

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du grade de

MAGISTER

En Hydrogéologie et Environnement.

Par

BOURSALI Ilyas

Thème

Application de la fonction pluie-débit au bassin versant de la TAFNA

Cas de l'oued Khemis-TLEMCEN (NW Algérien)

Soutenu le 11 /05/2016 devant les membres de Jury

Président	M KHALDI Abdelkader	Professeur	Univ. Mascara
Encadreur	Mme BABA-HAMED Kamila	MCA	Univ. Tlemcen
Co-encadreur	M BOUANANI Abderrazak	Professeur	Univ. Tlemcen
Examineur	M AZZAZ El Habib	MCA	Univ. Mascara
Examineur	M BENSLIMANE Mohammed	MCA	Univ. Mascara

2015-2016

Résumé

Les problèmes d'estimation des crues représentent un souci majeur aux techniciens chargés du dimensionnement des ouvrages hydrotechniques.

C'est pour cela que 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 « GR » dans le bassin versant de l'Oued Khemis aux différentes pas de temps (annuel, mensuel et journalier).

Dans un premier temps, nous avons essayé deux approches assez différentes : une empirique de type boîte noire sous la forme $lames\ d'eau\ écoulées = f(pluie)$ où f est déterminée par une régression effectuée sur les chroniques pluies-débits. L'autre conceptuelle globale représentée par le modèle du Génie Rural (GR).

Les résultats obtenus par la simulation de la transformation de la pluie en débit par l'utilisation des modèles du Génie Rural GR1A, GR2M et GR4J sont plus satisfaisants que la modélisation par approche corrélatrice.

En effet le modèle GR prend en compte la succession chronologique des phénomènes d'une part et l'influence des paramètres aussi bien climatiques (évapotranspiration) que celle physico-hydrogéologiques du bassin versant (humidité du sol et échanges externes).

Mots clés : Tafna- Oued Khemis – Corrélation - Modélisation pluie-débit - Modèle GR .

Abstract

The flood estimation problems represent a major concern for technicians to dimensionnement of engineering structures.

That is why we have tried in this work the application of modeling rain-flow using a global model tank: the model of Agricultural Engineering "GR" in the watershed of Khemis River no different to time (annual, monthly and daily).

At first, we tried two rather different approaches: an empirical kind of black box as water slides elapsed = f (rain), where f is determined by a regression performed on chronic rainfall-discharge. The other represented by the overall conceptual model of Rural Engineering.

Search result obtained by the simulation of the processing speed in the rain by the use of models of Agricultural Engineering GR1A, GR2M and GR4J are more satisfactory than the modeling approach corrélatrice.

Indeed the GR model takes into account the chronological succession of phenomena on one hand and the influence of climatic parameters as well (evapotranspiration) than physico-hydrogeological catchment (soil moisture and external exchanges).

Key words: Tafna, Khemis river , correlation, rain-flow modeling, model GR.

الملخص

ان مشاكل تقدير الفيضانات تمثل مصدر قلق كبير لتقنيي الهياكل الهيدروتقنية. هذا هو السبب في أننا حاولنا في هذا العمل تطبيق نماذج المطر-التدفق باستخدام نموذج للهندسة الزراعية "GR" في مستجمع المياه من واد خميس مختلفة الوقت (سنوية وشهرية ويومية). في البداية، حاولنا استخدام نمودجين مختلفين إلى حد ما: النوع الاول التجريبي من الصندوق الاسود كما انقضى الشرائح المياه = f (المطر)، حيث يتم تحديد من الانحدار التي أجريت على المزمّن الأمطار التفرغ. ويمثله النموذج المفاهيمي العام للهندسة الريفية الأخرى. نتيجة البحث التي حصل عليها محاكاة لسرعة المعالجة في المطر عن طريق استخدام نماذج الهندسة الزراعية، GR1A، GR2M و GR4J مرضية أكثر من نمودج العلاقات الرياضية البسيطة. في الواقع نموذج GR يأخذ بعين الاعتبار خلاف زمني من الظواهر من جهة، وتأثير العوامل المناخية وكذلك (التبخّر) من الفيزيائية الهيدرولوجية مستجمعات المياه (رطوبة التربة والتبادلات الخارجية).

الكلمات المفتاحية: تافنة، واد خميس، ارتباط، نماذج مطر-تدفق، نموذج الهندسة الزراعية.

DEDICACES

Je dédie ce travail à :

La mémoire de mon grand-père

Mes parents, qui m'ont soutenu dans toutes les démarches pour concrétiser ce travail

A mon frère : Fekhreddine et mes sœurs :
« Amel » et « Radja ».

A tous mes amis : Amine, Kamel, Mohammed, Nouredine, fayssal et Ibrahim, Amina, Ikram et Samira pour leur précieuse aide et leur encouragement.

A ceux qui me sont proches et chers, de près ou de loin.

REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie Dieu tout puissant qui m'a guidé tout au long de ma vie, qui m'a permis de m'instruire et d'arriver aussi loin dans mes études, qui m'a donné courage et patience pour passer tous les moments difficiles, et qui m'a permis d'achever ce travail.

Je tiens tout d'abord à exprimer tous mes respects et toute ma reconnaissance Madame **BABA HAMED K** et Monsieur **BOUANANI A** pour leurs qualités humaines, leur extrême gentillesse et leur patience, leur disponibilité durant toute l'élaboration de mon mémoire. C'est un honneur pour moi de les avoir eu comme encadreur.

Je tiens également à exprimer toute ma gratitude à Monsieur **KHALDI A**, Recteur de l'Université de Mascara, Responsable de notre post graduation d'avoir accepté de présider le jury de mon mémoire, c'est pour moi un très très grand honneur.

Je souhaiterai notamment exprimer mes profonds remerciements à Monsieur **BENSLIMANE M** et Monsieur **AZZAZ**, enseignants à l'université de Mascara d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Je ne sais comment exprimer ma gratitude à Madame **DJELAD R** pour ses conseils stimulants ses remarques avisées.

Je tiens aussi à remercier tous les enseignants du département des Sciences de la Nature et de la Vie de l'université de Mascara qui ont fait tout leur possible afin de faire de nous ce que nous sommes aujourd'hui.

Mes remerciements vont également au personnel de l'ANRH d'Oran et l'ANRH de Remchi.

Mes remerciements vont à tous mes amis de la promotion de magister 2012/2013 d'hydrogéologie et environnement.

Je ne pourrai terminer sans évoquer mes chères collègues Samira, Amina et Amine avec qui j'ai passé des moments agréables.

Mes remerciements vont à tous mes élèves de 2^{ème} SE et 2^{ème} M.

En fin, que toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail soient vivement remerciées.

TABLE DES MATIERES

Résumé	
Abstract	
المخلص	
Dédicaces	
Remerciements	
Sommaire	
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : Etat de l'art de la modélisation	
Introduction	3
I- Qu'est-ce qu'un modèle pluie-débit ?.....	3
I-1 Calage et performance d'un modèle hydrologique	4
I-1.1 Généralités	4
I-1.2 Méthodes automatiques de calage des modèles	5
I-1.2.1 Méthodes locales.....	5
I-1.2.2 Méthodes globales.....	6
I-1.3 Evaluation de la performance.....	6
I-1.3.1 La performance potentielle en calage	6
I-1.3.2 La performance en validation.....	6
I-1.3.3 La performance en transposition spatiale.....	6
I-1.3.4 La performance en prévision.....	6
I-1.4 Critères de performance	7
I-1.5 Intérêt d'un modèle pluie-débit	8
I-1.6 Pourquoi des modèles hydrologiques ?.....	9
I-2 Différentes approches de modélisation.....	10
I-2-1 Modèle déterministe.....	10
I-2-2 Modèle stochastique.....	10
I-2-3 Modèle à base physique.....	10
I-2-4 Modèle paramétrique.....	10
I-2-5 Modèle conceptuel ou « modèle conceptuel à réservoir ».....	10
I-2-6 Modèle analytique	11
I-2-7 Modèles empiriques.....	11
I-2-8-1 Modèle à base physique distribué.....	11
I-2-8 Présentation de quelques outils.....	11
I-2-8-1 Modèle physique-conceptuel semi-spatialisé TOPMODEL.....	12
I-2-8-2 HEC HMS.....	12
I-2-8-3 Hydrotel : l'intégration des données de télédétection.....	13
I-2-8-4 MIKE SHE : la modélisation hydrologique complète.....	13
I-2-8-5 TOPKAPI : les ondes cinématiques opérationnelles.....	14
I-2-8-6 AIGA : la méthode spécifique aux crues éclair.....	14
I.3 Modèles du Génie Rural GR.....	15
I.3-1 Objectifs de développement.....	15
I.3-2 Mode de développement.....	16
I.3-3 Description du modèle pluie-débit annuel GR1A.....	16
I.3-3.1 Introduction.....	16
I.3-3.2 Description mathématique.....	16
I.3.3.3 Paramètre.....	17
I.3.4 Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M	17
I.3.4.1 Introduction.....	17
I.3.4.2 Description mathématique.....	17
• Production.....	18
• Percolation.....	19
• Routage et échange avec l'extérieur non atmosphérique.....	19
I.3.4.3 Paramètres.....	19
I.3.5 Description du modèle pluie-débit journalier GR4J.....	20
I.3.5.1 Introduction.....	20
I.3.5.2 Description mathématique.....	20
• Neutralisation.....	21
• Fonction de rendement.....	21
• Percolation.....	22
• Hydrogrammes unitaires.....	22
• Fonction d'échange avec l'extérieur non atmosphérique.....	24
• Réservoir de routage.....	24
• Ecoulement total.....	24
• Paramètres.....	24
I.4 Applications des modèles.....	25
I.5 Conclusions et perspectives.....	26
CHAPITRE II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	
II.1 Synthèse géographique	28
II.2 Situation du secteur d'étude.....	30
II.3 Caractéristiques physiques du bassin versant.....	31
II.3.1 Caractéristiques de Forme.....	31
II.3.2 Indice de compacité (de Gravelius).....	31
II.3.3 Rectangle équivalent.....	31
II.3.4 Etude du Relief	32
II.3.4.1 Etude de la répartition de la surface en fonction de l'altitude	32
II.3.4.2 Etude des pentes	34
Indice de pente de Roche Ip	34
a- Indice de pente global.....	34

II.3.5- Etude du réseau hydrographique.....	35
II.3.5.1- Densité de drainage.....	36
II.3.5.2- Rapport de confluence Rc.....	37
II.3.5.3- Rapport de longueurs.....	37
II.3.5.4- Coefficient de torrentialité.....	38
II.3.5.5- Temps de concentration des eaux.....	38
II.3.6- Profil en long de l'oued Khemis.....	39
II.6- Conclusion.....	40

CHAPITRE III : ETUDE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

III- Cadre géologique.....	42
III.2. Série lithostratigraphique.....	44
III.2.1. Le Primaire.....	44
III.2.1.1. Silurien.....	44
III.2.1.2. Dévonien.....	45
III.2.1.3. La phase éruptive.....	45
III.2.2. Le Secondaire.....	45
III.2.2.1. Trias.....	45
III.2.2.2. Jurassique inférieur et moyen.....	45
III.2.2.3. Jurassique supérieur.....	46
a. Argiles de Saida.....	46
b. Grès de Boumediène.....	46
c. Calcaires de Zarifet.....	46
d. Dolomies de Tlemcen.....	46
e. Calcaires de stah.....	46
f. Marno-calcaires de Raourai.....	46
g. Calcaires de Lato et dolomies de Terni.....	46
Marno-calcaire de Hariga.....	46
III.2.3 Le Plio-Quaternaire.....	46
III.3- Analyse structurale.....	50
III.3.1- Principales phases tectoniques.....	51
III.3.2- Unités structurales.....	51
III.3.2.1- Accidents décrochants.....	51
III.4 APERCU HYDROGEOLOGIQUE.....	51
III.4.1 Formations aquifère à perméabilité d'interstices.....	51
III.4.1.1 Grès de Boumediène.....	51
III.4.1.2 Formations aquifère à perméabilité de fissures.....	52
III.4.1.2 Les terrasses alluviales.....	52

CHAPITRE IV : ETUDE HYDRO-CLIMATIQUE

IV-ETUDE CLIMATIQUE.....	54
IV.1- Introduction.....	54
IV.2- Etude des paramètres climatiques.....	54
IV.2.1- Présentation de la station.....	54
IV.2.1.1- Etude des précipitations annuelles.....	54
IV.2.1.2- Précipitations mensuelles.....	56

IV.2.1.3- Précipitations saisonnières.....	56
IV.2.2- Etude des températures.....	57
IV.2.2.1- Températures annuelles.....	58
IV.2.2.2- Températures moyennes mensuelles.....	59
IV.2.3- Evapotranspiration potentielle.....	59
IV.2.3.1- Estimation de l'évapotranspiration.....	59
IV.2.4- Etude du climat.....	62
A- Les méthodes graphiques : (courbe pluvio-thermique de Bagnouls et Gausson).....	62
B- Indices climatiques.....	63
B.1- Indice d'Aridité de De Martonne.....	63
IV.3- Etude hydrologique.....	69
IV.3.1- Etude des modules (débits).....	69
IV.3.1.1- Débit annuels.....	69
IV.3.1.2- Débit moyens mensuels.....	70
IV.3.2- Etude des lames d'eau écoulées.....	71
IV.3.2.1- Lame d'eau écoulée annuelle.....	71
IV.3.2.2- Lame d'eau écoulée moyenne mensuelle.....	72
IV.4- Etude statistique.....	73
IV.4.1- Ajustement des précipitations annuelles à la station de Khemis.....	74
A- Ajustement par la loi normale.....	74
Test graphique.....	74
B- Ajustement par la loi log normale.....	76
> Test du χ^2	77
C- Calcul des précipitations pour une période de récurrence donnée.....	77
IV.4.2- Ajustement des lames d'eau écoulées.....	78
Ajustement des lames d'eau écoulées annuelles à loi log normale.....	78
> Test graphique.....	78
> Test du χ^2	78
Calcul des lames d'eau écoulées pour une période de récurrence donnée.....	80
IV.5- Conclusion.....	80

CHAPITRE V : APPLICATION DU MODELE GR

V- MODELISATION PAR CORRELATION (précipitations / lames d'eau écoulées).....	82
V.1 - Corrélation annuelle.....	82
V.2- Corrélation mensuelle.....	84
V.3- Corrélation journalière.....	85
V.4- Applications des modèles.....	85
V.4.1- Modèle annuel GR1A.....	86
V.4.1.1- Calage du modèle.....	86
V.4.1.2.1- Résultats du calage du modèle annuel en utilisant l'ETP par la méthode Turc et la méthode Thornthwaite.....	87
V.4.1.2.2- Résultats obtenus par le modèle GR1A avec l'ETP de Thornthwaite.....	88
V.4.1.3- Validation du modèle.....	88
V.4.2- Modèle Mensuel GR2M.....	89
V.4.2.1.1 Résultats du calage du modèle mensuel en utilisant l'ETP par la méthode Turc et Thornthwaite.....	89
V.4.2.1.2- Résultats obtenus par le modèle GR2M avec l'ETP de Turc.....	90
V.4.2.2 - Résultats obtenus par le modèle GR2M avec l'ETP de Thornthwaite.....	91
V.4.2.3- Validation du modèle.....	92

V.4.3- Modèle Mensuel GR4J.....	93
V.4.3.4- Validation du modèle.....	96
V.5- Etude comparative.....	97
V.5.1- Modèle annuel GR1A	98
V.5.2- Validation.....	98
V. 5. 3-Modèle Mensuel GR2M.....	99
V.5.4- Validation.....	100
CONCLUSION GENERALE	102
Références bibliographiques	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Annexes	

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les ressources naturelles en eau sont constituées d'eaux souterraines et superficielles. Elles sont prélevées pour être destinées à la consommation humaine, l'agriculture ou l'industrie.

L'Algérie est confrontée à la rareté de l'eau, facteur limitant du développement et source de tensions sociales. La rareté est mesurée en termes de stress hydrique et d'irrégularité de la ressource, deux facteurs susceptibles de s'accroître avec le changement climatique.

La protection de cette ressource nous amène à évaluer les paramètres qui jouent un rôle important dans le cycle de l'eau en général et l'écoulement des eaux superficielles en particulier.

Ces facteurs englobent à la fois les caractéristiques géologiques, géomorphologiques, hydrologiques, et climatiques. Nous nous intéresserons, dans la présente étude, aux caractéristiques hydrologiques et climatiques d'un bassin versant.

L'utilisation d'un outil performant tel que le model GR (Génie rural) est très nécessaire et utile dans le cadre de cette étude. Cette nouvelle technique a permis de donner des prévisions des crues ou d'étiages, la prédétermination des débits pour le dimensionnement d'ouvrages d'art, ou le dimensionnement de réservoirs de stockage d'eau ou d'écrêtement des crues caractérisant le bassin versant.

Pour faire face à ce risque des crues, nous allons appliquer les modèles du Génie rural (GR1A, GR2M, GR4J) sur le bassin versant d'Oued Khémis (Tafna- NW Algérie).

Notre objectif est de mettre en œuvre une prédétermination de la réponse du bassin versant à des éléments pluvieux, et ce afin de caractériser l'écoulement d'un bassin versant. Cette recherche est exposée en quatre chapitres :

- Le premier chapitre, où, nous présentons l'état de l'art de la modélisation pluie-débit.
- Le second chapitre, donne un aperçu sur le site d'étude, ainsi qu'un exposé sur le cadre géologique et morphologique et hydrogéologique du bassin versant.
- Le troisième chapitre, expose le cadre géologique de bassin versant d'Oued Khémis.
- Le quatrième chapitre, sera consacré à l'étude hydro-climatique du bassin versant d'Oued Khémis.
- Le cinquième chapitre porte sur l'application du modèle GR1A, GR2M et GR4J sur les données relatives au bassin versant d'Oued Khémis suivi par une comparaison avec les résultats antérieurs.

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale, où sera exposée la synthèse des résultats de cette recherche.

CHAPITRE I

L'ETAT DE L'ART DE LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

Introduction

La modélisation en hydrologie et particulièrement la transformation des précipitations en débit, est un sujet qui n'est jamais démodé, car situé au cœur de l'hydrologie. On peut lire dans la littérature que les recherches menées dans ce domaine se continuent, non seulement pour développer ou améliorer les modèles existants, mais aussi pour créer des modèles nouveaux.

L'intérêt d'un modèle réside dans sa capacité à apporter une réponse (satisfaisante) aux questions que l'on se pose à propos de l'objet modélisé, ce qui nous renvoie à l'objet assigné au modèle qui doit bien entendu précéder et orienter la conception et la construction du modèle. Généralement les modèles sont utilisés pour la prévision, la prédétermination, la reconstitution ou l'extrapolation de données, etc. (Bouanani R, 2010).

I- Qu'est-ce qu'un modèle pluie-débit ?

En hydrologie, un modèle pluie-débit est une représentation mathématique simplifiée du comportement d'un bassin versant. Il est généralement défini par (fig.1) :

- **Les variables d'entrée** appelées aussi **forçages** en raison du rôle moteur qu'elles jouent sur un grand nombre de processus. Il s'agit généralement des chroniques de pluie et d'évapotranspiration ou de température.
- **Les variables d'état** qui correspondent aux **variables internes** du système et qui rendent compte de son état.
- **Les variables de sortie** qui représentent **la réponse** du système. Il s'agit généralement des débits à l'exutoire mais aussi parfois de la piézométrie ou d'une autre variable intéressant le modélisateur.
- **Les équations mathématiques** qui relient les variables de sortie aux variables d'entrée et aux variables d'état. Celles-ci permettent de représenter de façon plus ou moins explicite les processus impliqués dans le fonctionnement du bassin versant étudié.
- **Les paramètres** qui interviennent dans les équations du modèle, et qui représentent la part non explicitée du fonctionnement du bassin dans ces équations. Ils peuvent avoir une signification physique ou non. Ils servent à adapter les relations régissant le modèle au fonctionnement réellement observé. (Perrin *et al.*, 2009).

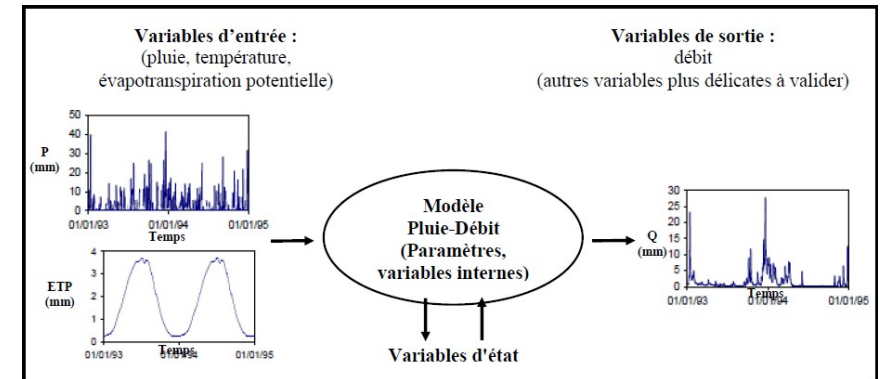


Fig. 1: Représentation du fonctionnement d'un modèle hydrologique. (Perrin *et al.*, 2009).

I-1 Calage et performance d'un modèle hydrologique (Marchandise, 2007)

I-1.1 Généralités

Le calage d'un modèle consiste à déterminer, sur un échantillon d'évènements de référence, un ou plusieurs jeux de paramètres avec lesquels les simulations du modèle approchent au mieux les hydrogrammes de la base de données de référence.

La plupart du temps, on utilise une méthode d'optimisation qui détermine un jeu « optimal », au sens où la distance entre les simulations du modèle et les hydrogrammes de référence est minimale. La nécessité de cette phase de calage des paramètres a plusieurs origines (Marchandise, 2007) :

La schématisation du fonctionnement du bassin versant repose sur des objets conceptuels (de type réservoir) dont les paramètres n'ont pas une signification hydrologique et ne sont donc pas mesurables.

Le modèle repose sur des hypothèses physiques qui ne sont pas acceptables pour le fonctionnement du bassin considéré. Le calage aura donc tendance à identifier un comportement marginal du modèle, en forçant les paramètres vers des valeurs dont l'interprétation ne correspond pas à la physique du modèle. L'intégration et la résolution des équations différentielles qui régissent le fonctionnement interne d'un modèle distribué peuvent être soumises à un biais numérique qui fait dépendre la valeur du paramètre de la taille de la maille de résolution des équations. (Marchandise, 2007)

La variabilité spatiale d'un descripteur du bassin versant n'est pas appréhendée par le modèle (faute de données ou mesures disponibles). Il s'agit alors de caler un paramètre qui sera représentatif de la valeur moyenne du paramètre sur le bassin.

Les données fournies à l'entrée et à la sortie des modèles sont soumises à des incertitudes de mesure. Le calage des paramètres du modèle doit permettre de compenser ces erreurs. Pour caler un modèle, il faut donc choisir (Marchandise, 2007) :

- Une base de données d'évènements (pluie et hydrogrammes de crue) de référence.
- Un critère ou indicateur pour évaluer l'ajustement des simulations du modèle aux données de calage pour un jeu de paramètre donné.
- Une méthode d'exploration de l'espace des paramètres du modèle.

Pour explorer les paramètres et pour évaluer les modélisations, on peut procéder « à la main », en testant des jeux de paramètres au hasard ou prédéfinis et en évaluant visuellement l'ajustement des simulations des modèles aux données de référence. Cette méthode s'appliquera si on a une bonne connaissance de la sensibilité des différents paramètres du modèle et/ou si le modèle est relativement parcimonieux. Dans le cas contraire, on utilisera une méthode d'optimisation automatique associée à des critères de performance.

On propose dans le paragraphe suivant des méthodes de calage des modèles. On présentera ensuite les critères d'évaluation des performances des simulations des modèles utilisés.

I-1.2 Méthodes automatiques de calage des modèles

On distingue deux méthodes locale et l'autre globale ;

I-1.2.1 Méthodes locales

Une méthode d'optimisation locale part d'un vecteur de paramètres donné par l'utilisateur et se déplace de manière itérative, par variations infinitésimales du vecteur des paramètres, vers des zones de critère de performances croissant. Elle s'arrête lorsqu'elle ne trouve plus de jeux de paramètres plus performants dans le voisinage d'un jeu de paramètres considéré alors comme optimal. On introduit une différenciation dans la terminologie des méthodes suivantes :

Que, au cours de son itération, la méthode est basée sur la valeur seule de la fonction critère-on parle alors de **méthode directe**- ou si elle utilise à la fois la valeur et le gradient de la fonction critère pour décider de sa stratégie de recherche dans l'espace des paramètres : on parle alors de **méthode gradient**. La **stratégie** de recherche de la méthode inclut sa **direction** de recherche – une direction peut correspondre à un déplacement suivant un paramètre par exemple et au pas de sa recherche – variation du ou des paramètres dans la direction de recherche. (Marchandise, 2007)

I-1.2.2 Méthodes globales

A l'opposé des méthodes locales, les méthodes globales de calage explorent une partie importante de l'espace des paramètres. Il existe différentes stratégies pour explorer l'espace

des paramètres, ce qui conduit à différencier les méthodes déterministes des méthodes stochastiques et des méthodes combinatoires.

Les méthodes déterministes ne font pas d'hypothèse a priori sur la localisation de l'extremum pour la fonction critère. Elles consistent en une exploration intégrale de l'espace des paramètres suivant une discrétisation régulière de l'espace des paramètres.

Avec une méthode stochastique, les valeurs des paramètres testées sont tirées dans une loi de probabilité prédéfinie. Dans le cas le plus simple, la distribution est supposée uniforme : chaque zone de l'espace a la même probabilité de contenir l'extremum.

L'avantage de ces méthodes globales est qu'elles permettent d'identifier les maxima globaux et locaux. Elles évitent ainsi le piège d'identifier un extremum local de la fonction critère. Leur principal inconvénient est qu'elles nécessitent des temps de calcul beaucoup plus importants que les méthodes locales.

Dans la pratique, on couple souvent une méthode globale avec une méthode locale : une analyse de sensibilité globale, avec un pas de balayage, permet d'identifier la ou les zones de critères optimaux. La méthode locale vient affiner la recherche, avec en entrée de la méthode les jeux identifiés comme optimaux avec la méthode globale.

I-1.3 Evaluation de la performance

Quand on parle de la performance d'un modèle, il faut différencier :

I-1.3.1 La performance potentielle en calage : On évalue alors les capacités d'adaptation du modèle sur un ou plusieurs évènements. Cette performance est généralement toujours bonne et ne permet pas de différencier les modèles.

I-1.3.2 La performance en validation : on évalue le modèle calé sur une base de données d'évènements qui n'a pas servi pour le calage. Cette étape est nécessaire pour évaluer la robustesse du modèle qui nous intéresse dans une optique de simulation opérationnelle des crues. On peut s'intéresser à évaluer la performance du modèle sur des évènements de fréquence plus rare pour tester leur capacité d'extrapolation vers les extrêmes.

I-1.3.3 La performance en transposition spatiale : on teste un modèle calé sur un bassin donné sur un autre bassin ou un sous bassin.

I-1.3.4 La performance en prévision : il s'agit d'évaluer la simulation du modèle à un pas de temps (t+dt) à partir de la connaissance de la situation du système (pluie, débit, saturation du bassin) à l'instant (t).

I-1.4 Critères de performance

Pour l'évaluation des modélisations, différents critères mesurant la distance entre les hydrogrammes simulés et les hydrogrammes reconstitués ont été calculés. Nous présentons les critères arithmétiques et quadratiques les plus couramment utilisés dans les études hydrologiques.

Equation1 : Valeur moyenne des écarts entre deux séries, notée $e\%$

$$e\% = \frac{\sum_i (X_i - Y_i)}{N}$$

Equation2 : valeur moyenne des écarts absolus entre deux séries, notée $|e|_{\%}$

$$|e|_{\%} = \frac{\sum_i |X_i - Y_i|}{N}$$

Equation3 : Critère EAM

$$EAM = \frac{\sum_i |X_i - Y_i|}{\sum_i Y_i}$$

L'écart arithmétique moyen : Cet indicateur mesure le biais moyen absolu entre les deux séries, normé par la moyenne des observations.

Equation4 : Critère EQM (L'écart quadratique moyen)

$$EQM = \frac{\sqrt{\sum_i (X_i - Y_i)^2}}{\sum_i Y_i} \cdot \sqrt{N}$$

Ce critère est la mesure de la moyenne quadratique de toutes les erreurs commises, normées par la moyenne des observations.

Equation5 : Critère de NASH (Nash et Stouff, 1970)

$$NASH = 1 - \frac{\sum_i (X_i - Y_i)^2}{\sum_i (Y_i - \bar{Y})^2}$$

Cet indicateur mesure la part de la variance du champ de départ Y_i expliquée par le champ simulé X_i . Pour une valeur de critère de 1, la simulation est parfaite. Pour des valeurs négatives de ces critères, la valeur moyenne de la série est un meilleur estimateur que la série des débits simulés.

Ces critères ont tous une valeur optimale atteinte si les hydrogrammes simulés coïncident parfaitement avec les hydrogrammes de crue reconstitués. Cette valeur optimale vaut 0 pour $e\%$, $|e|_{\%}$, l'EAM et 1 pour le critère de NASH.

Le critère de NASH est le critère le plus fréquemment utilisé. Il a l'avantage de donner un poids important à la restitution par le modèle des forts débits. Il présente également la qualité d'être normalisé par la variance du champ observé. Son principal inconvénient est son caractère dissymétrique : il peut prendre des valeurs fortement négatives pour des événements mal représentés par le modèle (Mathevet, 2005). Les performances d'un modèle sur plusieurs événements peuvent alors être biaisées si un événement est mal simulé par le modèle.

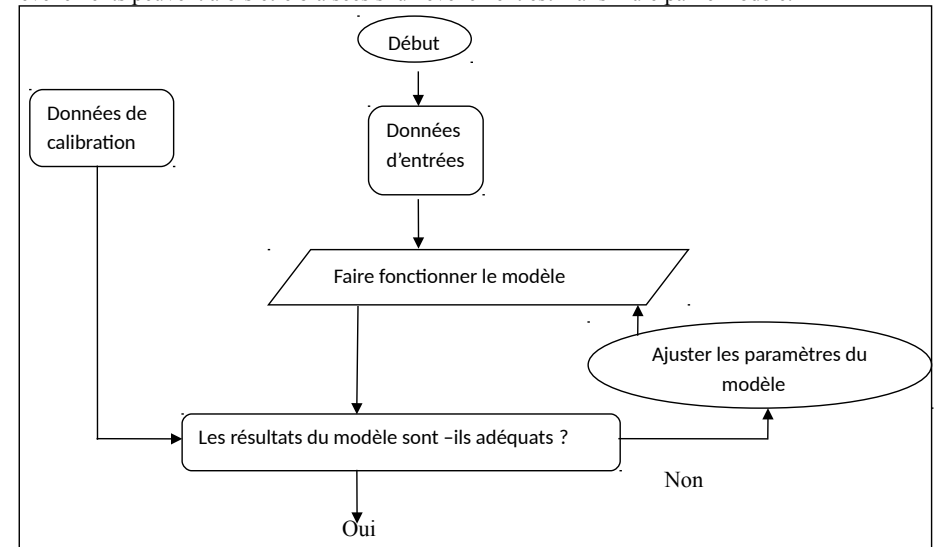


Fig. 2 : Organigramme de calibration et validation des modèles hydrologiques (Leconte, 2007)

I 1-5 Intérêt d'un modèle pluie-débit

- Les débits sont parfois inexistantes ou connus sur une durée trop faible.
- Les pluies sont plus faciles à observer et à modéliser.
- Le délai de prévision est augmenté si l'on remonte aux pluies.
- Avec les débits seuls, on ne peut pas faire la différence entre variation climatique et évolution du bassin.

Les différentes applications de modélisation pluie-débit sont consignées sur la figure.3 :

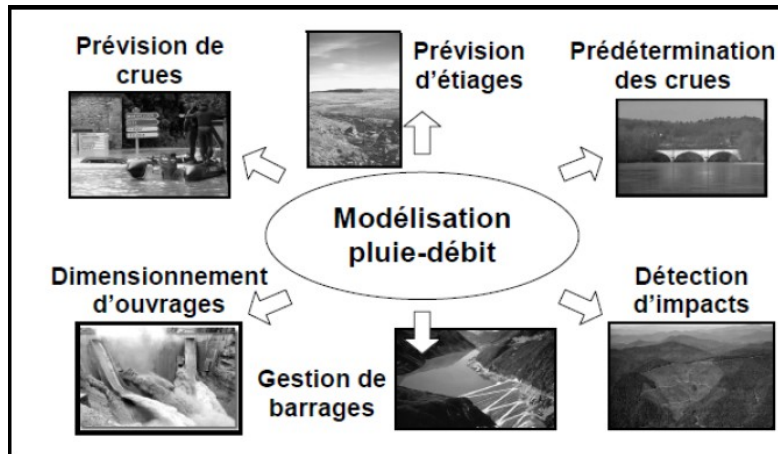


Fig.3 : Différentes applications de la modélisation pluie-débit (Perrin, 2000).

I 1-6 Pourquoi des modèles hydrologiques ?

Les modèles hydrologiques, sont nés bien avant l'avènement de l'informatique. A quel besoin répondaient et répondent encore ces modèles ?

La littérature scientifique présente une très grande diversité de modèles dont très peu ont trouvé une utilisation opérationnelle. La question de l'utilisation de modèles en hydrologie pour effectuer des prévisions, dimensionner des ouvrages d'art, délimiter des zones inondables - se pose en particulier pour les bassins versants pour lesquels on dispose de séries de débits mesurés. Nous aurons l'occasion de l'aborder dans le cadre du Travail dirigé consacré à la modélisation hydrologique. Ceci dit, on peut distinguer trois types d'utilisation des modèles mathématiques en hydrologie.

