freine. Relativement stable au moins dans ses grands traits, ce facteur influe aussi sur la répartition spatiale des autres facteurs.

I.3.3 Typologie des écoulements

Limiter le calcul de la formation des crues sur un bassin versant au seul phénomène du ruissellement de surface serait, évidemment, par trop simpliste. D'autres phénomènes

interviennent dans des proportions variées, comme le mouillage, l'évapotranspiration, l'infiltration, les écoulements de subsurface ou encore les écoulements souterrains.

I.3.3.1 Ecoulements superficiels

La conception la plus connue de la genèse des débits dans les cours d'eau est celle proposée par (**Horton, 1933**) d'un partage de la pluie disponible au niveau de la surface du sol, après interception éventuelle par la végétation :

- Dès que l'intensité des pluies dépasse l'infiltrabilité du sol, elle-même variable selon son humidité, il y a saturation de la surface « par le haut » ; après avoir rempli les dépressions superficielles, l'eau en excès s'écoule par ruissellement sur les versants pour former l'écoulement rapide de crue ;
- Le reste de l'eau s'infiltré et contribue à la recharge des nappes et au débit de base, par un écoulement lent à travers les formations superficielles.

❖ Les précipitations directes à la surface libre du cours d'eau :

Parmi les processus de génération de crue, le premier qui peut être souligné est bien évidemment la contribution directe de la précipitation sur la surface des cours d'eau du bassin versant. Cependant, ce type de processus est considéré comme marginal du fait que la surface occupée par les cours d'eau de type pérenne ne représente qu'une très faible fraction de la surface totale du versant.

❖ L'écoulement de surface :

Ou ruissellement est constitué par la frange d'eau qui, après une averse, s'écoule plus ou moins librement à la surface des sols. L'importance de l'écoulement superficiel dépend de l'intensité des précipitations et de leur capacité à saturer rapidement les premiers centimètres du sol, avant que l'infiltration et la percolation, phénomènes plus lents, soient prépondérantes.

On distingue :

❖ Ecoulement par dépassement de la capacité d'infiltration :

L'écoulement par dépassement de la capacité d'infiltration du sol (écoulement Hortonien) est considéré comme pertinent pour expliquer la réponse hydrologique des bassins en climats semi-arides ainsi que lors de conditions de fortes intensités pluviométriques. I

❖ Ecoulement sur surfaces saturées :

L'écoulement sur surfaces saturées se produit lorsque la capacité du sol à stocker l'eau est épuisée et lorsque la capacité à transmettre latéralement le flux d'eau est dépassée. Par conséquent, l'eau ne pourra plus s'infiltrer et va s'écouler en surface.

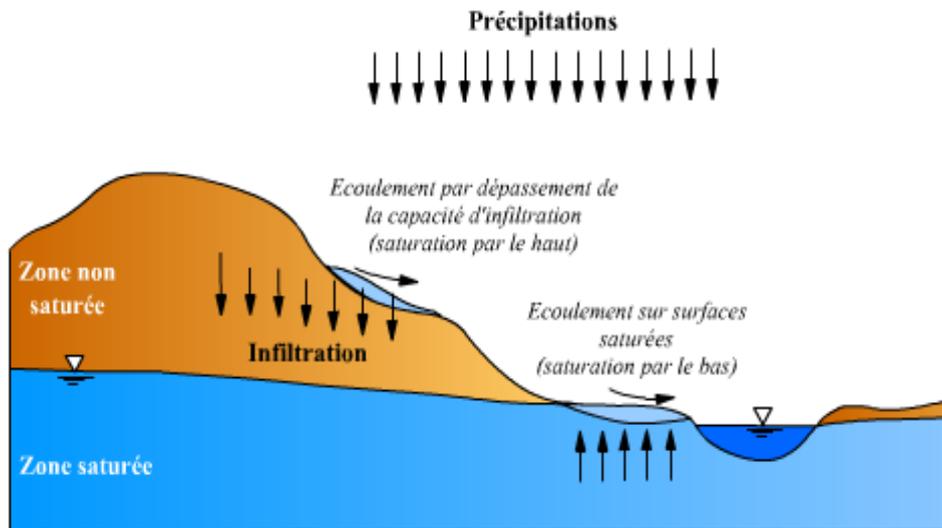


Figure I.3 - Processus de génération d'écoulement (Musy, 2005)

I.3.3.2 Ecoulement hypodermique

L'écoulement de subsurface ou écoulement hypodermique comprend la contribution des horizons de surface partiellement ou totalement saturés en eau ou celle des nappes perchées temporairement au-dessus des horizons argileux. Ces éléments de subsurface ont une capacité de vidange plus lente que l'écoulement superficiel, mais plus rapide que l'écoulement différé des nappes profondes.

I.3.3.3 Les processus souterrains

Lorsque la zone d'aération du sol contient une humidité suffisante pour permettre la percolation profonde de l'eau, une fraction des précipitations atteint la nappe phréatique. L'importance de cet apport dépend de la structure et de la géologie du sous-sol ainsi que du volume d'eau précipité.

- **Intumescence de la nappe**

Le processus d'écoulement par intumescence de la nappe trouve son origine dans le soulèvement rapide de la nappe en bas de versant. Ce soulèvement est rendu possible par la proximité du sommet de la nappe avec la surface. Il entraîne alors une augmentation rapide du gradient de charge hydraulique de la nappe durant la crue. De plus, ce processus est fortement lié à la présence d'une frange capillaire proche de la surface, ce qui entraîne que le profil de sol est proche de la saturation.

En conséquence, seule une faible quantité d'eau suffit à déclencher ce type de processus. (**Musy, 2005**).

I.3.4 Variabilité des écoulements

La variabilité temporelle des écoulements solide et liquide est intéressante à examiner aussi bien d'année en année que de saison en saison, (**Touaibia, 2001**).

I.3.4.1 Mesure des écoulements

Pour mesurer le débit d'un écoulement naturel (cours d'eau, canal, dérivation...), il existe quatre grandes catégories de méthodes.

- Les méthodes "volumétriques" (ou jaugeage capacitif) permettent de déterminer le débit directement à partir du temps nécessaire pour remplir d'eau un récipient d'une contenance déterminée.
- Les méthodes "d'exploration du champ de vitesse" consistent à déterminer la vitesse de l'écoulement en différents points de la section, tout en mesurant la surface de la section mouillée.
- Les méthodes "hydrauliques" tiennent compte des forces qui régissent l'écoulement (pesanteur, inertie, viscosité...). Ces méthodes obéissent aux lois de l'hydraulique.
- Les méthodes "physico-chimiques" prennent en compte les variations, lors de l'écoulement, de certaines propriétés physiques du liquide (concentration en certains éléments dissous). Ces méthodes consistent généralement à injecter dans le cours d'eau un corps en solution, et à suivre l'évolution de sa concentration au cours du temps. Ce sont les méthodes dites «par dilution» ou encore «chimique», (**Musy, 2005**).

I.3.4.2 Difficulté de la mesure des écoulements

Ces méthodes restent toutefois très approximatives puisqu'elles reposent sur certain nombre d'hypothèses qui sont généralement mal respectées, en particulier en cas de très fortes crues. La réduction du nombre de stations de mesure semble un moyen de limiter les dépenses, cela peut aussi se traduire par une perte économique à long terme en raison des incertitudes additionnelles qui affecteront les calculs hydrologiques utilisant les données ainsi produites.

Ces évaluations d'incertitude dépendent de différents facteurs : l'objectif de l'étude hydrologique (connaissance des crues ou des étiages par exemple), les outils utilisés pour estimer les débits aux sites dépourvus de stations, les caractéristiques des bassins versants étudiés, l'existence ou non de quelques mesures ponctuelles de débit. Les méthodes qui permettent de mesurer directement ou indirectement une partie du débit sont nombreuses. Etant convaincu qu'une mauvaise mesure vaut mieux qu'un bon calcul, (**Roche, 1963**).

▪ Contraintes spatiales

Lors de l'étude des propriétés des sols et des écoulements, le facteur problématique est l'hétérogénéité des formations du sol en place lequel provoque une grande variabilité spatiale dans le mouvement des eaux. Plusieurs études décrivent les propriétés hydrauliques d'un sol au moyen de fonctions aléatoires (**Bresler et al, 1983**) ont discuté l'utilisation efficace du concept des probabilités dans la description de l'écoulement de l'eau souterraine à l'échelle du terrain. La difficulté est liée au fait que les données expérimentales existantes sont très dispersées dans l'espace et le mécanisme contrôlant les écoulements n'est pas encore très bien connu.

▪ Contraintes temporelles

Il est possible de donner plusieurs définitions de la variabilité temporelle des débits, en particulier selon l'échelle de temps considérée et la référence qui détermine la variation. Celles qui suivent sont intimement liées aux contraintes régissant l'équilibre d'un écosystème aquatique. Les paramètres de l'écoulement (type de sol, topographie, réseaux hydrologiques....) ne varient pas dans le temps.

I.5 Influence des cycles de sécheresse sur les régimes d'écoulement : cas de l'Algérie

La sécheresse survient suite à l'affaiblissement prolongé des apports pluviométriques au niveau des bassins versants. Un déficit d'écoulement en résulte systématiquement au niveau des cours d'eau. La recharge des nappes souterraines est réduite et les opérations d'irrigation sont compromises. (**Mokssit, 1996**).

On distingue schématiquement plusieurs types de sécheresse :

Les sécheresses dites exceptionnelles qui se traduit par un déficit pluviométrique important, affectant une vaste région pendant un temps pouvant atteindre plusieurs années consécutives. C'était le cas des sécheresses des années 1913-1915 et 1940-1949 au Sahel. Il faut signaler que durant ces 13 14 mêmes périodes, on a enregistré des sécheresses analogues en Algérie, durant le 19ème siècle, à partir des données sur Oran Boudens qui ont débuté en 1870, nous avons remarqué qu'une sécheresse s'est produite au début des années 1890.

Les sécheresses que l'on pourrait appeler "méditerranéennes" sont liées aux irrégularités du climat méditerranéen. Elles peuvent compromettre les récoltes d'une saison sans qu'il y ait pour autant un déficit global annuel important. En effet pour les céréales, les pluies de printemps, qui correspondent à la phase maturité des céréales jouent un grand rôle dans la valeur du rendement. (BIR, 2008)

I.5.1 L'impact de la sécheresse

La sécheresse a de profonds retentissements. Elle affecte nos vies en exerçant des contraintes sur l'approvisionnement en eau en dégradant l'environnement et la santé humaine par la mauvaise qualité de l'eau, en intensifiant l'érosion du sol et en portant préjudice à l'économie du fait de la réduction de la capacité de production agricole.

I.5.1.1 Problème d'approvisionnement en eau

En période de sécheresse, la demande en eau tend à augmenter. L'approvisionnement hydrique à usage domestique se pose en termes de quantité et de qualité. D'après les statistiques de 1994-1995, la ressource en eau mobilisable en Algérie est de 14.43 Km³/an. Cette valeur est inférieure à la normale si on considère la capacité de mobilisation des ressources en eau pour la majorité des pays de la méditerranée qui ont une population légèrement supérieure, et même inférieure que celle de l'Algérie.

Cette situation a entraîné des restrictions et des coupures dans l'approvisionnement en eau potable, dans de nombreux noyaux urbains surtout les grandes villes comme Oran et Alger. Ces restrictions sont devenues de plus en plus sévères suite à la persistance de la sécheresse des deux dernières décennies.

I.5.1.2 La surexploitation des aquifères

En Algérie, la demande en eau et la sécheresse associées ont causé une diminution de la ressource en eau souterraine. La pénurie de ressources hydriques superficielles a entraîné, pendant les dernières années, une exploitation intensive des nappes souterraines surtout à usage agricole, ce qui a produit de fortes baisses de niveaux phréatiques.

I.6 Gestion des ressources en eau : Enjeux et contraintes

La situation actuelle en Algérie se caractérise par un déséquilibre entre les besoins et les ressources en eau disponibles. La pollution des nappes et des ressources superficielles par les rejets domestiques, industriels et agricoles dépassent de loin les capacités de traitement des systèmes d'épuration.

