

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCCEN

N° d'ordre : /DSTU/

**FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
ET DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS**

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

**LABORATOIRE RESSOURCES HYDRIQUES, MINIERES ET PEDOLOGIQUES :
CHOIX TECHNOLOGIQUE ET LEGISLATION DE L'ENVIRONNEMENT**

MEMOIRE DE MAGISTER

Option

Ressources en eau dans leur environnement

Présenté par :

Radia GHERISSI

**HYDROLOGIE ET MODELISATION PLUIE-DEBIT :
CAS DU BASSIN VERSANT DE L'OUED LAKHDAR (EX : CHOULY)
TAFNA-NW ALGERIEN**

Soutenu le / /2012 devant les membres du jury :

Mme AZZOUNI A.	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mr BOUANANI A.	Professeur	Univ. Tlemcen	Encadreur
Mr HAYANE S.M.	Maître de conférences A	Univ. Oran	Examineur
Mr MEGNOUNIF A.	Maître de conférences A	Univ. Tlemcen	Examineur
Mme BABA-HAMED K.	Maître de conférences B	Univ. Tlemcen	Invité

المخلص

إن الحوض الهيدرولوجي لودي الأخضر (170 كلم²)، كان موضوع اهتمام لدراسة العلاقة الموجودة بين التساقط و التدفق باستعمال نموذج الهندسة الريفية.

في البداية، سعينا لتحديد خصائص عدة عوامل مادية، و الظروف الجيولوجية و المناخية التي تتحكم في التدفق. ثم استخدمت الدراسة الهيدرولوجية علي أساس معالجة البيانات الهيدرومترية لمدة 40 عاما. المرحلة الثالثة من هذا العمل هو تطوير النماذج التي يمكن أن تشكل العلاقة لسقوط الأمطار والجريان السطحي. تحقيقا لهذه الغاية، حاولنا استخدام طريقتين مختلفين نوعا ما : تجربة الصندوق الأسود من نوع تدفق = و (المطر) مستعملة على معطيات التساقط و التدفق. الطريقة الأخرى يمثلها النموذج المفاهيمي الشامل للهندسة الريفية.

النتائج المحصل عليها عليها من دراسة تحول المطر إلى التدفق باستعمال نموذج GR1A، GR2M و GR4J تظهر أن هذه النماذج ذات الخزانين أثبتنا النجاعة من نموذج "العلبة السوداء".

بالفعل، إن نموذج GR يأخذ بعين الاعتبار التسلسل الزمني للظواهر من جهة و ضغوط العوامل المناخية (التبخر) و كذا العوامل "الفيزيولوجية" للحوض من جهة أخرى (رطوبة التربة و التبادلات المناخية).

الكلمات المفتاحية : النموذج مطر-تدفق، وادي الأخضر (الشولي)، GR1A، GR2M و GR4J.

RESUME

Le bassin versant de l'Oued lakhdar (170 Km²) - Tafna - a fait l'objet d'une modélisation pluie-débit, par l'utilisation des modèles GR (Génie Rural) à trois pas de temps (Annuel, Mensuel et Journalier).

Dans un premier temps, nous avons cherché à caractériser quelques facteurs en particulier physiques, géologiques et climatiques régissant l'écoulement. Ensuite une étude hydrologique basée sur le traitement des données hydrométriques relatives à une période de 40 ans a été utilisée. La troisième phase de ce travail consiste en l'élaboration des modèles pouvant rendre compte de la relation pluie-débit. A cet effet, nous avons essayé deux approches assez différentes : une empirique de type boîte noire sous la forme $débit = f (pluie)$ où f est déterminée par une régression effectuée sur les chroniques pluies-débits. L'autre conceptuelle globale représentée par le modèle du Génie Rural.

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 corrélatoire. 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 : Modélisation pluie-débit, Oued Lakhdar (Chouly), GR1A, GR2M, GR4J.

ABSTRACT

The Oued Lakhdar - Tafna - watershed (170 km²) was the purpose of a rainfall-discharge modeling, by the use of the GR (Genie Rural) models with three time intervals (annual, Monthlu and Daily).

At first, we tried to characterize some factors; in particular physical, geological and climatic; governing the flow. Then a hydrological study based on the processing of 40-year hydrometric data period was used. The third phase of this work consists of the elaboration of the models that can take into account the rainfall-runoff relationship. For that purpose, we tried two quite different approaches: one empirical – black box type – in the form of $flow = f (rainfall)$ where f is determined by a regression done on rainfall-discharge history. The other represented by the Genie Rural comprehensive conceptual model.

The results obtained by simulating the transformation of rainfall into runoff by the use of the Genie Rural models GR1A, GR2M GR4J and more satisfying than modeling by correlative approach. Indeed, on the one hand, the GR model takes into account the chronological succession of phenomena and, on the other hand, the influence of the climatic (evapotranspiration) as well as that of the watershed physical and hydrogeological (soil moisture and external exchanges) parameters.

Key-words : rainfall-discharge modeling, Oued Lakhdar (Chouly), GR1A, GR2M, GR4J.

AVANT-PROPOS

La question de l'eau a éveillé en moi un intérêt particulier depuis ma 1^{ère} année universitaire.

La gestion de l'eau est un principe particulièrement bien énoncé au regard des défis à venir. Sa mise en application reste une entreprise très difficile, car les moyens pour parvenir aux objectifs donnés sont très divers, particulièrement dans le domaine épineux des ressources en eau.

Traiter ce sujet est donc une grande satisfaction en finalité probable de mon parcours d'études. Cette satisfaction n'aurait pu avoir lieu sans le soutien de nombreuses personnes que je tiens à remercier sincèrement dans ces modestes lignes.

Mes remerciements vont en particulier à :

Mes parents pour tout ce qu'ils m'ont appris, donné et inculqué et pour leur soutien durant tous mes études, sans eux ce travail n'aurait pu être réalisé.