- ✓ **La modélisation comme outil de recherche** : Cela reste aujourd'hui encore le champ d'application privilégié de la modélisation hydrologique. La modélisation peut être utilisée pour interpréter des données mesurées. Différents scénarios de fonctionnement hydrologique des bassins versants peuvent être confrontés aux mesures.
- ✓ **La modélisation comme outil de prévision** : 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** : reconstitution de séries de débits plausibles. Dans certains cas, comme par exemple le dimensionnement de déversoirs de sécurité de barrages hydroélectriques ou encore la délimitation de zones inondables dans le cadre d'un Plan de prévention des risques, il est nécessaire de proposer des scénarios de crues, ou éventuellement d'étiages, de période de retour nettement

supérieure à la durée d'observation des débits sur le site étudié. L'utilisation de longues séries de pluies éventuellement générées à l'aide d'un modèle stochastique de pluie - couplées à un modèle hydrologique permet de reconstituer des scénarios rares. (Perrin, 2000).

I-2 Différentes approches de modélisation

Le terme de modèle recouvre une large variété d'outils, à la philosophie et aux objectifs différents. Les approches habituellement utilisées en modélisation pluie-débit apparaissent en sombre dans la figure 4.

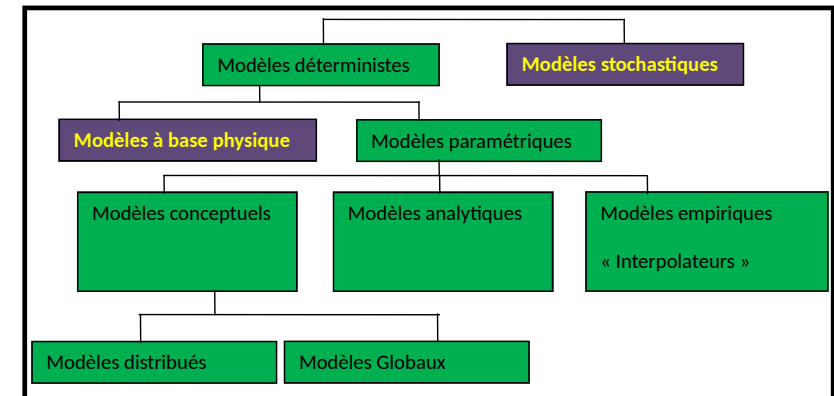


Fig.4 : Différentes approches de la modélisation (Gaume, 2002)

I-2-1 Modèle déterministe

Modèle qui associe à chaque jeu de variables de forçage, de variables d'état et de paramètres, une valeur réalisation unique des variables de sortie (Maftai, 2002).

I-2-2 Modèle stochastique

L'une au moins des variables de forçage ou des variables d'état ou des paramètres est une variable aléatoire. Par voies de conséquence, la ou les variables de sortie sont des variables aléatoires. La reconstitution de la distribution des variables de sortie nécessite des simulations répétées en tirant aléatoirement la valeur de la variable d'entrée. On parle de simulation de Monte Carlo (Vauclin, 1991).

I-2-3 Modèle à base physique

Modèle basé uniquement sur des équations de la physique, et ne comportant idéalement aucun paramètre. (Maftai, 2002)

I-2-4 Modèle paramétrique

Modèle incluant des paramètres dont la valeur doit être estimée par calage.

I-2-5 Modèle conceptuel ou « modèle conceptuel à réservoir ».

Modèle dans lequel le fonctionnement du bassin versant est représenté par des analogies : concepts. L'analogie la plus souvent utilisée pour représenter le fonctionnement

des sols et des nappes est celle du réservoir dont le débit de vidange dépend du taux de remplissage.

I-2-6 Modèle analytique

Modèle pour lequel les relations entre les variables de sortie et les variables de forçage ont été établies par analyse de séries de données mesurées. L'exemple type est celui des modèles linéaires : les paramètres du modèle sont liés aux coefficients de corrélation entre les variables. Notons que l'analyse des données peut conduire au choix de relations non linéaires entre les variables (Vauclin, 1991).

I-2-7 Modèles empiriques

Le type de fonctions reliant les variables est fixé a priori (fonctions polynômiales, fonctions sigmoïdes). Le niveau de complexité (nombre de fonctions à utiliser, ordre du polynôme) étant fixé, le calage consiste alors à déterminer la combinaison de fonctions s'ajustant le mieux aux données mesurées. Les réseaux de neurones sont l'exemple le plus répandu de ce type de modèles en hydrologie. Les outils d'interpolation s'avèrent généralement être de piètres extrapolateurs. Ils sont donc à utiliser avec prudence en dehors de la gamme de valeurs pour laquelle ils ont été calés. (Vauclin, 1991).

I-2-8 Présentation de quelques outils

I-2-8-1 Modèle à base physique distribué

Développé dès la première moitié des années 80 (Refsgaard & Storm, 1995), le Système Hydrologique Européen (SHE) poursuivait l'objectif ambitieux de construire un modèle hydrologique entièrement basé sur des équations physiques : modèle de Barré de Saint venant bidimensionnel pour le ruissellement superficiel, modèle de Richards monodimensionnel vertical pour les écoulements dans les sols non saturés et modèle de Darcy bidimensionnel pour les écoulements de nappes. Remarquons au passage que tous ces modèles sont paramétriques.

Un tel outil demande certes un important travail de préparation des données et de temps de calcul, mais permet en théorie de tirer pleinement profit de l'ensemble des informations disponibles sur un bassin versant : topographie, occupation des sols, profondeur et nature des sols, géologie. La fidélité de la représentation du bassin versant dans le modèle dépend bien entendu de la qualité et en particulier du niveau de discrétisation spatiale des données disponibles. Or celui-ci est généralement assez médiocre. La précision de la topographie disponible à l'IGN est généralement du mètre et les mailles des modèles numériques de terrain sont rarement inférieures à l'are. Ceci ne permet pas de prendre en compte la topographie fine d'un bassin versant et en particulier les thalwegs de versants, ni de représenter correctement la relation versant rivière : deux éléments fondamentaux dans les processus hydrologiques. Par ailleurs, la pédologie et la géologie ne sont connues qu'au travers de sondages isolés. Les profondeurs et propriétés des sols sont bien souvent par défaut considérées comme homogènes, hypothèse très certainement bien éloignée de la réalité physique que le modèle vise pourtant à reproduire. Dans la pratique, les profondeurs et les conductivités moyennes des sols représentatives de sous-parties du bassin versant doivent être

évaluées par calage et deviennent, de fait, des paramètres. Les tentatives de développement et d'utilisation de modèles "à base physique" ont souvent conduit à des résultats très satisfaisants à l'échelle d'une parcelle ou d'un versant. En revanche, à l'échelle du bassin versant, ils doivent comme tout autre modèle, faire l'objet d'un calage.

Celui-ci est d'autant plus délicat que le nombre de paramètres du modèle est important et que les interdépendances entre les différents processus simulés par le modèle sont complexes et difficiles à maîtriser : une modification de la conductivité hydraulique des sols jouera sur les débits de crue mais aussi sur les formes des courbes de tarissement et sur les débits d'étiage par exemple (Gaume, 2002).

Modèle physique-conceptuel semi-spatialisé TOPMODEL (TOP orography based hydrological MODEL) est un modèle hydrologique initialement développé par (Beven & Kirkby, 1979), (Beven, 1989), (Beven, 1992) à l'Université de Lancaster. Il s'agit d'un modèle pluie-débit qui suit une approche articulée autour de deux idées centrales :

- le ruissellement se produit sur des zones contributives variables,
- la topographie influence la manière dont se produit le ruissellement.

L'originalité de TOPMODEL réside dans la définition de l'indice topographique. Cet indice est un paramètre dynamique qui traduit la propension qu'a un pixel à se saturer plus ou moins vite. TOPMODEL modélise le sol à l'échelle du versant de la façon suivante :

- 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.

I-2-8-2 HEC HMS

Ce logiciel a été développé par le HEC (Hydrologic Engineer Center) des US Army Corps of Engineers. La première version de ce logiciel est apparue en 1995. Il s'agit d'un modèle pluie-débit, constitué par un ensemble de modèles hydrologiques qui permettent de décrire le fonctionnement d'un bassin versant de manière spatialisée. La géométrie du bassin versant peut être conceptualisée par un ensemble de sous unités hydrologiques liées entre elles par des éléments hydrauliques. Cette description se fait à l'aide d'outils géométriques prédéfinis. La description des pluies se fait par l'introduction d'observations faites sur des pluviographes ou bien de pluies synthétiques.

Chacune des unités hydrologiques ainsi que chacun de ces éléments de liaison sont caractérisés par de multiples modèles de simulation hydrologique et hydraulique. Parmi ces modèles, on trouve :

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

I-2-8-3 Hydrotel : l'intégration des données de télédétection

Ce modèle a été conçu en collaboration entre l'INRS EAU Canada et Laboratoire d'Hydrologie et Modélisation de Montpellier (Fortin et al. 1995), dans le but de créer un outil capable d'intégrer et de gérer la spatialisation des données et des processus physiques. Il utilise ainsi les données issues de la télédétection et les SIG. Il se décompose en 2 modules : PHYSITEL (pour le traitement du MNT en vue de la détermination des unités hydrologiques du bassin et de son réseau de drainage) et HYDROTEL (pour la simulation hydrologique). Ce dernier module intègre, en plus des résultats de PHYSITEL, le type de sol, sa profondeur racinaire, la pluie (sous forme de pluviographes), l'occupation des sols et les caractéristiques de la végétation (albédo, indice foliaire). Il simule l'ETP, la fonte des neiges, le ruissellement superficiel (par l'onde cinématique), la propagation de la crue dans la rivière avec l'onde cinématique ou l'onde diffusante.

Ce modèle présente l'avantage d'intégrer l'imagerie satellitale, d'utiliser des équations physiques pour modéliser les processus de genèse et de propagation de crues et de se présenter sous la forme d'une interface conviviale. Toutefois, il nécessite une grande quantité d'informations pour son calage initial. De plus, son pas de temps horaire est très limitatif pour la prévision des crues éclair.

I-2-8-4 MIKE SHE : la modélisation hydrologique complète

MIKE est une famille de logiciels qui traitent d'écoulements dans les rivières, de crues en 1 et 2D, d'hydrologie intégrée (MIKE SHE) et de management hydrologique assisté par un Système d'Information Géographique. MIKE SHE qui est un modèle physique au sens de (Bonell, 1993), comprend plusieurs modules :

- Evapotranspiration
- Ecoulement dans la zone non saturée basée sur l'équation de Richards
- Ecoulement dans la zone saturée

- Ecoulement superficiel dans les cours d'eau et sur les versants selon l'équation de l'onde diffusante

Ainsi que des modules propres à des applications particulières comme l'irrigation. Les inconvénients majeurs de ce type de logiciels résident dans leur coût, leur non modularité, l'inaccessibilité de leur code source et le manque de détails des équations programmées.

I-2-8-5 TOPKAPI : les ondes cinématiques opérationnelles

TOPKAPI signifie TOP orographic Kinematic Approximation and Intégration. Il a été conçu et développé par (Liu & Todini, 2002). Il s'agit d'un modèle hydrologique distribué à base physique. Les équations de l'onde cinématique sont intégrées à différentes échelles pour permettre une résolution de la transformation pluie-débit et de la propagation de la crue dans la rivière rapide. Il prend en compte l'évapotranspiration, la fonte des neiges et les transferts de l'eau dans le sol, en surface et dans les cours d'eau. En particulier, il modélise l'apparition du ruissellement superficiel par saturation des zones contributives. Les paramètres de ce modèle sont invariants par changement d'échelle et se déterminent à partir de différentes données : le MNT, la carte des sols, la carte de la végétation, la carte d'occupation des sols. Il a été utilisé pour l'analyse de crues extrêmes, la détermination des impacts des changements climatiques, l'extension à des bassins non jaugés, le couplage avec des modèles généraux de circulation.

I-2-8-6 AIGA : la méthode spécifique aux crues éclair

Il s'agit d'une méthode développée conjointement par Météo France et le Cémagref qui a pour vocation la prévision opérationnelle des crues éclair (Gregoris et al., 2001). Les pluies introduites dans le modèle sont d'une part les pluies du radar météorologique (reçues toutes les 15 minutes) et d'autre part une précipitation prévue à une heure. Le modèle hydrologique à l'échelle du bassin versant utilisé est la méthode du SCS (US Soil Conservation Service). Il faut fournir à cette méthode 2 paramètres ainsi qu'une condition initiale d'humidité. Cette dernière est fournie quotidiennement par ISBA. La sortie d'AIGA est une évaluation du risque basé sur la période de retour de l'événement ainsi prévu (2 à 10 ans, 10 à 50 ans, au-delà de 50 ans).

Tableau 1 : Résumé de quelques modèles hydrologiques (Estupina-Borrell, 2004).

Modèles	Statistique ou à base physique	Taille de l'unité hydrologique	Type de calage	Nature de la sortie
TOPMODEL	À base physique (zones contributives saturées)	Versant	À base physique (zones contributives saturées)	Hydrogramme de crue à l'exutoire
TOPKAPI	À base physique	Pixel	Paramètres à caler à	Hydrogramme de

	(processus complexes)		partir de chroniques PQ	crue
HEC HMS	À base physique (processus de type hortonien)	Sous bassin versant	Prédétermination possible puis calage à partir de chroniques PQ	Hydrogrammes de crue en différents points du bassin
SOPHIE	Modèles à propagation le long d'un cours d'eau et modèles pluie PQ globaux	Sous bassin versants	Calage statistique à partir de chroniques PQ	Hydrogrammes de crue en différents points du bassin
MIKE SHE	À base physique (processus complexes)	Pixel	Prédétermination possible et calage à partir de chroniques PQ	Hydrogrammes de crue en différents points du bassin
AIGA	À base physique (processus de type hortonien)	Pixel	Prédétermination possible puis calage à partir de chroniques PQ	Risque hydrologique
HYDROTEL	À base physique	Pixel	Prédétermination possible puis calage à partir de chroniques PQ	Hydrogrammes de crue

I.3 Modèles du Génie Rural GR

Les modèles de simulation du Génie Rural fonctionnent aux pas de temps annuel, mensuel et journalier.

I.3-1 Objectifs de développement

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

I.3-2 Mode de développement

Bien que ces modèles soient parfois apparentés à des modèles conceptuels du fait de leur structure à réservoirs, ce sont en fait des modèles empiriques: leur construction s'est faite sur la base de grands jeux de données et en découvrant progressivement la structure permettant de reproduire au mieux le comportement hydrologique du bassin versant (c'est-à-dire sa réponse aux pluies). Les idées suivantes se sont progressivement imposées au cours du développement de ces modèles pour permettre d'obtenir des modèles fiables et robustes (Mathevet, 2005):

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

I.3-3 Description du modèle pluie-débit annuel GR1A

I.3-3.1 Introduction

Le modèle GR1A (modèle du Génie Rural à 1 paramètre Annuel) est un modèle pluie-débit global à un seul paramètre. Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1990, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie-débit robuste et fiable en vue d'utilisations pour des applications d'évaluation et de gestion de la ressource en eau. La principale version, que nous présentons ici, est celle proposée par Mouelhi (2003) et Mouelhi *et al.* (2006a).

I.3-3.2 Description mathématique

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

$$Q_k = P_k \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{0.7P_k + 0.3P_{k-1}}{XE_k} \right)^2 \right]^{0.5}} \right\}$$

Eq.1

où X est l'unique paramètre du modèle.

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

I.3.3.3 Paramètre

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

I.3.4 Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M

I.3.4.1 Introduction

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.

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

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

I.3.4.2 Description mathématique

Un schéma de la structure est donné à la figure 5. P_k est la pluie mensuelle du mois k et E l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même mois calendaire.

Les équations qui régissent le modèle sont les suivantes :

- **Production**

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

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

Eq.2

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

$$P_1 = P - P_s' \quad \text{Eq.3}$$

et le contenu du réservoir est actualisé :

$$S' = S_k + P_s \quad \text{Eq.4}$$

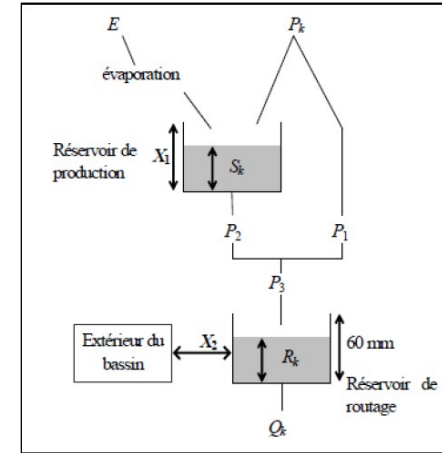


Fig. 5: Schéma de la structure GR2M

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

$$E_s = \frac{S' \cdot \left(2 - \frac{S'}{X_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S'}{X_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)}$$

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

$$S'' = S' - E_s \quad \text{Eq. 6}$$

- **Percolation**

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

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

Eq.7

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

$$S_{k+1} = S'' - P_2 \quad \text{Eq.8}$$

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

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

$$P_3 = P_1 + P_2 \tag{Eq. 9}$$

Le niveau R_k dans le réservoir devient alors R' :

$$R' = R_k + P_3 \tag{Eq. 10}$$

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

$$F = (X_2 - 1) \cdot R' \tag{Eq. 11}$$

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

$$R'' = X_2 - R' \tag{Eq. 12}$$

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

$$Q_k = \frac{R''^2}{R'' + 60} \tag{Eq. 13}$$

Le contenu du réservoir est enfin actualisé par :

$$R_{k+1} = R'' + Q_k \tag{Eq. 14}$$

1.3.4.3 Paramètres

Le modèle a deux paramètres optimisables :

X_1 : capacité du réservoir de production (mm)

X_2 : coefficient d'échanges souterrains (-)

Sur un large échantillon de bassins versants, on obtient les valeurs données dans le Tableau 2

Tableau 2 : Valeur des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants

Paramètre	Médiane	Intervalle de confiance à 90%
X_1 (mm)	380	140 - 2640
X_2 (-)	0.92	0.21 - 1.31

1.3.5 Description du modèle pluie-débit journalier GR4J

1.3.5.1 Introduction

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

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

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

Remarquons que le modèle GR3H (Fourmigué et Lavabre, 2005) utilisé au pas de temps horaire correspond à la version à trois paramètres proposée par Edijatno (1991). Le modèle GR3H est très similaire à la version du modèle décrite dans la section suivante, mais n'intègre ni fonction d'échange, ni fonction de percolation, les autres fonctions étant pratiquement identique.

1.3.5.2 Description mathématique

Un schéma de la structure est donné à la figure 6. P_k est la pluie journalière du jour k et E l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même jour calendaire.

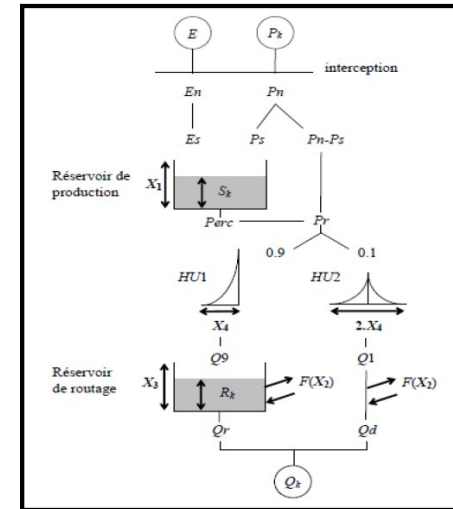


Fig.6: Schéma de la structure du GR4J

- **Neutralisation**

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

$$\text{Si } P_k > E, \text{ alors } P_n = P_k - E \text{ et } En = 0 \quad \text{Eq. 15}$$

$$\text{Si } P_k < E, \text{ alors } P_n = 0 \text{ et } En = E - P_k \quad \text{Eq. 16}$$

- **Fonction de rendement**

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

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

Où :

X_1 (mm) : la capacité maximum du réservoir de production,

S_k : le contenu du réservoir de production au début du jour k .

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

$$Es = \frac{S_k \left(2 - \frac{S_k}{X_1} \right) \tanh \left(\frac{En}{X_1} \right)}{1 + \left(1 - \frac{S_k}{X_1} \right) \tanh \left(\frac{En}{X_1} \right)} \quad \text{Eq. 18}$$

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

$$S' = S_k + P_s - E_s \quad \text{Eq. 19}$$

- **Percolation**

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

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

Par suite, le contenu du réservoir devient :

$$S_{k+1} = S' - Perc \quad \text{Eq. 21}$$

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

$$Pr = Perc + (P_n - P_s) \quad \text{Eq. 22}$$

- **Hydrogrammes unitaires**

Pr est divisée en deux composantes d'écoulement, 90 % étant routés par un hydrogramme unitaire $HU1$ et un réservoir de routage et 10 % par un hydrogramme unitaire symétrique $HU2$.

$HU1$ et $HU2$ dépendent du même paramètre $X4$, temps de base de $HU1$ exprimé en jours.

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

$$\text{Pour } t=0 \quad SH1(t) = 0 \quad \text{Eq. 23}$$

$$\text{Pour } 0 < t < X4 \quad SH1(t) = \left(\frac{t}{X4} \right)^{\frac{5}{2}} \quad \text{Eq. 24}$$

$$\text{Pour } t > X4 \quad SH1(t) = 1 \quad \text{Eq. 25}$$

➤ **$SH2$ est définie en fonction du temps par :**

$$\text{Pour } t=0 \quad SH2(t) = 0 \quad \text{Eq. 26}$$

$$\text{Pour } 0 < t < X4 \quad SH2(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{X4} \right)^{\frac{5}{2}} \quad \text{Eq. 27}$$

$$\text{Pour } X4 < t < 2X4 \quad SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{X4} \right)^{\frac{5}{2}} \quad \text{Eq. 28}$$

$$\text{Pour } t > 2X4 \quad SH2(t) = 1 \quad \text{Eq. 29}$$

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

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j-1) \quad \text{Eq. 30}$$

$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j-1) \quad \text{Eq. 31}$$

Où « j » est un entier.

Pour $t \geq 0$ $SH1(t) = 0$

$$\text{Pour } 0 < t < X_4 \quad SH1(t) = \left(\frac{t}{X_4} \right)^{\frac{5}{2}} \quad \text{Eq. 23}$$

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

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j-1) \quad \text{Eq. 33}$$

$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j-1) \quad \text{Eq. 34}$$

Où : j est un entier.

A chaque pas de temps k , les sorties Q_9 et Q_1 des deux hydrogrammes correspondent à la convolution des pluies antérieures par la clé de répartition donnée par l'hydrogramme discrétisé et sont calculées par :

$$Q_9(i) = 0,9 \cdot \sum_{k=1}^i UH1(k) \cdot \text{Pr}(i - k + 1) \quad \text{Eq. 35}$$

$$Q_1(i) = 0,1 \cdot \sum_{k=1}^m UH2(k) \cdot \text{Pr}(i - k + 1) \quad \text{Eq. 36}$$

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

• Fonction d'échange avec l'extérieur non atmosphérique

Un échange souterrain en eau est calculé par :

$$F = X_2 \left(\frac{R}{X_3} \right)^{7/2} \quad \text{Eq. 37}$$

Où :

R_k : niveau dans le réservoir en début de pas de temps,

X_3 : capacité à un jour du réservoir ,

X_2 : coefficient d'échange en eau qui peut être positif dans le cas d'apports, négatif dans le cas de pertes vers des nappes profondes ou nul.

En fait, l'interprétation physique de cette fonction d'échange n'est pas directe.

• Réservoir de routage

Le niveau dans le réservoir de routage est modifié en ajoutant la sortie Q_9 de l'hydrogramme $HU1$ et F :

$$R' = \max(0, R_k + Q_9(k) + F) \quad \text{Eq. 38}$$

Il se vidange ensuite en une sortie Q_r donnée par :

$$Q_r = R' \cdot \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R'}{X_3} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\} \quad \text{Eq. 39}$$

Le niveau dans le réservoir devient :

$$R_{k+1} = R' - Q_r \quad \text{Eq. 40}$$

• Ecoulement total

La sortie Q_1 de l'hydrogramme $HU2$ est soumise au même échange pour donner la composante d'écoulement Q_d :

$$Q_d = \max(0, Q_1(k) + F) \quad \text{Eq. 41}$$

Le débit total Q est alors donné par :

$$Q_k = Q_r + Q_d \quad \text{Eq. 42}$$

• Paramètres

Le modèle GR4J ne comporte que quatre paramètres à caler :

X_1 : capacité du réservoir de production (mm)

X_2 : coefficient d'échanges souterrains (mm)

X_3 : capacité à un jour du réservoir de routage (mm)

X_4 : temps de base de l'hydrogramme unitaire $HU1$ (j) Sur un large échantillon de bassins versants, on obtient les valeurs données dans le Tableau 3.

Tableau3 : Valeur des paramètres du modèle GR4J obtenues sur un large échantillon de bassins versants

Paramètre	Médiane	Intervalle de confiance à 80%
X1 (mm)	350	100 à 1200
X2 (mm)	0	-5 à 3
X3 (mm)	90	20 à 300
X4 (jours)	1.7	1.1 à 2.9

I.4 Applications des modèles

Les modèles présentés précédemment peuvent être utilisés pour un certain nombre d'application d'ingénierie ou de gestion de l'eau. On peut citer à titre d'exemples :

- ✓ **la reconstitution ou l'extension de séries de débit** : après calage, le modèle est appliqué en simulation sur une période sur laquelle on dispose de données pluviométriques observées,
- ✓ **la prédétermination** : les séries de débit observé étant souvent courte, il peut être intéressant de les étendre à l'aide d'un modèle pluie-débit. On peut pour cela soit utiliser des séries de pluie observée si elles sont suffisamment longues, soit utiliser un

générateur stochastique de pluie qui permettra d'obtenir des séries probables de pluie sur le bassin (un tel générateur demandant un calage préalable sur des séries de pluie observée),

- ✓ **la prévision à court terme (quelques heures à quelques jours)** : elle est particulièrement utile pour les événements de crues. Le modèle doit alors intégrer une procédure d'assimilation des débits observés, ce qui permet d'améliorer de façon substantielle les prévisions. Les travaux de Tangara (2005) ont par exemple permis de mettre au point un modèle continu (GR3P) dérivant du modèle GR4J et spécifiquement adapté à l'exercice de prévision à court terme, voir également les travaux réalisés en mode événementiel avec le modèle GR3H (Fourmigué et Lavabre, 2005),
- ✓ **la prévision à moyen ou long terme (de quelques semaines à quelques mois)** : elle est intéressante pour les problématiques d'étiage et de gestion de la ressource. Dans ce cas, se pose le problème de l'incertitude sur les pluies futures. Pour en tenir compte, on doit adopter un cadre de prévision probabiliste en utilisant de nombreux scénarios de pluie future à partir de l'instant de prévision, scénarios issus soit de prévisions d'ensemble de modèle météorologiques, soit d'archives météorologiques si elles existent, soit d'un générateur stochastique de pluie,
- ✓ **la détection de tendance dans le comportement hydrologique du bassin versant** : l'utilisation d'un modèle hydrologique permet d'identifier dans la variabilité des séries de débit ce qui vient de la variabilité naturelle des conditions climatiques de ce qui vient de changements de caractéristiques du bassin versant (Andréassian, 2002; Andréassian *et al.*, 2003);
- ✓ **la gestion ou le dimensionnement d'ouvrages** : grâce au modèle, on peut dans une étude de dimensionnement simuler en continu des apports au réservoir et ainsi optimiser son dimensionnement pour des objectifs particuliers (soutien d'étiage, écrêtement de crue, etc.) en tenant compte ainsi de la variabilité naturelle de ces apports. En conditions opérationnelles, la prévision des apports peut permettre en mieux gérer l'ouvrage (Yang *et al.*, 1991).

I.5 Conclusions et perspectives

Les modèles du Génie Rural du fait de leur construction, ne peuvent être que parcimonieux (peu de paramètres à caler). Par suite, ils ont des besoins en données limités, dans un domaine où les modèles tendent à devenir de plus en plus complexes pour intégrer des processus supposés exister à l'échelle ponctuelle. Cette simplicité, si elle n'est pas un objectif en soi, s'est imposée au cours de leur développement parce que de nombreuses hypothèses de fonctionnement, empruntées à l'arsenal des modèles conceptuels, étaient rejetées par des données observées lorsque de nombreux bassins étaient pris en compte et que le test en calage-contrôle était appliqué avec rigueur. C'est ainsi par exemple que les sous modèles classiques d'infiltration n'ont pu être retenus dans les architectures finales.

Notons également que les fonctions d'échanges vers l'extérieur non atmosphérique du bassin, absentes de la grande majorité des modèles conceptuels, sont apparues comme indispensables à tous les pas de temps.

Les modèles GR ont été testés sur des bassins et des contextes climatiques très variés, en France mais aussi dans d'autres pays (Etats-Unis, Australie, Brésil, Allemagne, Angleterre, Côte d'Ivoire, Algérie.etc.). Applicables à l'échelle du bassin versant, ils ont été testés sur des bassins versants allant de moins de 10 km² à plus de 100 000 km². Ils sont également utilisés pour une large gamme d'applications opérationnelles telles que la prédétermination des crues, la prévision des crues ou des étiages, la détection d'impact, la gestion ou le dimensionnement d'ouvrages, pour lesquelles le Cemagref développe des méthodologies spécifiques de mise en œuvre. Pour de simples objectifs de simulation, les modèles GR peuvent être appliqués aisément à partir d'un tableur (voir <http://www.cemagref.fr/webgr/>). Comme tous les modèles hydrologiques actuels, ces modèles restent perfectibles, malgré les efforts déjà consentis pour les rendre aussi performants que possible. Les recherches continuent donc pour les faire progresser et améliorer ainsi la compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin versant. La modélisation à pas de temps horaire, les interactions nappes-rivières, la prise en compte de l'hétérogénéité spatiale des pluies ou d'informations hydrométriques amont, une meilleure représentation des fontes nivales, constituent les pistes explorées actuellement.

CHAPITRE II PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Cette partie a pour objet de présenter le contexte général du bassin d'oued Khémis d'un point de vue géomorphologique, géologique, et climatologique.

II.1 Synthèse géographique

Le bassin versant de la Tafna, situé au Nord ouest du territoire algérien (fig.7), s'étend sur la totalité de la wilaya de Tlemcen sur une superficie de 7245 km². Selon la nouvelle structuration des unités Hydrologiques en Algérie, le bassin versant de la Tafna appartient à l'ensemble de l'Oranie –Chott Cherguie (fig.8).

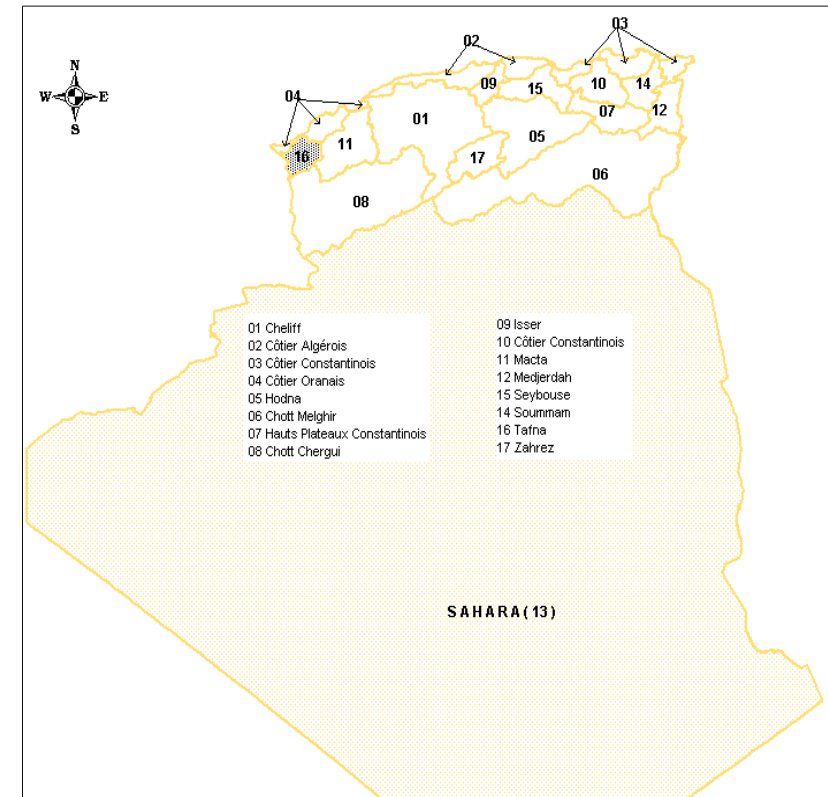


Fig.7 : Bassins versants algériens (Bouanani A, 2004)

Globalement, le bassin versant peut être subdivisé en trois grandes parties (fig.8) :

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

Les plaines du bassin de la Tafna s'étendent aux pieds des monts de Tlemcen en avant des massifs de Traras et du Tessala, elles sont entourées de massifs aux reliefs élevés dessinant un édifice régulier formé essentiellement de terrains mésozoïques et cénozoïques.

Les monts des Traras au Nord ouest dressent une barrière entre le bassin et la mer, ils correspondent à une série de crêtes de direction NE – SW culminant à 1136 m au djebel Fillaoucène.

- à l'Est par les djebels : El Rhar (1523m), djebel Herhour, Nif el Ogab (1467m) et Guarn Zahra (1292m).
- à l'Ouest, par le Horst de Rhar-Roubane (1014m) et Ras-Asfour (1532m).

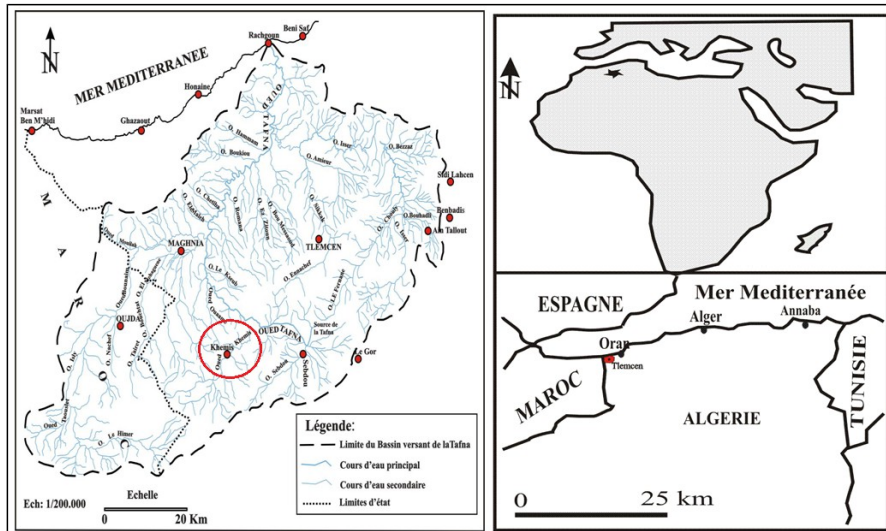


Fig.9 : Situation du bassin de l'Oued Khemis.