Ces dégradations réduisent les volumes d'eau susceptibles d'être utilisés. Cette situation de pénurie des ressources en eau et ces contraintes ont souvent été appréhendées en termes de réalisation d'infrastructures ou plus exactement de construction de barrages. Cette approche s'est avérée insuffisante, dans la mesure où elle n'a pas permis une bonne satisfaction des besoins, malgré l'importance des investissements consentis. Aussi est-il nécessaire d'envisager de nouvelles stratégies de planification, d'aménagement et de gestion nos ressources, basées sur des outils modernes d'investigation, de prévision et de gestion, tenant compte des nouvelles conditions hydro-climatiques et socio-économiques du pays. (TALBI et al, 2016)

I.6.1 Nécessite de la prévision des apports

Dans toute l'acceptation du terme, prévoir une crue c'est dire à l'avance quel sera le débit ou la cote de la rivière en une station donnée à une date donnée. Les méthodes envisagées pour résoudre ce problème sont extrêmement nombreuses, aussi nous contenterons-nous d'en esquisser les principes en insistant seulement sur celle d'entre elles qui nous paraît susceptible de l'application la plus générale.

Un second aspect des questions de prévisions se rapporte non plus tellement à la prévision la plus exacte possible d'une cote à un instant donné, mais à l'évaluation même grossière des apports susceptibles de survenir à plus ou moins longue échéance, indication précieuse pour l'exploitation d'une retenue. Ces prévisions ont un caractère très différent des premières.

Alors que celles-ci sont basées presque exclusivement sur les propriétés hydrauliques du réseau, celles-là mettent en jeu les données recueillies aux postes pluviométriques, car il est alors nécessaire de prévoir le plus longtemps possible à l'avance, avant que l'eau pluviale n'ait gagné la partie du réseau où la propagation des crues puisse être utilisée.

Des méthodes analogues peuvent être employées dans certains cas pour prévoir la date et l'importance du maximum annuel très longtemps à l'avance. (Roche ,1963)

I.7 Conclusion

Chapitre I : Les processus hydrologiques

A partir de ce chapitre on a pu démontrer qu'un bassin versant apparait comme un système complexe, et que les processus hydrologiques interviennent à différentes échelles de temps et d'espace (ces derniers nous a donné l'occasion de détailler les divers phénomènes intervenants dans de la génération des débits), où l'eau circule à des vitesses et suivant des cheminements très variables selon les endroits et les moments.

L'élaboration de modèles de simulation des débits pour la prévision, la gestion et la simulation est devenu une obligation, vu la difficulté de l'expérimentation et la nécessité d'une gestion plus rationnelle des ressources en eau.

Chapitre II : Etude des modèles pluie-débit en hydrologie

Introduction

Malgré l'évolution des techniques de mesures (télédétection, méthodes géophysiques,...) notre connaissance du système bassin versant reste limitée. Le comportement hydrologique d'un hydrosystème donné est éminemment complexe (**Musy et Higy, 2004**). Cette complexité résulte d'abord de la complexité et de l'hétérogénéité du milieu proprement dit (cf, géomorphologie du bassin versant, occupation des sols, sols et géologie, réseau hydrographique).

Tous les modèles hydrologiques sont de ce fait une représentation extrêmement simplifiée de l'hydrosystème et de son fonctionnement. Pour des raisons de commodité, ces modèles sont en particulier construits en se concentrant sur les processus ainsi que sur les échelles spatiales et temporelles déterminants pour les phénomènes hydrologiques visés. (**Hingray et al, 2009**)

Dans les années 1930, de nouvelles théories basées sur des concepts simples, comme la théorie d'infiltration de Horton (**Horton, 1933**) ou l'hydrogramme unitaire de Sherman (**Sherman, 1932**), sont apparues. « Ces modèles » se sont révélés très efficaces pour répondre aux attentes des hydrologues.

Actuellement avec le développement de l'informatique, les modèles hydrologiques en particulier les modèles pluies-débits sont de plus en plus appliqués dans de nombreuses recherches en hydrologie.

II.1 Définition d'un modèle

Un modèle est une représentation simplifiée, relativement abstraite, d'un processus, d'un système, en vue de le décrire, de l'expliquer ou de la prévoir (selon le Glossaire International d'Hydrologie), ou bien c'est un Système physique, mathématique ou logique représentant les structures essentielles d'une réalité et capable à son niveau d'en expliquer ou d'en reproduire dynamiquement le fonctionnement (**Musy et al, 1998**).

En hydrologie : Un modèle est un outil numérique de représentation de d'un processus hydrologique l'échelle d'un bassin versant. Il permet de transformer des séries temporelles décrivant le climat d'un bassin versant donné (séries de précipitations et de températures par

exemple, séries qui sont les entrées du modèle hydrologique) en une série de débits (sortie du modèle hydrologique).

De nombreux modèles hydrologiques ont été développés depuis la fin des années 1960. Le choix du type de modèle à utiliser dépend généralement de l'objectif de modélisation ainsi que des données d'entrées disponibles.

II.1.1 Propriétés requises des modèles

Les modèles auxquels on s'intéresse dans ce mémoire font partie des modèles hydrologiques pluie-débit.

Face à la diversité des bassins versants et des applications possibles des modèles hydrologiques, (Klemeš,1986) a défini les qualités attendues des modèles hydrologiques, qui sont principalement:

- Le modèle doit être basé sur des fondements scientifiques sains ;
- Les données nécessaires au bon fonctionnement du modèle doivent être en accord avec la disponibilité de celles-ci ;
- La complexité du modèle doit être aussi limitée que possible pour atteindre un objectif de performance donné ;
- Le modèle doit être correctement validé, général, transposable et robuste ;
- Le modèle doit être compréhensible par les utilisateurs.

L'évaluation de ces qualités peut se faire, soit de manière qualitative (appréciation), soit de manière quantitative et objective (critères numériques). Ainsi, un des moyens d'évaluer la capacité d'un modèle à produire de bonnes simulations, est de conduire une étude comparative des performances de différentes structures de modèles, sur un certain nombre de bassins versants (Perrin, 2000).

II.1.2 Objectifs de la modélisation pluie-débit

Au cours de ces dernières années, les efforts de la recherche pour la compréhension du cycle de l'eau dans les milieux naturels (bassins versants, rivières, nappes,...) associés au développement de l'informatique, se sont concrétisés par l'apparition d'une multitude de modèles mathématiques. On peut distinguer trois types d'utilisation des modèles mathématiques en hydrologie (Gaume, 2002) :

- **La modélisation comme un outil de recherche :** la modélisation peut être utilisée pour interpréter des données mesurées à différents scénarios de fonctionnement hydrologique des bassins versants peuvent confrontés aux mesures.
- **La modélisation comme un 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 hydrologiques. Dans la plupart des cas cependant, les modèles développés sont basés sur des régressions linéaires entre les variables indépendantes (pluie, débits amont) et les variables dépendantes (débits aval), et font peu appel aux connaissances sur les processus hydrologiques.
- **La modélisation comme outil d'extrapolation :** Dans certain cas comme la délimitation de zones inondables dans le cadre d'un plan de prévision des risques, il est nécessaire de proposer des scénarios de crues, ou éventuellement d'étiage, de période de retour nettement supérieure à la durée d'observation des débits sur le site étudié.

II.2 Les modules hydrologiques d'un modèle pluie-débit

Lorsqu'ils visent à simuler le comportement hydrologique des hydro-systèmes, les modèles hydrologiques résultantes de l'association de différentes modules qui s'attachent chacun à représenter une partie des processus hydrologiques jugés important, ces modules sont parfois indépendants. Ils sont le plus souvent indépendants les uns des autres, la sortie de l'un produisant les entrées d'un autre.

On distingue quatre types de variables qui peuvent exister en totalité ou en partie dans chaque modèle :

- ✓ **Variable d'entrées :** le modèle fait appel à ces variables qui dépendent du temps et/ou de l'espace (pluie, ETP, caractéristiques physiques et hydrodynamique du milieu)
- ✓ **Variable de sortie :** le modèle répond par un ensemble de variables (débits, flux ou concentration en polluant, ...)
- ✓ **Variable d'état :** elles permettent de caractériser l'état du système modélisé et peuvent en fonction du temps (niveau de remplissage des réservoirs d'eau d'un bassin versant, taux de saturation des sols, profondeur des sols, pentes ...) (**Gaume, 2002**)

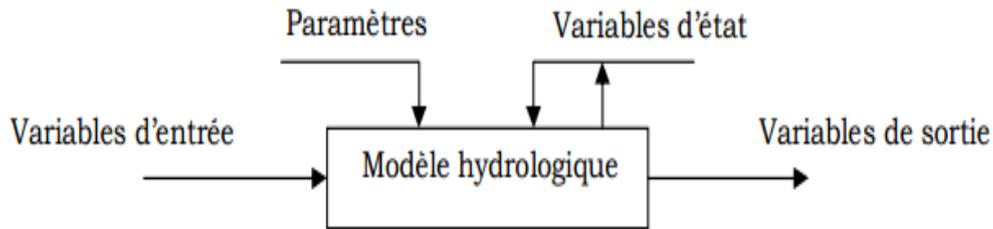


Figure II-1 : Les variables d'un modèle hydrologique (Gaume, 2002).

II.3 Représentation des processus hydrologiques

Différents types d'approches ont été développées pour représenter la relation pluie-débit: les approches empiriques, les approches conceptuelles et les approches à base physique. Le choix d'un type d'approche de représentation des processus conditionne particulièrement les autres caractéristiques d'un modèle hydrologique: un modèle hydrologique empirique ne nécessite pas de discrétisation spatiale des processus par exemple et est donc généralement global.

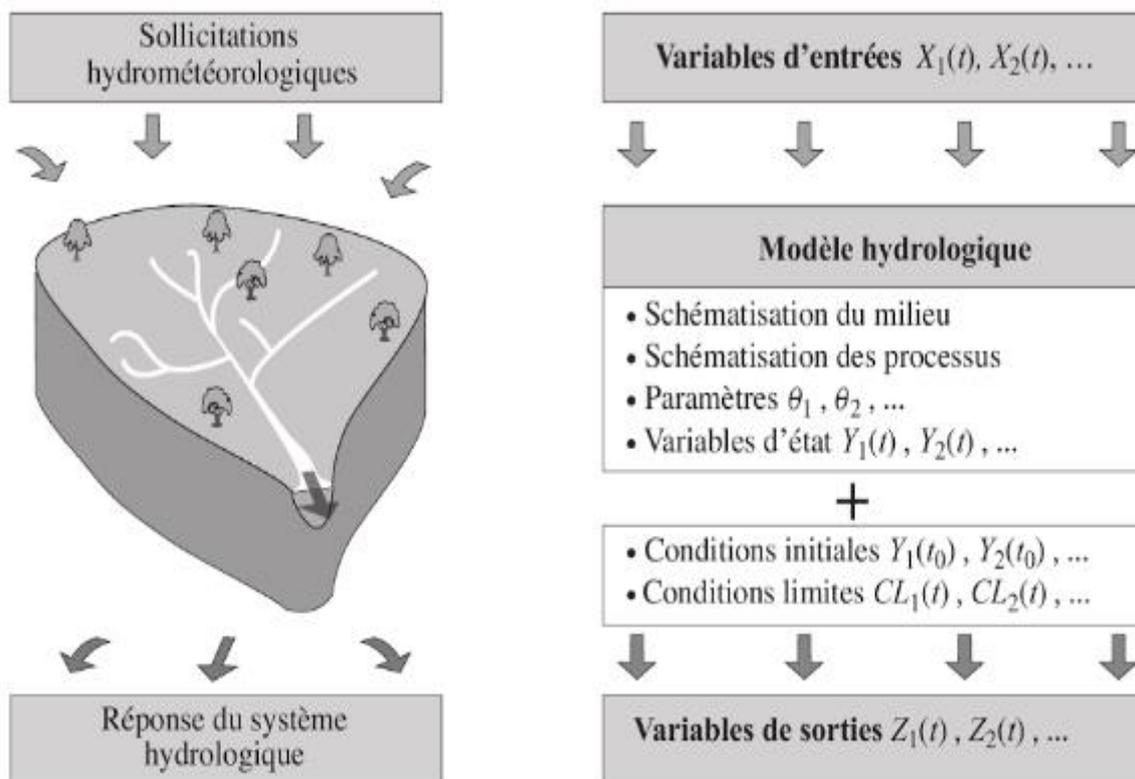


Figure II-2 : Structure et variable type d'un modèle hydrologique (Hingray et al, 2009)

II.4 Typologie des modèles

Il existe de très nombreux modèles hydrologiques, qui varient en nature et en complexité. L'établissement d'une typologie est difficile et ambiguë du fait de la variété des critères de classification possibles. Diverses classifications ont été proposées dans la littérature (Singh, 1995 ; ASCE, 1996 ; Resgaard, 1997 ; Ambroise, 1998). Elles varient selon le point de vue adopté :

- Suivant la nature des relations utilisées pour la représentation des processus, les modèles sont empiriques, conceptuels ou à bases physiques.
- Suivant leur manière de représenter le milieu, et en particulier suivant la nature de l'unité spatiale à laquelle est attachée la résolution des équations utilisées pour décrire les processus, les modèles sont globaux, distribués, spatialisés ou semi-spatialisés.
- Suivant leur manière de considérer les variables hydrologiques et les relations entre ces variables, les modèles sont déterministes ou stochastiques.
- Selon la nature des périodes de temps considérées pour la simulation, les modèles sont dits < évènementiels > ou < de simulation continue >.