Mon encadreur Monsieur **BOUANANI A.**, de m'avoir tout d'abord ouvert la porte sur le monde de post-graduation, pour sa grande contribution à ma formation, et de m'avoir proposé ce sujet d'actualité, de bien veiller à l'achèvement de ce modeste travail, de m'avoir efficacement guidé et conseillé.

Madame **AZZOUNI A.**, qui après m'avoir fait profiter de son enseignement, a accepté de présider ce jury.

Monsieur **HAYANE S.M.** et Monsieur **MEGNOUNIF A.**, pour avoir eu la bienveillance d'accepter d'examiner ce travail.

Madame **BABA-HAMED K.**, qui a accepté notre invitation.

Personnages de l'A.N.R.H d'Oran et de Tlemcen qui ont accepté volontiers de me fournir les documents que je convoitais.

Que soient remerciés tous ceux, collègues et amis, qui m'ont témoigné leur amitié et qui m'ont soutenu et encouragé dans mon travail.

Puisse ce mémoire reflète tous mes efforts, mon sérieux et le résultat de tout ce que vous m'avez appris tout au long de mon parcours universitaire.

Je dédie ce travail à :
Mes chers parents ;
Mes deux frères et leurs épouses ;
Toute ma famille ;
A tout mes enseignants, amis et collègues ;
Enfin, à tous ceux qui m'ont aidé à réaliser cet ouvrage.

TABLE DES MATIERES

RESUME	p.
AVANT-PROPOS	
TABLE DES MATIERES.....	1
INTRODUCTION GENERALE.....	5
<hr/> <i>Chapitre I :</i> <hr/> MODELISATION HYDROLOGIQUE ET MODELES PLUIE-DEBIT	
I- INTRODUCTION.....	6
II- HYDROLOGIE.....	6
II.1- LA NOTION DE L'HYDROLOGIE.....	6
II.2- LA NOTION DE BASSIN VERSANT.....	7
III- MODELISATION HYDROLOGIQUE ET MODELES PLUIE-DEBIT.....	8
III.1- DEFINITIONS GENERALES.....	8
III.2- OBJECTIFS DE LA MODELISATION PLUIE-DEBIT.....	10
III.3- INTERETS D'UN MODEL PLUIE-DEBIT.....	11
III.4- CHOIX D'UN MODELE.....	11
III.5- ETAPES D'ELABORATION D'UN MODELE.....	11
III.6- TYPOLOGIE DE MODELES HYDROLOGIQUE.....	12
III.6.1- Selon le degré d'abstraction.....	13
<i>Modèles physiques</i>	13
<i>Modèles mathématiques</i>	13
III.6.2- Selon la nature des variables.....	13
<i>Modèles déterministes</i>	13
<i>Modèles stochastiques (probabilistes)</i>	13
III.6.3- Selon la discrétisation spatiale.....	14
<i>Modèles globaux</i>	14
<i>Modèles spatialisés (distribués)</i>	14
III.6.4- Selon la description des sous processus.....	14
<i>Modèles conceptuels</i>	14
<i>Modèles empiriques</i>	14
III.7- CRITERES D'EVALUTION DE LA MODELISATION.....	15
III.7.1- Erreur moyenne.....	15
III.7.2- Erreur quadratique moyenne.....	15
III.7.3- Coefficient de Nash.....	15
III.8- CALAGE DE MODELE HYDROLOGIQUE.....	16
III.9- METHODES DE CALAGE DES MODELES PLUIES-DEBITS.....	16
III.9.1- Calage manuel.....	16
III.9.2- Calage automatique.....	16
III.9.3- Calage mixte.....	17
III.10- PRESENTATION DE QUELQUES MODELES.....	17
III.10.1- MIKE SHI.....	17
III.10.2- CEQUEAU.....	19
III.10.3- TOP MODEL.....	20
III.10.4- WATER WARE.....	21
III.10.5- GIBSI.....	22
III.10.6- MODELES NEURONAUX.....	23
III.11- CHOIX DU MODELE UTILISEE.....	24

IV- MODELE GR	24
IV.1- INTRODUCTION	24
IV.1.1- Objectifs de développement	24
IV.1.2- Mode de développement	25
IV.1.3- Principales caractéristiques	25
IV.2- DESCRIPTION DU MODELE PLUIE-DEBIT ANNUEL GR1A	26
IV.2.1- Introduction	26
IV.2.2- Description mathématique	26
IV.2.3- Paramètre	26
IV.3- DESCRIPTION DU MODELE PLUIE-DEBIT MENSUEL GR2M	27
IV.3.1- Introduction	27
IV.3.2- Description mathématique	27
• Production.....	27
• Percolation.....	28
• Routage et échange avec l'extérieur non atmosphérique.....	29
IV.3.3- Paramètres	29
IV.4- DESCRIPTION DU MODELE PLUIE-DEBIT MENSUEL GR4J	30
IV.4.1- Introduction	30
IV.4.2- Description mathématique	30
• Neutralisation.....	31
• Fonction de rendement.....	31
• Percolation.....	32
• Hydrogrammes unitaires.....	32
• Fonction d'échange avec l'extérieur non atmosphérique.....	33
• Réservoir de routage.....	33
• Ecoulement total.....	34
IV.4.3- Paramètres	34
IV.5- APPLICATIONS DES MODELES	34
IV.6- CONCLUSIONS	35

Chapitre II :

PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DE L'OUED LAKHDAR

I- PRESENTATION GENERALE DU BASSIN VERSANT DE LA TAFNA	36
II- PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DE L'OUED LAKHDAR	37
II.1- ETUDE MORPHOMETRIQUE	40
II.1.1- CARACTERISTIQUE DE FORME	40
II.1.1.1- Indice de compacité de Gravelius (Kc)	40
II.1.1.2- Rectangle équivalent	41
II.1.2- ETUDE DU RELIEF	41
II.1.2.1- Courbe hypsométrique	41
II.1.2.2- Indice de pente	43
a- Indice de pente (Ip).....	43
b- Indice de pente global (Ig).....	44
c- Dénivelée spécifique (Ds).....	44
d- Indice de pente moyenne (Im).....	45
Conclusion	45
II.1.3- CARACTERISTIQUES HYDROGRAPHIQUES	46
II.1.3.1- Rapport de confluence	46
II.1.3.2- Rapport des longueurs	46
II.1.3.3- Densité de drainage	47
II.1.3.4- Profil en long du cours d'eau principal	48
Conclusion	48

II.2- ETUDE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE	49
II.2.1- DESCRIPTION LITHOSTRATIGRAPHIQUE	49
II.2.1.1- SECONDAIRE	50
A- Jurassique	50
A.1- Marnes et calcaires du Kimméridgien moyen.....	50
A.2- Dolomies et calcaires du Kimméridgien supérieur.....	50
B- Crétacé	50
B.1- Berriasien.....	50
II.2.1.2- TERTIAIRE	50
A- Pliocène continental	50
II.2.1.3- QUATERNAIRE	50
A- Alluvions récentes et sub-actuelles	50
II.2.2- TECTONIQUE	50
II.2.3- HYDROGEOLOGIE	51
II.2.3.1- Aquifère.....	51
II.2.3.2- Rôle de la tectonique dans l'hydrogéologie de la région.....	52
II.2.3.3- Relation fracturation et karstification.....	52
II.2.3.4- Les eaux souterraines.....	53
II.2.3.5- Ressources en eau superficielles.....	53

Chapitre III :

**ETUDE DES PARAMETRES HYDROLOGIQUES DU BASSIN DE L'OUED
LAKHDAR**

I- INTRODUCTION	54
II- ETUDE DES PARAMETRES HYDROLOGIQUES	54
II.1- PRESENTATION DES STATIONS	54
II.2- ETUDE DES PRECIPITATIONS	54
II.2.1- ETUDE DES PRECIPITATIONS ANNUELLES	55
II.2.1.1- ETUDE DE LA VARIABILITE INTERANNUELLES DES PRECIPITATIONS	55
II.2.1.2- ETUDE STATISTIQUE DES PRECIPITATIONS	56
• Test de normalité	56
- Test graphique	56
- Test analytique	56
II.2.1.2.1- Adéquation des données à une loi statistique	56
a- Ajustement par la loi normale	57
a.1- Test graphique	57
a.2- Test du X^2	58
b- Ajustement par la loi log normale	58
b.1- Test graphique	58
b.2- Test du X^2	59
c- Calcul des précipitations pour une période de récurrence donnée	60
II.2.2- ETUDE DES PRECIPITATIONS MENSUELLES	60
II.2.3- ETUDE DES PRECIPITATIONS SAISONNIERES	61
II.2.4- ETUDE DES PRECIPITATIONS JOURNALIERES	62
II.3- ETUDE DES ECOULEMENTS	62
II.3.1- VARIATION ANNUELLES DES ECOULEMENTS	63
II.3.2- ETUDE STATISTIQUE DES ECOULEMENTS	63
a- Ajustement des lames d'eau écoulées annuels à la loi normale	64
a.1- Test graphique	64
a.2- Test du X^2	64
b- Ajustement des lames d'eau écoulées annuels à la loi log normale	65
b.1- Test graphique	65

b.2- Test du X^2	65
c- Calcul des lames d'eau écoulées pour une période de récurrence donnée.....	66
II.3.3- VARIATIONS MENSUELLES DES LAMES D'EAU ECOULEES	66
II.3.4- VARIATIONS SAISONNIERES DES LAMES D'EAU ECOULEES	67
II.3.5- VARIATIONS JOURNALIERES DES LAMES D'EAU ECOULEES	67
II.4- ETUDE DES TEMPERATURES	68
II.4.1- TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES	68
II.4.2- TEMPERATURES MOYENNES ANNUELLES	68
II.5- ETUDE DE L'EVAPOTRANSPIRATION	69
II.5.1- NOTION D'EVAPOTRANSPIRATION REELLE ET POTENTIELLE	69
II.5.1.1- ESTIMATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION	69
II.5.1.1.1-Formule de Turc.....	69
II.5.1.1.2- Formule de Thornthwaite (1948-1955).....	70
II.5.1.1.3- Formule d'Oudin.....	71
II.5.2- CALCUL DE L'ETR	71
II.5.2.1- BILAN MOYEN ANNUEL DE L'ECOULEMENT	71
II.5.2.2- BILAN MOYEN MENSUEL DE L'ECOULEMENT	72
II.5.2.3- CALCUL DE L'EVAPOTRANSPIRATION REEL (ETR)	73
a- Formule de Turc : calcul de l'ETR.....	73
b- Méthode de Coutagne.....	74
Conclusion	75

Chapitre IV :

MODELISATION PLUIE-DEBIT

I- INTRODUCTION	76
II- RELATION PLUIE-DEBIT	76
II.1- ETUDE DE LA RELATION PLUIE-DEBIT	76
II.2- MODELISATION PAR CORRELATION	77
• Les régressions simples.....	77
• Corrélation linéaire.....	77
II.2.1- CORRELATION ANNUELLE	78
II.2.2- CORRELATION MENSUELLE	79
II.2.3- CORRELATION JOURNALIERE	80
II.3- MODELISATION DE LA RELATION PLUIE-DEBIT PAR L'UTILISATION DU MODEL GR	82
II.3.1- MODELE ANNUEL GR1A	82
II.3.1.1- Calage du modèle	82
II.3.1.2- Validation du modèle	84
II.3.2- MODELE MENSUEL GR2M	85
II.3.2.1- Calage du modèle	85
II.3.1.2- Validation du modèle	88
II.3.2- MODELE MENSUEL GR4J	89
II.3.2.1- Calage du modèle	89
II.3.1.2- Validation du modèle	91
Conclusion	92
CONCLUSION GENERALE	93
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	95
LISTE DES FIGURES	100
LISTE DES TABLEAUX	102
ANNEXES	103