II.3 Caractéristiques physiques du bassin versant

II.3.1 Caractéristiques de Forme

Comme paramètre de mesure :

- Paramètres géométriques : la surface S du bassin et son périmètre P,
- Son indice de forme ou de compacité Kc,
- Les cotés de son rectangle équivalent.

II.3.2 Indice de compacité (de Gravelius)

Le coefficient de Gravelius exprime la forme d'un bassin versant, il est égal au rapport du périmètre du bassin versant considéré à celui d'un cercle qui aurait la même surface. Plus cet indice sera proche de 1, plus le bassin aura une forme ramassée et plus le temps de concentration des eaux sera court.

$$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{S}}$$

P : Périmètre du bassin versant (km) P=93km

S : Superficie du bassin versant (km²) S=350Km²

Kc=1,39

La valeur de Kc traduit un allongement du bassin et le développement d'une érosion linéaire.

II.3.3 Rectangle équivalent

C'est une notion introduite pour pouvoir comparer les bassins entre eux du point de vue influence de la forme sur l'écoulement.

On détermine la longueur et la largeur du rectangle qui aurait la même superficie, le même indice, la même courbe de fréquence altimétrique et les mêmes conditions d'écoulement que ceux du bassin versant considéré.

$$L = \frac{Kc \cdot \sqrt{S}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Kc} \right)^2} \right]$$

L : longueur du bassin versant

$$L=36,96Km$$

$$l = \frac{Kc \cdot \sqrt{S}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Kc} \right)^2} \right]$$

l : largeur : l=S/L

$$l= \text{largeur du bassin}=9,47km$$

Kc : coefficient de Gravelius

S : Superficie du bassin

Dans notre étude la longueur du bassin est de 36,96Km et la largeur est de 9,47km. (fig.10)

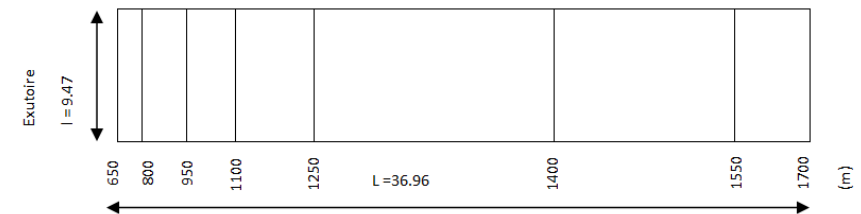


Fig.10 : Rectangle équivalent du bassin versant de l'Oued Khemis.

II.3.4 Etude du Relief

Comme paramètre du relief :

- L'indice de pente Ip de Roche.
- L'indice de pente globale Ig.

Qui requièrent la connaissance de la répartition hypsométrique et la dénivelée D.

II.3.4.1 Etude de la répartition de la surface en fonction de l'altitude

Après, la mesure de l'aire totale du bassin, on détermine les surfaces partielles (Tableau 4).

Les données du tableau 4, permettent d'établir la courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Khemis $H\%=f(\Sigma A\%)$ et le diagramme des fréquences altimétriques pour le même bassin.

Tableau 4 : Répartition de la surface en fonction de l'altitude.

Altitude (m)	% Altitude	Surface partielle		Surface cumulée	
		Km ²	%	Km ²	%
1700-1550	100	28,3	8,08	28,3	8,08
1550-1400	85,74	98	28	126,3	36,08
1400-1250	71,45	134	38,28	260,3	74,36
1250-1100	57,16	29,6	8,45	289,9	82,81
1100-950	42,87	26,5	7,57	316,4	90,38
950-800	28,58	25,2	7,2	341,6	97,58
800-650	14,29	8,4	2,4	350	100

Pour Strahler, la courbe hypsométrique est le reflet de l'état d'équilibre dynamique potentiel du bassin. Dans notre étude, la courbe hypsométrique présente une concavité vers le bas, c'est un bassin jeune d'où un potentiel érosif important, il est donc en pleine évolution géomorphologique.

La courbe hypsométrique et l'histogramme des fréquences altimétriques du bassin d'oued Khemis (figures 11,12) nous permettent de déterminer les altitudes caractéristiques suivantes :

- Altitude la plus fréquente : 1250-1550m
- Altitude de fréquence 1/2 : 1400m
- Altitude moyenne : 1175m

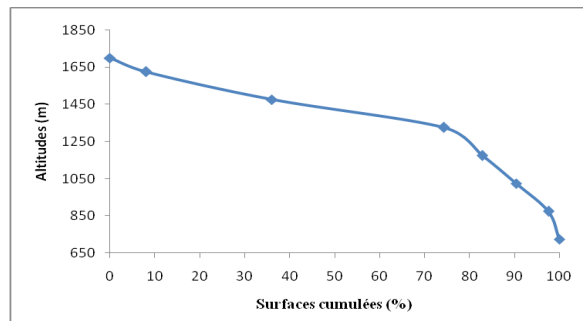


Fig.11 : Courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Khemis.

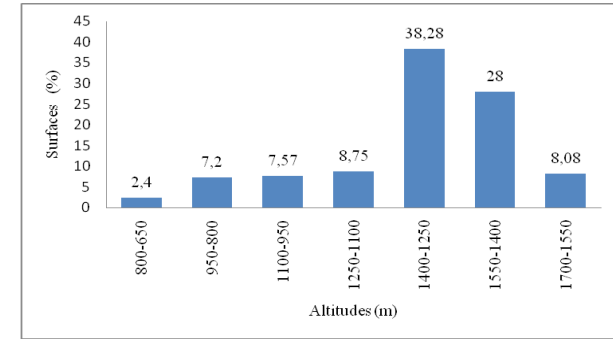


Fig.12 : Histogramme des fréquences altimétriques du bassin d'oued Khemis.

Remarque :

On constate que près de 74,36% de la surface du bassin est comprise entre les tranches d'altitude 1400-1250, tandis qu'entre 1250-650 on n'a que 25,62% de la surface totale du bassin, on peut conclure la présence de pentes assez fortes au niveau, des basses altitudes indiquant la présence de plaine.

II.3.4.2 Etude des pentes

a- Indice de pente de Roche Ip

C'est un indice de pente qui rend compte de l'influence du facteur pente sur le régime hydrologique du bassin, nous le déterminons à partir du rectangle équivalent.

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n x_i \sqrt{\beta_i(a_i - a_{i+1})}$$

β_i : Fraction de la surface totale comprise entre les cotés a_i et a_{i+1}

X_i : Fraction de la longueur du rectangle équivalent.

L : Longueur du rectangle équivalent.

$$I_p = 2,89$$

b- Indice de pente global

Le relief joue un rôle important, car il commande en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains. Son appréhension peut être faite à l'aide de l'indice de pente global I_g donné par la relation :

$$I_g = D / L$$

Où,

I_g : indice globale de Roche

D: dénivelée (m): $H_{5\%}-H_{95\%}$ tirées de la courbe hypsométrique.

L : longueur du rectangle équivalent (km)

$$I_g = 19,3 \text{ m/km} = 0,019$$

Ig a été corrigé de l'effet de surface par la notion de dénivelée spécifique :

$$D_s = I_g \cdot (S)^{1/2}$$

Ig : Indice de pente global (m/km)

S : Aire du bassin (km²)

$$D_s = 361,07 \text{ m}$$

Selon la classification de l'OROSTOM, le bassin de khemis appartient à la classe de relief fort.

Tableau 5 : Classification du relief selon Ds

R1	Ds < 10	Relief tres faible
R2	10m < Ds < 25m	Relief faible
R3	25m < Ds < 50m	Relief assez faible
R4	50m < Ds < 100m	Relief modere
R5	100m < Ds < 250m	Relief assez fort
R6	250m < Ds < 500m	Relief fort
R7	500m < Ds	Relief tres fort

On confirme que le relief du bassin de Khemis est un relief fort.

II.3.5- Etude du réseau hydrographique (fig.13)

La disposition du réseau hydrographique est liée en grande partie à l'évolution des phénomènes structuraux, qui ont affecté la région au cours des temps géologiques (Seladji.S, 2000).

Les paramètres importants qui régissent le régime hydrologique d'un cours d'eau sont : la densité de drainage, les rapports de confluence et rapports des longueurs.

L'oued Khemis est un affluent rive gauche de l'oued Tafna, il court au fond d'une vallée encaissée, cet oued est alimenté essentiellement par des sources qui lui assurent un écoulement permanent.

Il prend naissance à une altitude de 1700m par la rencontre de 3 Oueds :

- Le premier d'Ouled Belkasssem.
- Le second renfermant : Oued Tadet, Oued Mazer (même cours d'eau).
- Et le dernier qui renferme : O. Tadert, O.Tirheza, O.Boulefane et O.Chadli (même cours d'eau permanent), un autre cours d'eau celui de O. Laames madhel (temporaire) est lié à ce troisième oued.

Le bassin de Khémis représente la partie amont la plus élevée de la Tafna dont l'altitude oscille entre 1000 et 1800m. Ce bassin occupe une superficie de 343km² sur un périmètre de 93km. Le basin est caractérisé par la présence de reliefs très contrastés et des pentes très fortes favorisant l'accentuation de son potentiel érosif.

L'oued Khemis coule sur une grande partie dans une vallée étroite, au versant abrupte de direction SSW–NNE alimentant le barrage de Beni- Bahdel.

Le schéma du chevelu hydrographique à partir des cartes topographiques à l'échelle 1/50000 est illustré sur la figure 13.

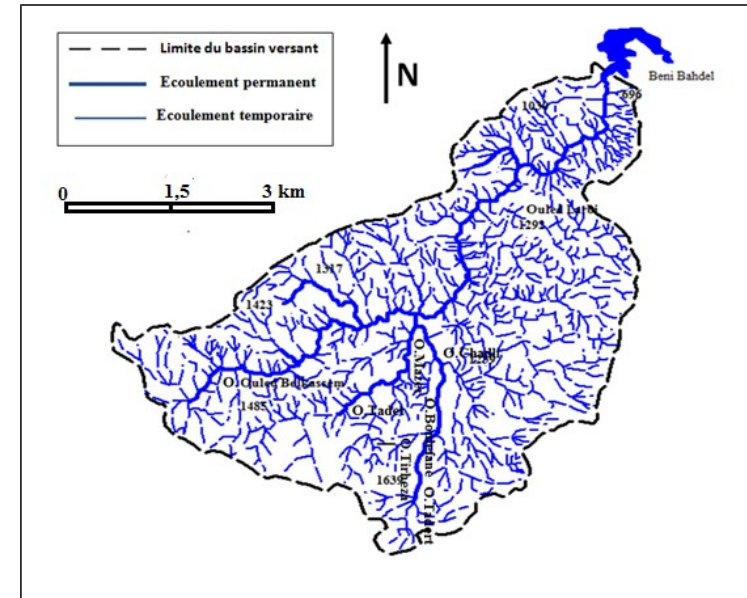


Fig.13 : Réseau hydrographique du bassin versant d'oued Khemis. (In Bouanani, 2004)

Nous utiliserons ici la classification définie par STRAHLER et SCHUM, 1954 :

Tout tronçon de cours d'eau formé par la réunion de 2 cours d'eau d'ordre x est d'ordre x+1.

Tableau 6: Classification des thalwegs suivant les ordres et rapports caractéristiques

Ordre	Nombre	Rapport de confluence	Longueur [Km]	Longueur moyenne[m]	Rapport des longueurs
1	1905	3,21	571	0,3	/
2	593	6,44	290,5	0,49	1,63
3	92	4,84	152	1,65	3,36
4	19	3,8	54	2,84	1,72
5	05	5	37	7,4	2,61
6	01	/	23,5	23,5	3,18
Total	2615	-	1128	-	-

II.3.5.1- Densité de drainage

C'est un paramètre qui permet de caractériser l'organisation du chevelu hydrographique et le degré de drainage du bassin versant, il correspond au rapport de la longueur total des thalwegs par la surface du bassin.

$$D_d = \frac{\sum L_i}{S}$$

Où,

D_d : densité de drainage (km/km²)

L_i : longueur moyenne des thalwegs au niveau de chaque ordre (km).

A : Surface du bassin (km²)

$$D_d = 3.22 \text{ Km} / \text{Km}^2$$

La valeur élevée de la densité de drainage indique la présence d'une pente forte favorisant des crues rapides, on peut dire que le bassin de Khemis est bien drainé.

II-3.5.2- Rapport de confluence R_c (fig.14)

C'est le quotient du nombre de thalwegs d'ordre x par celui des thalwegs d'ordre supérieur $x+1$.

$$\text{Il est défini par : } R_c = \frac{N(x)}{N(x+1)}$$

Il est préférable d'estimer la valeur moyenne des rapports de confluence par méthode graphique, sur un papier semi-log où, on porte

- En ordonnées logarithmique, le nombre de thalwegs
- En abscisse arithmétique l'ordre des thalwegs.

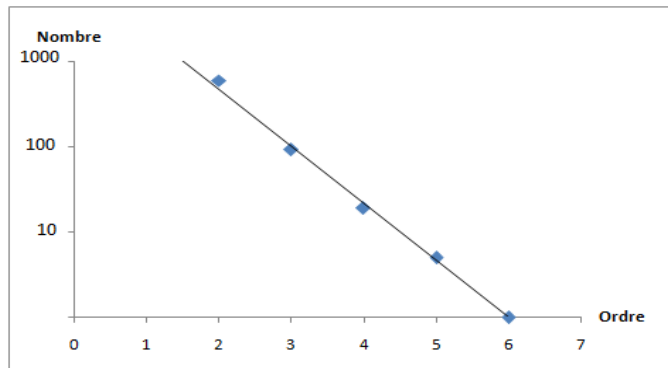


Fig.14 : Rapport de confluence.

On obtient une droite d'équation : $\log N = ax + b$

$$a = \frac{\log N(x) - \log N(x+1)}{x - (x+1)}$$

Pour le bassin de l'oued Khemis : $R_c = 2,29$

Le réseau est bien organisé, le nombre de cours d'eau d'ordre successifs forme une progression géométrique d'ordre inverse.

II-3.5.3- Rapport de longueurs (fig.15)

C'est le quotient de la longueur moyenne des thalwegs d'ordre $(x+1)$ par celle des thalwegs d'ordre (x) .

$$R_L = \frac{l(x+1)}{l(x)}$$

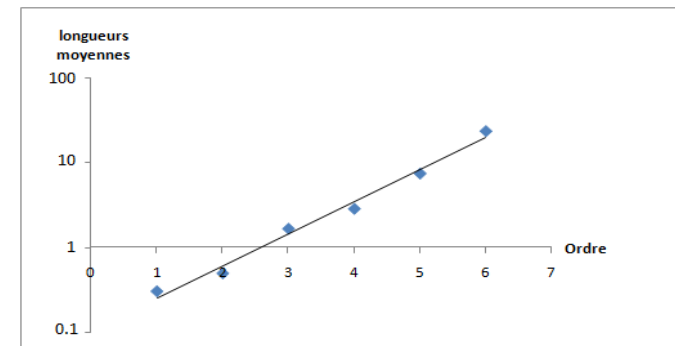


Fig.15 : Rapport des longueurs

Graphiquement, nous obtenons une valeur moyenne de $R_L = 1.38$

La longueur moyenne de thalwegs d'ordres successifs croissants forme une série géométrique directe.

II.3.5.4- Coefficient de torrentialité

C'est un coefficient qui tient compte à la fois de la densité des thalwegs élémentaires par la densité de drainage :

$$CT = D_d \cdot F_i$$

Avec :

D_d : densité de drainage

F_i : fréquence des thalwegs élémentaires $F_i = N_i / S$

N_i : nombre de cours d'eau d'ordre i

$$CT = 17.52$$

II.3.5.5- Temps de concentration des eaux

C'est le temps que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée pour parvenir à l'exutoire, pour son calcul, nous faisons appel à la formule de Giandotti

$$T_c = \frac{4 \sqrt{S + 1.5 L}}{0.8 \sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

Où,

T_c : temps de concentration (heure)

A : superficie du bassin (km²)

L : longueur du thalweg principal (km)

H_{moy} : altitude moyenne (m)

H_{min} : altitude minimale (m)

$$T_c = 06 \text{ H } 30 \text{ mn}$$

II.3.6- Profil en long de l'oued Khemis

Le profil en long du cours d'eau principal permet de déterminer les pentes des thalwegs et leur influence sur le régime d'écoulement (figure 16) d'une longueur de 31km, le cours d'eau principal de l'oued Khemis présente des variations de pente importantes depuis oued Tadert jusqu'à Beni-Bahdel.

Pour le premier tronçon entre oued Tadert et oued Boulefane existe une pente forte de 4.29%, elle diminue pour atteindre 3% entre oued Boulefane et Si Larbi.

La pente s'atténue encore entre Si Larbi et Khemis où, une rupture de pente de 2.31% est observée et elle passe à 2.14% à Khemis,

Pour le dernier tronçon la pente est faible et atteint une valeur de 1.67% à Beni-Bahdel.

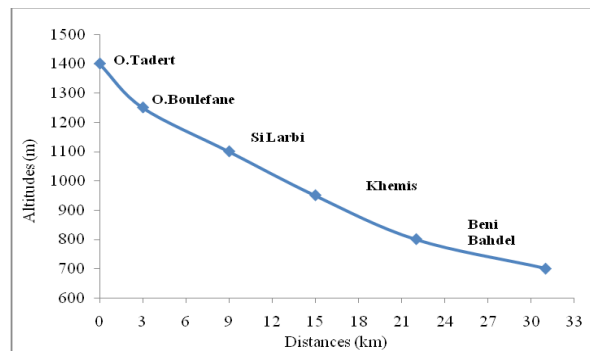


Fig.16 : Profil en long de l'Oued Khemis.

II.6- Conclusion

Nous représentons sur le tableau 7 un récapitulatif des différentes valeurs des caractères physiques du bassin, qui met en évidence le caractère allongé du bassin et un relief généralement fort.

Tableau 7: Caractéristiques physiques du bassin versant de l'oued khemis

Caractéristique physiographiques	Valeurs
Altitude maximale (m)	1700
Altitude minimale (m)	650
Altitude la plus fréquente (m)	1250 - 1400
Altitude fréquence ½ (m)	1400
Surface (km ²)	350
Périmètre (km)	93
Longueur (km)	36,96
Largeur (km)	9,47
Indice de Gravelius	1.39
Pente moyenne Ig	0.019

CHAPITRE III

ETUDE GEOLOGIQUE

III- Cadre géologique

La structure actuelle de l'Algérie septentrionale est liée aux mouvements hercyniens et alpins.

La région d'étude constitue une zone de passage entre le Tell au Nord et les hautes plaines au Sud (fig.17).

- Elle se trouve dans un massif montagneux qui forme la terminaison occidentale des monts de Tlemcen et qui s'élève graduellement du Nord vers le Sud, ce sont les monts de Rhar-Roubane (L. Mekahli, 1988).

Les monts de Rhar-Roubane sont bordés par la plaine de Maghnia au Nord, la plaine des Angad d'Oujda et le plateau de Djorf-Ouazazen à l'Ouest, la plaine de Magoura au Sud et en fin la partie occidentale des monts de Tlemcen à l'Est (L.Mekahli, 1988).

- Lucas, 1942 divise les monts de Rhar-Roubane du Nord vers le Sud en 4 unités géographiques (fig.18)
 - Les monts du Kef.
 - La région de Ras Asfour qui comprend du Nord vers le Sud, le talus des Beni Bousaid, la barrière et le plateau de Ras-Asfour.
 - La chaîne du Ténouchefi.
 - Le massif de Raourai.
 - Nous nous sommes basés sur les travaux réalisés par: Lucas 1952, Benest 1985 et Mekahli, 1988.

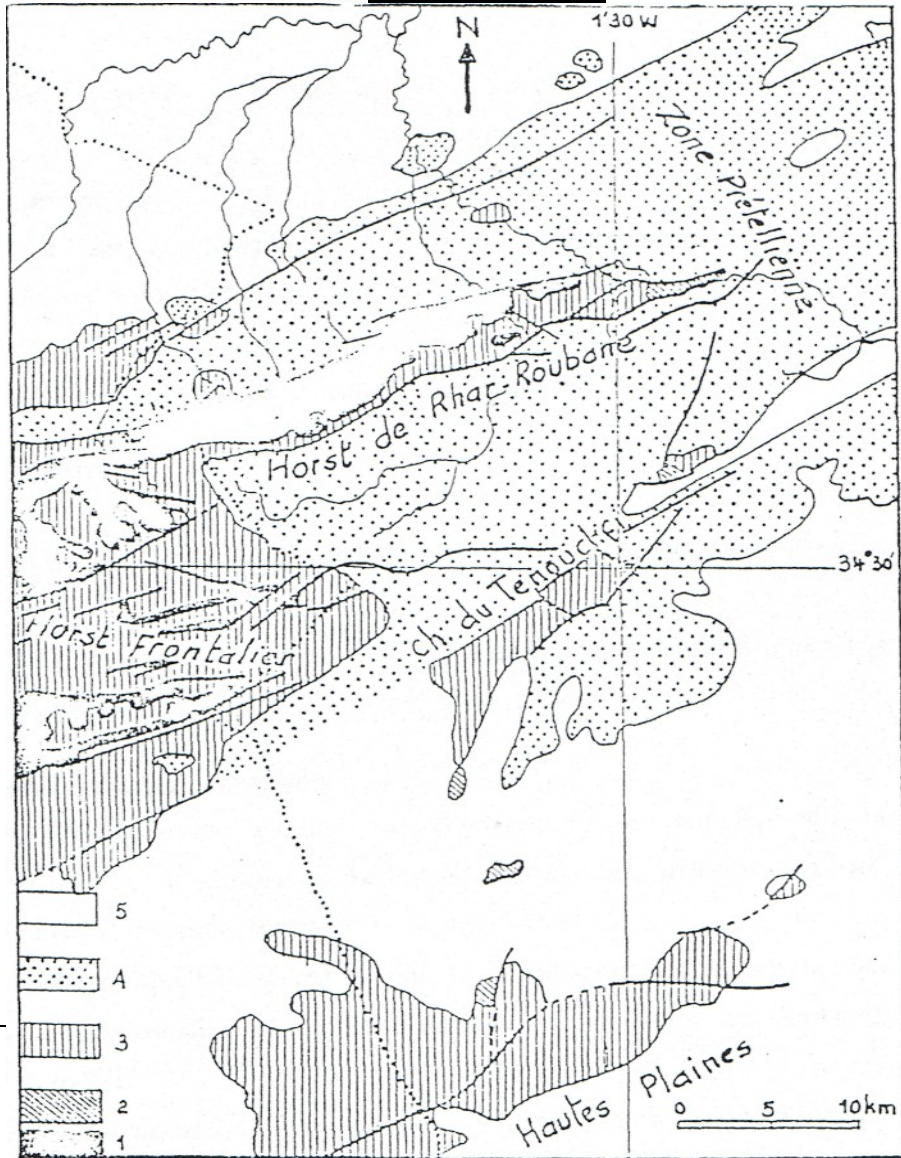


Fig.18 : Situation des principales zones de la région de Rhar-Roubane (G.Lucas, 1952)

1: Primaire 2:Trias gypseux 3:Jurassique inférieur à Séquanien 4: Kimméridgien et Portlandien 5:Tertiaire et Quaternaire.

III.2. Série lithostratigraphique (fig.19)

La série stratigraphique des monts de Rhar-Roubane est constituée essentiellement de terrains secondaires qui reposent sur les terrains primaires, nous avons une série épaisse du Jurassique qui va du Lias au Kimméridgien

- Le Tertiaire et le Quaternaire existent en terrains réduits.

III.2.1. Le Primaire

Représenté par des formations schisto-quartziques d'âge silurien et dévonien qui forment les noyaux des plissements.

III.2.1.1. Silurien

C'est une formation schisteuse reconnue à Djorf-fermane et Djorf- Ouazzen.

III.2.1.2. Dévonien

Il s'agit de formation schisteuse puissante avec des intercalations calcaires et gréseuses.

III.2.1.3. La phase éruptive

Il s'agit de la phase qui donne naissance au granite des Beni-Snous (microgranite de Rhar-Roubane), suit les mouvements hercyniens, les roches sont profondément érodées, il se forme de belles plate-formes connues sous le nom de pénélaines post-hercyniennes sur lesquelles vient se déposer le Trias et le Jurassique. (Gadiri.F, 1995)

III.2.2. Le Secondaire

III.2.2.1. Trias

Il est localisé essentiellement au Nord de la zone d'étude dans la région de Beni-Bahdel.

Constitué par des argiles plus ou moins dolomitiques s'accompagnant parfois d'un léger métamorphisme.

III.2.2.2. Jurassique inférieur et moyen

- Les assises du Jurassique inférieur sont discontinues ou lacunaires et n'importe quel niveau peut reposer sur le Primaire. Les premiers niveaux continus appartiennent au Bathonien dans le Horst de Rhar-Roubane (Mekahli, 1988)
- La série du Jurassique débute par le Lias, le Domérien inférieur affleure la partie médiane de Rhar-Roubane au Djorf Tissedoura, il s'agit de formation calcaire (R.Ciszak, 1993).
- Au niveau de la frontière algéro-marocaine, les premiers dépôts liasiques (Carixien-Domérien) indiquent une sédimentation détritique. Ces dépôts sont surmontés par des marno-calcaires et des calcaires à Brachiopodes et spicules, de Spongiaires indiquant l'ouverture de la région vers la mer franche au cours du Toarcien (Mekahli, 1988).

- Dans la zone de Tenouchfi, le Dogger est très épais, le Toarcien et le Jurassique moyen présentent des faciès de vasière relativement profonde (domaine «prétellien» Lucas, 1952), le Toarcien est représenté par des couches rouges ou violacées.
- Pendant l'Aalénien et Bajocien se sont déposées des dolomies dans le secteur occidental : Deglène.
- Le Bathonien correspond à des calcaires gris parfois dolomités après une lacune du Bathonien supérieur, l'enfoncement du milieu se poursuit au début du Callovien avec des argiles gréseuses.

III.2.2.3. Jurassique supérieur (fig.20)

a. Argiles de Saida

Elles correspondent à des dépôts argileux et marneux avec des niveaux gréseux à la base, la formation est attribuée au Callovo oxfordien.

b. Grès de Boumediène

Sont constituées essentiellement de grès, avec des passées argileuses pouvant atteindre 500m, on les trouve dans le secteur de Khemis.

c. Calcaires de Zarifet

Surmontant les grès de Boumediène dans la région de Khemis. Il s'agit d'une alternance de minces lits marneux à rares passées gréseuses légèrement micacées et de calcaires argileuses sombres.

d- Dolomies de Tlemcen

Il s'agit de dolomies cristallines grises, cette série est bien exposée sur le versant occidental du djebel Kossilet, grâce à l'entaille réalisée par l'oued Khemis, on peut admettre qu'elle débute à environ 100 m au-dessus du substratum des calcaires de Zarifet (M.Benest 1985).

e- Calcaires de stah

Epais de 29 m, cette unité dans laquelle s'intercalent des niveaux marno-calcaires peu compacts, débute par des calcaires et s'achève par des dolomies.

f- Marno-calcaires de Raourai

Du Kimméridgien moyen Tithonique. Il s'agit de marnes grises, blanchâtres en surface intercalées de nombreux lits et bancs de calcaires marneux durs. Cette formation est limitée au sommet par les calcaires de Lato et dolomies de Terni.

g- Calcaires de Lato et dolomies de Terni

Ils sont du Kimméridgien supérieur (Portlandien). La grande falaise sommitale qui surplombe les gorges de l'oued Khemis en amont du village du même nom, correspond à la deuxième masse dolomitique (Lucas, 1952), c'est-à-dire à l'ensemble formé par les calcaires de Lato et les dolomies de Terni (Benest, 1985).

h- Marno-calcaire de Hariga

Il s'agit d'une alternance de marnes et de marno-calcaires, où ils forment les 30 premiers mètres, visibles jusqu'au sommet de Djbel Kossilet (Benest, 1985).

III.2.3 Le Plio-Quaternaire

Représenté par des sédiments continentaux d'âges comparables bien que de natures variables. Il s'agit d'une série complexe de dépôts discontinus formés d'éléments hétérométriques et hétérogènes, on y rencontre les faciès suivants :

- Les travertins : De puissants dépôts de sources disposés en masses et s'avancant en hautes falaises, ils sont jaunes, friables riches en débris végétaux.
- Le complexe de sédiments plio-villafranchiens : la bordure des massifs secondaire est soulignée par des éboulis de piémont plus au moins encroutés et remaniés d'épaisseurs très variables mais toujours assez faible.
- Des marnes rouges avec peu ou pas de galets, plus ou moins tufeuses.
- Des anciennes alluvions allant des marnes alluvionnaires verdâtres aux galets en passant par les limons et les graviers. Nous ne trouvons que de petites terrasses sur les côtés de l'oued Khemis ou les paysans cultivent.
- Les limons, sables et graviers récents : les limons sont jaunes en général avec des couches rougeâtres, les galets se trouvent surtout en lits à la base des limons.

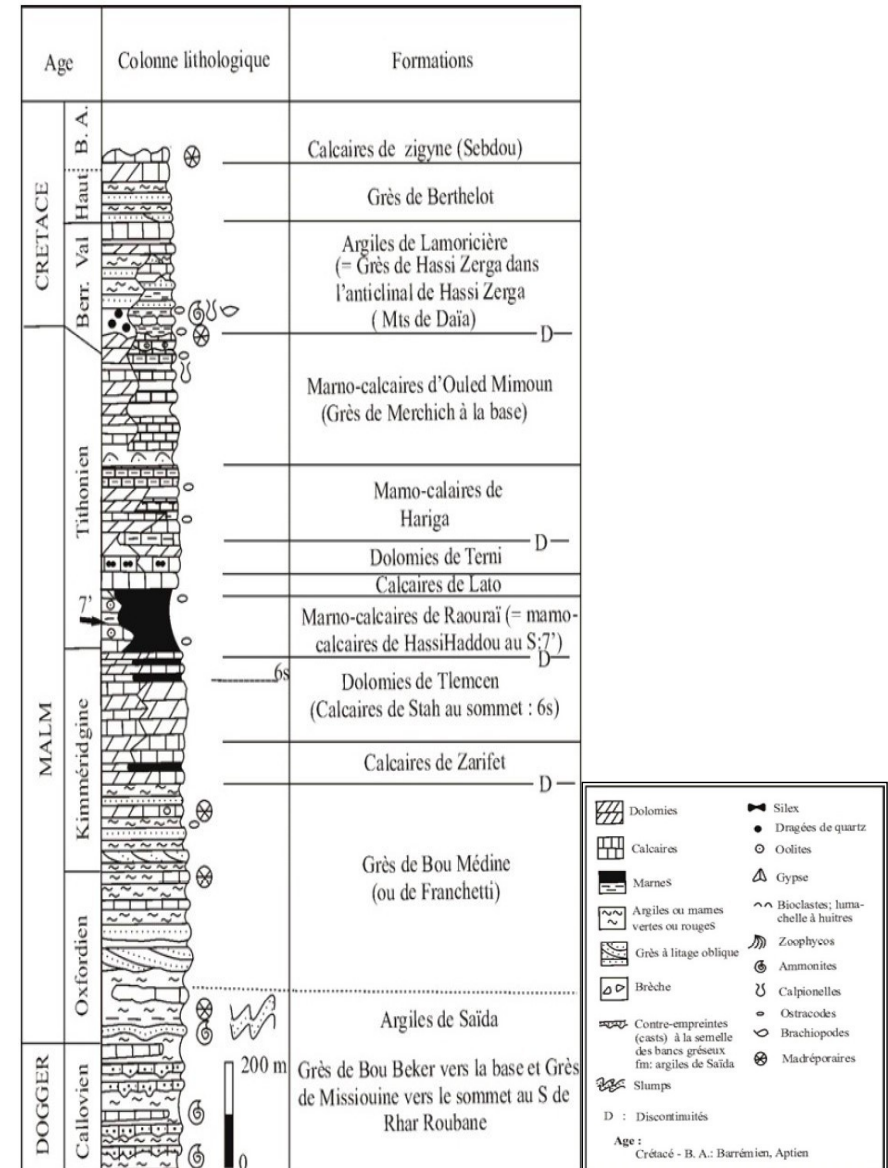


Fig. 19 : Colonne stratigraphique des monts de Tlemcen jusqu'aux hautes plaines (Benest & Bensalah, 1999)

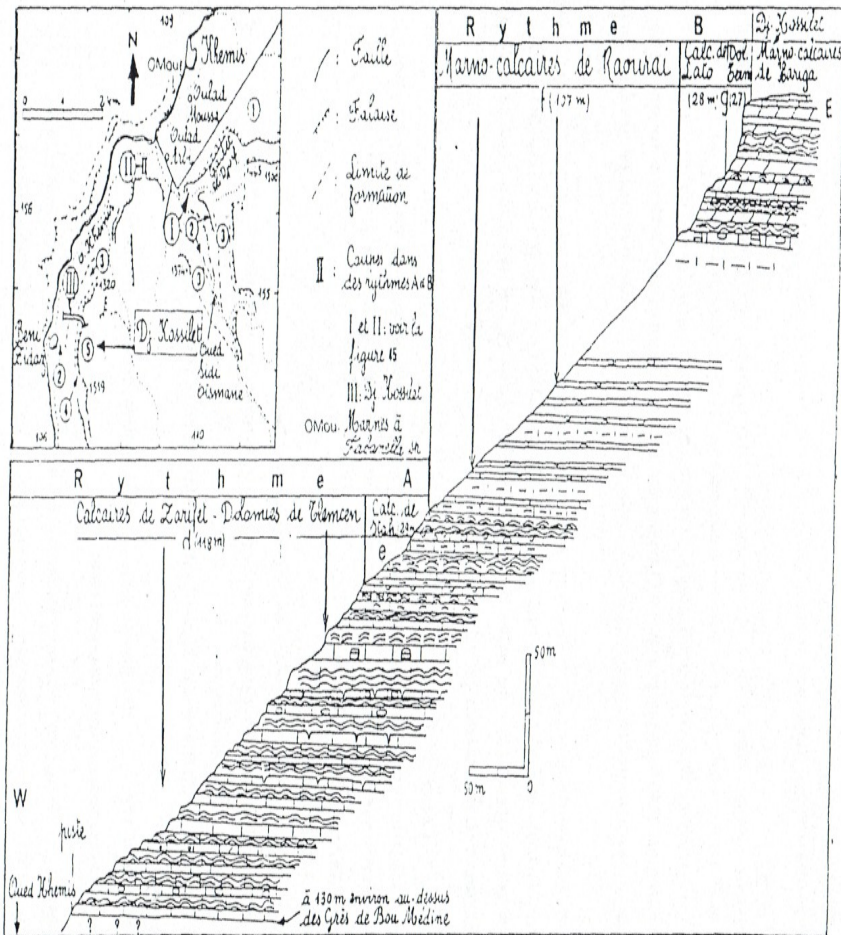


Fig.20 : Rythmes A et B au djebel Koussilet dans le secteur de Khemis (Benest, 1985).