II.4.1 Les modèles empiriques et/ou boîte noire

Un modèle empirique est construit autour de relations mathématiques directes établies entre les entrées et les sorties observées sur le bassin versant considéré. Ce type de modèle ne cherche pas à décrire les processus impliqués dans la relation pluie-débit et est donc souvent caractérisé comme des modèles "boîtes noires".

Les modèles empiriques reposent sur les relations observées entre les entrées et des sorties de l'hydrosystème considéré. Ils expriment la relation entre variables d'entrée et de sortie du système à l'aide d'un ensemble d'équations développées et ajustées sur la base des données obtenues sur le système. Un modèle empirique ne cherche pas à décrire les causes du phénomène hydrologique considéré ni à expliquer le fonctionnement de l'hydrosystème. L'hydrosystème est vu comme une boîte noire. (Hingray et al, 2009)

II.4.1.1 Les modèles régressifs et autorégressifs de type ARMA

Ces modèles s'appuient sur la théorie des modèles linéaires (modèles de régression et de corrélation). La forme générale du modèle est donnée par l'équation (Salas, 1993):

$$y_t = \mu + \sum_{j=1}^p \phi_j (y_{t-j} - \mu) + \sum_{j=1}^r \psi_j z_{t-j} + \varepsilon_t - \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j} \quad \text{II.1}$$

Où : $-\mu$ et ψ_1, \dots, ψ_r sont des paramètres du modèle, y_t et z_t respectivement la sortie (débit) et l'entrée exogène (pluie) à l'instant t , ϕ_1, \dots, ϕ_p

- p sont des p paramètres autorégressifs, θ_1, \dots, θ

- q , sont q paramètres de moyenne mobile et le bruit ε

- t est un processus normal non autocorrélé, de moyenne nulle et non corrélé à y_{t-1}, \dots, y_{t-p} .

II.4.1.2 Les modèles basés sur l'intelligence artificielle (Cas Les réseaux de neurones artificiels (RNA)) :

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) peuvent être définis comme un modèle de raisonnement basé sur le cerveau humain. Ils font partie de la catégorie des modèles « boîtes noires ». Mc Culloch et Pitts (1943) sont les premiers à montrer que des réseaux de neurones formels simples peuvent réaliser des fonctions logiques, arithmétiques et symboliques complexes.

Il existe de nombreux types réseau de neurones, caractérisés par leur fonction d'activation et la façon dont l'interconnexion se fait entre les neurones. Parmi ces types les Perceptrons Multicouches (PMC) sont utilisés en modélisation pluie-débit (Shamseldin et al., 1996).

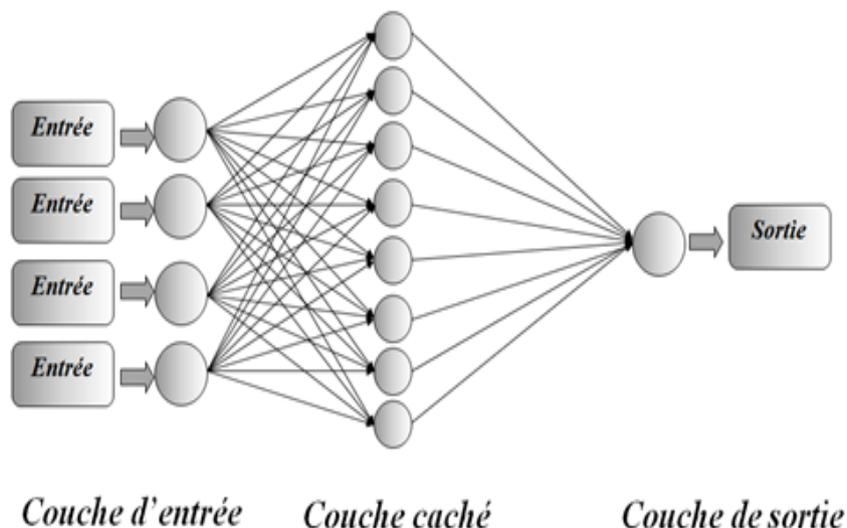


Figure II-3 : Structures des réseaux de neurones de type perceptron multicouche.

II.4.2 Les modèles conceptuels

Un modèle conceptuel cherche à représenter les principaux processus de la relation pluie-débit sans utiliser les lois physiques régissant les processus concernés. La représentation est conceptuelle dans le sens où elle se base sur la perception que l'hydrologue a du comportement hydrologique du bassin. Cette perception dérive de son expertise hydrologique et de sa connaissance théorique, empirique et/ou intuitive du fonctionnement de l'hydrosystème étudié. Pour les écoulements de surface par exemple ; un concept de modélisation assimile le bassin versant à un plan rectangulaire incliné de pente constante, configuration pour laquelle il est possible de dériver simplement les équations d'écoulement.

Ce type de modèle est généralement constitué de réservoirs connectés entre eux, dont les niveaux augmentent et diminuent au cours du temps et qui sont censés représenter les différents compartiments hydrologiques des bassins versants. L'utilisation de différents réservoirs permet une première séparation des composantes de la relation pluie-débit.

II.4.3 Les modèles déterministes et/ou physiquement fondés

Un modèle à base physique représente les processus de la relation pluie-débit en utilisant les lois physiques régissant ces processus. Les modèles de surface continentale sont également des modèles à base physique qui représentent la relation pluie-débit. Ce type de modèle permet, de plus, de calculer les différents termes du bilan d'eau du bassin versant étudié.

Les modèles à bases physiques représentent le fonctionnement hydrologique de l'hydrosystème par un couplage de sous-modèles, dédiés chacun à des processus hydrologiques distincts. Ils se basent en principe sur une discrétisation spatiale fine du milieu. Quelles que soient la nature et la résolution spatiale de cette discrétisation, il est important de noter que la variabilité spatiale du milieu et des processus ne peut être décrite explicitement que pour les échelles d'espace plus grandes que celles de la discrétisation. Pour les échelles inférieures, elle devrait être décrite de façon conceptuelle, ce qui n'est pas fréquemment le cas.

Le développement des modèles à base physiques à l'échelle du bassin versant date des années 1980. Le modèle à base physiques le plus célèbre et le plus documenté à ce jour est le système Hydrologique Européen connu sous l'acronyme SHE (Abbott et al, 1986a).

II.4.4 Modèles en fonction de la Représentation de l'espace

Le choix de la résolution spatiale d'un modèle déterminé quelle part de la variabilité spatiale peut être représentée de façon explicite et quelle part doit l'être de façon implicite.

Chapitre II : La modélisation pluie-débit en hydrologie

En pratique, il existe trois principales approches pour prendre en compte la variabilité interne aux éléments de discrétisation d'un modèle donné.

Le premier consiste à utiliser des paramètres dits effectifs dans les équations physiques décrivant les processus. Ces paramètres sont censés permettre de simuler le comportement global de l'élément de discrétisation considéré. Une conductivité « effective » est par exemple souvent utilisée pour décrire les écoulements saturés en milieu poreux hétérogène. La difficulté de cette approche consiste à estimer les valeurs de ces paramètres effectifs. **(Hingray et al, 2009)**

- **Modèle global :**

Dans un modèle global, le bassin versant est représenté comme une seule entité spatiale homogène. La variabilité spatiale des processus étudiés n'est donc pas explicitement prise en compte avec ce type de modèle.

- **Modèle semi-distribué :**

Dans un modèle semi-distribué, certains processus sont modélisés en divisant le bassin versant en plusieurs entités spatiales. Ce découpage de l'espace peut être réalisé grâce à des critères hydrologiques (découpage en sous bassin versant), ou des critères topographiques (découpage par bandes d'altitude). Ce modèle permet de prendre en compte la variabilité spatiale des processus étudiés.

- **Modèle distribué :**

Dans un modèle distribué, le bassin versant est divisé en plusieurs entités spatiales. Ce découpage de l'espace peut être sous la forme d'un maillage régulier, ou par sous bassins-versants. Ce modèle permet de prendre en compte la variabilité spatiale des processus étudiés.

II.5 Nécessite du calage et de la validation

II.5.1 Calage

La première phase de toute étude de simulation, hydrologique dans notre cas, constitue la phase de calage. Celle-ci a pour but de définir le modèle à construire et de le faire coïncider au maximum avec un événement réel pris comme référence. Les paramètres du modèle seront ainsi dits adaptés au modèle et au phénomène réel. Cette phase doit être effectuée avec la plus grande attention car elle constitue la base du travail. **(Berterreche et al, 2008)**.

Dans toute modélisation conceptuelle, le calage est une étape très importante pour la validation du modèle, **(Benkaci, 2001)**

II.5.2 La validation

Cette étape de calage ne suffit cependant pas à s'assurer du réalisme du modèle: il reste encore à le valider, en vérifiant si le modèle calé simule correctement des séries de données spatio-temporelles de référence non utilisées lors du calage, portant de nouveau si possible sur plusieurs variables d'intérêt -et non pas seulement sur les débits, comme c'est encore trop souvent le cas. Comme le recommande (**Klemes, 1986b**), cette validation devrait au minimum comporter les étapes itératives suivantes

- Calage sur une période et un bassin de référence, si possible pour plusieurs variables d'intérêt.
- Validation sur d'autres périodes pour le même bassin (*split-snnzple test*) et sur plusieurs flux et variables internes du bassin, sans modifier le jeu de paramètres estimés ou calés;
- transposition à d'autres bassins similaires (*proxy-basin test*) et pour les périodes de référence disponibles, en conservant ou adaptant le jeu de paramètres précédent sans nouveau calage.

Chacune de ces étapes peut conduire à remettre en cause la paramétrisation ou la structure du modèle en cas de simulation insatisfaisante au vu de la fonction-objectif choisie: tout échec ou erreur en modélisation est en fait plein d'enseignements (**Ambroise, 1998**).

II.6 Critères d'appréciation des modèles

La calibration d'un modèle hydrologique nécessite de définir un ou plusieurs critères de performance. Les critères possibles sont multiples. Peuvent être aussi utilisés pour l'étape d'évaluation du modèle.

La performance d'un modèle peut être évaluée qualitativement en comparant visuellement, sur la base d'une même représentation graphique, les valeurs observées et les simulées d'une variable donnée. Plusieurs types de représentations graphiques peuvent être considérés. Il peut s'agir, par exemple de :

- L'évolution temporelle, à différents pas de temps et sur une fenêtre temporelle donnée, de la variable d'intérêt.
- La structure spatiale, à un instant donné, de la variable d'intérêt si le modèle est spatialisé, semi-spatialisé et si les observations correspondantes sont disponibles.
- La distribution statistique de la variable d'intérêt (cf, distribution statistique des débits journaliers, des débits maximum de crue au pas de temps horaire).

En contrepartie des critères numériques ont été développées pour mieux juger les performances des modèles pluie-débit.

II.7 Optimisation des modèles pluie-débit

L'estimation des paramètres des modèles pluie-débit est la première problématique dans leur application.

Les différentes méthodes de recherche d'un optimum dans l'espace des paramètres permettent de répartir les algorithmes en deux grandes catégories, avec d'un côté les méthodes locales et de l'autre les méthodes globales.

II.7.1 Les méthodes locales

Adoptent une stratégie itérative dans laquelle, partant d'un point de l'espace des paramètres, on se déplace dans une direction qui améliore continûment la valeur de la fonction critère, jusqu'à ne plus pouvoir générer d'amélioration. Le jeu de paramètres trouvé correspond alors à l'optimum de la fonction. Au sein des méthodes locales, on peut distinguer deux sous-groupes, les méthodes directes et les méthodes de gradient.

II.7.2 Les méthodes globales

Les méthodes d'optimisation globales ont été développées pour remédier à ces limitations. Elles permettent d'explorer une partie beaucoup plus grande de l'espace des paramètres optimal en évitant le blocage sur un optimum local ou un autre.