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'importance de l'eau en tant que support de vie et de facteur régulateur du développement d'un pays est universellement reconnue. Aussi est-il nécessaire de la quantifier et de la gérer aussi rigoureusement que possible. Dans ce contexte, on comprend alors aisément la nécessité de mettre au point des outils d'aide à la gestion et à la décision. Parmi ces outils, les modèles hydrologiques qui ont vu le jour au cours des vingt dernières années, surtout en regard de la relation pluie - débit.

La simulation de la transformation de la pluie en débit du bassin versant par des modèles mathématiques est devenue très répandue grâce à l'accroissement des capacités de calcul et l'amélioration de l'outil informatique.

Parmi le nombre de modèles existant, les modèles conceptuels ou empiriques globaux sont les plus performants, ils présentent le lien entre la pluie et le débit par des agencements variés de réservoirs.

Dans ce cadre, une étude intitulée "Hydrologie et modélisation pluie-débit : cas du bassin versant de l'Oued Lakhdar (ex : Chouly) Tafna-NW Algérien" nous a été confiée. Elle vise plusieurs objectifs qui sont :

- Caractériser le bassin versant de l'Oued Lakhdar par l'analyse de quelques facteurs en particulier physiques, géologiques et climatiques régissant l'écoulement ;
- Une étude hydrologique basée sur le traitement des données hydrométriques ;
- Etablissement d'une modélisation corrélatoire et une modélisation à l'aide d'un modèle pluie-débit par la transformation de la pluie en débit à trois pas de temps Annuelle, mensuelle et journalier ;
- Modéliser le comportement hydrologique du bassin versant de l'Oued lakhdar ;
- Utilisation des mesures ponctuelles de débit de l'Oued Lakhdar pour estimer les paramètres et les performances du modèle pluie-débit (GR).

Le mémoire s'articule en quatre chapitres :

- **Chapitre I** : traite des généralités sur la modélisation, nous avons présenté les différents types de modèles hydrologiques rencontrés dans la littérature ainsi que les logiciels les plus courants.

- **Chapitre II** : aborde une présentation générale du bassin versant de l'Oued Lakhdar (situation géographique, étude morphométrique, étude géologique).

- **Chapitre III** : il s'attache à décrire les paramètres hydrologiques du bassin versant en utilisant les données des précipitations, des débits et des températures ainsi qu'une étude statistique afin de déterminer la loi d'ajustement de la distribution des précipitations et des débits.

- **Chapitre IV** : Après avoir présenté succinctement au chapitre I les principaux outils de modélisation qui ont été appliqués dans la littérature pour l'évaluation des débits de ruissellement, nous proposons plus de détail dans ce chapitre le modèle GR qui fait l'objet de la présente étude. Il s'agit d'une :

- Modélisation corrélatoire ;
- Modélisation par application du modèle GR à trois pas de temps annuelle, mensuelle, et journalier.

Enfin une conclusion générale sera donnée à la fin du travail.

Chapitre I :
**MODELISATION HYDROLOGIQUE ET
MODELES PLUIE-DEBIT**

I- INTRODUCTION

Connaître le débit des rivières, c'est une évidence, de première importance pour la gestion de la ressource en eau et la maîtrise du risque hydrologique. La modélisation pluie-débit constitue un substitut efficace à des mesures de débits fastidieuses, quand elles sont possibles, elle a pris une dimension tellement importante qu'on la surnomme le "cœur" même de l'hydrologie.

De nombreux modèles hydrologiques ont vu le jour au cours de ces vingt dernières années, surtout ceux qui regardent la relation pluie - débit, offrant ainsi beaucoup de flexibilité dans la manipulation, beaucoup de gain en temps matériel, etc.

La modélisation hydrologique est devenue un outil indispensable pour divers domaines: résoudre les problèmes de gestion de ressources d'eau (par exemple l'irrigation), prédétermination des crues et aménagement de l'environnement (par exemple l'édification de barrage) ou de protection de l'environnement (évolution due à la pression anthropique) et de prévision de catastrophes naturelles (simulations de crues à court terme, prévision d'étiages).

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

II- HYDROLOGIE

II.1- LA NOTION DE L'HYDROLOGIE

La définition de l'hydrologie reste difficile, car ce n'est pas une science unifiée, elle change d'une époque ou d'un hydrologue à l'autre. Etymologiquement elle est définie comme étant "science qui traite des eaux". Penman (1961 *in* Yanoba, 2009) la définit comme la science qui cherche à répondre à la question « **Qu'arrive-t-il aux précipitations ?** ». Question simple en apparence mais sur laquelle les nombreux chercheurs qui s'y sont penchés n'ont pas trouvé une réponse entièrement satisfaisante. Cela s'explique par le fait que les éléments qui font l'objet d'études en hydrologie sont eux-mêmes sujets à de nombreuses incertitudes tant dans la connaissance théorique des chercheurs que dans leurs mesures en nature. Cette complexité a donné lieu à plusieurs branches de l'hydrologie: hydrologie maritime, côtière, des bassins versants. Dans les dictionnaires, elle est parfois définie comme la science qui étudie les eaux, leurs caractéristiques, leurs propriétés, s'appuyant sur des considérations physiques, météorologiques, géologiques ou chimiques (Perrin, 2000). L'objet fondamental d'étude de l'hydrologie est le cycle de l'eau. Ce cycle est illustré (Fig. 1).