III.3- Analyse structurale (fig.21)

Les môles primaires résistants de Rhar-Roubane ont largement influencé l'évolution structurale de la région, la direction générale des grandes fractures est WSW-ENE.

III.3.1- Principales phases tectoniques

Une étude réalisée pas (Elmi, 1973), explique les mouvements tectoniques dans la région de Rhar –Roubane .

- Les découpages de la région en grands panneaux allongés WSW-ENE pas des failles liées aux structures hercyniennes.
- Une phase de serrage donne des plis à grand rayon de courbure.
- La compression provoque deux décrochements :
 - Accident NNE : senestre
 - Accident NW-ESE : dextre
- Une nouvelle phase de serrage intervient sur un pays modelé par l'érosion.
 - Dans les monts de Rhar-Roubane, elle accuse des différences entre zones stables et secteurs plissés

III.3.2- Unités structurales

Les monts de Rhar –Roubane et leur prolongement vers L'Est forment un ensemble de relief grossièrement orienté SW-NE c'est le haut pays oranais (G .B .M. Flamand, 1911) le plus souvent, nous avons des alignements N 70 déviés par des accidents transversaux N 110-140 et N 20. Ils représentent la continuité occidentale des monts de Tlemcen, où la limite semble être masquée par la transversale de la Tafna (Elmi, 1970., 1983) qui correspond au pli croiseur de Tenouchfi (Lucas, 1952) et qui joue essentiellement en décrochement senestre, le panneau occidental est caractérisé par l'existence du Horst de Rhar-Roubane orienté N 70, qui vient se noyer à proximité du barrage de Beni-Bahdel (Mekahli, 1988).

On distingue comme grandes unités structurales orientées WSW-ENE :

- L'Anticlinal du Djebel Hamra-Bouhlou.
- Le Synclinal de Azaira.
- La zone Anticlinale du Djebel Tmalouft.
- Le Synclinal du Djebel Ouinane.
- Le Horst de Rhar-Roubane (direction WSW-ENE essentiellement formé de terrains primaires).
- Un Vaste plateau du Ras- Asfour affecté de failles dans sa partie méridionale.
- La Zone haute de Tenouchfi.

III.3.2.1- Accidents décrochants

a. Décrochement sénestres Nord 10-Nord 30

- Accident du Djebel Tmalouft - Ayech.
- Accident du Ras-Asfour, sur le plateau à l'Ouest de Deglène.
- Accident du Djebel Maroui - Fernane –Tazemmouret.
- Accident de Menchar limitant à l'Est l'extension actuelle du horst de Rhar-Roubane.

b. Décrochement dextres Nord 110-Nord 145

- Accident du Djorf Ouazen et Djorf Dourdaz.
- Accident Zouziz – Sidi Djillali.
- Accident Tisse Fsafine – Tazemmouret.

				Dolomies vacuolaires à patine rousse avec des	Très Karstifiées et donnent naissance à d'
Marno calcaires Raourai				Alternance de marnes grises verdâtres et de	Très faible perméabilité ou nulle dans
Calcaire de Stah, Dolomie de Tlemcen, Calcaire de				Dolomies Cristallines à patine rousse surmontées par des calcaires	Très Karstifiées, forment avec les calcaires de Zarifet des réserves
Grès de Boumediène				Grès bruns en gros bancs séparés par les interlits argileux	Perméabilité très médiocre forme la base de l'aquifère des dolomies de Tlemcen

CHAPITRE IV ETUDE HYDRO-CLIMATIQUE

IV-ETUDE CLIMATIQUE

IV.1- Introduction

Le climat, par définition est l'ensemble des phénomènes météorologiques (précipitations, Températures, vents) qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère et son évolution.

Il est déterminé par la situation géographique du lieu (latitude, altitude, éloignement de la mer) et par la circulation atmosphérique.

Les conditions climatiques jouent un rôle important dans les comportements hydrologiques des cours d'eau. Ces paramètres climatiques (surtout la température et l'évapotranspiration) sont en relation avec les précipitations.

L'étude hydroclimatique a pour but de :

- ❖ Déterminer le type de climat de la région étudiée.
- ❖ Analyser les paramètres climatiques (température et précipitations) de cette région.

IV.2- Etude des paramètres climatiques

IV.2.1- Présentation de la station

Dans notre étude, nous utiliserons la station de Khemis située à l'intérieur de notre bassin versant à une altitude de 843m.

Tableau 9: Caractéristiques de la station pluviométrique (ANRH d'Oran)

Station	Coordonnées		Altitude (m)	Période d'observation	Précipitations moyennes annuelles (mm)
	Longitude	Latitude			
Khemis	1°34'	34°39'	843	1980/1981-2010/2011	395,3

IV.2.1.1- Etude des précipitations annuelles

Pour cette étude, nous avons pris une série de 31 ans des valeurs des précipitations sur la période (1980/1981-2010/2011) à la station de Khemis.

Tableau 10 : Précipitations moyennes annuelles (mm) à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011) (ANRH d'Oran)

Années	P (mm)	Années	P (mm)	Années	P (mm)	Années	P (mm)
1980/1981	515,1	1988/1989	227,5	1996/1997	315,5	2004/2005	259,2
1981/1982	227,5	1989/1990	304,5	1997.1998	327,4	2005/2006	442,0
1982/1983	221,5	1990/1991	460,3	1998/1999	114,4	2006/2007	422,2
1983/1984	295,7	1991/1992	649,1	1999/2000	130,0	2007/2008	225,1
1984/1985	269,8	1992/1993	353,6	2000/2001	476,3	2008/2009	919,9
1985/1986	433,8	1993/1994	381,4	2001/2002	451,3	2009/2010	535,0
1986/1987	488,0	1994/1995	488,9	2002/2003	454,3	2010/2011	393,3
1987/1988	234,3	1995/1996	713,1	2003/2004	524,6	Moy (mm)	395,3

Nous désignons selon le tableau 10 et la figure 22 :

La variation annuelle des précipitations nous montre une irrégularité assez prononcée, allant du simple au double d'une année à l'autre.

- 15 années sur 31 ont enregistré des hauteurs de pluie supérieure à la moyenne.
- Le maximum est enregistré en 2008-2009 avec 919.9 mm
- et le minimum est enregistré en 1998-1999 avec 114,4mm

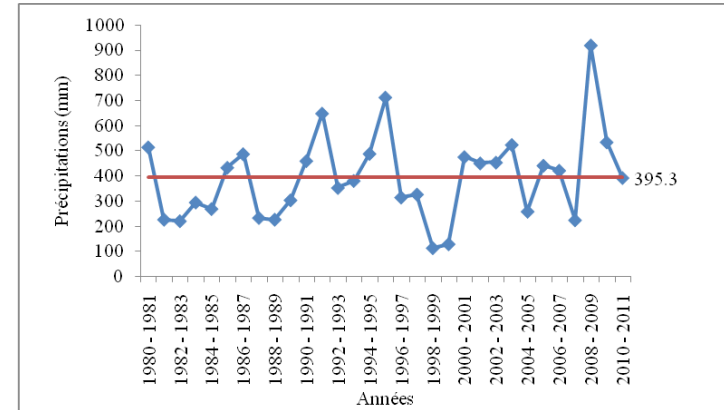


Fig.22 : Variation des précipitations annuelles à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011)

$$\frac{P_M}{P_m} = \frac{919,9}{114,4}$$

Le coefficient d'irrégularité est : $\frac{P_M}{P_m} = 8,04$, c'est donc une zone où les précipitations sont distribuées irrégulièrement d'une année à une autre.

IV.2.1.2- Précipitations mensuelles

La répartition mensuelle des précipitations dans l'année et ses variations conditionnent en relation avec les facteurs thermiques, l'écoulement saisonnier et par là même le régime des cours d'eau ainsi que celui des nappes aquifères. Sa connaissance est donc forte utile dans l'optique de notre étude.

Tableau 11 : Précipitations moyennes mensuelles à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011) (ANRH d'Oran)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Moy
P(mm)	20,1	29,9	41,0	49,7	57,3	49,9	54,7	43,2	32,1	9,7	3,3	4,4	395,3

D'après l'histogramme des précipitations mensuelles à la station des Khemis (fig.23) nous remarquons que le mois le plus pluvieux est celui de Janvier avec 57,3mmn tandis que le mois de Juillet est le plus sec avec 3.3mm.

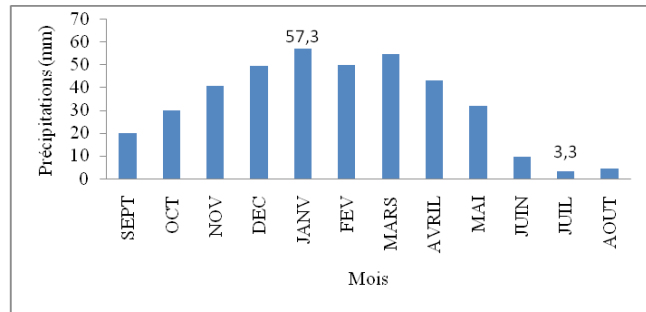


Fig.23 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011)

IV.2.1.3- Précipitations saisonnières

Les 4 saisons de l'année correspondent à :

- ❖ Hiver : (Décembre, Janvier, Février)
- ❖ Printemps : (Mars, Avril, Mai)
- ❖ Été : (Juin, Juillet, Août)
- ❖ Automne : (Septembre, Octobre, Novembre)

Tableau 12 : Précipitations saisonnières moyennes à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011)

Saisons	Automne	Hiver	Printemps	Été
P (mm)	91	156,9	130	17,4

La distribution des précipitations saisonnières (fig.24), montre que l'Hiver est la saison la plus humide suivie du Printemps. L'Été est la saison la plus sèche.

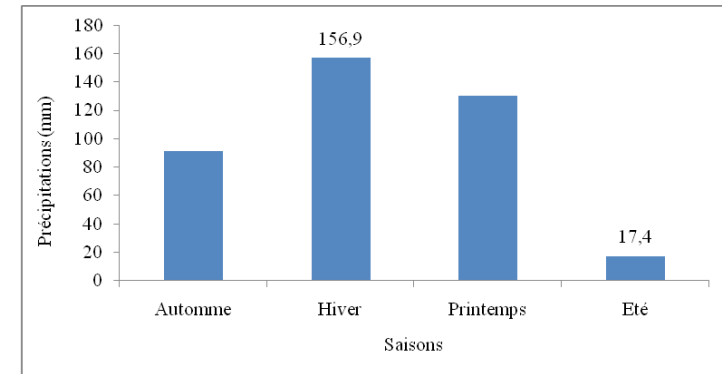


Fig.24 : Histogramme des précipitations saisonnières de la station de Khemis (1980/1981-2010/2011)

IV.2.2- Etude des températures

La température est un facteur important qui détermine le climat en interaction avec les autres facteurs météorologiques. Elle permet avec les précipitations le calcul du déficit d'écoulement et des indices climatiques.

Faute de données à la station de Khemis, nous avons utilisé les températures annuelles et mensuelles de la station de Beni Bahdel sur la période (1986/1987-2005/2006).

IV.2.2.1- Températures annuelles

Tableau 13 : Températures moyennes annuelles à la station de Beni Bahdel (1986/1987-2005/2006). (ANRH d'Oran)

Année	T °(C)	Année	T °(C)	Année	T °(C)	Année	T °(C)
1986-1987	17,5	1991-1992	16,9	1996-1997	17,2	2001-2002	18,7
1987-1988	17,9	1992-1993	16,3	1997-1998	17,7	2002-2003	18,1
1988-1989	17,4	1993-1994	16,2	1998-1999	17,5	2003-2004	18,4
1989-1990	18,7	1994-1995	17,4	1999-2000	18,1	2004-2005	18
1990-1991	17,7	1995-1996	17,5	2000-2001	18,2	2005-2006	17,6
Moy	17,6						

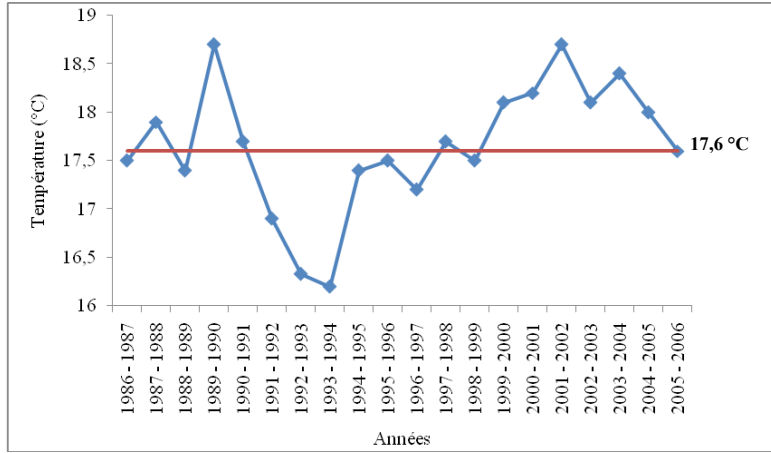


Fig.25 : Variation des températures annuelles à la station de Beni Bahdel (1986/1987-2005/2006).

La moyenne interannuelle des températures est de 17,6 °C, il existe une faible variation de la température durant la période (1986/1987-2005/2006).

IV.2.2.2- Températures moyennes mensuelles

Tableau 14 : Températures moyennes mensuelles, maximales et minimales à la station de Beni Bahdel (1986/1987-2005/2006). (ANRH d’Oran)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A	Année
T (°C)	23,3	18,8	13,3	10,6	9,3	10,4	13,1	15,1	18,7	23,8	27,4	27,8	17,6
T max (°C)	35,4	29,7	23,7	19,3	17,4	19	23,7	26,5	31,3	36,4	40,6	41,2	29,45
T min (°C)	11,2	7,9	2,9	1,9	1,2	1,8	2,5	3,7	6,2	11,3	14,2	14,5	5,83

La figure 26 Montre que les mois d’Août et de Juillet sont les plus chauds avec en moyenne 27.5°C et le mois de Janvier par contre est le plus froid (9.3°C).

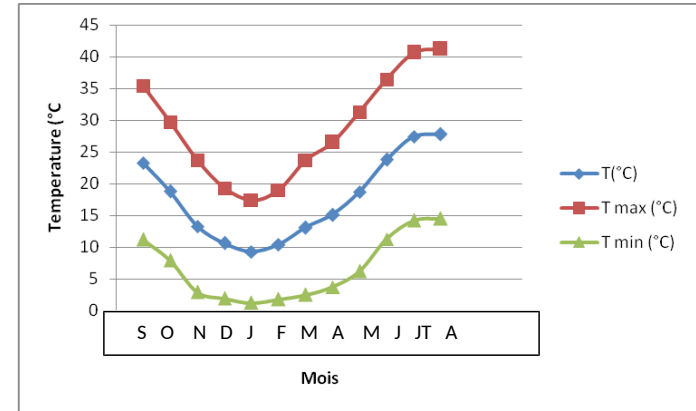


Fig.26 : Variation des températures moyennes mensuelles à la station de Beni Bahdel (1986/1987-2005/2006).

IV.2.3- Evapotranspiration potentielle

C’est la quantité d’eau susceptible d’être évaporée par une surface d’eau libre ou par un couvert végétal dont l’alimentation en eau n’est pas le facteur limitant. La valeur de l’évapotranspiration potentielle est fonction de l’énergie disponible. (Margat, 1997)

Elle est estimée par une mesure par un évaporomètre ou déduite par des formules empiriques telles que celles de Penman, 1968, Morton, 1983.

IV.2.3.1- Estimation de l’évapotranspiration

Plusieurs formules permettent d’évaluer l’ETP à partir de différentes mesures climatologiques. Dans notre cas, nous avons utilisé les formules de Turc et Thornthwaite.

➤ Formule de Turc

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

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

avec:

- Etp : Evapotranspiration potentielle mensuelle (mm d’eau),
- T : Température moyenne mensuelle de l’air (°C),
- Ig : Radiation globale moyenne mensuelle reçue au sol (calorie/cm²/jour),

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

$$\text{Si non } K = 1 + \frac{50 - h_r}{70}$$

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

$$I_g = I_g A (0,18 + 0,62 \frac{h}{H})$$

Avec:

IgA : Radiation globale théorique (calorie/cm² /jour);

H : Durée théorique des jours du mois.

Pour le calcul de l'ETP par la méthode de Turc on a utilisé le programme élaboré par (L Benadda, 2000).

Tableau 15 : Valeur l'ETP par la méthode de Turc à la Beni Bahdel (1986/1987-2005/2006). (ANRH d'Oran)

Année	ETP(mm)	Année	ETP(mm)	Année	ETP(mm)	Année	ETP(mm)	
1986-1987	973,26	1991-1992	952,87	1996-1997	966,65	2001-2002	1002,58	
1987-1988	983,45	1992-1993	940,72	1997-1998	979,94	2002-2003	990,73	
1988-1989	970,32	1993-1994	939,00	1998-1999	971,74	2003-2004	994,88	
1989-1990	1001,30	1994-1995	967,07	1999-2000	985,93	2004-2005	982,10	
1990-1991	975,41	1995-1996	973,07	2000-2001	990,67	2005-2006	972,49	
							Moy (mm)	975,71

➤ **Formule de Thornthwaite**

Thornthwaite, en 1948 est le premier à introduire le concept d'évapotranspiration potentielle, il a proposé également une formule basée essentiellement sur les températures de l'air :

$$ETP = 1,6 \left(\frac{10T}{i} \right)^a \times k \text{ et } I = \sum_{i=1}^{12} i \text{ avec } i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514}$$

$$a = \frac{1,61}{100} - 0,5$$

avec :

T : Température moyenne mensuelle du mois considéré (°C),

ETP : Evapotranspiration potentielle du mois considéré (mm),

K : Coefficient d'ajustement mensuel en fonction de la latitude et de la durée du jour.

Tableau 16 : Valeur l'ETP par la méthode de Thornthwaite à la station de Beni Bahdel (1986/1987-2005/2006). (ANRH d'Oran)

Année	ETP(mm)	Année	ETP(mm)	Année	ETP(mm)	Année	ETP(mm)	
1986-1987	906,32	1991-1992	904,38	1996-1997	868,76	2001-2002	956,75	
1987-1988	919,3	1992-1993	850,26	1997-1998	879,04	2002-2003	909,27	
1988-1989	893,15	1993-1994	853,28	1998-1999	903,41	2003-2004	965,76	
1989-1990	954,25	1994-1995	923,6	1999-2000	942,96	2004-2005	929,8	
1990-1991	912,03	1995-1996	887,49	2000-2001	936,84	2005-2006	940,76	
							Moy	911,87

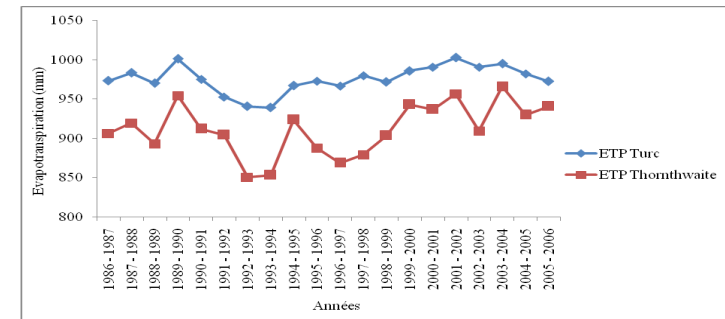


Fig. 27 : Variation de l'ETP Turc et l'ETP Thornthwaite pour la station de Beni Bahdel (1986/1987-2005/2006).

Les courbes de la figure 27, montrent que les valeurs annuelles de l'ETP de Turc sont supérieures à celles de l'ETP de Thornthwaite.

IV.2.4- Etude du climat

Pour l'étude du climat, nous disposons de différentes méthodes :

- les premières, nous permettent de visualiser l'étendue des périodes sèches et humides.
- Les secondes sont basées sur le calcul d'indices permettant à partir des précipitations et températures de caractériser le climat dominant la région.

A- Les méthodes graphiques : (courbe pluvio-thermique de Bagnouls et Gaussen)

Pour Bagnouls et Gaussen, un mois sec est celui où, le total moyen des précipitations exprimées en mm est inférieur ou égal au double de la température moyenne exprimée en degrés Celsius ($P < 2T$)

Cette relation permet d'établir des diagrammes pluviothermiques sur lesquels les températures sont portées à une échelle double de celle des précipitations.

- La courbe des températures passe au dessus de celles des précipitations pendant les mois secs alors que pour les mois humides, la courbe des précipitations passe au dessus de la courbe des températures.

Les valeurs des précipitations et températures mensuelles sont reportées sur le tableau 17,

Tableau 17 : Valeurs des précipitations et températures moyennes mensuelles à la station de Khemis (1986/1987-2005/2006).(ANRH d’Oran)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Année
P(mm)	16,9	28,9	40,3	37,6	59	50,2	58,3	43,6	33,7	11	4,9	5,5	389,8
T (°C)	23,3	18,8	13,3	10,6	9,3	10,4	13,1	15,1	18,7	23,8	27,4	27,8	17,6

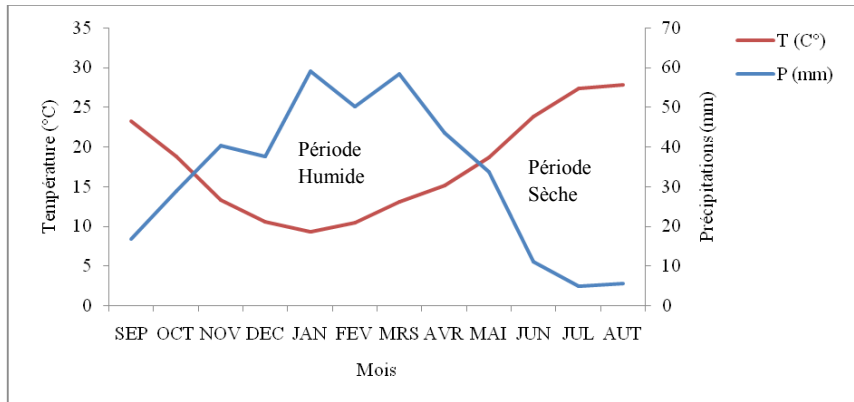


Fig. 28 : Diagramme pluviothermique à la station de Khemis

- Une période humide entre le mois de Novembre et mois de Mai.
- Une période sèche occupant les autres mois de l’année.

B- Indices climatiques

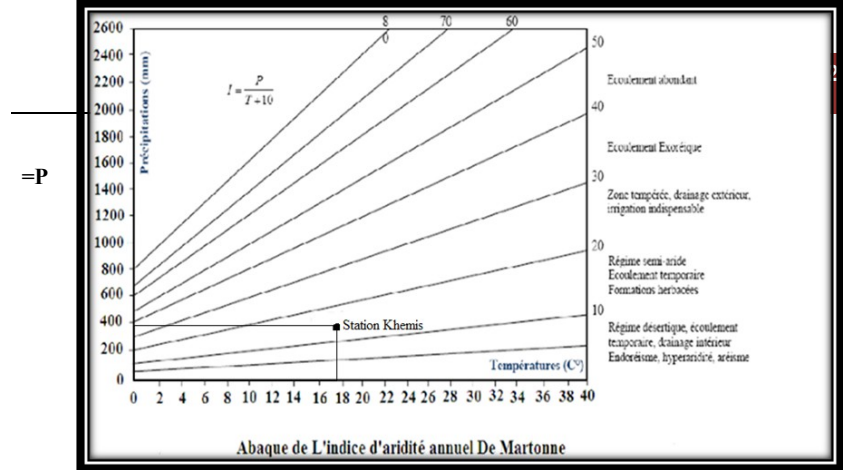
L’utilisation des indices climatique définis par les différents auteurs est très intéressante, car elle permet de mieux visualiser le type de climat d’une région.

B.1- Indice d’Aridité de De Martonne

De Martonne a établi en 1923 un indice d’aridité dont les variations correspondaient aux changements des conditions d’écoulement de l’eau.

➤ **Indice d’aridité annuel**

En 1923, De Martonne a défini l’indice d’Aridité comme ceci :



(T+10)

P : Précipitations moyennes annuelles (mm)

T : Températures moyennes annuelles (°C)

Tableau 18 : Indice d’aridité annuel de De Martonne à la station de Khemis

De Martonne propose la classification suivante :

- $20 < I$: Climat humide
- $10 < I < 20$: Climat semi aride
- $5 < I < 10$: Climat désertique
- $I < 5$: Climat hyper aride

Fig. 29 : Abaque de De Martonne.

Le calcul donne une valeur comprise entre 10 et 20 et le report sur l’abaque (fig.29) caractérise cette région par un climat semi-aride avec des écoulements temporaires.

➤ **Indice d’aridité mensuel**

Utilisé par les élèves de De Martonne dans le but de préciser les conditions de la semi-aridité. Cet indice est donné par la relation suivante :

$$I = 12p / (T + 10)$$

P : Précipitations moyennes mensuelles (mm)

T : Température moyenne mensuelle (°C)

Les résultats sont représentés dans le tableau 19,

Tableau 19 : valeurs des indices d'aridité mensuels de De Martonne à la station de Khemis.

MOIS	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
P(mm)	16,9	28,9	40,3	37,6	59	50,2	58,3	43,6	33,7	11	4,9	5,5
T (°C)	23,3	18,8	13,3	10,6	9,3	10,4	13,1	15,1	18,7	23,8	27,4	27,8
I	6.09	12.04	20.75	21.9	36.68	29.53	30.28	20.84	14.09	3.9	1.57	1.75

On peut alors définir :

- les mois de Novembre, Décembre, Janvier, Février, Mars et avril comme étant des mois humides.
- Les mois de Mai, et Octobre comme semi-aride.
- Celui de Septembre comme désertique.
- Et enfin les mois de Juin, Juillet et Août comme hyperaride.

B.2- Indice de Moral (1964)

L'Indice pluviométrique annuel est donné par :

$$I = \frac{P}{T^2 - 10T + 200}$$

avec

P : Précipitations moyennes annuelles (mm)

T : Température moyenne annuelles (°C)

Tableau 20 : Indice de moral à la station de Khemis

P (mm)	389.8
T (°C)	17.6
I _a	1.17

Moral a proposé un indice mensuel donné par la formule suivante :

$$I_m = \frac{P}{0.1t^2 - t + 20}$$

P : Précipitations moyennes mensuelles (mm)

T : Température moyenne mensuelle (°C)

Tableau 21 : Valeurs des indices mensuels de Moral à la station de Khemis

MOIS	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
P(mm)	16,9	28,9	40,3	37,6	59	50,2	58,3	43,6	33,7	11	4,9	5,5
T (°C)	23,3	18,8	13,3	10,6	9,3	10,4	13,1	15,1	18,7	23,8	27,4	27,8
I _m	0,33	0,79	1,65	1,82	3,05	2,46	2,42	1,57	0,93	0,21	0,07	0,09

Les quatre types de mois de l'indice de Moral :

- mois pluvieux : $p > 0,1T^2 - T + 30$
- mois humide : $0,1T^2 - T + 30 > p > 0,1T^2 - T + 20$
- mois sec : $0,1T^2 - T + 20 > p > 0,05T^2 - T + 10$
- mois aride : $p < 0,05T^2 - T + 10$

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
$0.1t_m^2 + t_m + 30$	60,98	46,5	34,4	30,6	29,3	30,4	34,1	37,7	46,3	62,8	77,7	79,5
$0.1t_m^2 + t_m + 20$	50,98	36,5	24,4	20,6	19,3	20,4	24,1	27,7	36,3	52,8	67,7	69,5
$0.05t_m^2 - t_m + 10$	13,8	8,9	5,5	5,01	5,02	5,01	5,5	6,3	8,8	14,5	20,1	20,8
Type	S	S	P	P	P	P	P	P	S	A	A	A

Tableau 22 : Type de climat selon Moral

S : Sec, P : Pluvieux, A : Aride

Nous pouvons remarquer que selon l'indice de Moral, la station de Khemis est caractérisée par 6 mois pluvieux, 3 mois secs et 3 mois arides.

B.3- Climagramme d'Emberger

La méthode basée sur les limites des aires occupées par les différentes associations végétales, consiste à reporter sur un climagramme établie par L Emberger, en ordonnée la valeur de Q_2 et en abscisse la moyenne des minima du mois le plus froid en °C.

Avec :

$$Q_2 = \frac{P}{\frac{M+m}{2}(M-m)} \times 1000 \quad \text{Où,} \quad Q_2 = \frac{2000P}{M^2 - m^2}$$

P : Précipitations moyennes annuelles (mm)

M : moyenne des maxima de la température en (°K) du mois le plus chaud,

m : moyenne des minima de la température en (°K) du mois le plus froid,

Q_2 : quotient pluviométrique d'Emberger.

$M = 41.2 + 273 = 314.2^\circ\text{K}$

$m = 1.2 + 273 = 274.2^\circ\text{K}$

Tableau 23 : Indice d'Emberger de la station de Khemis

P (mm)	389.8
M (°K)	314.2
m (°K)	274.2
Q_2	33.12

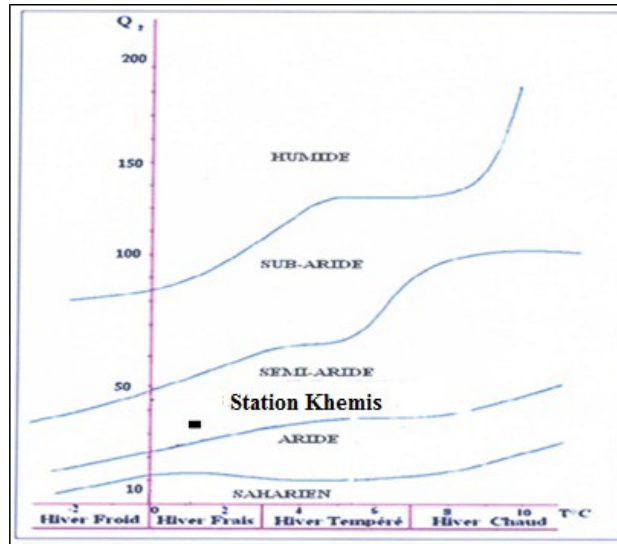


Fig.30: Climagramme d'Emberger.

En reportant cette valeur sur le climagramme d'Emberger qui comporte en ordonnées les valeurs de Q_2 et en abscisses la moyenne des minima du mois le plus froid ($^{\circ}\text{C}$).

Nous constatons que la région présente un climat semi-aride avec un hiver frais.

B.4- Indice de Stewart

Cet indice est donné par la relation suivante :

$$Q_2 = \frac{3.43P}{M - m}$$

P : Précipitations moyennes annuelles (mm).

M : Moyenne des maxima de température du mois le plus chaud en ($^{\circ}\text{C}$)

m : Moyenne des minima de température de mois le plus froid en ($^{\circ}\text{C}$)

- $10 < Q_2 < 50$ Climat semi aride
- $2 < Q_2 < 10$ Climat désertique
- $Q_2 < 2$ Climat insaturé

Tableau 24 : indice de Stewart de la station de Khemis

P (mm)	389.8
M ($^{\circ}\text{K}$)	314.2
m ($^{\circ}\text{K}$)	274.2
Q_2	33.42

l'indice de Stewart (Q_2) est compris entre 10 et 50, donc cette valeur caractérise un climat semi aride.

B.5- Indice de continentalité de Kerner

Cet indice permet de préciser l'influence de la mer sur les conditions locales, Kerner a donné la relation suivante :

$$IK = \frac{T_0 - T_A}{A} \times 100$$

T_0 : Température moyenne du mois d'octobre ($^{\circ}\text{C}$)

T_A : Température moyenne du mois d'avril ($^{\circ}\text{C}$)

A : Amplitude entre le mois le plus chaud et le mois le plus froid ($^{\circ}\text{C}$)

Tableau 25 : Indice de Kerner de la station de Khemis

T_0	18.8
T_A	15.1
A	18.5
I_K	20

Comparant la valeur obtenue ($I_K = 20$) avec les résultats de la station côtière de Béni-Saf ($I_K = 34,7$) et celle très continentale de Ghardaïa ($I_K = 1,3$), Nous constatons que notre région subie des influences maritimes (climat méditerranéen).

IV.3- Etude hydrologique

IV.3.1- Etude des modules (débits)

IV.3.1.1- Débit annuels

Tableau 26 : Débit annuels à la station hydrologique de Khemis (1980/1981-2010/2011) (ANRH d'Oran)

Années	Débit (m³/s)	Années	Débit (m³/s)	Années	Débit (m³/s)	Années	Débit (m³/s)
1980 – 1981	1,34	1988 - 1989	0,41	1996 - 1997	0,14	2004 - 2005	0,09
1981 – 1982	0,37	1989 - 1990	0,35	1997 - 1998	0,17	2005 - 2006	0,11
1982 – 1983	0,35	1990 - 1991	1,14	1998 - 1999	0,50	2006 - 2007	0,18
1983 – 1984	0,35	1991 - 1992	0,79	1999 - 2000	0,13	2007 - 2008	0,06
1984 – 1985	0,46	1992 - 1993	0,27	2000 - 2001	0,42	2008 - 2009	1,89
1985 – 1986	0,83	1993 - 1994	0,39	2001 - 2002	0,44	2009 - 2010	0,27
1986 – 1987	1,01	1994 - 1995	0,80	2002 - 2003	0,71	2010 - 2011	0,12
1987 – 1988	0,42	1995 - 1996	0,78	2003 - 2004	0,43	Moy (m³/s)	0,51

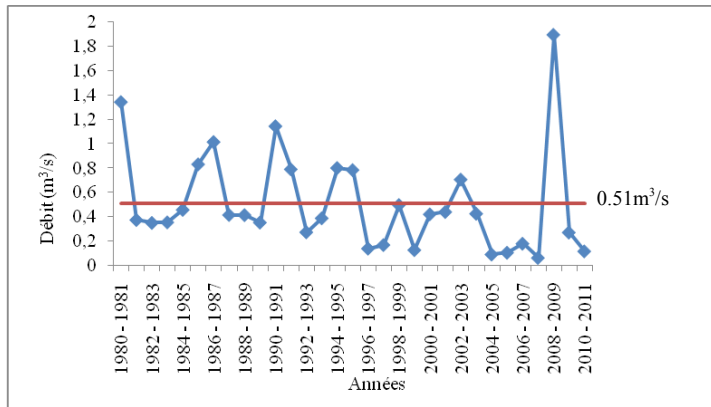


Fig.31 : Variation des débits annuels à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011).