- **La méthode SCEUA: « Shuffled Complex Evolution method developed at the University of Arizona »**

Depuis son apparition dans la littérature (**Duan et al, 1993**), cet algorithme est devenu une méthode d'optimisation très largement utilisée pour le calage des modèles hydrologiques. Par sa forte popularité tant dans le domaine de la recherche que dans le milieu opérationnel, l'algorithme SCEUA apporte un standard au niveau de la performance des méthodes d'optimisation auquel il est convenable de comparer d'autres approches de calage. Bien que sa renommée soit faite pour le calage de modèles hydrologiques conceptuels et globaux, SCEUA offre une stratégie d'optimisation efficace qui pourrait également répondre à la problématique de calage de modèles hydrologiques plus complexe.

II.8 Etude des modèles conceptuels a réservoirs

Ces modèles sont structurés à partir de deux composantes majeures:

- un module de production responsable de la détermination des bilans en eau, c'est-à-dire de la répartition de la pluie brute en pluie nette (alimentant le débit), en quantité évaporée et en quantité stockée. Parfois présentes dans les modèles, les fonctions d'échanges en eau, permettant de simuler des pertes et/ou des apports vers ou de l'extérieur, font également partie de ce module;

- un module de routage ou transfert permettant d'assurer la répartition temporelle de la quantité d'eau transitant dans le cours d'eau (**Perrin, 2000**).

❖ La fonction de transfert

C'est la fonction qui permet le transfert, comme son nom l'indique, la quantité d'eaux déterminée par la fonction de production vers le cours d'eau. Elle permet la transformation de la pluie nette en un hydrogramme à l'exutoire du bassin versant donc de donner une forme à la crue dont le volume a été déterminée par la fonction de production, en simulant l'hydrogramme de crue à l'exutoire.

II.9 Présentation de quelques modèles hydrologiques

II.9.1 Le modèle GR4J

Le modèle GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier) est un modèle pluie-débit global à quatre paramètres. 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...) (**Perrin et al, 2007**). 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.

• Les Paramètres de GR4J

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)

Chapitre II : La modélisation pluie-débit en hydrologie

- la surface du sol donne lieu au ruissellement superficiel (Horton ou Aires contributives saturées),
- la zone racinaire retient l'eau de pluie en début d'événement,
- la zone insaturée transfère la pluie infiltrée vers la zone saturée selon l'équation de Darcy,
- la zone saturée s'écoule vers l'exutoire.

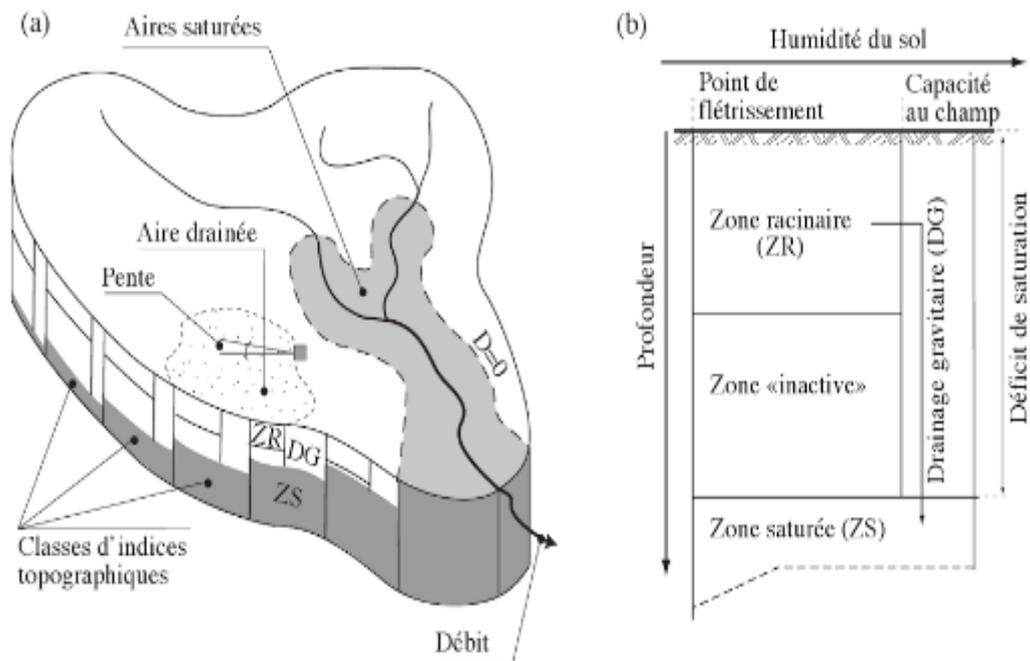


Figure II-5 : Structure du Modèle TOPMODEL (Beven et al, 1984)

II.10 Conclusion

La modélisation pluie-débit est considérée actuellement comme un des moyens les mieux adaptés pour décrire de façon assez simple une réalité complexe du fonctionnement d'un bassin versant. Dans cette étude, à travers une description des différents modèles, nous avons présenté la diversité des modèles mathématiques en hydrologie pour le traitement des problèmes liés à la simulation de la transformation de la pluie en débit.

Dans notre cas, le modèle qui sera appliqué pour tester leur aptitude à simuler les débits d'un bassin versant est le modèle Génie Rural à deux paramètres (GR2M).

Chapitre III : Simulation des écoulements mensuels par un modèle pluie-débit, cas du bassin de l'Isser

Introduction

Tout au long du développement de l'hydrologie, la simulation de la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant par des modèles mathématiques a connu un fort essor depuis le début des années 60 grâce notamment à l'accroissement des capacités de calcul, (Yang, 1993).

Il existe aujourd'hui un grand nombre de modèles, parmi lesquels on trouve les modèles conceptuels ou empiriques globaux qui représentent le lien entre la pluie et le débit par des agencements variés de réservoirs. Dans ce chapitre, on représente un modèle hydrologique conceptuel dite GR2M.

III.1. Présentation de la zone d'étude : le bassin versant de l'Isser

Le Nord de l'Algérie est divisé en plusieurs bassins versants, alimentés par des oueds qui présentent différentes longueurs. Le bassin du Cheliff situé à l'ouest du pays est le plus important par sa superficie (43500km²).

Dans notre étude, nous avons étudié le bassin versant de l'Isser situé dans le Nord Algérien, et limité par :

- Nord Est par la daïra de Drâa El Mizane,
- Sud Est par la wilaya de Bouira,
- Sud par la daïra d'Ain boucif
- Sud-Ouest par la daïra de Ksar El Boukhari et la wilaya de Médéa,
- Nord-Ouest par les daïras de Tablat et Larbâa
- Nord par la mer Méditerranée

III.2 Géologie de la zone d'étude

Le bassin versant de l'oued Isser est caractérisé par des terrains azoïques, du crétacé, du paléogène et du quaternaire.

Ce bassin est formé en majeure partie de roches tendres; marnes et argile. Les formations lithologiques rencontrées dans le bassin selon leur importance sont : (**BETERRECHE L,2008**)

- **Crétacé (inférieur, moyen et supérieur):** Représenté par des marnes et marne-calcaire, il occupe environ 50% de la superficie totale.
- **Quaternaire:** Des alluvions anciennes et récentes qui occupent une superficie environ 15% de la superficie totale.
- **Oligocène marin:** Représenté par des conglomérats de grés et de marne, il couvre une superficie de 566 Km² soit 13% de la superficie totale.
- **Aquitainien continental :** C'est des sables rouges et des argiles, il couvre environ 10% de la superficie totale.
- **Miocène (inférieur, moyen et supérieur):** C'est des grés et des marnes, il couvre une superficie de 212 Km² soit 5% de la superficie totale.
- **Eocène (calcaires et marnes ou marno-calcaires) :** Les marnes sont de teinte jaunâtre, au milieu et partiellement au sommet de ces formations marneuses, des intercalations gréseuses en blanc apparaissent. Ces grés essentiellement quartzeux se désagrègent facilement et laissent au pied de leurs affleurements des accumulations sableuses. Cet étage couvre environ 5% de la surface totale.
- **Trias marin ou lagunaire :** Peu représentatif avec une superficie de 15 Km² soit 0,33 %, cependant, cette formation est responsable de la salure de l'oued Malah, ces roches enrichissent le sol en gypse (CaSO₄).

III.3 Hydrologie du bassin de l'Isser

Le bassin de l'Isser est situé au Nord de l'Algérie, avec une superficie totale de 4149 Km², ce qui vaut à 8.72% de la superficie totale du bassin Algérois - Hodna – Soummam.

Son climat est méditerranéen, froid et humide en hiver, chaud et sec en été, la pluviométrie moyenne est de 800mm/an.

Il est limité comme suit:

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

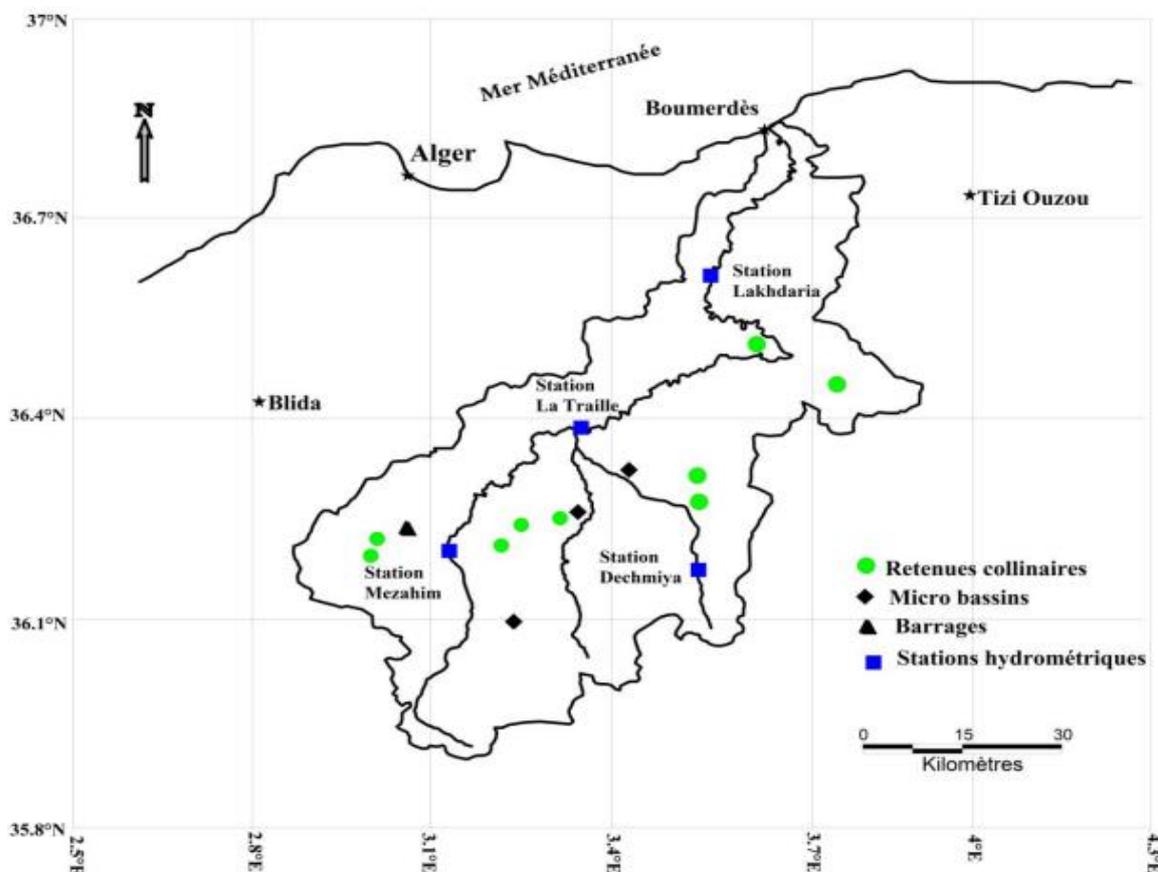


Figure III.2 : Carte de Situation du bassin de l'Isser

III.3.1 Caractéristiques morphométriques

Le bassin versant d'Isser est formé essentiellement des cinq sous-bassins. Afin de mieux étudier la particularité du relief du bassin et pour mieux comprendre le comportement hydrologique du bassin versant, il est impératif de connaître ses caractéristiques morphométriques (forme, altitude, pente...) qui explique le cycle de transformation des pluies en écoulement et s'apprêtent à une analyse quantifiée.