L'hydrologie continentale, qui s'intéresse plus particulièrement à la partie du cycle de l'eau sur ou proche des terres émergées, peut être aussi définie comme la science de l'eau qui traite de la circulation, de la distribution, de la dynamique et des propriétés de l'eau sur Terre au travers du cycle hydrologique (Eagleson, 1991 *in* Perrin, 2000). Ses thèmes d'étude sont les précipitations, l'évaporation, l'infiltration, le ruissellement, les écoulements dans les nappes et les cours d'eau, et le transport de substances dissoutes ou en suspension.

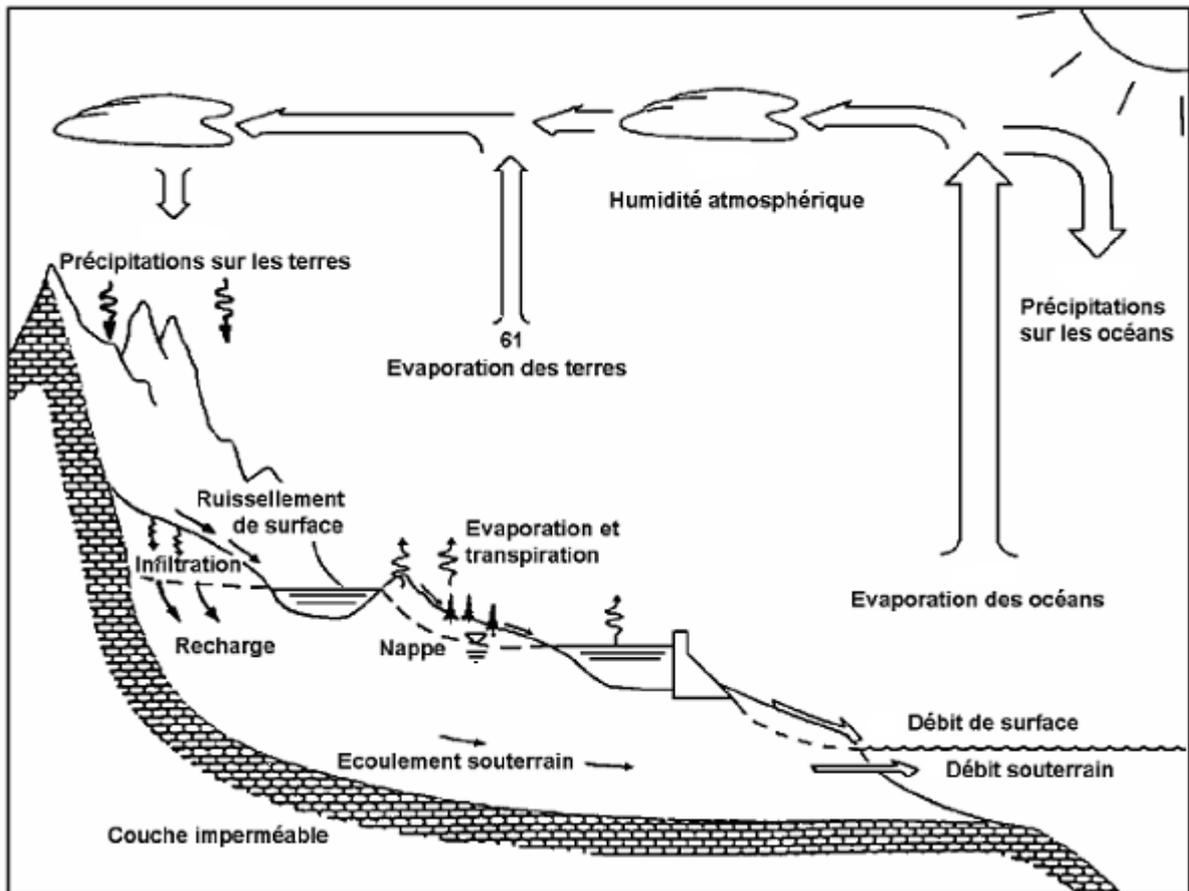


Figure 1 : Le cycle hydrologique (d'après Maidment, 1992).

L'hydrologie est donc une science pluridisciplinaire comprenant l'hydrologie de surface, la glaciologie, l'hydrogéologie, la nivologie, la physico-chimie, en incluant aussi l'étude de l'érosion ou du transport de sédiments. Mais elle est également plus ou moins directement liée à la météorologie, l'hydraulique, la géographie, la géologie, la biologie ou l'écologie. Il est donc très difficile d'assigner à l'hydrologie un but plus précis que la lourde tâche de décrire et comprendre le cycle de l'eau, dans un environnement éminemment complexe, hétérogène et variable dans le temps.

Le moteur de cette science réside principalement dans le lien étroit qui existe entre l'homme et son environnement, et en particulier dans la dépendance qu'il a vis-à-vis de la ressource en eau, pour ses besoins d'alimentation ou dans ses activités (Michel, 1989 in Perrin, 2000).

Pour ce qui nous concerne, nous nous intéressons à l'hydrologie des bassins versants qui peut être définie comme l'étude des processus intervenant dans le cycle de l'eau à l'échelle des bassins versants.

II.2- LA NOTION DE BASSIN VERSANT

Afin de pouvoir mettre en relation les précipitations (pluie, neige) et les débits d'un cours d'eau, il est nécessaire de délimiter les surfaces qui contribuent à alimenter l'écoulement de ce cours d'eau. L'ensemble de ces surfaces constitue le **bassin versant** (Gaume, 2009) qui représente l'élément d'étude de base en hydrologie.