La courbe de la variation des débits annuels à la station de Khemis montre que la moyenne interannuelle des débits est de 0.51m³/s, le maximum est enregistrée en 2008 - 2009 avec 1.89 m³/s par contre, le minimum est enregistré en 2007-2008 il n'est que de 0.06 m³/s.

IV.3.1.2- Débit moyens mensuels

Tableau 27 : Débit moyens mensuels à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011). (ANRH d'Oran).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A	Moy
Débit (m³/s)	0,15	0,22	0,37	0,54	0,86	1,01	1,60	0,57	0,38	0,19	0,11	0,10	0,51



L'histogramme des débits moyens mensuels à la station de Khemis (fig.32), montre que le mois à grand débit est le mois de Mars avec 1.6 m³/s et le mois à faible débit est celui d'août avec 0.1 m³/s.

Nous observons sur l'histogramme des débits moyens mensuels, une augmentation des modules à partir du mois de Septembre jusqu'au mois de Mars, cela correspond à la période de fortes précipitations. Ensuite, une nette diminution des débits marque les autres mois à cause de la diminution des précipitations.

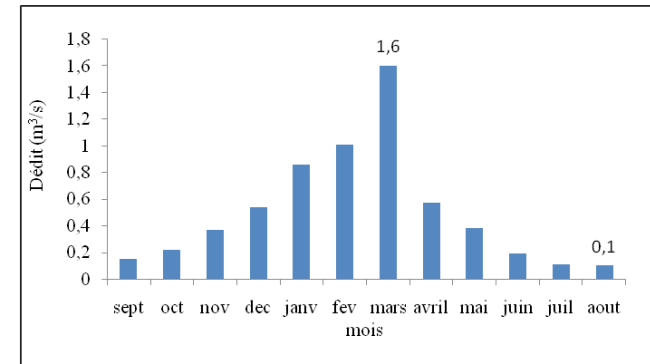


Fig. 32 : Histogramme des débits mensuels à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011).

IV.3.2- Etude des lames d'eau écoulées

Pour cette étude, nous avons pris en considération les valeurs annuelles et mensuelles des lames d'eau écoulées de la station de Khemis.

IV.3.2.1- Lame d'eau écoulée annuelle

Tableau 28 : lames d'eau écoulées annuelles (mm) à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011) (ANRH d'Oran).

Années	Lame d'eau (mm)	Années	Lame d'eau (mm)	Années	Lame d'eau (mm)	Années	Lame d'eau (mm)

1980/ 1981	119,16	1988/ 1989	36,78	1996/ 1997	12,38	2004/ 2005	8,1
1981/ 1982	33,24	1989/ 1990	31,35	1997/ 1998	14,99	2005/ 2006	9,37
1982/ 1983	31,08	1990/ 1991	101,51	1998/ 1999	44,13	2006/ 2007	15,87
1983/ 1984	32,52	1991/ 1992	70,19	1999/ 2000	11,32	2007/ 2008	5,57
1984/ 1985	40,59	1992/ 1993	24,28	2000/ 2001	37,35	2008/ 2009	168,17
1985/ 1986	73,8	1993/ 1994	34,47	2001/ 2002	39,04	2009/ 2010	24,06
1986/ 1987	90,08	1994/ 1995	71,06	2002/ 2003	62,67	2010/ 2011	10,36
1987/ 1988	36,89	1995/ 1996	69,62	2003/ 2004	37,8	Moy (mm)	45,09

D'après la figure 33, la variation des lames d'eau écoulées annuelles à la station de Khemis, montre que la moyenne interannuelle des lames d'eau écoulées est de 45,09mm, le maximum est enregistré en 2008 - 2009 avec 168,17mm et le minimum est enregistré en 2007-2008 avec 5,57mm. En effet cette lame d'eau maximale correspond exactement aux précipitations tombées au courant de cette année représentant elles aussi le maximum de la période.

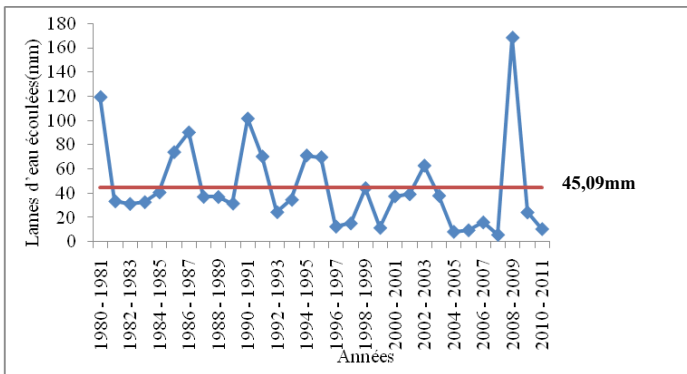


Fig.33 : Variation des lames d'eau écoulées annuelles à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011)

IV.3.2.2- Lame d'eau écoulée moyenne mensuelle

Tableau 29 : lames d'eau écoulées moyennes mensuelles à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011) (ANRH d'Oran)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A	Moy
Lame d'eau (mm)	1,08	1,62	2,74	3,98	6,36	7,48	11,86	4,22	2,78	1,42	0,83	0,72	45,09

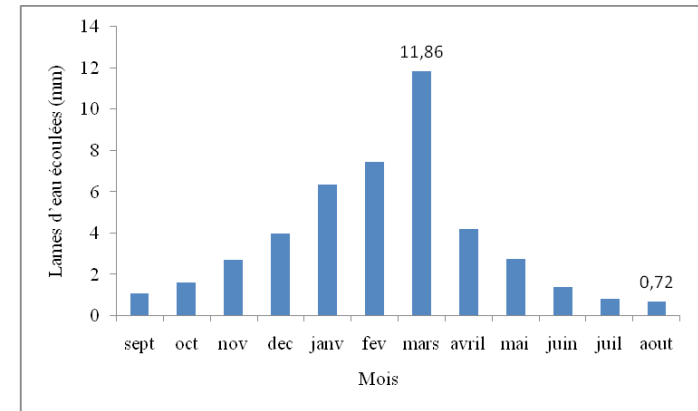


Fig. 34 : Histogramme des lames d'eau écoulées mensuelles à la station de Khemis.

L'histogramme des lames d'eau écoulées mensuelles à la station de Khemis (fig.34) montre que le mois à grand débit est le mois de Mars avec 11,86mm, contre un débit plus faible accusé par le mois d'Août avec 0.72mm.

IV.4- Etude statistique

L'ajustement statistique consiste à vérifier des hypothèses d'homogénéité entre une variable aléatoire et un modèle calculé, si ce modèle est bien superposé à l'échantillon étudié, on peut dire qu'il est bien ajusté. L'objet de la méthode statistique est la réduction de la masse de données, qui si importante, devrait être remplacée par un nombre réduit de paramètres statistiques pouvant représenter correctement cette masse (Dadi, 1998 in Boukhari, 2004).

Afin de découvrir la structure des variations des débits et des précipitations annuels et pour faire une analyse détaillée de ces données, l'ajustement statistique a été réalisé grâce au logiciel Statistica 8. Ce dernier propose les ajustements statistiques et détermine le modèle d'une loi ou plus qui ajustent au mieux l'ensemble des données. La méthode de calcul choisie pour l'estimation des paramètres du modèle est la méthode du maximum de vraisemblance.

L'ajustement graphique permet de vérifier si la forme de la loi retenue, ayant une valeur de test la plus petite, corrèle bien avec la distribution de la variable étudiée et représentent mieux l'échantillon. Le calcul des différents paramètres de la loi ou les lois choisies permet enfin de déduire les variations futures de la variable pour une probabilité donnée (R.Bouanani ,2010)

- Test de normalité

Pour tester la normalité des séries, il existe deux méthodes :

- Test graphique

Consiste à tracer sur un papier de Gauss la courbe théorique et la courbe empirique et de les comparer.

• **Test analytique**

Parmi les tests utilisés nous avons le test du Khi², le test de Kolmogorov, et nous pouvons aussi utiliser un test qui considère les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement. Le test de Khi² mesure l'écart qu'il y a entre les fréquences observées et les fréquences théoriques, il est donné par la statistique du χ^2 . Il est utilisé pour déterminer si une distribution théorique comme la distribution normale, peut ajuster une distribution empirique, c'est-à-dire une distribution calculée à partir des données observées.

La loi normale est la loi statistique la plus répandue et la plus adéquate pour notre série pluviométrique annuelle. De plus, de nombreuses autres lois statistiques peuvent être approchées par la loi normale. Pour notre cas, nous allons appliquer les tests graphiques et le test du χ^2 sur les données de notre bassin versant.

IV.4.1- Ajustement des précipitations annuelles à la station de Khemis

Tableau 30 : Paramètres de position des précipitations à la station Khemis (1980/1981-2010/2011)

Paramètres	Formules	Valeur
Moyenne	$\bar{P} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n P_i$	395,3
Variance	$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum (P_i - \bar{P})^2$	29546,6
Ecart type	$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$	171.89
Coefficient de variation	$Cv = \frac{\sigma}{\bar{P}}$	0.43

Le coefficient de variation $Cv < 0,5$, laisse fortement penser que l'ajustement suit une loi normale ou une loi log normale.

Le test du χ^2 permettra de vérifier cette adéquation.

A- Ajustement par la loi normale

$$P = \bar{P} + \sigma_u$$

Test graphique

L'ajustement graphique des séries pluviométriques à la station Khemis (fig.35) montre que la pluie s'ajuste en général suivant une loi normale de Gauss

La fréquence de chaque valeur sera calculée par la relation suivante :

$$F_i = i / N + 1$$

avec :

i : Rang

N : Période d'observation (nombres d'années)

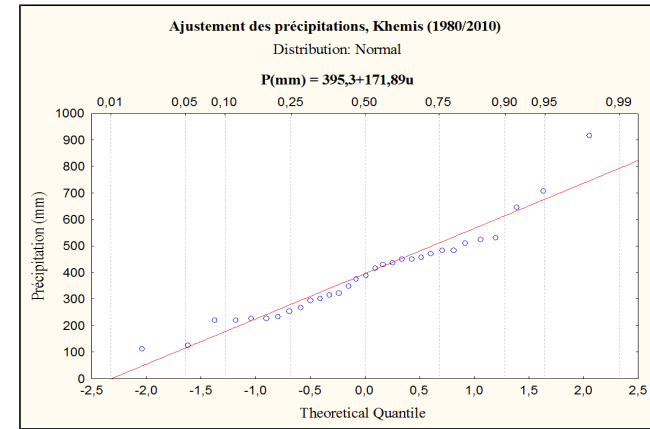


Fig.35 : Ajustement graphique des précipitations annuelles à la loi de distribution normale.

➤ **Test du χ^2**

Afin de déterminer la valeur du χ^2 , nous avons repris les séries des précipitations et nous avons réparti ces valeurs en classes. Les résultats sont donnés au tableau qui suit :

Tableau 31 : Calcul du χ^2 .

Nombre de classes	Limite de classes	Bornes standardisées	Fréquence cumulée à la borne >	Fréquence simple Théorique	Effectif observé (ni)	Effectif théorique (npi)	(ni-npi) ² /npi
1	<248.6	<-0.85	0.1977	0.1977	7	6.1287	0.124
2	[248.6-382.9 [	[-0.85 ; -0.07 [	0.4721	0.2744	8	8.5064	0.03
3	[382.9-517.2 [	[-0.07 ; 0.71 [	0.7611	0.289	11	8.959	0.465
4	[517.2-651.4 [	[0.71 ; 1.49 [	0.93189	0.17079	3	5.29449	0.994
5	[651.4-785.6 [	[1.49 ; 2.27 [	0.9884	0.05651	1	1.75181	0.323
6	>785.6	>2.27	1	0.0116	1	0.3596	1.14
Total				1	31	$\chi^2_{calculé}$	3.076

Le nombre de degré de liberté = nombre de classe – nombre de paramètre - 1

$ddL = n-m-1 \quad m=2$

$ddL = 6-2-1 = 3$ et pour une probabilité de 0.05

$\chi^2_{\text{tabulé}} = 7.815$

Le $\chi^2_{\text{calculé}}$ étant inférieur au $\chi^2_{\text{tabulé}}$ ($\chi^2_{\text{calculé}} < \chi^2_{\text{tabulé}}$), l'ajustement permet donc d'admettre une distribution normale des précipitations.

B- Ajustement par la loi log normale

$$\overline{\text{Log P}} = \overline{P}_{\text{Log}} + \sigma \text{Log.U}$$

La variable statistique dans ce cas n'exprime pas les précipitations, mais leurs logarithmes.

➤ **Test graphique**

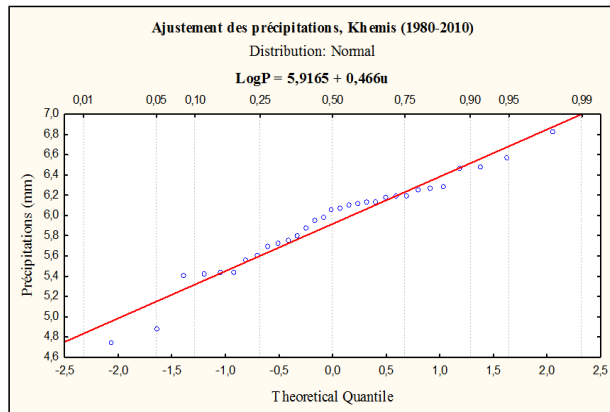


Fig.36 : Ajustement graphique des précipitations annuelles à la loi log normale.

Tableau 32 : Paramètres de position pour la loi log normale des précipitations à la station Khemis (1980/1981-2010/2011)

Paramètres	Formules	Valeur
Moyenne	$\overline{P}_{\text{log}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \log P_i$	5.9
Variance	$\sigma^2_{\text{log}} = \frac{1}{N} \sum (\log P_i - \overline{P}_{\text{log}})^2$	0.215
Ecart type	$\sigma_{\text{log}} = \sqrt{\sigma^2_{\text{log}}}$	0.46

Coefficient de variation	$Cv = \frac{\sigma_{\text{log}}}{\overline{P}_{\text{log}}}$	0.07
--------------------------	--	------

➤ **Test du χ^2 :**

Tableau 33 : Calcul du χ^2 .

Nombre de classes	Limite de classes	Bornes standardisées	Fréquence cumulée à la borne >	Fréquence simple Théorique	Effectif observé (ni)	Effectif théorique (npi)	(ni-npi) ² /npi
1	<5.09	<-1.76	0.0392	0.0392	2	1.2152	0.507
2	[5.09-5.44 [	[-1.76 ; -1 [	0.1587	0.1195	4	3.7045	0.024
3	[5.44-5.79 [	[-1 ; 0.24 [	0.5948	0.4361	5	13.5191	5.368
4	[5.79-6.14 [	[0.24 ; 0.52 [	0.6985	0.1037	10	3.2147	14.322
5	[6.14-6.49 [	[0.52 ; 1.28 [	0.8997	0.2013	8	6.2403	0.496
6	>6.49	>1.28	1	0.1003	2	3.1093	0.396
Total				1	31	$\chi^2_{\text{calculé}}$	21.113

$ddL = n-m-1 \quad m=3$

$ddL = 6-3-1 = 2$ et pour probabilité de 0.05

$\chi^2_{\text{tabulé}} = 5.991$

Le $\chi^2_{\text{calculé}}$ étant supérieur au $\chi^2_{\text{tabulé}}$ ($\chi^2_{\text{calculé}} > \chi^2_{\text{tabulé}}$), l'ajustement à la loi log normale n'est pas acceptable.

C- Calcul des précipitations pour une période de récurrence donnée

A partir de l'équation d'ajustement, nous pouvons calculer les précipitations pour des périodes de récurrences données.

Partant de l'équation de la loi normale : $P = 395.3 + 171.89u$

Tableau 34 : Calcul des précipitations pour une période de récurrence donnée.

Type de précipitations	Station Khemis
Précipitations décennales (u=1.28) (mm)	615.32
Précipitations centennales (u=2.33) (mm)	795.8
Précipitations millénaires (u=3.09) (mm)	926.44

IV.4.2- Ajustement des lames d'eau écoulées

Tableau 35 : Paramètres de position des lames d'eau écoulées à la station Khemis (1980/1981-2010/2011)

Paramètres	Formules	Valeur
Moyenne	$Q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \bar{Q}_i$	45.09
Variance	$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum (\bar{Q}_i - Q)^2$	1341.43
Ecart type	$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$	36.63
Coefficient de variation	$C_v = \frac{\sigma}{Q}$	0.81

Le coefficient de variation $C_v > 0,5$, laisse fortement penser que l'ajustement suit une loi log normale.

A- Ajustement des lames d'eau écoulées annuelles à loi log normale

$$\text{Log } Q \text{ (mm)} = \bar{Q} \text{ Log } + \sigma \text{ Log } U$$

Tableau 36 : Paramètres de position pour la loi log normale des lames d'eau écoulées à la station Khemis (1980/1981-2010/2011)

Paramètres	Formules	Valeur
Moyenne	$\bar{Q} \text{ log} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \text{log} Q_i$	3.5
Variance	$\sigma^2 \text{ log} = \frac{1}{N} \sum (\text{log} Q_i - \bar{Q} \text{ log})^2$	0.7
Ecart type	$\sigma \text{ log} = \sqrt{\sigma^2 \text{ log}}$	0.84
Coefficient de variation	$C_v \text{ log} = \frac{\sigma \text{ log}}{\bar{Q} \text{ log}}$	0.24

➤ **Test graphique**

Le test graphique (Fig.37) montre que la distribution log normale s'ajuste bien.

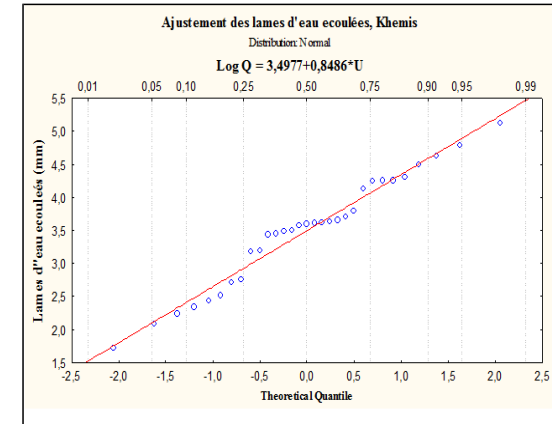


Fig.37: Ajustement graphique des lames d'eau écoulées annuelles à la loi log normale de la Station de Khemis (1980/1981-2010/2011)

➤ **Test du χ^2 :**

Tableau 37 : Calcul du χ^2 .

Nombre de classes	Limite de classes	Bornes standardisées	Fréquences cumulés à la borne >	Fréquence simple Théorique	Effectif observé (ni)	Effectif théorique (npi)	(ni-npi) ² /npi
1	<2.6	<-1.07	0.1432	0.1432	6	4.4392	0.549
2	[2.6-3.11 [	[-1.07; -0.46 [	0.3228	0.1796	2	5.5676	2.286
3	[3.11-3.62 [	[-0.46 ; 0.14 [	0.5557	0.2329	9	7.2199	0.439
4	[3.62-4.13 [	[0.14; 0.75 [	0.7734	0.2177	5	6.7487	0.453
5	[4.13-4.64 [	[0.75 ; 1.36 [	0.91309	0.13969	7	4.33039	1.646
6	>4.64	>1.36	1	0.08691	2	2.69421	0.179
Total				1	31	$\chi^2_{calculé}$	5.552

Le nombre de degré de liberté = nombre de classe – nombre de paramètre -1
 $ddL = n-m-1 \quad m=3$

$ddL = 6-3-1 = 2$ et pour probabilité de 0.05

$$\chi^2_{tabulé} = 5.991$$

Le $\chi^2_{calculé}$ étant inférieur au $\chi^2_{tabulé}$ ($\chi^2_{calculé} < \chi^2_{tabulé}$), l'ajustement permet donc d'admettre une distribution log normale des lames d'eau écoulées.

B- Calcul des lames d'eau écoulées pour une période de récurrence donnée

A partir de l'équation d'ajustement, nous pouvons calculer les lames d'eau écoulées pour des périodes de récurrences données.

Partant de l'équation de la loi log normal : $\text{Log } Q \text{ (mm)} = 3.5 + 0.84.u$

Tableau 38 : Calcul des Lames d'eau écoulées pour une période de récurrence donnée.

Type des Lames d'eau écoulées	Station Khemis
Lame d'eau écoulée décennale ($u=1.28$) (mm)	97.05
Lame d'eau écoulée centenaire ($u=2.33$) (mm)	234.44
Lame d'eau écoulée millénaire ($u=3.09$) (mm)	443.9

IV.5- Conclusion

Cette étude nous amène à conclure que le climat de la zone d'étude est caractérisé par :

- ✓ des précipitations moyennes annuelles égales à 395.3 mm, à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011).
- ✓ une moyenne annuelle des lames d'eau écoulées égale 45,09 mm à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011).
- ✓ Une moyenne annuelle de température égale à 17.6 °C avec Janvier le mois le plus froid et Août le plus chaud.
- ✓ A l'échelle saisonnière, l'étude des précipitations montre que l'Hiver est la saison la plus humide et l'Eté est la plus sèche.
- ✓ Les indices climatiques permettent de préciser qu'il s'agit d'un climat semi-aride à hiver frais.

CHAPITRE V MODELISATION

V- MODELISATION PAR CORRELATION SIMPLE (précipitations / lames d'eau écoulées).

Avant l'application du modèle du Génie Rural, annuel, mensuel et journalier nous avons essayé une corrélation simple entre les précipitations et les lames d'eau écoulées au bassin d'Oued Khemis.

V.1- Corrélation annuelle

Le tableau 38, montre les différents résultats du coefficient de détermination et les modèles qui relient les paramètres pluies – débits.

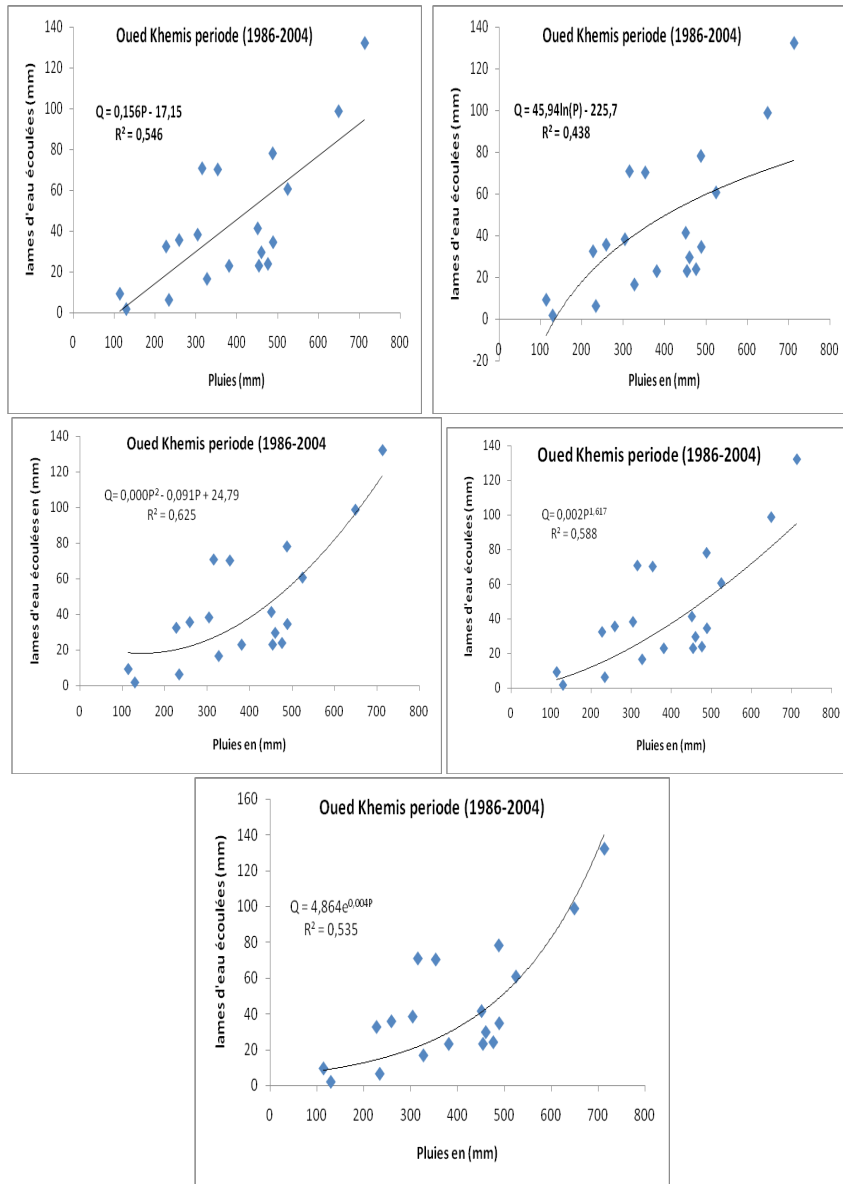


Fig.38 : Corrélation Pluie-Débit au pas de temps annuel (1986-2004).

Tableau 39: Résultats des différentes corrélations entre les deux paramètres pluie et la lame d'eau écoulée annuelle (1986-2004)

Type de régression	Station Khemis
Linéaire	$Q=0.156P-17.15$ $R^2=0.546$
Logarithmique	$Q=45.94 \ln(P)-225.7$ $R^2=0.438$
Polynomiale	$Q=-0.000P^2-0.091P+24.79$ $R^2=0.625$
Puissance	$Q=0.002 P^{1.617}$ $R^2=0.588$
Exponentielle	$Q=4,864e^{0.004P}$ $R^2=0.535$

P : Précipitations (mm), Q : Débit (mm)

La relation qui lie les lames d'eau écoulées et les précipitations annuelles est représentée par le modèle Polynomiale. De même, le modèle Puissance peut rendre compte de cette relation si on remplace P=0 (nous pouvons dire que l'écoulement permanent de l'oued est maintenue par les sources jaillissantes du karst, des eaux souterraines ou des échanges avec des formations).

La modélisation par corrélation entre les données annuelles (pluies et les lames d'eau écoulées) donne des coefficients de corrélation moyenne comprise entre 0.43 et 0.62 pour les différents types de relations choisies. Les caractéristiques physiques, la taille, la géologie, le climat et la structure du bassin associé à l'intensité, la répartition spatio-temporelle des précipitations, le caractère karstique, les pertes et les transferts souterrains vers d'autres bassins versants peuvent constituer la principale cause.

V. 2- Corrélation mensuelle

Nous avons utilisé des séries des données mensuelles de Janvier 1986 à Décembre 2004.

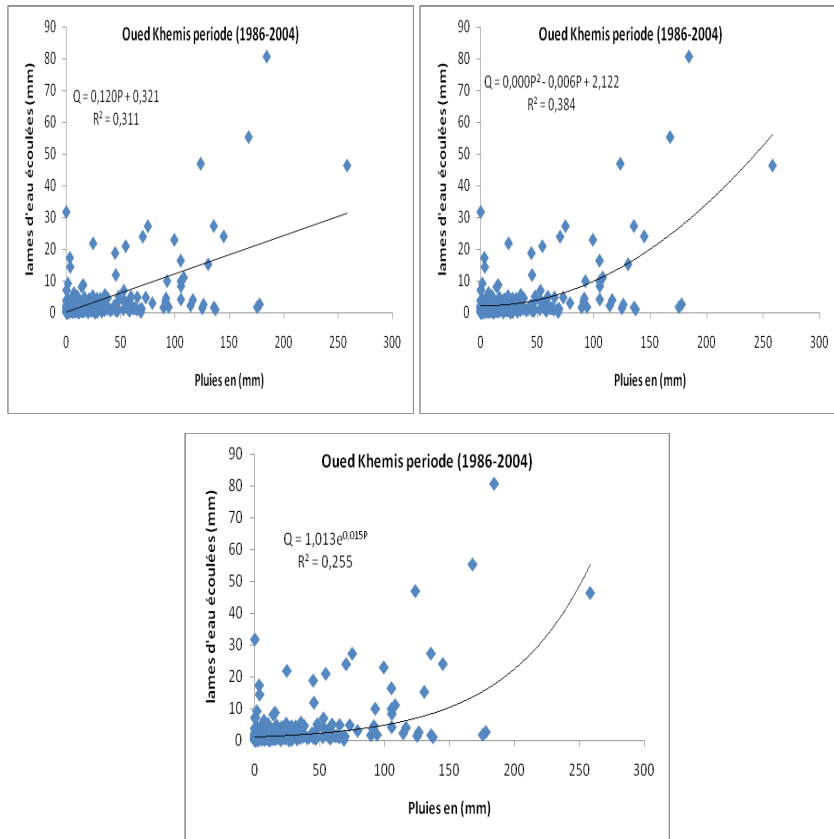


Fig. 39 : Corrélation Pluie-Débit au pas de temps mensuel (1986-2004).

Le tableau 39, présente les différentes corrélations pluie et lame d'eau écoulée mensuelles. Les résultats obtenus, permettent de constater que la modélisation par corrélation mensuelle donne des coefficients faibles.

Tableau 40 : Résultats des différentes corrélations entre les pluies et les lames d'eau écoulées mensuelles.

Type de régression	Station Khemis
Linéaire	$Q=0,120P+0,321$ $R^2=0,311$
Polynomiale	$Q=0,000P^2-0,006P+2,122$ $R^2=0,384$

Exponentielle	$Q=1,013e^{0,015P}$ $R^2=0,255$
P : Précipitations (mm), Q : Débit (mm)	

Les corrélations entre les pluies et les lames d'eau écoulées donnent des relations mensuelles non significatives avec des coefficients de corrélation inférieures à 0.5. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'écoulement enregistré dans le mois K ne correspond pas forcément aux pluies tombées au même mois et que les écoulements de surface peuvent en effet être soutenus par les écoulements souterrains dus aux pluies du mois ou des mois précédents.

V3- Corrélation journalière

Nous avons utilisé des séries de données journalières allant de 01 Septembre 2006 au 31 Août 2011.

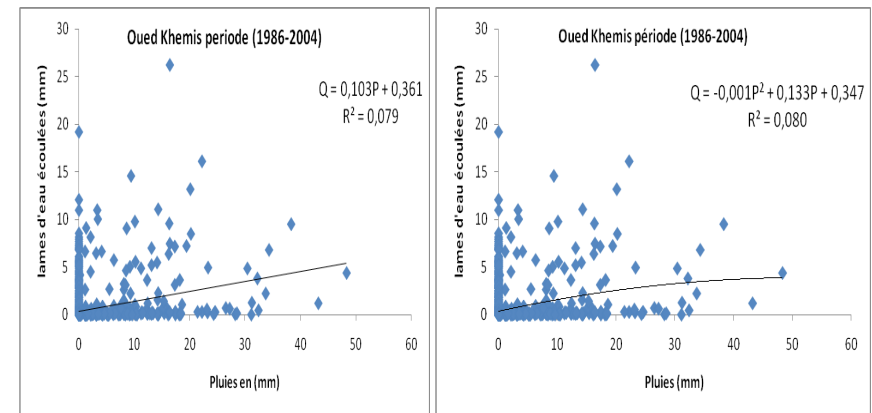


Fig. 40 : Corrélation Pluie-Débit au pas de temps journalier (1986-2004).

Le tableau 39, présente les différentes corrélations pluie et lame d'eau écoulée journalières. Les résultats obtenus, permettent de constater que la modélisation par corrélation journalière donne des coefficients très faibles, inférieurs à 0.1. (voir même plus faibles qu'à avec le pas de temps annuel et mensuel. Aucun des modèles n'est représentatif de la relation pluie-lame d'eau écoulée.

Tableau 41: Résultats des différentes corrélations entre les pluies et la lame d'eau écoulée journalières.

Type de régression	Station Khemis
Linéaire	$Q=0,103P+0,361$ $R^2=0,079$
Polynomiale	$Q=0,001P^2-0,133P+0,347$ $R^2=0,080$

P : Précipitations (mm), Q : Débit (mm)

L'examen des tableaux (39,40 et 41) et les figures (38,39 et 40), montre que les corrélations entre les lames d'eau écoulées et les pluies donnent des coefficients de détermination (r) au pas de temps annuel supérieur à ceux calculés au pas de temps mensuel.

La fonction polynomiale reste tout de même la plus adaptée avec les différents pas de temps adoptés.

Ces faibles coefficients de corrélation peuvent s'expliquer par le fait que l'écoulement enregistré dans le mois k ne correspond pas forcément aux pluies tombées au même mois et que les écoulements de surface peuvent en effet être soutenus par les écoulements souterrains dus aux pluies du mois ou des mois précédents.

Les caractéristiques physiques, la taille, la géologie, et la structure du bassin associées à l'intensité et la répartition spatio- temporelle des précipitations constituent les principaux facteurs qui conditionnent le phénomène.

En effet, ces modèles sont trop simples et ne tiennent pas compte d'autres paramètres qui régissent l'écoulement en particulier les échanges avec l'atmosphère et les réservoirs souterrains.

Aussi et dans la suite du travail, nous proposons d'utiliser un modèle qui prendra compte de ces échanges.