Chapitre III : Simulation des écoulements mensuels

Les caractéristiques du bassin de l'Isser sont résumées comme suit :

■ Courbe hypsométrique

III.1 Répartition altimétrique du bassin versant d'Isser

Tranches d'altitudes (m)	Moyennes (m)	Superficies partielles		
		Km2	%	% Cumulés
1600-1800	1650	2,63	0,06	0
1400-1600	1500	6,38	0,16	0,06
1200-1400	1300	80,02	1,94	0,22
1000-1200	1100	270,18	6,56	2,16
800-1000	900	823,2	20	8,73
600-800	700	1267,2	30,79	28,73
400-600	500	910,2	22,11	59,51
200-400	300	370,15	8,99	81,63
0-200	100	386,04	9,38	90,62
Totaux		4116	100	100

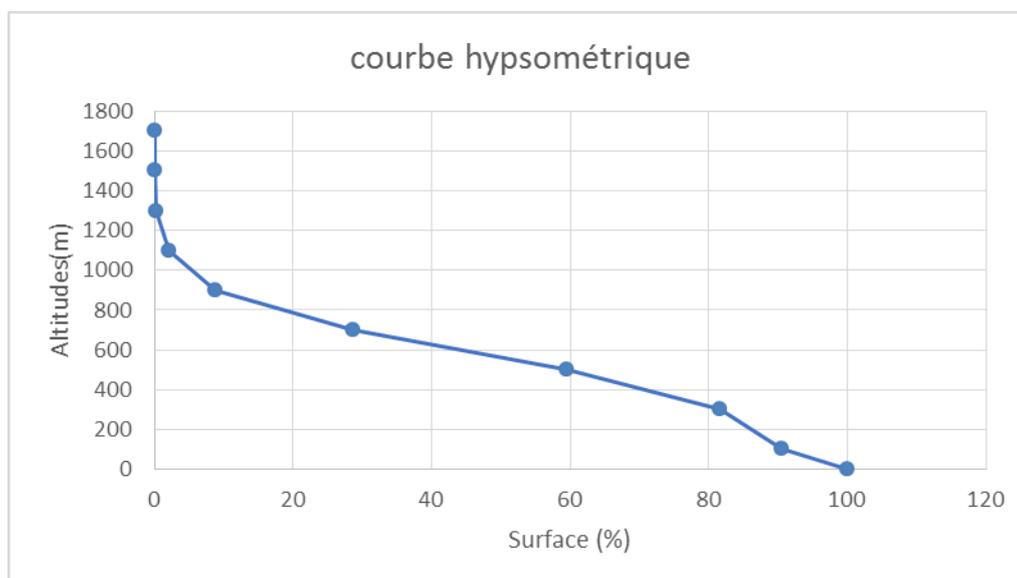


Figure III.3 : Courbe hypsométrique du bassin d'Isser

Chapitre III : Simulation des écoulements mensuels

Tableau III.2 : caractéristiques hydrologiques du bassin d'Isser

Caractéristiques	Bassin Isser
A(Km ²)	4119,08
P(Km)	416,15
Kc	1,816
L(Km)	185,92
Altitude maximale(m)	1802
Altitude minimale(m)	0
Altitude moyenne(m)	659,9
Ig(m /Km)	4,95
Dg(Km/Km ²)	0,64
Tc(Heures)	24,4

Source : ANRH Alger 2014

III.4 Etude de la pluviométrie

L'étude des précipitations est importante dans toute analyse hydrologique, puisqu'elle permet de caractériser le régime pluviométrique et son influence sur les crues, ce qui permet de mieux dimensionner les ouvrages hydrotechniques. Les données utilisées nous ont été fournies par l'Office National de la Météorologie (O.N.M) et l'Agence Nationale des Ressources en Hydrauliques (ANRH).

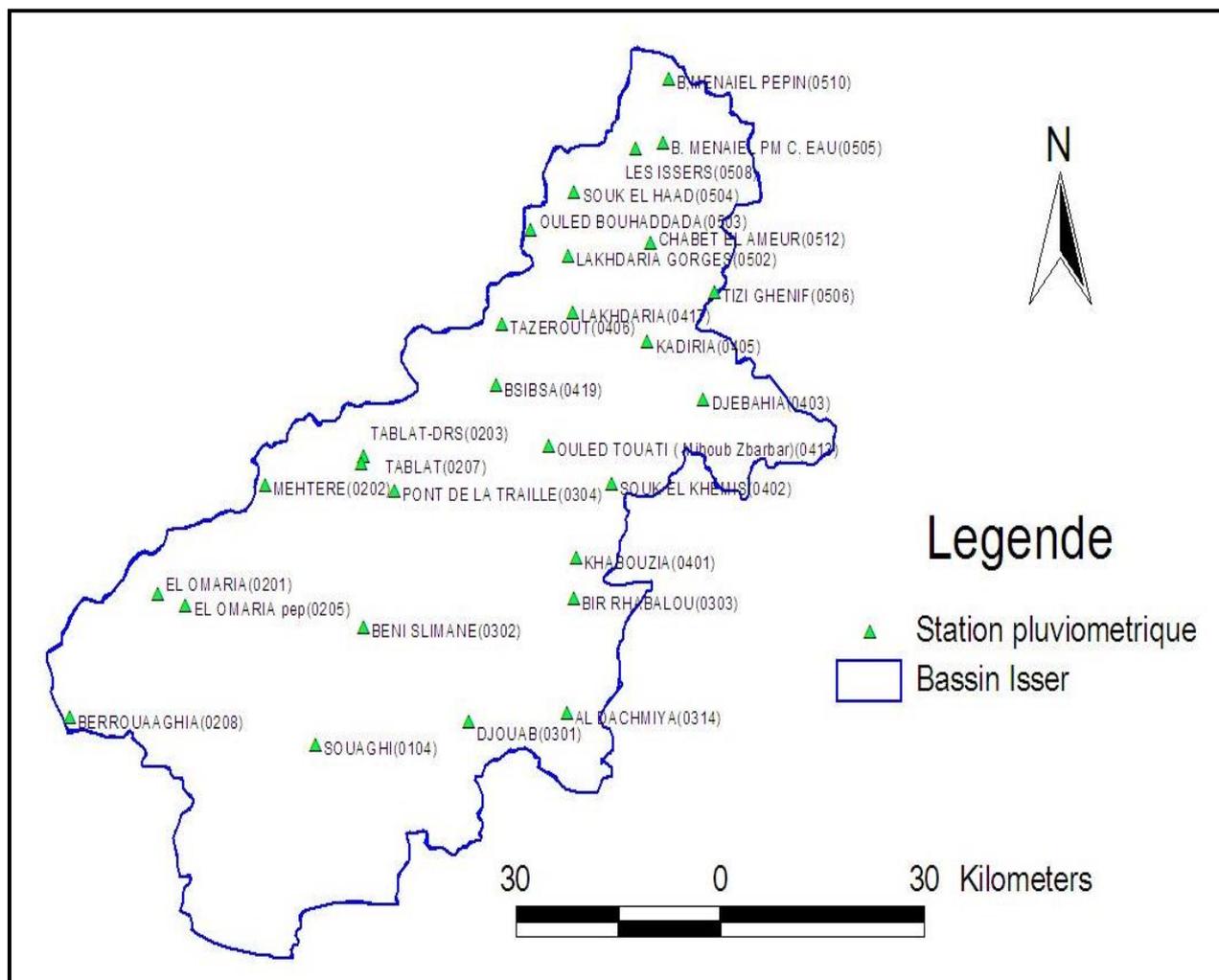
III.4.1 Choix de la station pluviométrique

Le bassin de l'Isser dispose d'un réseau pluviométrique assez dense, constitué par vingt (20) stations d'observations. Le tableau III.3, nous indique la position des stations qui peuvent être exploitées, la figure montre leur répartition spatiale.

Tableau III.3 : Caractéristiques des stations pluviométriques

Code	Station	Coordonnées Lambert (Km)		Altitude (m)
		XLNA	YLNA	
90417	LAKHDARIA	579,50	363,00	158

Chapitre III : Simulation des écoulements mensuels



Le tableau suivant montre la répartition mensuelle des pluies annuelles de la station Lakhdaria gorges avec un nombre d'observation de 46 ans.

Tableau III.4 : Répartition mensuelle des pluies moyennes annuelles

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Pluie annuelle (mm)
Pluie (mm)	31	48	91	120	91	103	96	67	48	17	4	6	722
Pluie (%)	4	7	13	17	13	14	13	9	7	2	0.8	1	100

Source : ANRH Alger 2014

III.4.2 Ajustement des pluies annuelles à la loi de Gauss (loi normale)

Le procédé de calcul consiste à (Roche, 1964) :

-Classer les valeurs de l'échantillon par ordre croissant.

Chapitre III : Simulation des écoulements mensuels

-Affecter un numéro d'ordre aux valeurs classées.

-Calculer la fréquence expérimentale (par la formule de Hazen par exemple).

-Variable réduite de gauss :
$$U = \frac{X - \bar{X}}{\delta} \quad \text{III.1}$$

-Calcul des caractéristiques empirique de loi (\bar{X} ; δ ; Cv; CS=0).

-Calculer le coefficient de variation :
$$Cv = \frac{\delta}{x} \quad \text{III.2}$$

Le quantile de pluie pour une période de retour donnée est:

$$XP\% = \bar{X} + \delta * Up\% \quad \text{III.3}$$

Avec : XP%: précipitation de probabilité P%.

Up%: variable réduit de Gauss.

\bar{X} : Moyenne arithmétique.

δ : Écart type

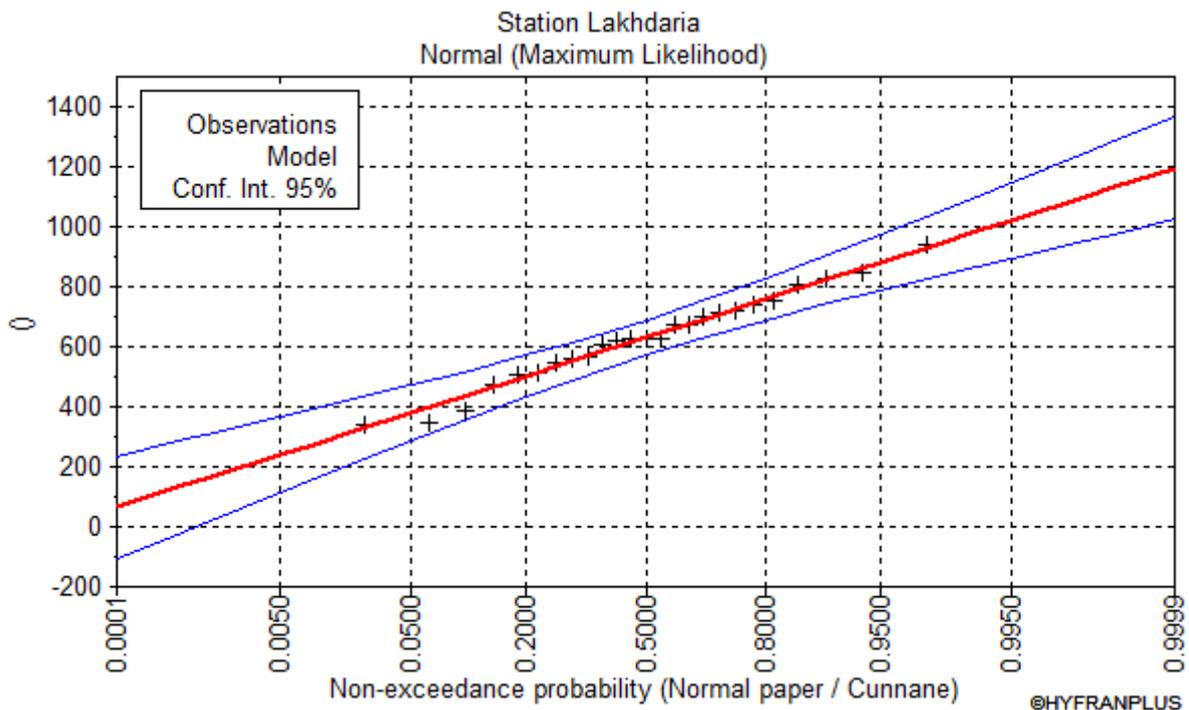


Figure III.5 Ajustement des pluies annuelles a la loi Normale

Chapitre III : Simulation des écoulements mensuels

Le test Khi carrée est de 1.05, alors que le Khi carrée est de 7.82, l'ajustement est donc à considérer.

Tableau III.5 : Résultats de l'ajustement avec la loi normale

T	Q	XT	Ecart type	intervalle de confiance (95%)	
1000	0.999	1100	74.3	954	1250
100	0.99	984	59.4	867	1100
50	0.98	942	54.3	836	1050
20	0.95	880	47.2	788	973
10	0.9	825	41.4	744	906

III.5 Etude hydrométrique

Le bassin d'Isser dispose de douze stations hydrométriques gérées par l'Agence Nationale des Ressources en Hydrauliques (ANRH).