Le bassin versant en une section droite d'un cours d'eau, est lui défini comme la totalité de la surface topographique drainée par ce cours d'eau et ses affluents à l'amont de cette section. Les processus qui s'y déroulent sont essentiellement les précipitations, l'infiltration, le ruissellement et l'évapotranspiration. Ces processus sont régis par le climat, la végétation, la topographie, le sol, la géologie, l'utilisation et la taille du bassin versant (Singh et Woolhiser, 2002 *in* Yonaba, 2009). La taille du bassin varie de quelques fractions de m² à quelques milliers de km² ; ce qui explique sa non uniformité et donc la complexité de l'étude des processus hydrologiques qui s'y opèrent.

La limite du bassin versant correspond à la ligne de crête. Son tracé commence par l'exutoire et suit les points les plus élevés jusqu'à fermeture du circuit. Or, il peut exister des interactions entre la surface et le sous-sol. Les limites déduites de la topographie peuvent ne plus correspondre aux limites fonctionnelles du bassin comme le montre la figure 2.

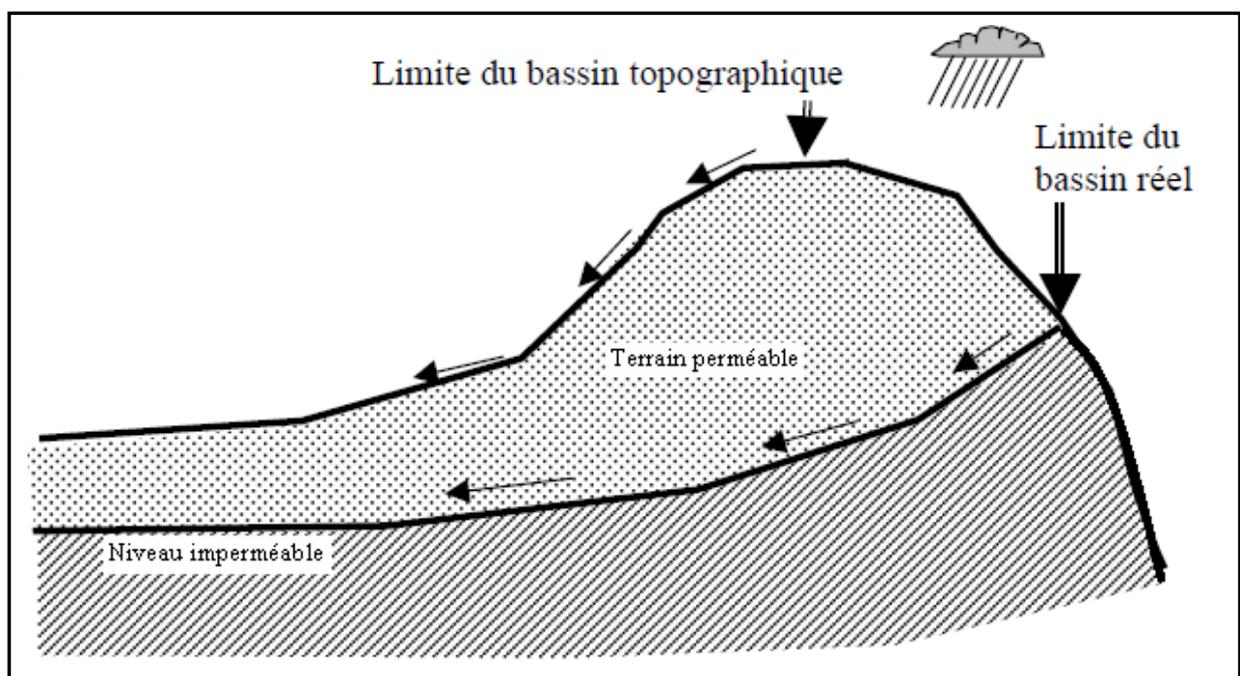


Figure 2 : Limites d'un bassin versant (d'après Roche, 1963).

III- MODELISATION HYDROLOGIQUE ET MODELES PLUIE-DEBIT

III.1- DEFINITIONS GENERALES

La modélisation hydrologique est la représentation simplifiée partielle ou totale du cycle hydrologique (Marchandise, 2007). Cette représentation se fait grâce à un ensemble d'équations mathématiques qui sont appelées à reproduire le système. Le modélisateur introduit généralement les facteurs qui lui semblent pertinents pour minimiser l'inexactitude liée aux hypothèses simplificatrices de la modélisation. On distingue quatre types de variables qui existent en totalité ou en partie dans chaque modèle (Fig. 3) (Boudahraa, 2007) :

- *Variables d'entrées* : Le modèle fait appel à ces variables qui dépendent du temps et/ou de l'espace (pluie, ETP, caractéristiques et hydrodynamiques du milieu, ...).
- *Variables de sorties* : Le modèle répond par un ensemble de variables (débits, flux ou concentration en polluants, ...).

- *Variables d'état* : Elles permettent de caractériser l'état du système modélisé et peuvent évoluer en fonction du temps (niveau de remplissage des réservoirs d'eau d'un bassin versant, taux de saturation des sols, profondeurs des sols, pentes, ...).
- *Paramètres de calage* : En plus des variables, la modélisation fait intervenir des variables dont la valeur doit être déterminée par calage (conductivité hydraulique à saturation, ...) (Gaume, 2002 in Boudahraa, 2007).