V4- Modèle annuel GR1A

Dans cette étude, pour prédire le débit à une année donnée, nous utilisons à l'entrée du modèle des valeurs des pluies annuelles observées (mm), des ETP calculées par la méthode de Turc et la méthode de Thornthwaite en mm et des débits annuels (exprimés en lames d'eau écoulées) observés au niveau de la station d'Oued Khemis de 1992 au 2004.

V4.1- Calage du modèle

Le calage du modèle a été réalisé manuellement en procédant au changement de la valeur du paramètre X du modèle plusieurs fois, en commençant par la valeur 0,13 (valeur minimale donnée par le concepteur du GR1A) et faisant accroître successivement avec un intervalle de 0,01 jusqu'à la valeur supérieure limite 3,5. Nous avons obtenue le meilleur calage avec des valeurs du paramètre X présentées dans le tableau.

La validation du calage est effectuée en appliquant le test de performance du modèle de coefficient de détermination R² (Tableau 42)

V4.1.1 Résultats du calage du modèle annuel en utilisant l'ETP par la méthode Turc et la méthode Thornthwaite

Tableau 42: Représentation des résultats obtenus par l'utilisation de GR1A.

Données annuelles	ETP (Turc)		ETP (Thornthwaite)	
		Coefficient de		Coefficient de

Critères	X	Nash	Bilan	corrélation (R ²)	X	Nash	Bilan	corrélation (R ²)
Oued Khemis (1992-2005)	1,14	65,8	75,4	0,659	1,14	74,2	85	0,682

X: Coefficient de correction de l'ETP (mm) (évapotranspiration potentielle)

V.4.1.2.1 - Résultats obtenus par le modèle GR1A avec l'ETP de Turc.

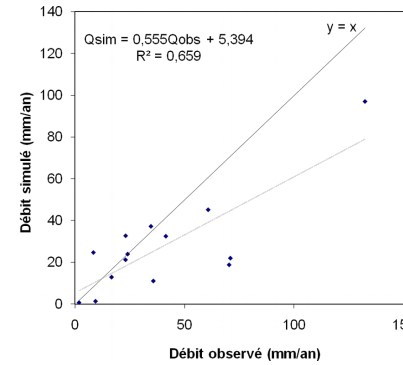


Fig. 41: Visualisation de la qualité du calage

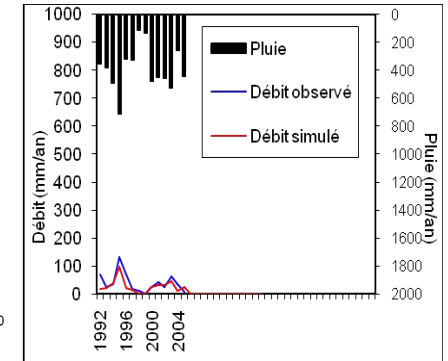


Fig. 42: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés

V.4.1.2.2- Résultats obtenus par le modèle GR1A avec l'ETP de Thornthwaite.

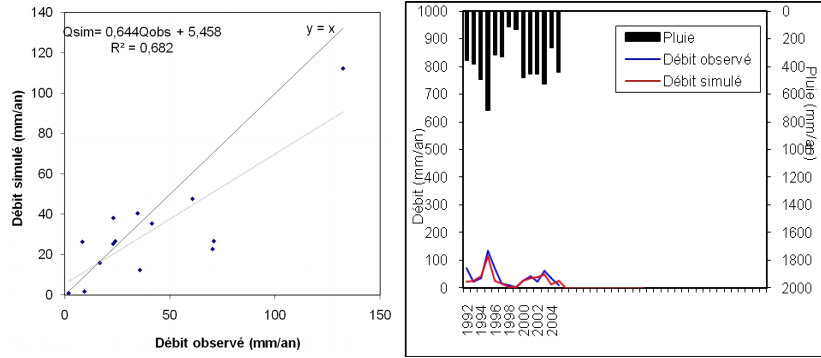


Fig.43: Visualisation de la qualité du calage

Fig. 44: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés

Au regard des valeurs des coefficients de détermination, le calage paraît correcte. Les valeurs de Nash après calage sont satisfaisantes. D’après les résultats Tableau (42) et la superposition des débits simulés et calculées figure (41,42, 43 et 44), nous pouvons dire que les modèles d’évapotranspiration calculée par la méthode de Thornthwaite donne de meilleurs résultats que celle de Turc.

Le critère de Nash après calage est compris entre 65,8% et 74.2% Tableau (42). Le bilan est équilibré.

Le coefficient de correction de l’évapotranspiration X est supérieur à 1, nous remarquons que. Le paramètre X traduit des échanges avec des nappes profondes, donc le système perd de l’eau en profondeur tout au long de l’oued Khemis cela paraît évident vu le caractère karstique de la région (voir présentation de la zone d’étude).

V.4.1.3- Validation du modèle

La validation porte sur l’application des modèles sur une série de données qui n’ont pas été utilisées lors du calage, elle est relative à la période (1986-1991). Le Tableau 43 et la Figure 45 présentent les résultats de cette validation.

Le tableau ci-dessous donne les variations du coefficient de corrélation avec l’utilisation de deux méthodes (Turc, Thornthwaite) pour l’évapotranspiration.

Tableau 43 : Variation des coefficients de corrélation

Données annuelles	Coefficient de corrélation (R²)	
	ETP (Turc)	ETP (Thornthwaite)

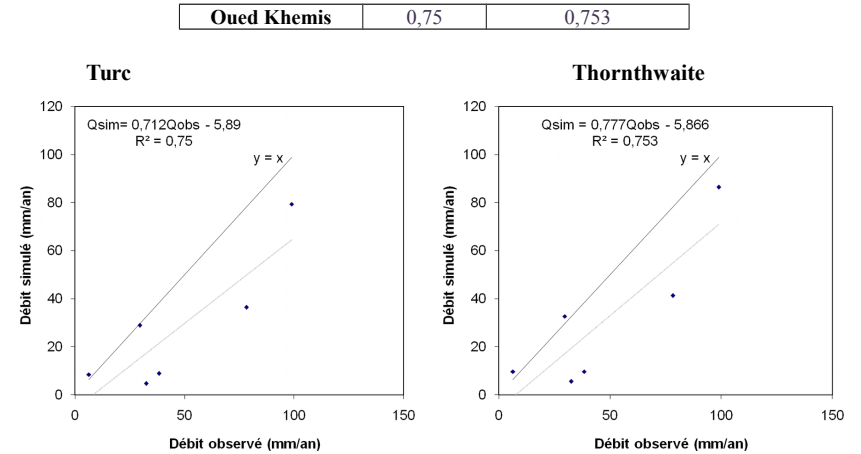


Fig. 45: Validation du modèle GR1A selon l'ETP respectivement de Turc et Thornthwaite.

Les valeur de R² qui sont obtenus à partir des débits simulés en fonction des débits observés (tableau 43) et (fig.45) par la méthode de Turc et celle de Thornthwaite indiquent que les modèles sont bien calés (r ≈ 0,87).

V.4.2- Modèle Mensuel GR2M

Dans cette étude, pour prédire le débit à un mois donné, nous avons utilisé à l’entrée du modèle des valeurs des pluies mensuelles observées (mm), des ETP calculées par la méthode de Turc et Thornthwaite (mm) et des débits mensuels observés exprimés en lames d'eau écoulées (mm) de (1993-1999)

V.4.2.1.1 Résultats du calage du modèle mensuel en utilisant l'ETP par la méthode Turc et Thornthwaite

Pour le calage des modèles, nous avons procédé manuellement aux changements des valeurs des paramètres X1 et X2 entre les valeurs limites comprises entre 140 et 2640 (mm) plusieurs fois jusqu’à l’obtention des valeurs optimales du coefficient du critère de qualité de Nash et du coefficient de détermination R² de la corrélation entre les débits calculés et ceux observés.

Les résultats du calage, coefficient de détermination le critère de Nash sont représentés sur le Tableau 44.

Tableau 44 : Représentation des résultats obtenus par l'utilisation de GR2M.

Critères		Oued Khemis (1993-1999)
	X ₁	244,69

ETP Turc	X ₂	0,70
	Nash%	73,2
	Bilan%	64,9
	R ₀	30
	R ²	0,684
ETP Thornthwaite	X ₁	403,43
	X ₂	0,78
	Nash%	75
	Bilan%	84,2
	R ²	0,648

X₁ : Capacité du réservoir de production (mm),
 X₂ : Paramètre d'échange (mm),
 R₀ : Niveau de remplissage initial (max: 60mm),
 R² : Coefficient de corrélation.

V.4.2.1.2- Résultats obtenus par le modèle GR2M avec l'ETP de Turc.

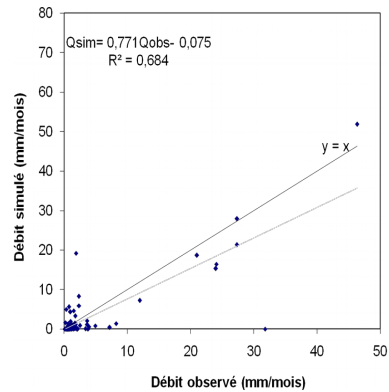


Fig.46: Visualisation de la qualité du calage

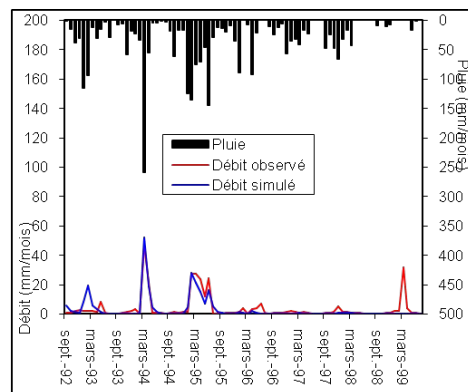


Fig.47: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés

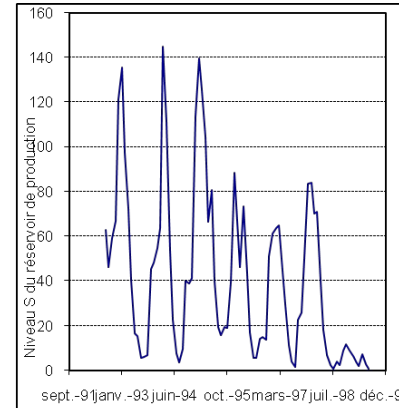


Fig.48 : Courbe du niveau S du réservoir de production.

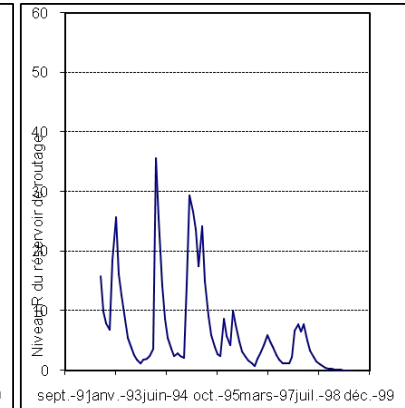


Fig.49 : Courbe du niveau R du réservoir de routage.

V.4.2.2 - Résultats obtenus par le modèle GR2M avec l'ETP de Thornthwaite.

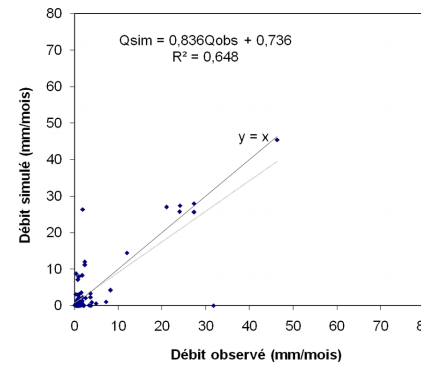


Fig. 50: Visualisation de la qualité du calage observés et les débits simulés

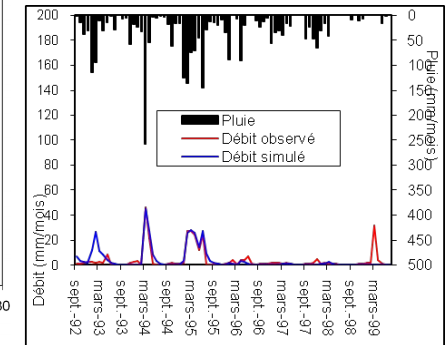


Fig.51: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés

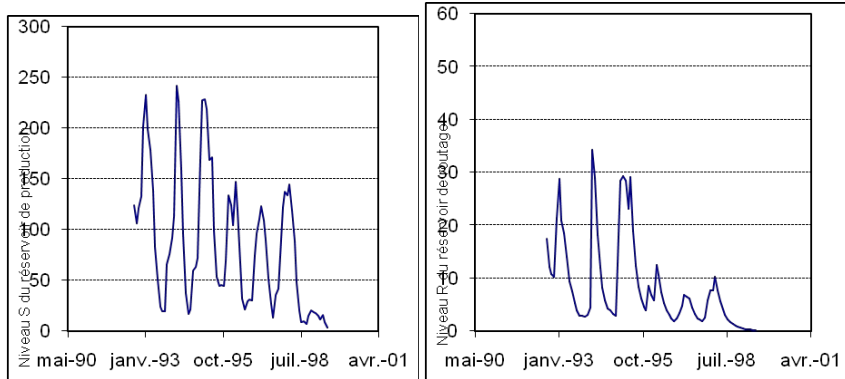


Fig. 52: Courbe du niveau S du réservoir de production.

Fig.53 : Courbe du niveau R du réservoir de routage.

D'après les valeurs du critère de Nash et les coefficients de détermination, ainsi que la bonne superposition des courbes des lames d'eaux écoulées calculés et mesurés (Tableau 44 et les figures 46, 47, 50 et 51), nous pouvons dire que les modèles sont calés. Là aussi, nous remarquons que l'évapotranspiration résultant de la formule de Thornthwaite donne de meilleurs résultats que celle de Turc.

Selon le graphe de l'évolution du taux de remplissage du réservoir de production, nous pouvons dire qu'une partie importante reste sous forme d'une perte au niveau du réseau de failles caractérisant le bassin et qui contribue à faire retarder la réponse au niveau des stations hydrométriques.

Ainsi l'évolution du taux de remplissage du réservoir de routage, peut expliquer un échange avec les formations adjacentes.

La variation du réservoir de production varie entre 2.19 mm et 144.97 mm (Fig.48) et la capacité du réservoir de routage qui varie entre 0.18 mm et 35.59 mm (Fig 49) pour Turc et pour Thornthwaite, la capacité de réservoir de production varie entre 3.66 mm et 241.83 mm (Fig 52) et la capacité du réservoir de routage qui varie entre 0.25 mm et 34.23mm (Fig 53) confirme la réponse des pluies qui est plus lente due aux formations karstiques.

V.2.2.3- Validation du modèle

Pour cela nous avons utilisé des données que n'avons pas utilisées lors du calage et correspondant à la période allant de Septembre 1989 à Décembre 1991.

Tableau 45 : Coefficients de corrélation entre les débits simulés et calculés au cours de la validation.

Données mensuelles	Coefficient de corrélation (R ²)	
	ETP (Turc)	ETP (Thornthwaite)
Oued Khemis	0.796	0.81

Nous avons obtenu un bon coefficient de corrélation R² = 0,796 pour Turc et R²=0,81 pour Thornthwaite, ceci permet de déduire que les modèles mensuels sont bien calés.

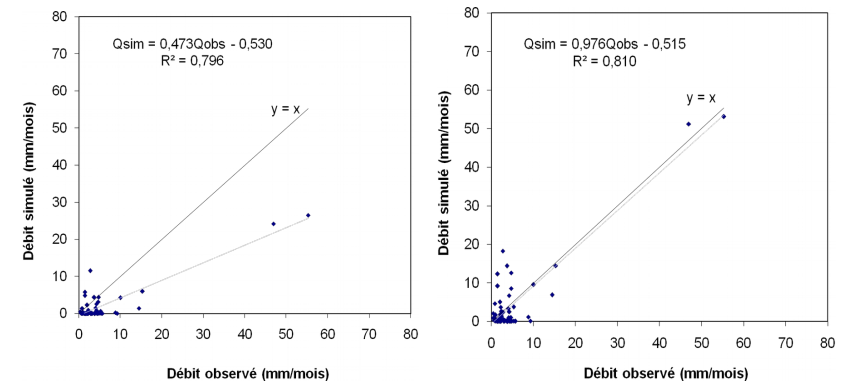


Fig. 54 : Validation du modèle GR2M selon l'ETP respectivement de Turc et Thornthwaite

V.4.3- Modèle journalier GR4J

La modélisation au pas de temps journalier s'est faite grâce au modèle GR4J du Cemagref. Les données nécessaires à rentrer sont les pluies journalières observées (mm), les débits (m³/s, les dates, la superficie du bassin versant ainsi que les données d'ETP (mm) calculées par la méthode d'Oudin.

V.4.3.1 Résultats obtenus par le modèle GR4J avec l'ETP d'Oudin

Nous avons essayé en appliquant le GR4J (pas de temps annuel) deux cas : le premier un calage avec l'année 2006 et la validation avec l'année suivante et dans le second cas , nous avons opté pour le calage en 2007 et la validation en 2006.

Nous avons reporté dans le tableau 46 les paramètres obtenus pour les deux cas étudiés.

Tableau 46: Résultats du calage au pas de temps journalier (2006 et 2007).

Périodes de calage	X1	X2	X3	X4	Nash	Bilan	R ²
2006	164,02	-4,02	20,09	1,85	32,2	103,8	0,2698

2007	141,17	-4,99	21,12	1,11	40,9	111,3	0,4127
------	--------	-------	-------	------	------	-------	--------

X1 : capacité du réservoir de production (mm),
 X2 : Paramètre d'échange (mm),
 X3 : Capacité réservoir de routage (mm),
 X4 : Délai (jours),
 R0 : Capacité du réservoir de routage (max. : 60mm),
 R2 : Coefficient de corrélation.

V4.3.2 Calage (période de 2006)

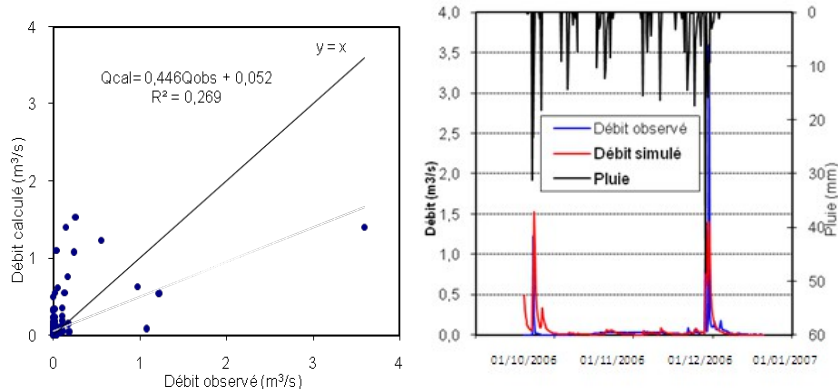


Fig. 55: Visualisation de la qualité du calage observés et les débits simulés

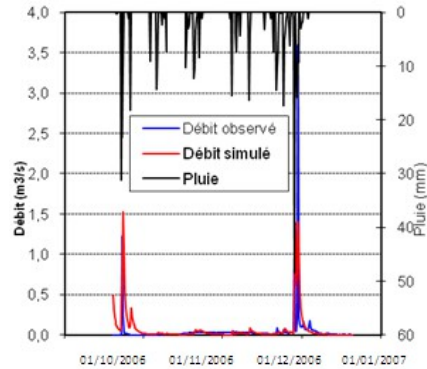


Fig.56: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés

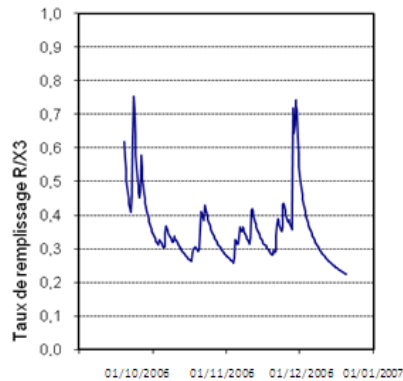


Fig. 57: Courbe du niveau R du réservoir



Fig.58 : Courbe du niveau S du réservoir

de Routage.

de production.

V.4.3.3 Calage (période de 2007)

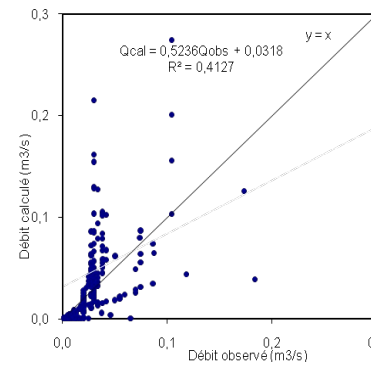


Fig. 59: Visualisation de la qualité du calage observés et les débits simulés

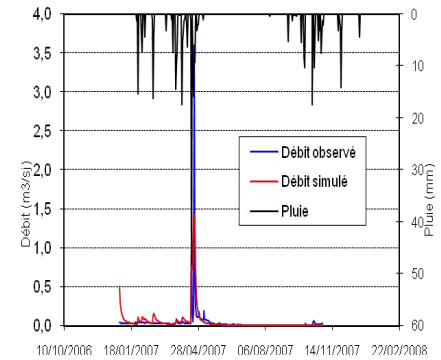


Fig.60: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés

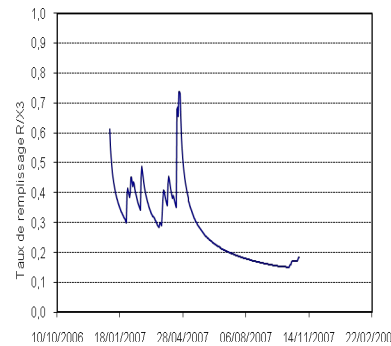


Fig. 61: Courbe du niveau R du réservoir de Routage.

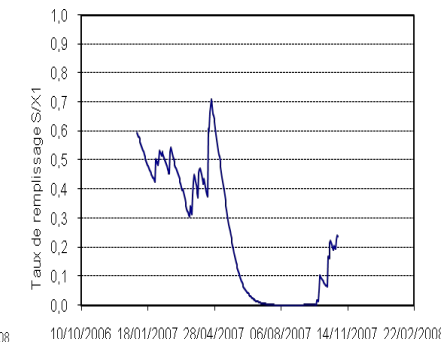


Fig. 62 : Courbe du niveau S du réservoir de production.

D'après les résultats (Tab. 46) et la superposition des deux courbes, des débits simulés et calculés (Fig. 56, 60), nous pouvons dire que le modèle est bien calé. Selon l'évolution du taux de remplissage du réservoir de routage (fig. 57, 61), nous remarquons qu'une partie des eaux souterraines, karstiques ou les échanges avec les formations adjacentes alimente l'écoulement. La variabilité journalière de l'écoulement est plus importante que celle annuelle et mensuelle. Cette variabilité des débits journaliers se traduit dans le modèle par le niveau du réservoir de production qui varie entre 0.024 mm et 0.066 mm pour 2006 (fig. 58) et entre 0,003 mm et 0,708 mm pour 2007 (fig.62); et la capacité du réservoir de routage qui varie

entre 0.753 mm et 0.224 mm pour 2006 (fig. 57) et entre 0,154 mm et 0,737mm pour 2007 (fig.61).

V.4.3.4- Validation du modèle

Pour la validation nous avons utilisé des données des précipitations et d'évapotranspiration correspondant à la période (2006 et 2007). Dans le premier cas, nous avons fait une validation avec les données de 2007 et qui n'ont pas été utilisées lors du calage . Et dans le deuxième cas, nous avons pris les données dont lesquelles nous avons fait la validation comme données de calage (2007) et avec les données de calage (2006) nous avons fait la validation. (Cette méthode s'appelle la validation croisée). Le Tableau 47 montre les variations des paramètres dans les deux cas.

Tableau 47: Résultats du validation au pas de temps journalier (2006 et 2007) .

Périodes de validation	X1	X2	X3	X4	Nash	Bilan	R ²
2006	242,26	-4,94	24,53	1,08	39,9	114,4	0,4286
2007	184,16	-3,07	20,09	0,04	60,2	98	0,6129

Selon le coefficient de corrélation de la fonction débit observé et débit simulé (Tab. 47), la modélisation pluie-débit réalisée par l'utilisation du GR4J donne de bon résultats.

La représentation de la répartition des points selon la droite y = x est importante pour déceler l'alignement des points de celle-ci.

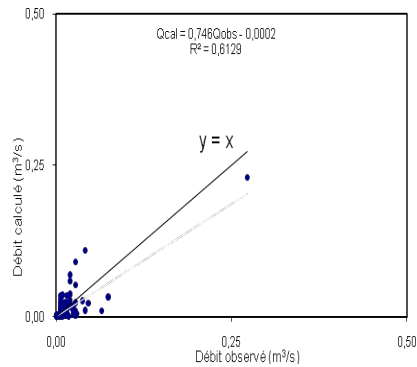


Fig.63 : Validation du modèle GR4J selon l'ETP de Oudin (2007).

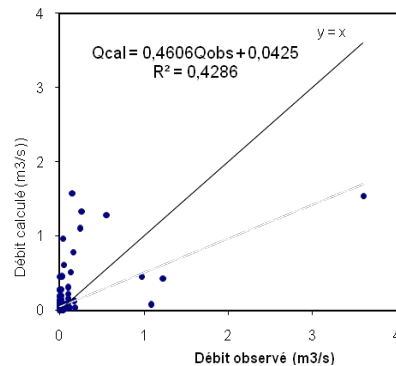


Fig.64 : Validation du modèle GR4J selon l'ETP de Oudin (2006).

L'analyse graphique (fig.63, 64), montre que les nuages de points sont bien alignés autour de la droite d'équation y = x à l'exception de quelques points.

Le coefficient de corrélation débits observés et débits calculés est égale à 0,612 ou R=78% pour 2007 et R²= 0,4286 ou R= 0,65 pour 2006 donc il est acceptable et qui nous

permet de dire que notre modèle est assez performant pour les données journalières de l'Oued Khémis.

Pour GR4J, les paramètres X2, X3, et X4 varient très peu, par contre, X1 est sensible à la longueur de la période de calage. Les critères de Nash sont presque toujours inférieurs à 50%.

Le modèle GR4J simulera mal les données de débits et pluie à faible longueur de période de calage et de validation à cause de la présence de données de précipitations nulls et qui peuvent entachés les résultats d'erreurs importantes.

V.5- Etude comparative

Dans cette partie, nous avons essayé de comparer nos résultats des simulations du modèle global GR avec ceux trouvés dans les travaux de Bourbaba, 2015 avec les pas de temps annuel et mensuel pris selon des périodes autres que les notes.

V.5.1- Modèle annuel GR1A

Les résultats de cette comparaison sont consignés au tableau 48.

Tableau 48 : Récapitulatif du calage du modèle annuel (ETP de Turc et de Thornthwaite)

Données annuelles	ETP (Turc)				ETP (Thornthwaite)			
	X	Nash	Bilan	Coefficient de corrélation (R ²)	X	Nash	Bilan	Coefficient de corrélation (R ²)
Oued Khemis (1986-1999) (Bourbaba, 2015)	1.01	71.4%	76%	0.777	1.01	76.5%	86.3%	0.79
Oued Khemis (1992-2005) (Boursali, 2015)	1,14	65,8	75,4	0,659	1,14	74,2	85	0,682

A partir des résultats mentionnés au tableau 48, nous pouvons déduire que :

- Quelque soit la période d'étude choisie, les meilleurs résultats sont donnés par l'utilisation d'ETP de Thornthwaite dans les deux séries de données.
- Les résultats de calage pour les deux périodes sont presque semblables.
- Les valeurs de Nash après calage sont bonnes.
- Les bilans sont équilibrés.
- Les coefficients de détermination sont acceptables.

V.5.2- Validation

Tableau 49 : Récapitulatif de la validation du modèle au pas de temps annuel

Données annuelles	Coefficient de corrélation (R ²)	
	ETP (Turc)	ETP (Thorntwaite)
Oued Khemis (Bourbaba, 2015)	0.795	0.735
Oued Khemis, 2015)	0,75	0,753

Le tableau ci-dessus met en évidence la performance du modèle GR quelque soit la période d'étude prise en considération.

V. 5. 3-Modèle Mensuel GR2M

Les résultats de cette comparaison sont consignés au tableau 50

Tableau 50 : Récapitulatif du calage du modèle mensuel (ETP de Turc et de Thorntwaite)

Critères		Oued Khemis (1986-1999) (BOURBABA)	Oued Khemis (1993-1999) (Boursali)
ETP Turc	X ₁	373.63	244,69
	X ₂	0.87	0.70
	Nash%	74.5	73,2
	Bilan%	77.6	64,9
	R ₀	30	30
	R ²	0.795	0,684
ETP Thorntwaite	X ₁	384.46	403,43
	X ₂	0.73	0,78
	Nash%	76.6	75
	Bilan%	71.1	84,2
	R ₀	30	30
	R ²	0.827	0,648

A partir des résultats mentionnés au tableau 50, nous pouvons déduire que :

- les résultats sont relativement meilleurs par utilisation d'ETP de Thorntwaite dans les deux séries des données.

- Les valeurs de Nash après calage sont bonnes.
- Les bilans sont équilibrés.
- Les coefficients de détermination sont acceptables.

V.5.4- Validation

Tableau 51 : Récapitulatif de la validation du modèle au pas de temps mensuel

Données annuelles	Coefficient de corrélation (R ²)	
	ETP (Turc)	ETP (Thorntwaite)
Oued Khemis (Bourbaba)	0.506	0.491
Oued Khemis (Boursali)	0.796	0.81

A partir du tableau 51, les coefficients de détermination pour la période de (1993-1999) sont satisfaisants relativement à ceux présentés par Bourbaba, 2015.

La différence du résultat est attribuée vraisemblablement à la période de validation choisie.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

A travers ce mémoire nous avons essayé de montrer qu'elle pouvait être la contribution d'un modèle hydrologique paramétrique global comme le GR dans la compréhension des écoulements sur un bassin versant tel que celui de Khemis qui est un affluent de la Tafna.

Dans ce travail, nous avons tout d'abord présenté l'état de l'art de la modélisation hydrologique en particulier celui de la fonction pluie-débit. La maîtrise de cette fonction nécessite la connaissance obligatoire de deux notions : d'une part la compréhension du fonctionnement du bassin versant et d'autre part la maîtrise des paramètres intervenant dans l'élaboration du modèle à savoir : les précipitations, la température, l'évaporation et les débits etc.

Nous avons ensuite présenté un aperçu sur le contexte morphologique, géologique, et hydro-climatique afin de comprendre au mieux le fonctionnement du bassin versant.

Oued el Khemis est caractérisé par un relief fort, soumis à un climat semi aride, les précipitations moyennes annuelles enregistrées durant la période allant de 1980 jusqu' à 2011 sont de 395,3mm/an avec une température de 17,6°C.

Ensuite, nous avons essayé de trouver des corrélations entre les précipitations et les lames d'eau écoulées par l'utilisation de l'approche corrélatrice à travers des régressions simples, toute fois, les résultats n'étaient pas concluants, c'est ce qui d'ailleurs justifie notre choix du modèle du Génie Rural (GR) pour expliquer le comportement hydrologique du bassin devant les variabilités climatiques observées à différentes échelles (pas de temps annuel, mensuel et journalier).

L'efficacité du modèle à simuler les écoulements moyens du bassin, est vérifiée par l'analyse du critère de Nash appliqué aux écoulements, Il a donné des valeurs satisfaisantes (supérieures à 70%), donc, nous pouvons dire que le modèle GR présente une certaine efficacité à simuler les écoulements et garantir une meilleure compréhension du comportement hydrologique du bassin.

Les résultats obtenus par les différentes applications du modèle GR s'avèrent intéressants à savoir :

1- **Pour le GR1A**, au pas de temps annuel (modèle à un seul paramètre de calage), les valeurs du critère de Nash Obtenues sont bonnes, elles sont comprises entre 65,8% (méthode de Turc) et 74.2% (méthode Thornthwaite). Le bilan est assez équilibré. Le coefficient de corrélation R^2 , varie entre 0.659 (méthode de Turc) et 0.682 (méthode de Thornthwaite).

Toutefois, l'évapotranspiration déduite de la formule de Thornthwaite donne de meilleurs résultats que celle de Turc.

2- **Pour le GR2M**, au pas de temps mensuel (modèle à deux paramètres de calage), les valeurs du critère de Nash obtenues sont bonnes, elles sont comprises entre $(Q)=73.2\%$ pour la méthode de Turc et 75% pour la méthode Thornthwaite. Le bilan reste assez équilibré. Le coefficient de corrélation R^2 , varie entre 0.684 pour la méthode de Turc et 0.648 pour la méthode de Thornthwaite.

3- **Pour le GR4J**, au pas de temps journalier (modèle à quatre paramètres de calage), le coefficient de corrélation R^2 est égale à 0.269 pour 2006 et 0,41 pour 2007 (ETP calculé par la méthode d'Oudin). Pour le GR4J, la valeur du critère de Nash obtenue est égale à 32.2% pour 2006 et 40,9% pour 2007.

Les bons résultats du calage ont été confirmés par la validation confirmant ainsi la performance du modèle GR appliqué à l'oued Khemis.

Ce modeste travail constitue la suite des travaux réalisés sur le bassin de la Tafna, il vient confirmer la performance du modèle GR utilisé pour des pas de temps différents, il serait souhaitable de continuer son application avec un pas de temps horaire par l'utilisation du modèle GR3H concernant l'étude des événements.

Bien sûr, pour des résultats plus probants, nous suggérons l'appui sur des modèles distribués qui sont suffisamment robustes pour représenter des écoulements impactés par des conditions climatiques différentes et que nous souhaiterons être l'objectif principal de notre thèse de doctorat.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AIDOUNI A., CHERRAT A. 2008. Etude hydrologique et hydrochimique des eaux thermales de la région de Remchi, Mém. Ing. Univ. Tlemcen, 78 p.

ANDREASSIAN V., CHARLES P., CLAUDE M. 2007. Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR)-Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés, 16 p.

ANCTIL F., PERRIN C. et ANDREASSIAN V. (2004). Impact of the length of observed records on the performance of ANN and of conceptual parsimonious rainfall-runoff forecasting models. Environmental Modelling & Software, vol 19, n° 4, 357-368.

BEVEN K. (1989). Changing ideas in hydrology - The case of physically-based models. Journal of Hydrology, 105, 157-172.

BEVEN K. (1992). The future of distributed modelling. Hydrol. Processes. 6, 253-254.