Le tableau suivant décrit ci-dessous, nous indique la position de ces stations, et la figure 11 montre leurs répartitions spatiales.

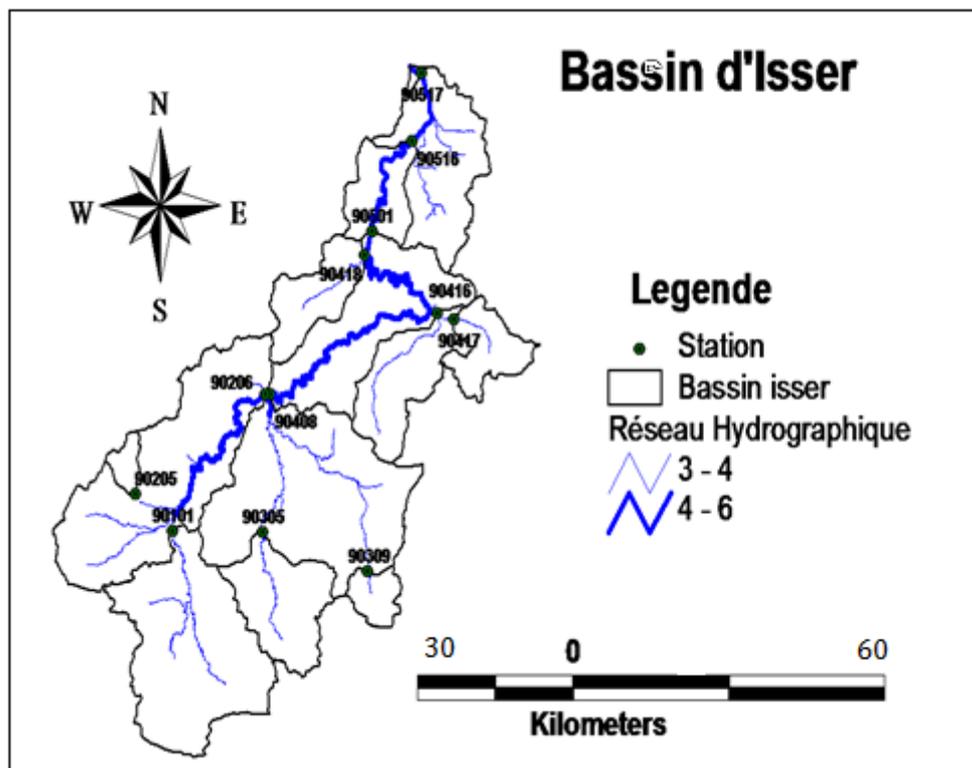


Figure III.6 : Stations hydrométriques (Bassin d'Isser).(ANRH Alger 2014)

Chapitre III : Simulation des écoulements mensuels

III.5.1 Apports liquides du bassin de l'Isser

Le test d'adéquation (ou d'ajustement) consiste à vérifier la compatibilité des données avec une distribution choisie à priori. Les apports liquides s'ajustent à une loi log-normale.

Tableau III.6 : les caractéristiques de la série des Apports liquides du bassin de l'Isser

Moyenne	272
σ	313
Max	910
Min	0.00

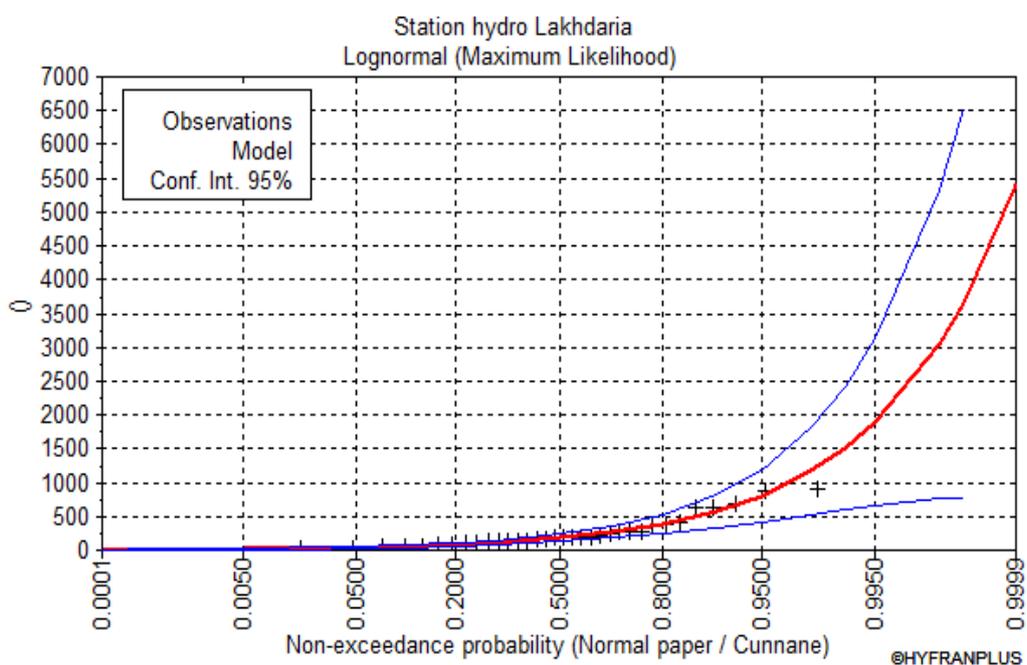


Figure III.7 Ajustement des apports liquides à la loi Log-Normale

Tableau III.7 : Résultats de l'ajustement des apports avec la loi log normale

T	Q	XT	Ecart type	intervalle de confiance (95%)	
1000.0	0.9990	3040	1160	761	5320
100.0	0.9900	1510	462	604	2420
50.0	0.9800	1180	329	530	1820
20.0	0.9500	808	197	423	1190
10.0	0.9000	579	124	337	822

III.5.2 Caractérisation des transports solides de la zone d'étude

L'estimation des apports solides permet de quantifier les volumes solides annuels et de prévoir la durée de vie des ouvrages de protection tels que les ouvrages et les retenue. Cependant, on doit préciser que les volumes des apports solides dépendent de plusieurs facteurs tels que les caractéristiques (érosion, pente) du sol, agressivité climatique, volumes liquides, etc.

Plusieurs formules ont établies par des hydrologues, en vue de quantifier les apports solides. Dans notre cas, on se base sur les méthodes recommandées par l'ANRH, à savoir la formule de Gravellovic.

■ Formule de Gravellovic :

Une formule très applicable en Algérie, cette équation prend en considération plusieurs paramètres :

$$T_0 = T_{sp} * G_{rm} \quad \text{III.4}$$

tel que :

$$T_{sp} = T \cdot P_{moy} \cdot \pi \cdot \sqrt{Z^3} \quad \text{Tel que } \left[T = \sqrt{\frac{t}{10} + 1} \right] \quad \text{III.5}$$

$$G_{rm} = \frac{(\sqrt{P} + H_{moy})}{0,2(L + 10)} \quad \text{III.6}$$

Avec :

T_0 : taux d'abrasion [t/Km²/an] ;

T_{sp} : le taux de la production annuel des matériaux en [m³/km²/an] ;

G_{rm} : taux de rétention des sédiments produits par le bassin ;

T : coefficient thermique ;

Z : coefficient d'érosion relative en fonction de la description du B.V, $Z = 0.6$;

P_{moy} : Pluie moyenne annuelle [mm] ;

t : température moyenne annuelle [°C] ; pour notre cas $t=20^\circ\text{C}$

P : périmètre du bassin versant [Km] ;

L : longueur du talweg principal [Km] ;

H_{moy} : Altitude moyenne [km].

Les résultats de calcul par les différentes méthodes sont donnés par le tableau suivant :

Chapitre III : Simulation des écoulements mensuels

Tableau III.8: Calcul du transport solide (Tonnes/an)

	Gravillovic(Tonnes/an)
Isser	380,1

III.6 Modélisation de la relation pluie débit par le modèle GR2M

III.6.1 Données et Méthodologie

a-Choix de la station hydrométrique

Pour les besoins de cette étude, nous avons procédé au dépouillement, tracé et calculé des paramètres statistiques des événements de crues observés à la station hydrométrique de Lakhdaria (90501), située en amont du barrage de Beni Amrane. Le modèle sera testé sur les données de la station hydrométrique de Lakhdaria, située en amont du barrage de Beni-Amrane, dont la capacité initiale est de 15 Hm³. Le cours d'eau principal parcourt une distance de 98,2 km.

b. Choix de l'échantillon des données

1981- 2005

Tableau III.9 : les caractéristiques de la série des débits mensuels

Période	Calage		validation	
	Pluie(mm)	Débit (m ³ /s)	Pluie(mm)	Débit(m ³ /s)
Moyenne	55.22	15,91	54,29	13,97
σ	57,81	26,13	53,20	20,22
Max	280	173,26	243,40	120,90
Min	0.00	0,03	0,00	0,01

c-.Choix du modèle pluie débit : le modèle GR2M

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) est un modèle pluie-débit global à deux paramètres. 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. 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.

1. Les Paramètres de GR2M:

Le modèle a deux paramètres optimisables :

X1 : capacité du réservoir de production (mm)

X2 : coefficient d'échanges souterrains.

2. La structure de GR2M:

Elle 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.

3. Description mathématique:

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 :

$$P_s = \frac{X_1 \cdot \left(1 - x \left(\frac{S_k}{X_1} \right)^2 \right) \cdot \tan \left(\frac{P_k}{X_1} \right)}{1 + \frac{S}{X_1} \cdot \tan \left(\frac{P_k}{X_1} \right)} \quad \text{III.7}$$

P_s : La fonction de production

P_k : la pluie

S_k : contenu dans le réservoir

X1 est positif et exprimé en mm. La pluie en excès, P1, est donnée par :

$$P1 = P - P_s'$$

Chapitre III : Simulation des écoulements mensuels

P1 : La pluie en excès.

Et le contenu du réservoir est actualisé :

$$S' = S_k + P_1$$

S' : le contenu du réservoir

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

$$E_s = \frac{S' \cdot \left(2 - \frac{S'}{X_1}\right) \cdot \tan\left(\frac{E}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S'}{X_1}\right) \cdot \tan\left(\frac{E}{X_1}\right)} \quad \text{III.8}$$

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

$$S'' = S' - E_s$$

- **Percolation:**

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

$$P_2 = S'' \cdot \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{S''}{X_1} \right)^3 \right]^{-1/3} \right\} \quad \text{III.9}$$

P_2 : percolation

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

$$S_{k+1} = S'' - P_2$$

- **Routage et échange avec l'extérieur non atmosphérique:**

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

$$P_3 = P_1 + P_2$$

Le niveau R_k dans le réservoir devient alors R' :

$$R' = R_k + P_3$$

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 :

$$F = (X_2 - 1) \cdot R'$$

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

$$R'' = X_2 \cdot R'$$

Chapitre III : Simulation des écoulements mensuels

Le réservoir, de capacité fixe égale à 60 mm, se vidange pour donner le débit Q_k selon

$$Q_k = \frac{R''^2}{R'' + 60} \quad \text{III.10}$$

Le contenu du réservoir est enfin actualisé par :