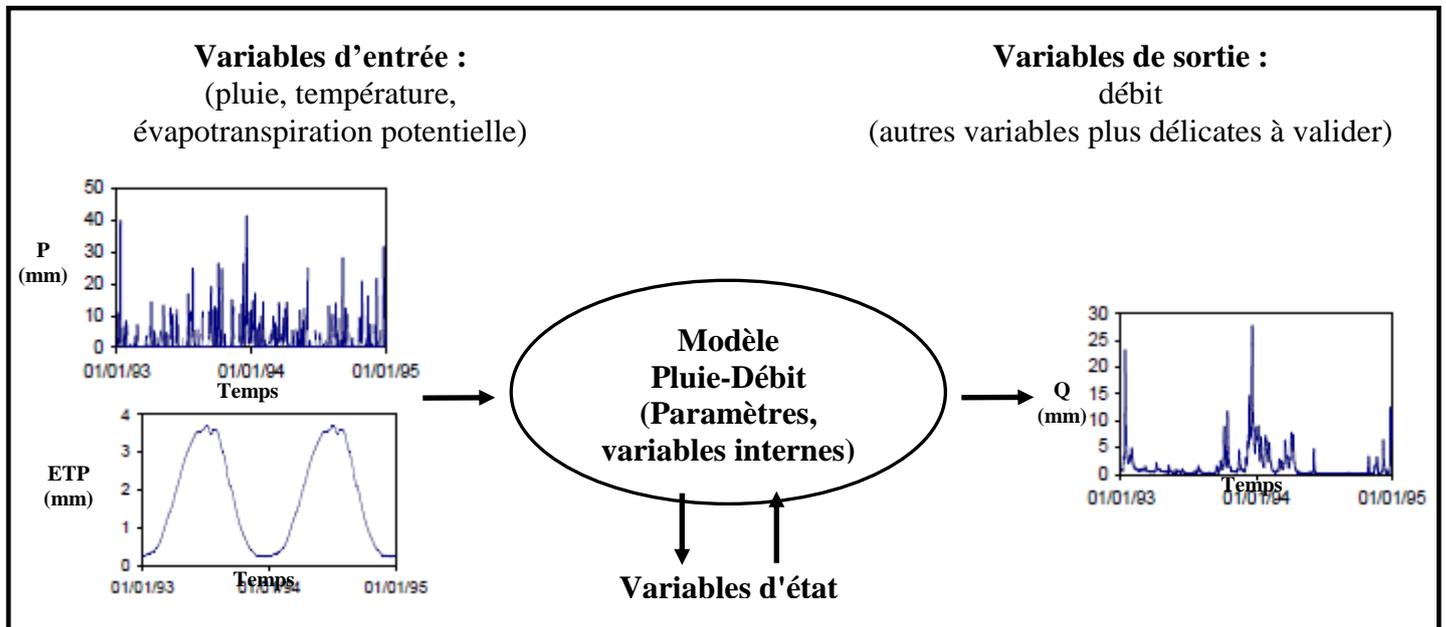


Figure 3 : Représentation schématique d'un modèle hydrologique (Perrin *et al.*, 2009).

Les variables citées ci-dessus interviennent dans la modélisation hydrologique par l'intermédiaire de deux fonctions : une fonction de production et une fonction de transfert (Fig. 4) (Boudahraa, 2007) :

- *La fonction de production* : c'est une représentation simple mais réaliste, des différentes voies que suivra l'eau de pluie, entre le moment où elle rejoint le cours d'eau (Morin, 1991 in Boudahraa, 2007), elle exprime la transformation de la pluie brute en pluie nette, définit la fraction de la pluie brute qui contribue effectivement au ruissellement. En d'autres termes, elle permet de calculer la quantité d'eau qui va s'écouler à l'exutoire d'un bassin ou sous bassin versant.
- *La fonction de transfert* : c'est la fonction qui permet de transférer, comme son nom l'indique, la quantité d'eau déterminée par la fonction de production, vers le cours d'eau. Elle permet la transformation de la pluie nette en un hydrogramme à l'exutoire du bassin versant, donc, de donner une forme à la crue dont le volume a été déterminé par la fonction de production, en simulant l'hydrogramme de crue à l'exutoire.

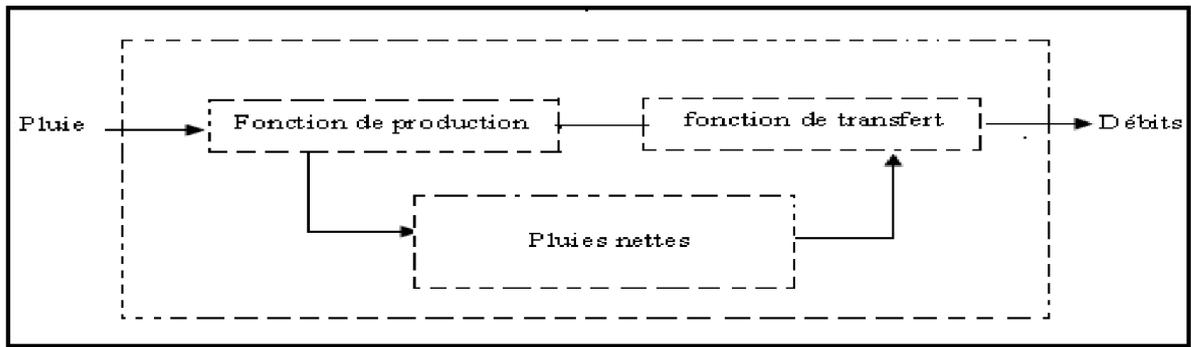


Figure 4 : Schéma d'un modèle hydrologique.

III.2- OBJECTIFS DE LA MODELISATION PLUIE-DEBIT

La modélisation de la transformation pluie-débit intègre dans son contexte les différents éléments du cycle hydrologique. Certains types de modèles nécessitent le passage par la modélisation de chaque élément avant de construire le modèle finale pluie-débit. L'unité de l'étude est généralement le bassin versant limité topographiquement, sauf dans le cas où des formations géologiques drainent des surfaces situées hors limites topographiques du bassin.