BEVEN K.J. et KIRKBY M.J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Sciences Bulletin, 24(1), 43-69.

BENHADDA N. 2014. Contribution à l'étude hydrogéologique du bassin versant de l'Oued Elmalah (NW- Algérien). Mém. Ing. Univ. Tlemcen, 154p.

BENHAZIL L. 2011. Application du modèle GR au bassin versant de l'Oued Isser. Mém. Ing. Univ. Tlemcen, 80p.

BOUANANI A. 2004. Hydrologie, Transport solide et modélisation. Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW-Algérien). Thèse de Doctorat d'état, Univ. Tlemcen, 250 p.

BOUANANI A., BABA-HAMED K., BOUANANI R. 2010. Utilisation d'un modèle global pour la modélisation pluie-débit : Cas du bassin de l'Oued Sikkak (Tafna-NW algérien). 6 p.

BOUANANI R. 2010. Modélisation de la fonction pluie-débit. Application au bassin versant de la Tafna (NW-Algérien). Mém. Magister, Univ. Tlemcen, 110 p.

BOURBABA L., TORCHI M. 2014. Application de quelques traitements statistiques aux données physico-chimiques des eaux de la nappe alluviale de la plaine d'Hennaya (NW-Algérien). Mém. Ing. Univ. Tlemcen, 98 p.

BOUREK R. 2010. Modélisation pluie-débit. Application au bassin versant de la Mactaa (NW-Algérien). Mém. Magister, Univ. Tlemcen, 118 p.

CISZAK R. 1993. Evolution géodynamique de la chaîne tellienne en Oranie (Algérie occidentale) pendant le Paléozoïque et le Mésozoïque. Strata 2 (20)(1993) 1-513.

EDIJATNO, MICHEL, C. (1989). Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. La Houille Blanche(2), 113-121.

EDIJATNO, NASCIMENTO, N.O., YANG, X., MAKHLOUF, Z. ET MICHEL, C. (1999). GR3J: a daily watershed model with three free parameters. *Hydrological Sciences Journal* 44(2), 263-277.

ESSADAoui M. 2012. Modélisation hydrologique du bassin versant Ouergha par utilisation de la plateforme WMS. Mém. Ing. Univ. Mohammed vagdak, 115 p.

ESTUPINABORRELL V. (2004). Vers une modélisation hydrologique adaptée à la prévision opérationnelle des crues éclair : Application à de petits bassins versants du sud de la France. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse., P254.

FANDI O. 1999. Etude hydrogéologique des sous bassins versants de la Tafna (Isser, Sikkak et Lakhdar). Recherche d'un modèle pluie - débit. Mém. Ing.Univ. Tlemcen, 197 p.

GADIRI F. 1995. Esquisse hydrogéologique de la région de Khemis. Mém. D.E.U.A.Inst. Science de la terre. Univ. Tlemcen. 82p.

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

GHERISSI R. 2012. Hydrologie et modélisation pluie-débit. Cas du bassin versant de l'Oued Lakhdar (ex : Chouly) Tafna (NW-Algérien). Mém. Magister, Univ. Tlemcen, 156 p.

GHERISSI R., BOUANANI A., BABA-HAMED K. Modélisation pluie-débit à l'aide d'un modèle conceptuel globale. Application au bassin d'Oued Lakhdar (Tafna-NW Algérien). 4 p.

KHELIFI S. 2012. Application du modèle hydrologique GR (annule, mensuel et journalier) au bassin versant d'Oued Sikkak (NW- Algérien). Mém. Ing. Univ. Tlemcen, 136 p.

LIU Z. & TODINI E. (2002). Towards a comprehensive physically-based rainfall runoff model. *Hydrology & Earth System Sciences*. 6(5), 859-881.

LAHMER A., CHENNI F. 2000. Etude hydrologique des sous bassins versant de la Tafna « Sebdu (Haute Tafna) Mouilah-Boukiou » recherche d'un Modèle Pluies-Débits. (NW-Algérien). Mém. Ing. Univ. Tlemcen, 120 p.

MAFTAI C.P 2002. Etude concernant les écoulements superficiels, modélisation spatialisée de l'écoulement sur le bassin versant de Voinesti-Roumani, 75 p.

MATHEVET T., (2005). Quels modèles pluie-débit globaux pour le pas de temps horaire ? Développement empirique et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants. Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris), Cemagref (Antony), France, 463 pp.

MEDANE K. 2012. Hydrologie et modélisation pluie-débit. Cas du bassin versant de l'Oued Boumessaoud Tafna (NW-Algérien). Mém. Magister, Univ. Tlemcen, 121 p.

MEKAHLI L. 1988. Le jurassique inférieur et moyen de la partie occidentale du Horst de Rhar-Roubane, (Tlemcen: Algérie occidentale) Stratigraphie Sédimentologie, cadre dynamique Thèse Magistère. Univ. Oran.255p.

MIMOUNI D., MAHBOUBI H. 2014. Etude géologique de l'indice de minéralisation (Djbel Beglen) partie Sud des monts de Ghar-Roubane, Tlemcen, Algérie. Diplôme de Master Academique, Univ. Tlemcen, 67 p.

MORTON F.J., (1983). Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. *Journal of Hydrology* 66 (1/4), 1-76.

MOUELHI S. 2003. Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Cemagref (Antony), France, 323 p.

MOUELHI S., MICHEL, C., PERRIN, C. ET ANDREASSIAN, V., (2006A). Linking stream flow to rainfall at the annual time step: the Manabe bucket model revisited. *Journal of Hydrology* 328, 283-296, doi:10.1016/j.jhydrol.2005.12.022.

MOUELHI S., MICHEL, C., PERRIN, C. ET ANDRÉASSIAN, V., (2006B). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology* 318(1-4), 200-214, doi:10.1016/j.jhydrol.2005.06.014.

NASH, J.E. ET SUTCLIFFE, J.V., (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 27(3), 282-290.

OU DIN L., (2004). Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris) / Cemagref (Antony), 495 pp.

OU DIN L., ANDRÉASSIAN, V., PERRIN, C. ET ANCTIL, F., (2004). Locating the sources of lowpass behaviour within rainfall-runoff models. *Water Resources Research* 40(11), W11101, doi:10.1029/2004WR003291.

OU DIN L., HERVIEU, F., MICHEL, C., PERRIN, C., ANDRÉASSIAN, V., ANCTIL, F. ET LOUMAGNE, C., (2005a). Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient PE model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology* 303(1-4), 290-306.

OU DIN L., MICHEL, C. ET ANCTIL, F., (2005B). Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 1 - Can rainfall-runoff models effectively handle detailed potential evapotranspiration inputs? *Journal of Hydrology* 303(1-4), 275289.

PERRIN C. 2000. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble. Cemagref. Antony), 530 p.

PERRIN C., ANDRÉASSIAN V., MICHEL C. 2007. Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR). Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés, 16 p.

RAHMANI S. 2012. Application du modèle hydrologique GR au bassin versant de la haute Tafna a Beni Bahdel (NW- Algérien). Mém. Ing. Univ. Tlemcen, 111 p.

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

SELADJI S. 2000. Contribution à l'étude hydrologie du bassin versant de l'Oued Khemis. Mém. Ing. Univ. Tlemcen, 100 p.

SINGH, P. (1995). Hydrologic systems, vol. 1 : Rainfall - Runoff modeling.

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

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

ZENNAKI A. 2010. Application du modèle hydrologique GR au bassin versant d'Oued Mouilah (NW- Algérien). Mém. Ing. Univ. Tlemcen, 129 p.

Liste des figures

Fig. 2: Représentation du fonctionnement d'un modèle hydrologique.....	4
Fig. 2 : Organigramme de calibrage et validation des modèles hydrologiques.....	8
Fig.3 : Différentes applications de la modélisation pluie-débit.....	9
Fig.4 : Différentes approches de la modélisation.....	10
Fig. 5: Schéma de la structure GR2M.....	18
Fig.6: Schéma de la structure du GR4J.....	21
Fig.7 : Bassins versants algériens.....	28

Fig. 8: Bassin versant de la Tafna dans l'ensemble Oranie Chott Chergui.....	29
Fig.9 : Situation du bassin de l'Oued Khemis.....	30
Fig.10 : Rectangle équivalent du bassin versant de l'oued Khemis.....	32
Fig.11 : Courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Khemis.....	33
Fig.12 : Histogramme des fréquences altimétriques du bassin d'oued Khemis.....	33
Fig.13 : Réseau hydrographique du bassin versant d'oued Khemis.....	36
Fig.14 : Rapport de confluence.....	37
Fig.15 : Rapport des longueurs.....	38
Fig.16 : Profil en long de l'Oued Khemis.....	39
Fig.17: Unités géographiques des monts de Rhar-Roubane.....	43
Fig.18 : Situation des principales zones de la région de Rhar-Roubane.....	44
Fig. 19 : Colonne stratigraphique des monts de Tlemcen jusqu'aux hautes plaines.....	48
Fig.20 : Rythmes A et B au djebel Koussilet dans le secteur de Khemis.....	49
Fig.21 : Carte structurale de l'Oranie Nord-Occidentale.....	51
Fig.22 : Variation des précipitations annuelles à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011).....	55
Fig.23 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011).....	56
Fig.24 : Histogramme des précipitations saisonnières de la station de Khemis (1980/1981-2010/2011).....	57
Fig.25 : Variation des températures annuelles à la station de Beni Bahdel (1986/1987-2005/2006).....	58
Fig.26 : Variation des températures moyennes mensuelles à la station de Beni Bahdel (1986/1987-2005/2006).....	59
Fig. 27 : Variation de l'ETP Turc et l'ETP Thornthwaite pour la station de Beni Bahdel (1986/1987-2005/2006).....	61
Fig. 28 : Diagramme pluviothermique à la station de Khemis.....	63
Fig. 29 : Abaque de De Martonne.....	64
Fig.30: Climagramme d'Emberger.....	67
Fig.31 : Variation des débits annuels à la station de Khemis (1080/1981-2010/2011).....	69
Fig. 32 : Histogramme des débits mensuels à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011).....	70
Fig.33 : Variation des lames d'eau écoulées annuelles à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011).....	72
Fig. 34 : Histogramme des lames d'eau écoulées mensuelles à la station de Khemis.....	72
Fig.35 : Ajustement graphique des précipitations annuelles à la loi de distribution normale.....	75
Fig.36 : Ajustement graphique des précipitations annuelles à la loi log normale.....	76
Fig.37: Ajustement graphique des lames d'eau écoulées annuelles à la loi log normale de la Station de Khemis (1980/1981-2010/2011).....	79
Fig.38 : Corrélation Pluie-Débit au pas de temps annuel (1986-2004).....	83
Fig. 39 : Corrélation Pluie-Débit au pas de temps mensuel (1986-2004).....	84
Fig. 40: Corrélation Pluie-Débit au pas de temps journalier (1986-2004).....	85
Fig. 41: Visualisation de la qualité du calage.....	87
Fig. 42: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés.....	87
Fig.43: Visualisation de la qualité du calage.....	88
Fig. 44: Corrélation entre les débitsobservés et les débits simulés.....	88
Fig. 45: Validation du modèle GR1A selon l'ETP respectivement de Turc et Thornthwaite.....	89

Fig.46: Visualisation de la qualité du calage.....	90
Fig.47: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés.....	90
Fig.48 : Courbe du niveau S du réservoir de production.....	91
Fig.49 : Courbe du niveau R du réservoir de routage.....	91
Fig. 50: Visualisation de la qualité du calage.....	91
Fig.51: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés.....	91
Fig. 52: Courbe du niveau S du réservoir de production.....	92
Fig.53: Courbe du niveau R du réservoir de routage.....	92
Fig. 54 : Validation du modèle GR2M selon l'ETP respectivement de Turc et Thornthwaite.....	93
Fig. 55: Visualisation de la qualité du calage.....	95
Fig.56: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés.....	95
Fig. 57: Courbe du niveau R du réservoir de Routage.....	95
Fig.58: Courbe du niveau S du réservoir de production.....	95
Fig. 59: Visualisation de la qualité du calage.....	96
Fig.60: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés.....	96
Fig. 61: Courbe du niveau R du réservoir de Routage.....	96
Fig. 62 : Courbe du niveau S du réservoir de production.....	96
Fig.63 : Validation du modèle GR4J selon l'ETP de Oudin (2007).....	97
Fig.64 : Validation du modèle GR4J selon l'ETP de Oudin (2006).....	97

Liste des tableaux

Tableau 1 : Résumé de quelques modèles hydrologiques.....	15
Tableau 2 : Valeur des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants.....	20
Tableau3 : Valeur des paramètres du modèle GR4J obtenues sur un large échantillon de bassins versants.....	25
Tableau 4 : Répartition de la surface en fonction de l'altitude.....	32
Tableau 5 : Classification du relief selon Ds.....	34
Tableau 6: Classification des thalwegs suivant les ordres et rapports caractéristiques.....	36
Tableau 7: Caractéristiques physiques du bassin versant de l'oued Khemis.....	40
Tableau.8 : Log hydrogéologique de la zone d'étude.....	52
Tableau 9: Caractéristiques de la station pluviométrique.....	54

Tableau 10 : Précipitations moyennes annuelles (mm) à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011).....	55
Tableau 11 : Précipitations moyennes mensuelles à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011).....	56
Tableau 12 : Précipitations saisonnières moyennes à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011).....	57
Tableau 13 : Températures moyennes annuelles à la station de Beni Bahdel (1986/1987-2005/2006).....	58
Tableau 14 : Températures moyennes mensuelles, maximales et minimales à la station de Beni Bahdel (1986/1987-2005/2006).....	60
Tableau 15 : Valeur l'ETP par la méthode de Turc à la Beni Bahdel (1986/1987-2005/2006).....	60
Tableau 16 : Valeur l'ETP par la méthode de Thornthwaite à la station de Beni Bahdel (1986/1987-2005/2006).....	61
Tableau 17 : Valeurs des précipitations et températures moyennes mensuelles à la station de Khemis (1986/1987-2005/2006).....	62
Tableau 18 : Indice d'aridité annuel de De Martonne à la station de Khemis.....	63
Tableau 19 : valeurs des indices d'aridité mensuels de De Martonne à la station de Khemis.....	64
Tableau 20 : Indice de moral à la station de Khemis.....	65
Tableau 21 : Valeurs des indices mensuels de Moral à la station de Khemis.....	65
Tableau 22 : Type de climat selon Moral.....	66
Tableau 23 : Indice d'Emberger de la station de Khemis.....	66
Tableau 24 : indice de Stewart de la station de Khemis.....	68
Tableau 25 : Indice de Kerner de la station de Khemis.....	68
Tableau 26 : Débit annuels à la station hydrologique de Khemis (1980/1981-2010/2011).....	69
Tableau 27 : Débit moyens mensuels à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011).....	70
Tableau 28 : lames d'eau écoulées annuelles (mm) à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011).....	71
Tableau 29 : lames d'eau écoulées moyennes mensuelles à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011).....	72
Tableau 30 : Paramètres de position des précipitations à la station Khemis (1980/1981-2010/2011).....	74
Tableau 31 : Calcul du χ^2	75
Tableau 32 : Paramètres de position pour la loi log normale des précipitations à la station Khemis (1980/1981-2010/2011).....	76
Tableau 33 : Calcul du χ^2	77
Tableau 34 : Calcul des précipitations pour une période de récurrence donnée.....	77
Tableau 35 : Paramètres de position des lames d'eau écoulées à la station Khemis (1980/1981-2010/2011).....	78
Tableau 36 : Paramètres de position pour la loi log normale des lames d'eau écoulées à la station Khemis (1980/1981-2010/2011).....	78
Tableau 37: Calcul du χ^2	79
Tableau 38 : Calcul des Lames d'eau écoulées pour une période de récurrence donnée.....	80

Tableau 39: Résultats des différentes corrélations entre les deux paramètres pluie et la lame d'eau écoulée annuelle (1986-2004).....	83
Tableau 40 : Résultats des différentes corrélations entre les pluies et les lames d'eau écoulées mensuelles.....	85
Tableau 41: Résultats des différentes corrélations entre les pluies et la lame d'eau écoulée journalières.....	86
Tableau 42: Représentation des résultats obtenus par l'utilisation de GR1A.....	87
Tableau 43 : Variation des coefficients de corrélation.....	89
Tableau 44 : Représentation des résultats obtenus par l'utilisation de GR2M.....	90
Tableau 45 : Coefficients de corrélation entre les débits simulés et calculés au cours de la validation.....	93
Tableau 46: Résultats du calage au pas de temps journalier (2006 et 2007).....	94
Tableau 47: Résultats du validation au pas de temps journalier (2006 et 2007).....	97
Tableau 48 : Récapitulatif du calage du modèle annuel (ETP de Turc et de Thornthwaite)	98
Tableau 49 : Récapitulatif de la validation du modèle au pas de temps annuel.....	99
Tableau 50 : Récapitulatif du calage du modèle mensuel (ETP de Turc et de Thornthwaite).....	99
Tableau 51 : Récapitulatif de la validation du modèle au pas de temps mensuel.....	100

ANNEXES

ANNEXE I: Données et résultats du modèle GR1A

Année	Pluie (mm)	Débit (mm)	Turc		Thornthwaite	
			ETP (mm)	Débit simulé (mm)	ETP (mm)	Débit simulé (mm)
1992	353,6	70,28	940,72	18,87	850,26	22,69
1993	381,4	22,99	939	21,28	853,28	25,34
1994	488,9	34,59	967,07	37,28	923,6	40,44
1995	713,1	132,3	973,07	97,00	887,49	112,20
1996	315,5	70,86	966,65	22,06	868,76	26,66
1997	327,4	16,62	979,94	12,97	879,04	15,89
1998	114,4	9,3	971,74	1,46	903,41	1,68
1999	130	1,78	985,93	0,80	942,96	0,88
2000	476,3	23,97	990,67	24,00	936,84	26,61
2001	451,3	41,39	1002,58	32,54	956,75	35,37
2002	454,3	23,05	990,73	32,76	909,27	38,14
2003	524,6	60,71	994,88	45,21	965,76	47,61
2004	259,2	35,68	982,1	11,13	929,80	12,33
2005	442	8,34	972,49	24,76	940,76	26,31

Données de validation						
1986	488	78,19	973,26	36,44	906,32	41,33
1987	234,3	6,3	983,45	8,51	919,3	9,67
1988	227,5	32,5	970,32	4,75	893,15	5,58

1989	304,5	38,31	1001,3	8,87	954,25	9,72
1990	460,3	29,62	975,41	28,93	912,03	32,65
1991	649,1	98,84	952,87	79,38	904,38	86,45

ANNEXE II: Données et résultats du modèle GR2M

Mois	Pluie (mm)	Débit (mm)	Turc		Thorntwaite	
			ETP (mm)	Débit simulé (mm)	ETP (mm)	Débit simulé (mm)
janv-92	5,8	2,37	34,28	0,76	15,68	0,27
févr-92	25	1,71	43,66	0,77	22,88	0,37
mars-92	53,9	3,25	52,62	1,52	28,19	1,32
avr-92	73,1	4,86	78,28	3,96	51,54	4,50
mai-92	99,3	23,01	105,86	9,73	84,14	11,26
juin-92	3,9	4,08	112,02	4,1	89,04	3,57
juil-92	0	2,2	134,8	2,01	155,99	1,30
août-92	9,6	1,07	129,23	1,14	167,57	0,57
sept-92	0,8	0,76	99,73	0,68	121,07	0,26
oct-92	14	1,03	68,45	0,44	58,04	0,13
nov-92	38,1	1,81	45,45	0,34	33,62	0,09
déc-92	30,1	2,49	36,34	0,33	22,5	0,09
janv-93	114,3	2,33	34,56	3,48	16,31	2,56
févr-93	94,1	1,87	38,79	13,47	16,75	12,38
mars-93	11	2,36	58,93	6,96	40,23	6,14
avr-93	29,8	1,77	77,14	5,26	49,65	4,96
mai-93	14,2	8,23	102,79	3	76,11	2,58
juin-93	1,6	0,65	120,61	1,58	120,48	1,04
juil-93	28,3	0,5	137,47	1,05	171,41	0,62
août-93	0	0,48	128,04	0,63	160,63	0,28
sept-93	7,1	0,51	93,33	0,41	91,69	0,14
oct-93	5,9	0,63	68,84	0,27	59,78	0,07
nov-93	57,3	1,52	43,46	0,28	29,63	0,08
déc-93	17,8	2,14	35,04	0,25	20,61	0,07
janv-94	23	3,38	33,73	0,28	12,4	0,11
févr-94	32,5	0,4	40,49	0,44	15,57	0,28

mars-94	258,3	46,36	59,42	44,26	36,02	43,73
avr-94	54,6	21	73,85	24,5	37,57	24,57
mai-94	3,6	0,97	109,97	7,84	91,02	6,68
juin-94	4,5	0,63	123,4	3,47	126,61	2,37
juil-94	0,7	0,58	142,62	1,76	203,07	0,93
août-94	2,8	0,38	132,41	1	186,78	0,41
sept-94	17	0,7	95,37	0,62	94,46	0,19
oct-94	60,7	1,7	72,37	0,58	66,18	0,17
nov-94	15,7	1,14	48,18	0,44	36,4	0,11
déc-94	15,5	1,38	35,26	0,35	17,52	0,09
janv-95	125	1,5	34,83	4,21	13,99	3,26
févr-95	135,6	27,36	46,77	25,86	24,96	24,36
mars-95	75	27,3	57,65	26,22	33,17	25,70
avr-95	70,3	24	78,28	22,3	46,96	23,13
mai-95	45,5	11,96	111,65	12,76	98,18	12,54
juin-95	144,8	24,09	121,27	24,59	117,69	24,34
juil-95	28,5	0,32	136,91	9,45	164,13	7,34
août-95	11,8	0,24	128,38	4,06	159,1	2,47
sept-95	13,6	0,53	93,33	2,09	86,63	1,00
oct-95	19,2	0,78	74,07	1,24	73,78	0,47
nov-95	8,7	0,64	49,84	0,76	41,94	0,23
déc-95	35,1	0,86	40,09	0,61	26,96	0,17
janv-96	89,4	1,72	42,84	2,09	27,42	1,16
févr-96	0	3,93	39,65	1,27	15,9	0,65
mars-96	7,4	0,5	64,79	0,89	51,57	0,44
avr-96	91,1	3,62	79,38	3,04	51,1	2,84
mai-96	20,4	3,66	104,76	2,18	77,51	1,88
juin-96	0	7,19	123,4	1,2	129,38	0,76
juil-96	0	0,74	135,58	0,71	157,85	0,34
août-96	10,3	0,49	125,91	0,45	145,78	0,17
sept-96	24	0,89	93,71	0,31	89,89	0,09
oct-96	11,8	0,87	69,62	0,22	58,99	0,05
nov-96	4,7	0,9	47,48	0,15	36,48	0,03
déc-96	56,4	1,39	39,53	0,21	26,89	0,06
janv-97	34,2	1,97	41,79	0,34	23,99	0,15
févr-97	31	1,7	48,32	0,52	27,53	0,32
mars-97	40,3	0,79	61,35	0,92	40,69	0,77
avr-97	16,9	1,61	82,27	0,8	56	0,65
mai-97	22,2	0,81	107,96	0,68	84,79	0,54
juin-97	0	0,53	121,92	0,43	120,19	0,25
juil-97	0	0,42	132,78	0,28	140,7	0,12
août-97	0	0,5	125,91	0,19	143,92	0,06
sept-97	47,3	1,16	98,29	0,16	109,08	0,05
oct-97	23,7	0,72	74,73	0,14	76,22	0,04
nov-97	46,5	1,48	47,65	0,22	35,36	0,07
déc-97	65,3	4,93	36,97	0,91	20,57	0,52
janv-98	31,4	1,29	39,11	1,39	19,37	0,97
févr-98	15,7	1,67	47,66	1,27	26,2	0,95
mars-98	41,9	1,08	59,18	1,88	35,77	1,84
avr-98	0	0,93	77,71	1,09	45,25	0,90
mai-98	0	1,06	102,5	0,66	68,65	0,42
juin-98	0	0,35	124,22	0,42	131	0,20
juil-98	0	0,09	139,26	0,27	178,78	0,10
août-98	0	0,23	130,37	0,18	171,98	0,05
sept-98	8	0,38	99,42	0,13	115,02	0,02
oct-98	0	0,45	71,48	0,09	63,2	0,01
nov-98	10,8	0,69	46,02	0,06	31,17	0,01
déc-98	6,6	1,08	34,81	0,05	17,02	0,00
janv-99	0	2,1	37,66	0,03	15,68	0,00
févr-99	0	2,03	37,3	0,02	11,11	0,00
mars-99	0	31,78	59,67	0,02	34,23	0,00
avr-99	0	3,78	83,52	0,01	55,95	0,00
mai-99	15,7	0,72	114,82	0,01	106,7	0,00
juin-99	0,7	0,58	125,82	0,01	135,93	0,00

juil-99	0	0,33	139,26	0,01	176,17	0,00
août-99	0	0,21	130,7	0,00	171,93	0,00
sept-99	25,1	1,63	98,12	0,00	105,07	0,00
oct-99	19,5	0,86	76,6	0,00	81,77	0,00
nov-99	33,2	1,01	47,65	0,01	32,96	0,00
déc-99	35,8	1,68	34,81	0,05	15,46	0,02
janv-00	135,8	1,74	35,1	5,01	12,62	4,56
févr-00	67,3	1,02	47,66	11,02	24,2	10,84
mars-00	8,6	0,88	61,82	5,62	38,91	5,25
avr-00	9,2	0,81	81,76	3,11	51,4	2,75
mai-00	15,9	0,76	110,46	1,94	89,37	1,61
juin-00	0	0,52	128,09	1,08	148,99	0,66
juil-00	0	0,25	139,96	0,65	181,05	0,3
août-00	0	0,16	131,33	0,41	176,61	0,14
sept-00	61,8	1,42	98,29	0,37	105,91	0,11
oct-00	105,3	9,98	68,65	1,64	50,95	0,81
nov-00	59,5	5,13	46,39	3,25	29,84	2,08
déc-00	12,9	1,3	41,16	2,36	26,99	1,5
janv-01	0,3	7,23	40,93	1,39	19,03	0,82
févr-01	8,2	5,08	45,13	0,97	18,72	0,61
mars-01	28,2	4,52	66,33	0,95	48,6	0,81
avr-01	137,2	1,12	83,52	7,78	53,35	10,05
mai-01	58,2	0,73	107,96	7,92	77,8	9,34
juin-01	0	0,55	129,17	3,35	153,07	2,79
juil-01	0	0,19	139,61	1,71	176,19	1,05
août-01	26,5	0,1	131,17	1,04	173,3	0,5
sept-01	37,4	1,27	99,1	0,74	107,76	0,28
oct-01	32,2	2,18	78,21	0,58	87,66	0,18
nov-01	105,2	16,47	43,67	2,3	22,55	1,09
déc-01	17,9	1,95	37,78	2,01	18,72	1,05
janv-02	175,5	1,86	40,93	1,6	20,96	1,98
févr-02	69,3	1,36	47,66	1,86	24,74	2,71
mars-02	8,6	1,05	61,35	10,22	38,57	9,54
avr-02	52,9	7,03	79,65	9,77	47,28	10,65
mai-02	18,7	3,15	108,98	5,07	85,24	4,97
juin-02	9,9	0,67	127,9	2,59	148,78	2,02
juil-02	0,3	0,21	137,1	1,38	162,67	0,8
août-02	2,8	1,84	126,81	0,81	146,9	0,36
sept-02	1,1	0,3	97,12	0,5	100,77	0,17
oct-02	27,5	3,08	74,24	0,34	71,78	0,09
nov-02	35,3	1,37	47,83	0,28	34,02	0,07
déc-02	52,4	1,13	41,16	0,46	27,56	0,18
janv-03	44,9	18,85	36,66	28,3	13,59	31,32
févr-03	24,6	21,89	40,77	33,6	13,7	34,2
mars-03	108	11,14	63,39	7,31	41,17	8,38
avr-03	22,5	3,37	81,76	4,87	49,63	5,16
mai-03	64,7	1,02	110,46	5,84	87,18	6,78
juin-03	5,4	0,27	130,23	2,8	160,85	2,37
juil-03	0,9	0,13	142,3	1,48	197,35	0,92
août-03	11	0,12	131,17	0,87	173,96	0,41
sept-03	2,6	0,12	99,58	0,54	111,21	0,19
oct-03	68,6	0,28	73,91	0,53	67,81	0,17
nov-03	45,2	0,87	47,48	0,67	31,21	0,24
déc-03	126,2	2,65	37,17	6,95	18,1	5,11
janv-04	18,7	1,6	39,34	5,29	18,28	4,17
févr-04	63,1	1,57	48,32	8,97	25,72	8,94
mars-04	48,1	5,2	58,67	9,25	32,63	10,09
avr-04	11	1,97	80,19	4,71	48,18	4,83
mai-04	0,3	1,28	101,32	2,28	62,68	1,93
juin-04	3,1	0,55	124,83	1,26	131,22	0,84
juil-04	0	0,19	140,13	0,75	182,73	0,37
août-04	0	0,09	131,64	0,47	179,38	0,17
sept-04	0,7	0,09	100,96	0,3	121,68	0,08
oct-04	20	0,16	77,19	0,21	85,26	0,04

nov-04	46,9	0,62	44,47	0,2	26,02	0,04
déc-04	47,3	0,93	35,04	0,36	16,02	0,14

Données de validation

janv-86	105,5	8,4	35,36	38,81	14,35	32,30
févr-86	184,3	80,63	45,37	88,19	22,3	78,65
mars-86	3,2	17,33	57,12	18,47	31,74	16,97
avr-86	7	6,31	86,59	7,46	68,12	6,45
mai-86	6	2,53	106,66	3,52	80,45	2,66
juin-86	0	2,21	121,27	1,78	117,06	1,04
juil-86	0	1,69	138,38	1,01	172,88	0,45
août-86	0	1,42	131,8	0,61	182,28	0,21
sept-86	17,5	1,48	98,29	0,39	108,91	0,10
oct-86	33,8	2,02	69,81	0,29	57,48	0,06
nov-86	92,7	10,03	45,64	0,99	30,28	0,46
déc-86	38	4,69	36,97	1,57	20,47	0,93
janv-87	58,8	4,71	39,57	3,7	19,09	3,08
févr-87	47,8	3,69	41,58	5,57	16,12	5,64
mars-87	3,6	14,48	55,5	3,06	27,56	3,02
avr-87	10,1	5,3	87,48	1,91	69,13	1,75
mai-87	18,9	2,78	109,23	1,32	86,7	1,15
juin-87	7	2,23	125,82	0,81	137,41	0,55
juil-87	0	2,06	137,65	0,5	166,65	0,25
août-87	0	1,48	129,72	0,33	166,12	0,12
sept-87	6,5	1,53	97,46	0,22	102,96	0,06
oct-87	29,5	2,9	74,89	0,16	75,07	0,03
nov-87	31,3	4,48	46,57	0,14	31,23	0,03
déc-87	20,8	4,35	37,98	0,14	21,26	0,03
janv-88	16,7	4,86	40,84	0,14	22,54	0,04
févr-88	24,2	5,36	47,66	0,17	26,59	0,07
mars-88	116,4	4,07	56,32	3,06	30,75	3,16
avr-88	2,7	2,17	82,78	1,77	57,75	1,53
mai-88	6,3	2,07	105,04	1,09	76,33	0,79
juin-88	0	2,12	117,62	0,66	102,74	0,36
juil-88	14,5	1,59	138,01	0,44	171,05	0,20
août-88	7,8	1,39	131,01	0,29	176,91	0,10
sept-88	1,2	1,39	99,26	0,2	114,67	0,05
oct-88	11,5	1,59	73,06	0,14	69,72	0,03
nov-88	13,7	2,15	43,46	0,1	26,09	0,01
déc-88	12,5	3,74	35,26	0,07	18,01	0,01
janv-89	79,1	3,1	36,92	0,34	13,54	0,17
févr-89	4,5	3,26	44,16	0,27	17,38	0,14
mars-89	1,5	9,28	61,35	0,2	35,71	0,09
avr-89	105,4	4,25	79,92	1,86	44,64	2,34
mai-89	33,9	2,29	111,18	1,96	88,88	2,29
juin-89	14,2	2,44	128,82	1,27	150,75	1,16
juil-89	4,1	1,9	140,3	0,76	181,21	0,51
août-89	0,5	1,39	131,33	0,48	174,5	0,23
sept-89	1,2	1,62	98,78	0,31	105,97	0,11
oct-89	0	1,9	75,52	0,21	74,11	0,06
nov-89	28,6	3,04	50,16	0,15	38,09	0,03
déc-89	31,5	3,84	42,86	0,14	29,47	0,03
janv-90	35,5	5,69	33,16	0,19	11,57	0,06
févr-90	53,4	3,81	50	0,61	30,17	0,40
mars-90	177,9	2,72	62,95	18,84	43,62	17,76
avr-90	1,8	4,22	76,27	6,9	41,49	5,96
mai-90	15,3	2,24	106,92	3,76	80,19	3,07
juin-90	5,4	0,98	125,23	1,96	135,18	1,28
juil-90	0,8	0,62	138,01	1,09	169,77	0,54
août-90	0	0,67	128,72	0,66	160,11	0,25

sept-90	19,7	0,8	101,85	0,42	128,75	0,12
oct-90	14,9	0,98	72,2	0,29	64,95	0,06
nov-90	43,9	2,29	46,2	0,27	30,96	0,06
déc-90	91,7	4,6	33,9	1,47	15,27	0,85
janv-91	15,5	4,13	34,83	1,42	14,52	0,90
févr-91	15,5	8,81	38,2	1,3	14,03	0,98
mars-91	130,5	15,32	56,59	11,72	32,08	13,66
avr-91	167,7	55,3	74,46	45,81	40,44	49,96
mai-91	123,6	46,95	102,79	44,92	71,33	46,94
juin-91	17,6	1,47	123,82	12,51	130,73	10,63
juil-91	18,9	0,82	139,79	5,39	183,52	3,75
août-91	25,9	0,4	132,41	2,84	187,8	1,56
sept-91	15,2	0,44	101,19	1,57	126,7	0,67
oct-91	57,5	0,93	68,25	1,32	54,14	0,45
nov-91	35	1,78	45,06	1,18	30,16	0,39
déc-91	26,2	2,85	35,48	1,09	18,93	0,40