$$R_{k+1} = R'' - Q_k$$

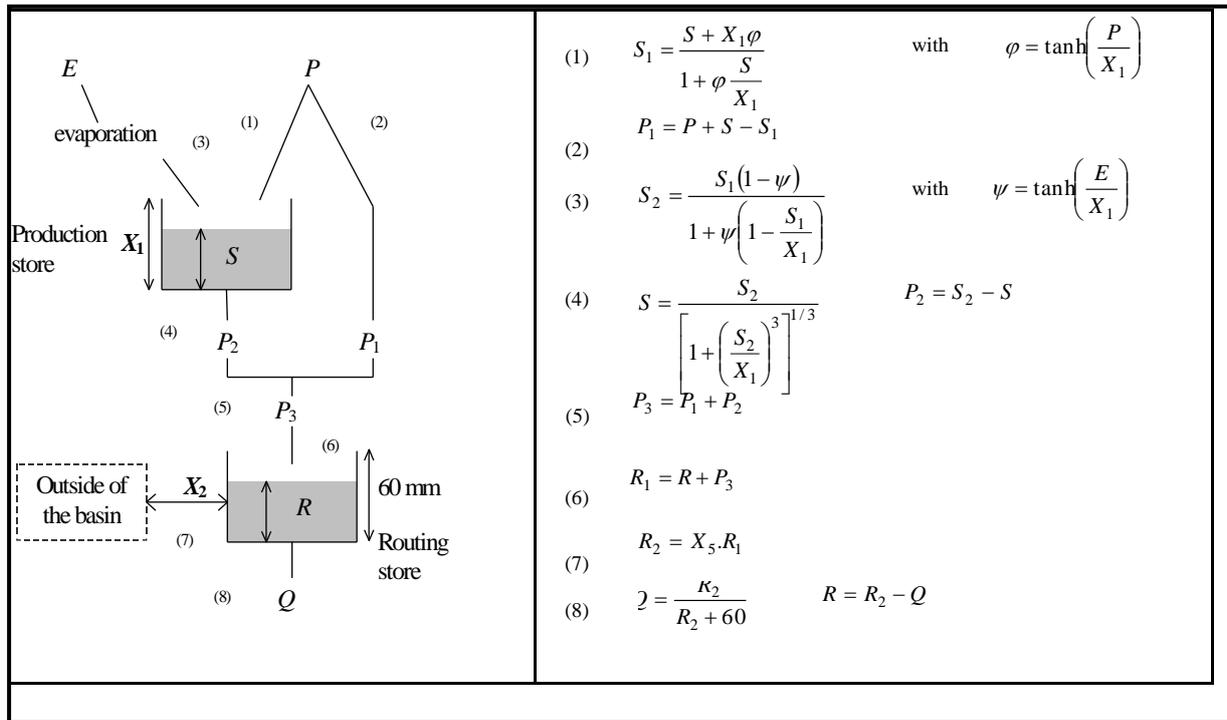


Figure III.8: Schéma de la structure du modèle GR2M

Dans notre cas, nous avons utilisé un troisième paramètre a été ajouté à la fonction de routage des débits, comme suit :

$$Q = \frac{R_2^2}{R_2 + X(3)}$$

Soit donc le modèle GR3M à trois paramètres à optimiser/

d-Calage et validation du modèle

Choix de la période de calage

Pour caler notre modèle, nous avons choisi une série de référence (pluie-débit) et fixé un critère d'évaluation pour l'ajustement des simulations du modèle aux données de calage par un jeu de paramètres donnés.

Chapitre III : Simulation des écoulements mensuels

Pour mieux étudier le processus de modélisation pluie-débit et le pouvoir prédictif des modèles, nous avons divisé les séries d'observation en deux phases distinctes mais de durées égales, telles 50% des données de la série soient utilisées pour le calage, et le reste de données (50%) est dédié à la validation. Ceci pour mieux interpréter les résultats entre la phase de calage et celle de la validation.

Tableau III.10. Durées des périodes de calage et de test des modèles utilisés.

	Periode
P. calage	1981/1993
P. Test	1994/2005

III.7 Critères de validation des modèles pluie-débit

Dans le cas de la modélisation pluie-débit on doit apprécier les performances des modèles par des critères qui minimisent l'écart entre les valeurs des débits simulés et observés.

On distingue deux types de critères (**Benkaci, 2006**) :

Les critères graphiques : correspondent à un ajustement graphique des données simulées sur les données observées. Ces critères ne sont pas sans importance, du fait qu'ils permettent un jugement visuel, et donc d'apprécier la qualité du modèle à reproduire les différentes tendances climatiques, tels que la succession des cycles de dessèchement et de rehumectation par le modèle.

Les critères numériques : consistent à déterminer une fonction qui va minimiser l'erreur entre les données simulées par le modèle, et celles observées.

III.7.1 Le critère de Nash

Nash et Sutcliffe (1970) ont proposé un critère, adimensionnel qui est considéré comme la base des critères de performance des modèles pluie-débit.

Ce critère exprime le pourcentage de la variance naturelle que l'on gagne par rapport à un modèle de référence qui donnerait comme débits calculés la moyenne des débits observés. Il est défini par :

$$Nash = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i\text{obs}} - Q_{i\text{sim}})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{i\text{obs}} - Q_{\text{moy}})^2} \right) \cdot 100 \quad \text{III.11}$$

➤ Rapport des volumes

Pour comparer les débits de crue simulés et observés au pas de temps journalier, certains hydrologues utilisent le rapport des volumes, défini comme suit :

$$RVol = \frac{\sum_{i=1}^n V_c \text{sim} - \sum_{i=1}^n V_c \text{obs}}{\sum_{i=1}^n V_c \text{obs}} \cdot 100 \quad \text{III.12}$$

Où $V_c \text{sim}$ est le volume des débits simulés et $V_c \text{obs}$ est le volume des débits de observés

III.7.2 Méthodes d'optimisation des modèles pluie-débit

L'optimisation des paramètres d'un modèle pluie-débit a pour but de trouver le jeu de paramètres qui rapproche le plus possible le comportement du modèle de celui du bassin modélisé.

Le calage demande donc le choix à la fois d'un critère de qualité, d'une méthode pour identifier les paramètres, ainsi que de séries de données destinées à fournir l'information nécessaire au calage (**Sorooshian et Gupta, 1985**).

Méthode SCE-UA : la méthode d'optimisation du SCE-UA suit l'algorithme suivant :

1. Choix des paramètres de l'algorithme :

- p^3 , p est le nombre de complexes,
- $m^3 n + 1$, m le nombre de points dans chaque complexe,
- n , le nombre de paramètres à être optimisé,
- $s = p \cdot m$, la taille de l'échantillon de points

2. Génération d'un échantillon des points, x_1, x_2, \dots, x_n dans l'espace des paramètres et calculer et la fonction objectif f_i à chaque point x_i .

Chapitre III : Simulation des écoulements mensuels

En absence d'information à priori, générer l'échantillon de points avec une distribution uniforme.

3. Classement des points : classer les points dans l'ordre croissant de leur fonction objectif. Classer les s points dans un tableau $D = \{ x_1, f_1, i = 1, \dots, s \}$ de telle manière que $i = 1$ représente le point avec la fonction objectif la plus petite,

4. Préparation des complexes : diviser l'échantillon des points en p complexes A_1, \dots, A_p , chacun contenant m points de telle manière que :

$$A^k = \left\{ x_j^k, f_j^k \mid x_j^k = x_{k+p(j-1)}, f_j^k = f_{k+p(j-1)}, j = 1, \dots, m \right\}$$

5. Evolution des complexes : faire évoluer chaque complexe A_1, \dots, A_p en utilisant l'algorithme CCE (Competitive Complex Evolution).

6. Mélanger les complexes : remettre les complexes A_1, \dots, A_p dans D , tel que :

$D = \{ A_k, k = 1, \dots, p \}$. Classer D dans l'ordre croissant de leur fonction objectif.

7. Vérifier la convergence : si le critère de convergence est satisfait, arrêter l'algorithme, sinon retourner à l'étape (4).

III.7.3 Mise en œuvre des modèles : le langage Matlab

MATLAB est un langage de programmation. Il permet de réaliser des simulations numériques basées sur des algorithmes d'analyse numérique. Il peut donc être utilisé pour la résolution approchée d'équations différentielles, d'équations aux dérivées partielles ou de systèmes linéaires.

La subroutine de la fonction de production et de routage du modèle est comme suit (Benkaci, 2006):

```
function [V,S1,S2,R1,R2,Qsim] = Prod_GR2M(x,V,P,E);
% SUBROUTINE OF MONTHLY RAINFALL-RUNOFF MODEL MODEL (GR2M WITH
3 PARAMETERS) BY TARIK
% BENKACI 1998-2017
% 1-Modélisation pluie débit mensuelle et journalière par les modèles conceptuels et les
systèmes neuro-flous. Phd Thesis INA- ALGER
```

Chapitre III : Simulation des écoulements mensuels

% the Model uses VERSION OF MOUELHI
%2-Mouelhi, Safouane. 2003. "Vers Une Chaîne Cohérente de Modèles Pluie-Débit Conceptuels Globaux Aux Pas de Temps Pluriannuel, Annuel, Mensuel et Journalier." PhD thesis, Paris, ENGREF.
%3-Mouelhi, S., C. Michel, C. Perrin, and V. Andréassian (2006), Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model, J. Hydrol., 318, 200-214, j.jhydrol.2005.1006.1014.

% FONCTION PRODUCTION

%Reservoir sol-- Soil Store Production

%CALCUL DE LA FONCTION DE PRODUCTION

WS=P/x(2);

if(WS>13);WS=13;end

S1=(V(1)+(x(2)*tanh(WS)))/(1.+V(1)/x(2)*tanh(WS));

P1=P+V(1)-S1 ;

WS=E/x(2);

if(WS>13);WS=13;end

S2=S1*(1.-tanh(WS))/(1.+(1.-S1/x(2))*tanh(WS));

V(1)=S2/((1+(S2/x(2))^3.)^(1./3.));

P2=S2-V(1) ;

P3=P1+P2;

% calculation (routing store):

R1=V(2)+P3;

R2=x(1)*R1;

% CALCUL OF SIMULATED RUNOFF-- CALCUL DU DEBIT SIMULE

Qsim=R2.^2/(R2+x(3));

% MISE A JOUR DU RESERVOIR DE ROUTAGE R

% Updating store level OF reservoir R

V(2)=R2-Qsim

III.7.4 Résultats de simulation

Ce modèle a été testé sur des épisodes de la station de Lakhdaria. Pour mieux exploiter les performances des modèles, on présente les résultats en période de calage et de test.

Les résultats de simulation par les modèles régressifs au pas de temps horaire de l'épisode choisi sont comme suit

Tableau III.11 Performances du modèle GR2M

Bassins	Calage		Validation	
Critères	Nash (%)	RVol	Nash (%)	RVol
GR2M	86.27	-8.27	74.75	-0.74