ANNEXE III : Données et résultats du modèle GR4J

Date	Pluie (mm)	ETP (mm)	Débit Obs (m ³ /s)	Débit Obs (mm/j)	Qcal
01/09/2006	0	4,81	0,01	0,001	0,033
02/09/2006	0	4,52	0,01	0,001	0,017
03/09/2006	0	4,33	0,01	0,001	0,011
04/09/2006	0	4,43	0,01	0,002	0,009
05/09/2006	0	4,51	0,01	0,002	0,008
06/09/2006	0,3	4,23	0,01	0,002	0,009
07/09/2006	0	3,94	0,01	0,002	0,009
08/09/2006	0	4,07	0,01	0,002	0,009
09/09/2006	0	3,63	0,01	0,002	0,008
10/09/2006	0	3,48	0,01	0,002	0,008
11/09/2006	31,1	3,72	0,01	0,002	0,009
12/09/2006	0	3,98	3,95	0,975	0,02
13/09/2006	23,3	4,02	4,95	1,223	0,082
14/09/2006	10,1	3,79	1,05	0,258	0,37
15/09/2006	0	3,94	0,15	0,038	0,943
16/09/2006	0	4,26	0,1	0,025	1,601
17/09/2006	0	4,17	0,09	0,022	0,394
18/09/2006	0	3,82	0,09	0,022	1
19/09/2006	0	3,77	0,07	0,017	0,104
20/09/2006	1,2	4,33	0,06	0,015	0,039
21/09/2006	0	3,99	0,06	0,015	0,025
22/09/2006	0	3,28	0,04	0,011	0,018
23/09/2006	18,1	3,23	0,02	0,005	0,016
24/09/2006	0	3,23	0,02	0,005	0,022
25/09/2006	0	3,22	0,02	0,005	0,043
26/09/2006	0	3,57	0,02	0,005	0,098
27/09/2006	0	3,47	0,02	0,005	0,205
28/09/2006	0	3,66	0,02	0,005	0,334

29/09/2006	0	3,12	0,02	0,005	0,038
30/09/2006	0	3,37	0,02	0,005	0,022
01/10/2006	0	3,32	0,02	0,005	0,015
02/10/2006	0	3,28	0,02	0,005	0,011
03/10/2006	0	2,99	0,02	0,005	0,009
04/10/2006	0	2,83	0,02	0,004	0,008
05/10/2006	0	2,88	0,02	0,005	0,006
06/10/2006	0	2,98	0,02	0,005	0,006
07/10/2006	0	2,95	0,02	0,004	0,005
08/10/2006	0	3,02	0,02	0,005	0,004
09/10/2006	0	3	0,02	0,005	0,004
10/10/2006	0	3	0,02	0,005	0,003
11/10/2006	0	2,79	0,02	0,005	0,003
12/10/2006	0	2,47	0,02	0,005	0,003
13/10/2006	0	2,54	0,02	0,005	0,002
14/10/2006	0	2,93	0,02	0,005	0,002
15/10/2006	0	2,55	0,02	0,005	0,002
16/10/2006	0	2,54	0,02	0,005	0,002
17/10/2006	0	2,63	0,02	0,005	0,002
18/10/2006	9,1	2,36	0,02	0,005	0,002
19/10/2006	0,1	2,37	0,02	0,005	0,002
20/10/2006	0	2,28	0,03	0,006	0,002
21/10/2006	0	2,12	0,03	0,006	0,004
22/10/2006	0	2,3	0,03	0,006	0,006
23/10/2006	0	2,26	0,03	0,006	0,012
24/10/2006	0	2,27	0,03	0,006	0,008
25/10/2006	0	1,92	0,03	0,006	0,006
26/10/2006	14,3	1,85	0,03	0,006	0,005
27/10/2006	8,1	1,95	0,08	0,02	0,005
28/10/2006	0	1,78	0,06	0,015	0,009
29/10/2006	0	1,75	0,06	0,015	0,018
30/10/2006	0	1,88	0,06	0,015	0,043
31/10/2006	0	1,57	0,05	0,013	0,095
01/11/2006	0,1	1,56	0,05	0,013	0,056
02/11/2006	2,3	1,76	0,03	0,006	0,023
03/11/2006	0	1,76	0,03	0,008	0,014
04/11/2006	0	1,79	0,04	0,011	0,01
05/11/2006	1,1	1,83	0,04	0,011	0,007
06/11/2006	0,4	1,79	0,04	0,011	0,006
07/11/2006	7,3	1,59	0,05	0,013	0,005
08/11/2006	0	1,65	0,05	0,013	0,005
09/11/2006	0	1,65	0,05	0,013	0,005
10/11/2006	0	1,53	0,05	0,013	0,007
11/11/2006	0	1,47	0,07	0,017	0,01
12/11/2006	0	1,65	0,07	0,017	0,015
13/11/2006	0	1,61	0,05	0,013	0,01

14/11/2006	0	1,53	0,05	0,013	0,007
15/11/2006	0	1,36	0,05	0,013	0,006
16/11/2006	0	1,47	0,05	0,013	0,005
17/11/2006	0	1,37	0,05	0,013	0,004
18/11/2006	0	1,59	0,05	0,013	0,003
19/11/2006	0	1,81	0,07	0,017	0,003
20/11/2006	0	1,78	0,07	0,017	0,002
21/11/2006	0	1,74	0,07	0,017	0,002
22/11/2006	0	1,59	0,07	0,017	0,002
23/11/2006	0	1,38	0,07	0,017	0,002
24/11/2006	0	1,38	0,07	0,017	0,001
25/11/2006	0	1,11	0,07	0,017	0,001
26/11/2006	0	1,15	0,07	0,017	0,001
27/11/2006	0	1,06	0,07	0,017	0,001
28/11/2006	0	1,09	0,08	0,02	0,001
29/11/2006	0	1,02	0,08	0,02	0,001
30/11/2006	0	1,31	0,08	0,02	0,001
01/12/2006	0	1,13	0,08	0,02	0,001
02/12/2006	10,2	1,14	0,08	0,02	0,001
03/12/2006	5,2	1,1	0,09	0,022	0,001
04/12/2006	0	1,09	0,09	0,022	0,002
05/12/2006	3,1	1,16	0,09	0,022	0,003
06/12/2006	2,3	1,14	0,12	0,03	0,008
07/12/2006	0	1,18	0,14	0,034	0,022
08/12/2006	0	1,25	0,12	0,03	0,023
09/12/2006	0	1,34	0,11	0,027	0,017
10/12/2006	0,1	1,28	0,11	0,027	0,015
11/12/2006	0	1,01	0,12	0,03	0,011
12/12/2006	12,3	0,98	0,12	0,03	0,008
13/12/2006	10,4	0,92	0,14	0,034	0,008
14/12/2006	3,4	0,83	0,12	0,03	0,012
15/12/2006	1,1	0,82	0,12	0,03	0,027
16/12/2006	0	0,67	0,14	0,034	0,07
17/12/2006	0	0,67	0,14	0,034	0,158
18/12/2006	0	1,08	0,14	0,034	0,111
19/12/2006	8,4	1,19	0,12	0,03	0,046
20/12/2006	0	1,34	0,15	0,038	0,026
21/12/2006	0	1,31	0,14	0,034	0,022
22/12/2006	1,1	1,16	0,14	0,034	0,024
23/12/2006	0	1,08	0,14	0,034	0,033
24/12/2006	0	1,03	0,14	0,034	0,049
25/12/2006	0	1,05	0,14	0,034	0,023
26/12/2006	0	1,03	0,14	0,034	0,014
27/12/2006	0	1,02	0,14	0,034	0,01
28/12/2006	0	0,86	0,14	0,034	0,008
29/12/2006	0	0,81	0,14	0,034	0,006

30/12/2006	0	0,76	0,14	0,034	0,005
31/12/2006	0	0,79	0,14	0,034	0,004
01/01/2007	0	1,04	0,14	0,034	0,004
02/01/2007	0	1,14	0,14	0,034	0,003
03/01/2007	0	1,08	0,12	0,03	0,003
04/01/2007	0	0,02	0,12	0,03	0,003
05/01/2007	0	1,25	0,14	0,034	0,002
06/01/2007	0	1,27	0,12	0,03	0,002
07/01/2007	0	1,27	0,12	0,03	0,002
08/01/2007	0	1,36	0,12	0,03	0,002
09/01/2007	0	1,13	0,11	0,027	0,002
10/01/2007	0	1,11	0,11	0,027	0,002
11/01/2007	0	1	0,12	0,03	0,002
12/01/2007	0	1,33	0,12	0,03	0,002
13/01/2007	0	1,26	0,12	0,03	0,001
14/01/2007	0	1,53	0,12	0,03	0,001
15/01/2007	0	1,36	0,14	0,034	0,001
16/01/2007	0	1,38	0,12	0,03	0,001
17/01/2007	0	1,17	0,12	0,03	0,001
18/01/2007	0	1,01	0,12	0,03	0,001
19/01/2007	0	1,12	0,12	0,03	0,001
20/01/2007	0	1,15	0,12	0,03	0,001
21/01/2007	0	1,09	0,12	0,03	0,001
22/01/2007	0	1,02	0,12	0,03	0,001
23/01/2007	0	0,79	0,12	0,03	0,001
24/01/2007	0	0,93	0,14	0,034	0,001
25/01/2007	0	1,16	0,14	0,034	0,001
26/01/2007	1,2	1,52	0,14	0,034	0,001
27/01/2007	0	1,32	0,14	0,034	0,001
28/01/2007	0	1,29	0,14	0,034	0,001
29/01/2007	15,4	1,17	0,15	0,038	0,001
30/01/2007	0,2	1,24	0,17	0,041	0,001
31/01/2007	0	0,89	0,17	0,041	0,002
01/02/2007	0	0,88	0,15	0,038	0,006
02/02/2007	0	0,9	0,14	0,034	0,019
03/02/2007	4,1	0,95	0,15	0,038	0,05
04/02/2007	7,4	1	0,17	0,041	0,024
05/02/2007	0	1,18	0,15	0,038	0,018
06/02/2007	0,3	1,17	0,15	0,038	0,019
07/02/2007	0	1,24	0,15	0,038	0,024
08/02/2007	4,3	1,19	0,12	0,03	0,038
09/02/2007	0	1,2	0,15	0,038	0,043
10/02/2007	0	1,3	0,15	0,038	0,023
11/02/2007	0	1,3	0,15	0,038	0,017
12/02/2007	0	1,26	0,15	0,038	0,016
13/02/2007	0	1,3	0,15	0,038	0,017

14/02/2007	0	1,38	0,14	0,034	0,011
15/02/2007	0	1,6	0,14	0,034	0,008
16/02/2007	0	1,59	0,12	0,03	0,006
17/02/2007	0	1,28	0,12	0,03	0,005
18/02/2007	0	1,55	0,12	0,03	0,004
19/02/2007	1,1	1,55	0,11	0,027	0,003
20/02/2007	16,3	1,55	0,12	0,03	0,003
21/02/2007	4,1	1,67	0,12	0,03	0,004
22/02/2007	0	1,8	0,12	0,03	0,009
23/02/2007	0	1,73	0,15	0,038	0,022
24/02/2007	0	1,8	0,11	0,027	0,061
25/02/2007	0	1,69	0,11	0,027	0,133
26/02/2007	0	1,86	0,11	0,027	0,045
27/02/2007	0	1,83	0,11	0,027	0,021
28/02/2007	0	1,54	0,11	0,027	0,013
01/03/2007	0	0,67	0,1	0,025	0,009
02/03/2007	0	1,26	0,1	0,025	0,007
03/03/2007	0	1,3	0,1	0,025	0,006
04/03/2007	0	1,26	0,09	0,022	0,005
05/03/2007	0	1,52	0,08	0,02	0,004
06/03/2007	0	1,93	0,08	0,02	0,003
07/03/2007	0	1,89	0,08	0,02	0,003
08/03/2007	0	1,84	0,08	0,02	0,003
09/03/2007	0	2,27	0,08	0,02	0,002
10/03/2007	0	2,32	0,08	0,02	0,002
11/03/2007	3,2	2,15	0,08	0,02	0,002
12/03/2007	0	2,66	0,08	0,02	0,002
13/03/2007	0	2,48	0,08	0,02	0,002
14/03/2007	0	2,78	0,08	0,02	0,002
15/03/2007	0	3,19	0,08	0,02	0,002
16/03/2007	0	2,53	0,08	0,02	0,002
17/03/2007	0	2,61	0,07	0,017	0,002
18/03/2007	0	2,53	0,07	0,017	0,002
19/03/2007	1,1	1,93	0,07	0,017	0,001
20/03/2007	0	2,09	0,07	0,017	0,001
21/03/2007	1,2	2,36	0,07	0,017	0,001
22/03/2007	7,4	2,12	0,08	0,02	0,001
23/03/2007	0	2,01	0,08	0,02	0,001
24/03/2007	0	2,55	0,07	0,017	0,001
25/03/2007	0	2,69	0,08	0,02	0,002
26/03/2007	14,4	2,96	0,11	0,027	0,003
27/03/2007	10,2	3,09	0,35	0,087	0,006
28/03/2007	7,1	2,68	0,2	0,05	0,008
29/03/2007	0,3	2,71	0,15	0,038	0,017
30/03/2007	0	2,64	0,12	0,03	0,041
31/03/2007	0	2,87	0,11	0,027	0,095

01/04/2007	0,1	2,97	0,11	0,027	0,077
02/04/2007	0	3,21	0,11	0,027	0,043
03/04/2007	0,2	3,23	0,11	0,027	0,02
04/04/2007	17,4	2,89	0,3	0,073	0,013
05/04/2007	5,2	2,91	0,15	0,038	0,012
06/04/2007	3,5	3	0,14	0,034	0,016
07/04/2007	1,2	3,32	0,14	0,034	0,029
08/04/2007	1,1	3,24	0,12	0,03	0,059
09/04/2007	0	2,98	0,12	0,03	0,113
10/04/2007	0	3,06	0,11	0,027	0,043
11/04/2007	2,6	3,34	0,11	0,027	0,022
12/04/2007	6,3	3,2	0,12	0,03	0,013
13/04/2007	0	2,95	0,12	0,03	0,01
14/04/2007	0	3,13	0,12	0,03	0,008
15/04/2007	0	2,66	0,12	0,03	0,008
16/04/2007	0	2,74	0,12	0,03	0,009
17/04/2007	1,3	3,25	0,12	0,03	0,01
18/04/2007	48,3	3,45	4,38	1,082	0,01
19/04/2007	0	3,03	0,59	0,146	0,022
20/04/2007	8,1	3,03	0,2	0,049	0,093
21/04/2007	15,9	2,74	0,67	0,166	0,363
22/04/2007	9,4	3,57	14,57	3,598	0,86
23/04/2007	9,3	2,95	2,24	0,552	1,472
24/04/2007	0	3,49	0,97	0,24	0,163
25/04/2007	0	4,14	0,53	0,131	0,559
26/04/2007	3,1	3,87	0,42	0,104	0,59
27/04/2007	2,1	3,99	0,42	0,104	0,219
28/04/2007	1,9	3,41	0,42	0,104	0,143
29/04/2007	0	3,13	0,7	0,173	0,04
30/04/2007	0	3,79	0,42	0,104	0,024
01/05/2007	0	2,95	0,3	0,074	0,018
02/05/2007	0	2,86	0,35	0,086	0,014
03/05/2007	0	2,95	0,3	0,074	0,012
04/05/2007	0	2,85	0,3	0,074	0,01
05/05/2007	1,1	2,61	0,28	0,069	0,009
06/05/2007	0	3,21	0,48	0,118	0,008
07/05/2007	0	3,34	0,74	0,183	0,007
08/05/2007	0	3,45	0,35	0,086	0,006
09/05/2007	0	3,54	0,3	0,074	0,005
10/05/2007	0	3,13	0,28	0,069	0,005
11/05/2007	0	3,06	0,28	0,069	0,004
12/05/2007	0	3,45	0,24	0,059	0,004
13/05/2007	0	3,98	0,22	0,054	0,004
14/05/2007	0	4,07	0,22	0,054	0,003
15/05/2007	0	4,09	0,2	0,049	0,003
16/05/2007	0	4,13	0,17	0,041	0,003

17/05/2007	0	4,67	0,15	0,038	0,002
18/05/2007	0	4,75	0,11	0,027	0,002
19/05/2007	0	4,47	0,1	0,025	0,002
20/05/2007	0	3,23	0,08	0,02	0,002
21/05/2007	0	3,45	0,08	0,02	0,002
22/05/2007	0	3,88	0,08	0,02	0,002
23/05/2007	0	4,29	0,07	0,017	0,001
24/05/2007	0	4,32	0,07	0,017	0,001
25/05/2007	0	4,48	0,06	0,015	0,001
26/05/2007	0	4,63	0,04	0,011	0,001
27/05/2007	0	5,03	0,04	0,011	0,001
28/05/2007	0	4,99	0,08	0,02	0,001
29/05/2007	0	5,52	0,08	0,02	0,001
30/05/2007	0	4,8	0,08	0,02	0,001
31/05/2007	0	4,85	0,08	0,02	0,001
01/06/2007	0	5,04	0,05	0,013	0,001
02/06/2007	0	4,94	0,05	0,013	0,001
03/06/2007	0	5,06	0,05	0,013	0,001
04/06/2007	0	5,38	0,04	0,011	0,001
05/06/2007	0	5,52	0,04	0,011	0
06/06/2007	0	6,02	0,04	0,011	0
07/06/2007	0	5,78	0,03	0,008	0
08/06/2007	0	5,62	0,03	0,008	0
09/06/2007	0	6,09	0,03	0,008	0
10/06/2007	0	5,65	0,03	0,008	0
11/06/2007	0	4,85	0,03	0,006	0
12/06/2007	0	4,55	0,03	0,006	0
13/06/2007	0	3,84	0,03	0,006	0
14/06/2007	0	4,59	0,03	0,008	0
15/06/2007	0	5,55	0,02	0,005	0
16/06/2007	0	5,54	0,03	0,006	0
17/06/2007	0	5,07	0,03	0,008	0
18/06/2007	0	4,95	0,03	0,008	0
19/06/2007	0	5,14	0,03	0,008	0
20/06/2007	0	5,27	0,03	0,008	0
21/06/2007	0	5,03	0,03	0,008	0
22/06/2007	0	5,13	0,03	0,006	0
23/06/2007	0	5,82	0,03	0,006	0
24/06/2007	0	6,4	0,03	0,006	0
25/06/2007	0	6,74	0,03	0,008	0
26/06/2007	0	6,31	0,03	0,008	0
27/06/2007	0	6,14	0,03	0,006	0
28/06/2007	0	5,29	0,03	0,008	0
29/06/2007	0	5,01	0,03	0,006	0
30/06/2007	0	5,49	0,03	0,006	0
01/07/2007	0,00	5,29	0,03	0,008	0,036

02/07/2007	0,00	5,41	0,03	0,006	0,034
03/07/2007	0,00	5,55	0,03	0,006	0,030
04/07/2007	0,00	5,39	0,03	0,006	0,026
05/07/2007	0,00	5,58	0,03	0,006	0,021
06/07/2007	0,00	5,38	0,02	0,005	0,018
07/07/2007	0,00	4,86	0,02	0,005	0,015
08/07/2007	0,00	5,16	0,03	0,006	0,012
09/07/2007	0,00	5,18	0,03	0,006	0,011
10/07/2007	0,00	5,09	0,03	0,006	0,009
11/07/2007	0,00	4,48	0,03	0,006	0,008
12/07/2007	0,00	5,80	0,03	0,006	0,007
13/07/2007	0,00	6,32	0,02	0,005	0,006
14/07/2007	0,00	6,08	0,02	0,005	0,005
15/07/2007	0,00	5,61	0,02	0,005	0,005
16/07/2007	0,00	5,47	0,02	0,004	0,004
17/07/2007	0,00	5,34	0,02	0,004	0,004
18/07/2007	0,00	5,47	0,01	0,003	0,003
19/07/2007	0,00	5,45	0,01	0,002	0,003
20/07/2007	0,00	4,90	0,02	0,004	0,003
21/07/2007	0,00	5,21	0,02	0,004	0,003
22/07/2007	0,00	5,33	0,01	0,003	0,002
23/07/2007	0,00	6,07	0,02	0,004	0,002
24/07/2007	0,00	6,41	0,01	0,003	0,002
25/07/2007	0,00	5,86	0,01	0,003	0,002
26/07/2007	0,00	5,20	0,02	0,004	0,002
27/07/2007	0,00	5,40	0,02	0,004	0,002
28/07/2007	0,00	5,47	0,01	0,003	0,002

29/07/2007	0,00	5,52	0,01	0,003	0,002
30/07/2007	0,00	5,82	0,01	0,002	0,001
31/07/2007	0,00	6,25	0,01	0,003	0,001
01/08/2007	0,00	6,66	0,01	0,003	0,001
02/08/2007	0,00	6,32	0,01	0,003	0,001
03/08/2007	0,00	5,82	0,01	0,003	0,001
04/08/2007	0,00	5,63	0,01	0,003	0,001
05/08/2007	0,00	5,42	0,01	0,003	0,001
06/08/2007	0,00	5,33	0,01	0,003	0,001
07/08/2007	0,00	5,28	0,01	0,003	0,001
08/08/2007	0,00	5,52	0,01	0,003	0,001
09/08/2007	0,00	5,69	0,01	0,002	0,001
10/08/2007	0,00	5,74	0,01	0,002	0,001
11/08/2007	0,00	5,62	0,01	0,002	0,001
12/08/2007	0,30	5,33	0,01	0,001	0,001
13/08/2007	0,00	5,13	0,01	0,002	0,001
14/08/2007	0,00	5,53	0,01	0,002	0,001
15/08/2007	0,00	5,69	0,01	0,002	0,001
16/08/2007	0,00	5,70	0,01	0,001	0,001
17/08/2007	0,00	4,99	0,01	0,002	0,001
18/08/2007	0,00	4,67	0,01	0,002	0,001
19/08/2007	0,00	4,66	0,01	0,002	0,001
20/08/2007	0,00	4,85	0,01	0,002	0,001
21/08/2007	0,00	5,05	0,01	0,001	0,001
22/08/2007	0,00	5,10	0,01	0,001	0,001
23/08/2007	0,00	5,05	0,01	0,002	0,001
24/08/2007	0,00	5,09	0,01	0,002	0,001
25/08/2007	0,00	5,89	0,01	0,001	0,001

26/08/2007	0,00	5,44	0,01	0,001	0,001
27/08/2007	0,00	4,94	0,01	0,001	0,000
28/08/2007	0,00	5,00	0,01	0,002	0,000
29/08/2007	0,00	4,64	0,01	0,002	0,000
30/08/2007	0,00	4,70	0,01	0,002	0,000
31/08/2007	0,00	4,52	0,01	0,001	0,000
01/09/2007	0,00	4,37	0,00	0,001	0,000
02/09/2007	0,00	4,35	0,01	0,002	0,000
03/09/2007	0,00	3,95	0,01	0,001	0,000
04/09/2007	0,00	4,04	0,01	0,001	0,000
05/09/2007	0,00	3,99	0,01	0,001	0,000
06/09/2007	0,00	4,05	0,01	0,002	0,000
07/09/2007	0,00	4,22	0,01	0,001	0,000
08/09/2007	0,00	4,07	0,01	0,002	0,000
09/09/2007	5,30	4,62	0,01	0,002	0,000
10/09/2007	0,00	4,79	0,02	0,005	0,000
11/09/2007	0,00	4,62	0,02	0,004	0,000
12/09/2007	0,00	4,62	0,02	0,004	0,000
13/09/2007	0,00	4,49	0,02	0,005	0,000
14/09/2007	0,00	4,33	0,02	0,005	0,000
15/09/2007	1,20	2,89	0,01	0,003	0,000
16/09/2007	0,00	3,67	0,02	0,005	0,000
17/09/2007	0,00	3,78	0,01	0,003	0,000
18/09/2007	0,20	3,66	0,01	0,003	0,000
19/09/2007	0,00	3,666	0,01	0,003	0,000
20/09/2007	0,10	3,65	0,01	0,003	0,000
21/09/2007	0,30	3,70	0,01	0,003	0,000
22/09/2007	0,00	3,59	0,01	0,003	0,000

23/09/2007	0,00	3,77	0,02	0,004	0,000
24/09/2007	0,00	3,86	0,01	0,003	0,000
25/09/2007	0,00	3,73	0,01	0,003	0,000
26/09/2007	0,00	3,27	0,02	0,004	0,000
27/09/2007	0,00	3,47	0,01	0,003	0,000
28/09/2007	5,40	3,14	0,01	0,003	0,000
29/09/2007	0,00	3,23	0,02	0,004	0,000
30/09/2007	0,00	3,10	0,02	0,005	0,000
01/10/2007	0,00	3,18	0,02	0,004	0,000
02/10/2007	8,40	3,10	0,02	0,005	0,000
03/10/2007	10,30	3,21	0,02	0,005	0,002
04/10/2007	0,00	3,26	0,10	0,025	0,004
05/10/2007	0,00	3,38	0,07	0,017	0,001
06/10/2007	0,00	3,64	0,03	0,008	0,001
07/10/2007	0,00	3,32	0,03	0,006	0,001
08/10/2007	0,00	3,79	0,03	0,006	0,001
09/10/2007	0,00	3,59	0,03	0,006	0,001
10/10/2007	0,00	3,19	0,02	0,005	0,001
11/10/2007	0,00	2,70	0,02	0,005	0,001
12/10/2007	0,00	2,42	0,03	0,006	0,001
13/10/2007	0,00	2,35	0,02	0,005	0,001
14/10/2007	0,00	2,60	0,02	0,005	0,001
15/10/2007	17,40	2,53	0,02	0,005	0,006
16/10/2007	1,20	2,34	0,15	0,037	0,026
17/10/2007	0,10	2,35	0,26	0,065	0,009
18/10/2007	10,30	2,38	0,18	0,045	0,022
19/10/2007	4,10	2,70	0,11	0,027	0,091
20/10/2007	0,00	2,78	0,08	0,020	0,058

21/10/2007	0,00	3,09	0,06	0,015	0,035
22/10/2007	0,00	3,91	0,05	0,013	0,024
23/10/2007	0,00	2,81	0,04	0,011	0,018
24/10/2007	5,10	3,18	0,04	0,011	0,018
25/10/2007	0,00	3,15	0,04	0,011	0,022
26/10/2007	3,20	2,98	0,05	0,013	0,017
27/10/2007	0,10	2,18	0,05	0,013	0,014
28/10/2007	7,50	2,56	0,06	0,015	0,023
29/10/2007	4,10	2,16	0,08	0,020	0,069
30/10/2007	1,30	2,08	0,08	0,020	0,059
31/10/2007	2,10	1,80	0,08	0,020	0,037
01/11/2007	0,00	1,81	0,08	0,020	0,027
02/11/2007	0,00	1,71	0,08	0,020	0,020
03/11/2007	0,00	1,83	0,07	0,017	0,015
04/11/2007	0,00	1,74	0,06	0,015	0,012
05/11/2007	0,00	1,84	0,05	0,013	0,010
06/11/2007	0,00	1,96	0,05	0,013	0,008
07/11/2007	0,00	2,04	0,05	0,013	0,007
08/11/2007	0,00	1,84	0,05	0,013	0,006
09/11/2007	0,00	1,83	0,05	0,013	0,006
10/11/2007	0,00	1,84	0,05	0,013	0,005
11/11/2007	0,00	1,47	0,06	0,015	0,004
12/11/2007	0,00	1,23	0,05	0,013	0,004
13/11/2007	0,00	1,36	0,05	0,013	0,004
14/11/2007	0,00	1,51	0,05	0,013	0,003
15/11/2007	0,00	1,50	0,05	0,013	0,003
16/11/2007	0,00	1,36	0,05	0,013	0,003
17/11/2007	0,00	1,42	0,06	0,015	0,003

18/11/2007	0,00	1,26	0,05	0,013	0,002
19/11/2007	0,00	1,38	0,05	0,013	0,002
20/11/2007	0,00	1,37	0,05	0,013	0,002
21/11/2007	0,10	1,20	0,06	0,015	0,002
22/11/2007	3,10	1,39	0,06	0,015	0,002
23/11/2007	0,00	1,38	0,05	0,013	0,003
24/11/2007	1,20	1,41	0,06	0,015	0,003
25/11/2007	2,40	1,42	0,06	0,015	0,003
26/11/2007	14,20	1,41	0,08	0,020	0,037
27/11/2007	3,20	1,29	1,10	0,273	0,230
28/11/2007	0,00	1,26	0,17	0,041	0,110
29/11/2007	0,00	1,33	0,11	0,027	0,052
30/11/2007	0,00	1,44	0,30	0,074	0,032
01/12/2007	0,00	1,45	0,11	0,027	0,023
02/12/2007	0,00	1,38	0,10	0,025	0,017
03/12/2007	0,00	1,49	0,09	0,022	0,014
04/12/2007	0,00	1,26	0,10	0,025	0,011
05/12/2007	0,00	1,22	0,11	0,027	0,009
06/12/2007	0,00	1,16	0,10	0,025	0,008
07/12/2007	0,00	1,29	0,10	0,025	0,007
08/12/2007	0,00	1,08	0,11	0,027	0,006
09/12/2007	0,00	1,05	0,11	0,027	0,005
10/12/2007	0,00	1,17	0,11	0,027	0,005
11/12/2007	0,00	1,02	0,11	0,027	0,004
12/12/2007	0,00	1,15	0,10	0,025	0,004
13/12/2007	0,00	1,27	0,10	0,025	0,004
14/12/2007	0,00	1,27	0,11	0,027	0,003
15/12/2007	0,00	1,19	0,11	0,027	0,003

16/12/2007	0,00	1,19	0,11	0,027	0,003
17/12/2007	0,00	1,22	0,11	0,027	0,003
18/12/2007	0,00	1,16	0,11	0,027	0,002
19/12/2007	0,00	1,40	0,11	0,027	0,002
20/12/2007	0,00	1,64	0,11	0,027	0,002
21/12/2007	0,00	1,14	0,11	0,027	0,002
22/12/2007	0,00	1,04	0,11	0,027	0,002
23/12/2007	0,20	1,03	0,11	0,027	0,002
24/12/2007	4,40	1,15	0,11	0,027	0,003
25/12/2007	0,00	1,12	0,17	0,041	0,010
26/12/2007	0,00	0,90	0,12	0,030	0,005
27/12/2007	0,00	0,69	0,12	0,030	0,005
28/12/2007	0,00	0,72	0,11	0,027	0,004
29/12/2007	0,00	0,80	0,11	0,027	0,004
30/12/2007	0,00	0,91	0,11	0,027	0,003
31/12/2007	0,00	0,87	0,11	0,027	0,003

الملخص: إن مشاكل تقدير الفيضانات تمثل مصدر قلق كبير لتقنيي الهياكل الهيدروتقنية هذا هو السبب في أننا حاولنا في هذا العمل تطبيق نماذج المطر-التدفق باستخدام نموذج للهندسة الزراعية "GR" في مستجمع المياه من واد خميس مختلفة الوقت (سنوية وشهرية ويومية).

في البداية، حاولنا استخدام نموذجين مختلفين إلى حد ما: النوع الأول التجريبية من الصندوق الأسود كما انقضى الشرائح المياه $f =$ (المطر)، حيث يتم تحديد من الانحدار التي أجريت على المزمّن الأمطار التقريغ. ويمثله النموذج المفاهيمي العام للهندسة الريفية الأخرى.

نتيجة البحث التي حصل عليها محاكاة لسرعة المعالجة في المطر عن طريق استخدام نماذج الهندسة الزراعية، GR1A، GR2M و GR4J مرضية أكثر من نموذج العلاقات الرياضية البسيطة.

في الواقع نموذج GR يأخذ بعين الاعتبار خلافاً زمنياً من الظواهر من جهة، وتأثير العوامل المناخية وكذلك (التبخّر) من الفيزيائية الهيدرولوجية مستجمعات المياه (رطوبة التربة والتبادلات الخارجية).

الكلمات المفتاحية: تافنة، واد خميس، ارتباط، نماذج مطر-تدفق، نموذج الهندسة الزراعية.

Résumé : Les problèmes d'estimation des crues représentent un souci majeur aux techniciens chargés du dimensionnement des ouvrages hydrotechniques.

C'est pour cela que 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 « GR » dans le bassin versant de l'Oued Khemis aux différentes pas de temps (annuel, mensuel et journalier).

Dans un premier temps, nous avons essayé deux approches assez différentes : une empirique de type boîte noire sous la forme *lames d'eau écoulées = f (pluie)* où f est déterminée par une régression effectuée sur les chroniques pluies-débits. L'autre conceptuelle globale représentée par le modèle du Génie Rural (GR).

Les résultats obtenus par la simulation de la transformation de la pluie en débit par l'utilisation des modèles du Génie Rural GR1A, GR2M et GR4J sont plus satisfaisants que la modélisation par approche corrélatrice.

En effet le modèle GR prend en compte la succession chronologique des phénomènes d'une part et l'influence des paramètres aussi bien climatiques (évapotranspiration) que celle physico-hydrogéologiques du bassin versant (humidité du sol et échanges externes).

Mots clés : Tafna- Oued Khemis – Corrélation - Modélisation pluie-débit - Modèle GR .

Abstract : The flood estimation problems represent a major concern for technicians to dimensionnement of engineering structures.

That is why we have tried in this work the application of modeling rain-flow using a global model tank: the model of Agricultural Engineering "GR" in the watershed of Khemis River no different to time (annual, monthly and daily).

At first, we tried two rather different approaches: an empirical kind of black box as water slides elapsed = *f (rain)*, where f is determined by a regression performed on chronic rainfall-discharge. The other represented by the overall conceptual model of Rural Engineering.

Search result obtained by the simulation of the processing speed in the rain by the use of models of Agricultural Engineering GR1A, GR2M and GR4J are more satisfactory than the modeling approach corrélatrice.

Indeed the GR model takes into account the chronological succession of phenomena on one hand and the influence of climatic parameters as well (evapotranspiration) than physico-hydrogeological catchment (soil moisture and external exchanges).

Key words: Tafna, Khemis river , correlation, rain-flow modeling, model GR.