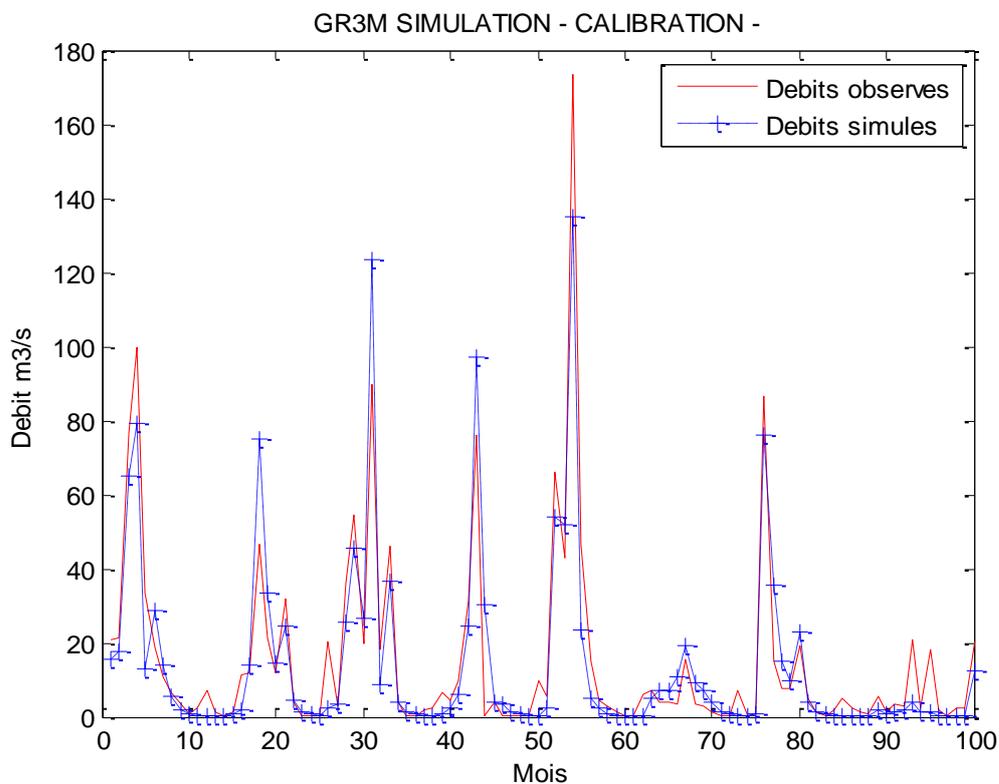


Figure III-9: Simulation des débits phase de Calage

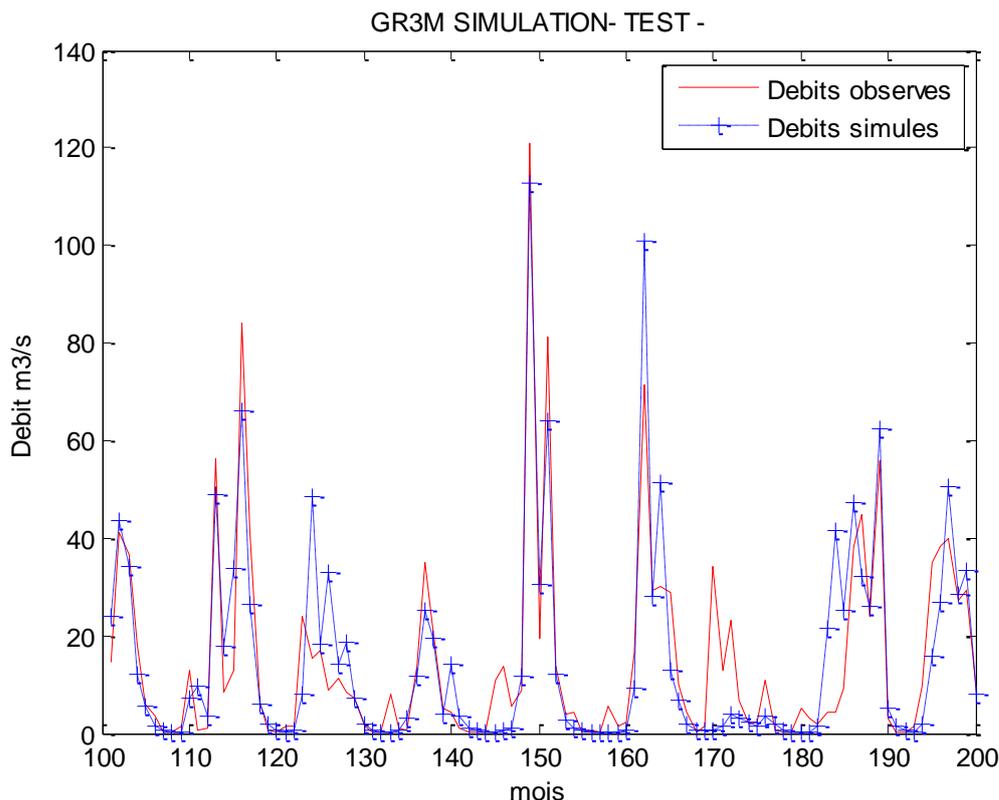


Figure III-10 : Simulation des débits phase de Validation

III.7.5 Paramètres optimisés des modèles :

L'optimisation des modèles par la méthode SCE-UA pour chaque station donne les paramètres finaux (optimisés) suivants:

Tableau III-12 Paramètres optimisés du modèle GR2M :

GR2M	X1=0.86	X2=464.18	X3=10.00
-------------	---------	-----------	----------

Discussion des résultats :

D'après les résultats des tableaux III.11 et III.12, on voit que les modèles basés sur le Modèle GR2M a donné des résultats très performants en phase de calage, en effet le critère de Nash est de l'ordre de 86.27 %.

En phase de test, pour les données horaires, on remarque une baisse de performance du l'efficience de Nash, il est de l'ordre de 74.75.

Simulation de nouvelles valeurs

La simulation pluie-débit par le modèle GR2M a permis de simuler les nouvelles valeurs, et de faire le comblement des lacunes des séries hydrométriques.

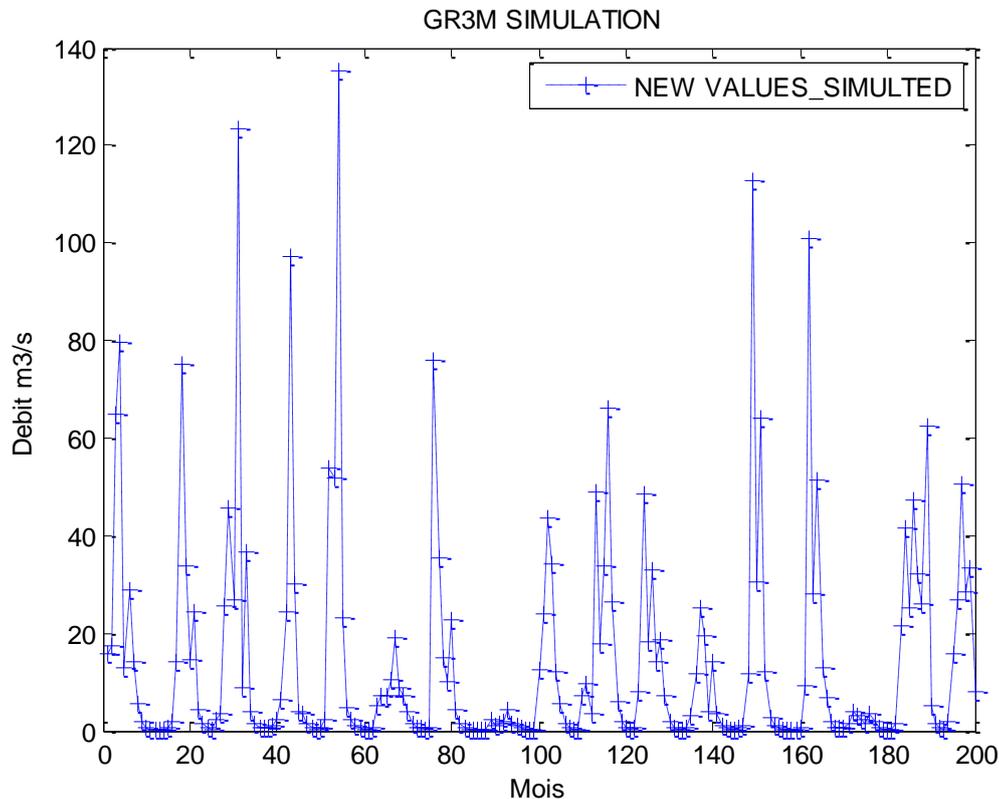


Figure III.11 Simulation de nouvelles valeurs

III.8 Conclusion :

La simulation pluie-débit est devenue un outil important dans la gestion des ressources en eau des retenues.

Dans ce chapitre, nous avons exploité un modèle pluie-débit au pas de temps mensuel pour simuler les débits (apports) du bassin versant de l'Isser situé au Nord de l'Algérie.

Le modèle exploité GR2M a relativement donné de bons résultats, en particulier en phase de calage.

Les modèles pluie-débits peuvent être exploités dans la gestion des ressources en eau à travers un soutien d'étiage et une prévision des crues.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

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

Dans le but d'utiliser un modèle pluie-débit pour une meilleure compréhension du comportement hydrologique du bassin versant de l'oued Isser ; nous avons entamé l'application du modèle génie rural au pas du mensuel (GR2M).

Pour l'application de ce modèle les variables d'entrées utilisés sont les précipitations et l'ETP du bassin versant de l'Isser. Le paramètre de sortie est le débit.

Pour mieux étudier le processus de modélisation pluie-débit et le pouvoir prédictif des modèles, nous avons divisé les séries d'observation en deux phases distinctes mais de durées égales, telles 50% des données de la série soient utilisées pour le calage, et le reste de données (50%) est dédié à la validation. Ceci pour mieux interpréter les résultats entre la phase de calage et celle de la validation.

A la fin de ce travail, nous pouvons dire que l'application des modèles du modèle génie rural au pas du mensuel (GR2M) aux données du bassin versant d'Isser a donné des résultats satisfaisants. Aussi, le modèle GR2M paraît très robuste pour être utilisé pour les bassins Méditerranéens à climat semi-aride tels que les bassins Algériens.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABBOT M. BATHURST J. CUNGE J. O'CONNELL P. RASMUSEN J. 1986;” An introduction to the European hydrological System'SHE'.Structure of a physically-based distributed modeling system”.

AMBROISE B. 1998 ;” La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant-Processus, Facteurs, Modèles”. H*G*A(ED), Bucarest.

AMBROISE B. 1999 ;” La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant”

BENKACI A. 2001 ;” Contribution à la modélisation de la relation pluie débit au pas de temps mensuel et journalier par les modèles conceptuels et les réseaux de neurones”. Thèse pour l'obtention du diplôme de magister. Institut national agronomique d'Alger.

BENKACI T. 2006 ;” Modélisation de la relation pluie-débit au pas temps journalier et mensuel par les réseaux de neurones artificiels et les systèmes neuro-flous”. Thèse de doctorat ENSA- ALGER.

HINGRAY B.MUSY A.PICOUET C.2009 ;”Volume2: une science pour l'ingénieur Guide (livre CDROM)”.

BETERRECHE L .CHAMPREDONDE R. 2008 ;” Hydrologie, étude de la génération de crues rapides par la confrontation de deux logiciels”.

BEVEN K. 1989;” Changing ideas in hydrology - The case of physically-based models”. Journal of Hydrology.

BEVEN K. 1992;” The future of distributed modelling”. Hydrol. Processes.

BEVEN K. et KIRKBY J.1979 ;” A physically based, variable contributing area model of basin hydrology”. Hydrological Sciences Bulletin.

BIR S .2012 ;” Thèse de magistere. Ecoulement au travers les milieux poreux.Approche stochastique”.Université Mouloud Mameri Tizi Ouzou .

BRESLER E.MCNEAL B. CARTER.1983; ‘ Saline and Sodic Soils”. Principles-Dynamics-Modeling.

DUAN Y .GUPTA V.SOROOSHIAN S.1993; ‘Shuffled complex evolution approach for effective and efficient golbalminimization”. Journal of optimization theory and applications.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

GAUME E. 2002 ;’’ Eléments d’analyse sur les crues éclair’’.

HORTON R .1933; ‘’The role of infiltration in the hydrologic cycle’’. Eos ,Transactions American Geophysical Unio.

KLEMES V.1986;’’Operational testing of hydrological simulation models-Hydrological’’ Sciences Journal.

Laborde J.P .2009 ; ‘’Elements d’hydrologie de surface’’ .Support de cours. ECOLE POLYTECHNIQUE DE L’UNIVERSITE DE NICE - SOPHIA ANTIPOLIS.

LUDWING B. AUZET A. BOIFFIN J. PAPY F. KING .D & CHADOEUF J.1996 ; ‘’ Etats de surface, structure hydrographique et érosion en rigole des bassins versants cultivés du Nord de la France’’. Etude et gestion des sols.

MOKSSIT A. 1996; ‘’ Global change and the terrestrial biosphere’’. Achivements and challenges.

Musy A. Higy C . 2004 ; ‘’Hydrologie, une science de la nature’’. Coll. Gérer l’environnement, Presses polytechniques et universitaires romandes.

Musy A . 2005 ; ‘’Cours d’Hydrologie Générale’’.

MUSY A .HIGY C .1998 ; ‘’ Hydrologie appliquée’’ .Edition H .G.A.

NASH J.E et SUTCLIFFE J.V. 1970 ; ‘’River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles’’. Journal of Hydrology.

Papy.F, Douyer. C, 1991 : Influence des états de surface du territoire agrigole sur le déclenchement des inondations catastrophiques. Agronomie.

PERRIN C. MICHEL C. ET ANDREASSIAN V. 2007 ; ‘’ Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR)’’. Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés.

PERRIN C. 2000 ; ‘’ Vers une amelioration d’un modèle pluie-débit au travers d’une approche comparative’’.

Roche P. Miquel J . Gaume. 2012 ;’’ Processus, modèles et aide à la décision’’ .Springer Science & Busines Media.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ROCHE M.1964 ; ‘‘Etudes des nappes d’inféro-flux des rivière de la bordure ouest de l’air Compagne’’, mission ORSTOM-Niger.

ROCHE P. 1963 ; ‘‘ Hydrologie de Surface’’, OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER - (PARIS), GAUTHIER - VILLARS ÉDITEUR.

SHAMSELDIN Y.1996; ‘‘Application oh neural network technique to rainfall modeling.Journal of hydrology’’.

SHARMAN L. 1932; ‘‘ Streamflow from rainfall by the unit-hydrograph method engineering news record’’.

SINGH V. 1995; ‘‘Computer models of waterched hydrology’’

SOROOSHIAN S .GUPTA V. 1985;’’ The analysis of structural identifiability’’.Theory and applications to conceptual Rainfall-Runoff Models.Water research.

TALBI S. SOUAK F.2016 ; ‘‘Article Le management intégré des ressources en eau en Algérie : enjeux et contraintes’’.

YANG . 1993 ; ‘‘Mise au point d'une méthode d'utilisation d'un modèle pluie-débit conceptuel pour la prévision des crues en temps réel’’ . Thèse de doctorat.  cole Nationale des Ponts et Chaussées.