La modélisation pluie-débit peut donner la réponse aux nombreuses questions, relatives à l'eau, axée sur la gestion des ressources et de risque. Parmi ces questions on note (Gresillon, 2000 in Chachoua, 2010) (Fig. 5) :

- La reconstitution des séries de débit par le comblement de lacunes dans les séries historiques afin de permettre les traitements statistiques utilisés notamment dans les études de faisabilité des ouvrages et de détermination des valeurs de projet;
- Prévion des fréquences avec lesquelles les débits extrêmes (crue et étiage) peuvent se produire ;
- Prédétermination de la réponse hydrologique d'un bassin versant avec un pas de temps, afin de permettre l'élaboration d'un système de prévention et d'alarme ;
- L'étude de l'impacte des différents aménagements sur la réponse hydrologique.

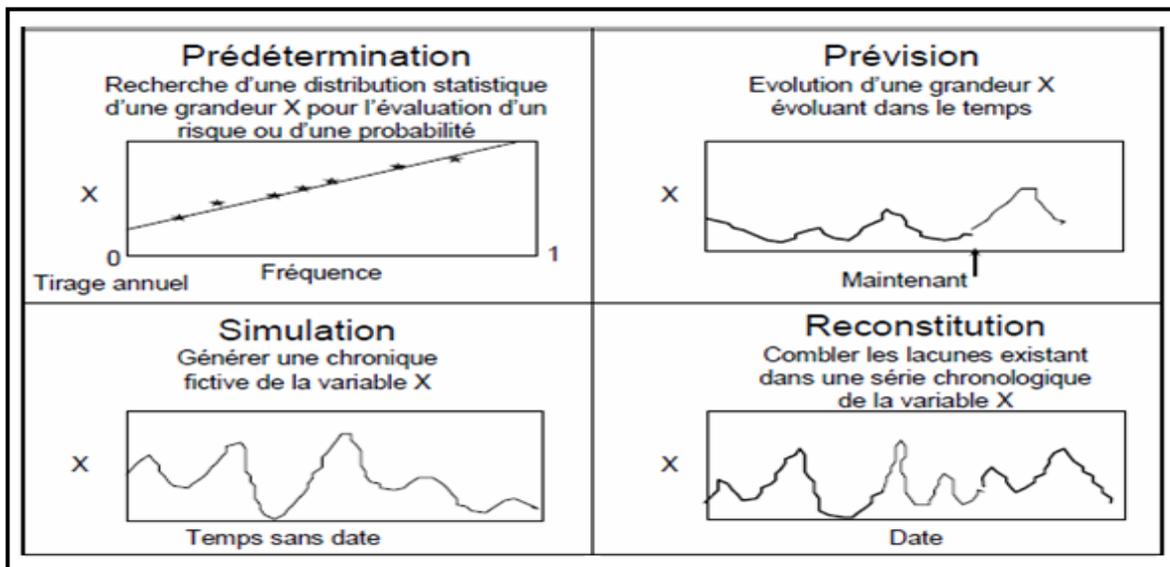


Figure 5 : Les quatre opérations de la modélisation.

III.3- INTERETS D'UN MODELE PLUIE-DEBIT

- Les débits sont parfois inexistants 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 la modélisation pluie-débit (Fig. 6) :

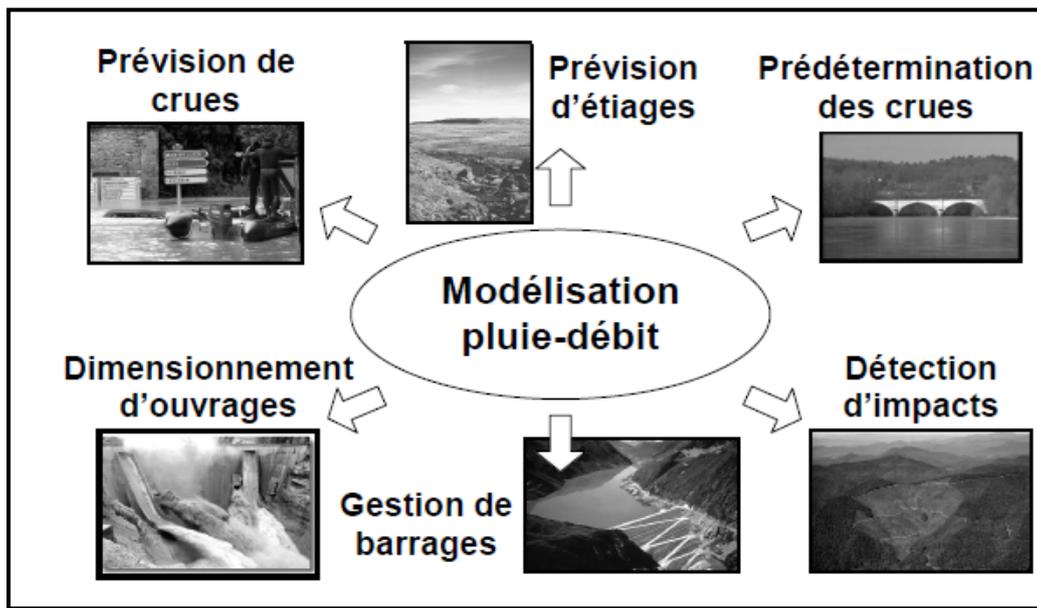


Figure 6 : Les différentes applications de la modélisation pluie-débit (Perrin, 2000).

III.4- CHOIX D'UN MODELE

Le choix d'un modèle hydrologique se fait en fonction des éléments suivants :

- objectif de l'étude hydrologique : Les objectifs de l'étude hydrologique sont multiples selon lesquels on peut négliger ou simplifier certains paramètres dans la modélisation ;
- disponibilité de données : En dépit des incertitudes que présentent des modèles par rapport à d'autres, le manque de données nous contraint à les utiliser ;
- nature de modèle, la robustesse et la simplicité de modèle influencent le choix en particulier dans le cas où le temps ou le coût présentent une contrainte.

III.5- ETAPES D'ELABORATION D'UN MODELE

L'élaboration d'un modèle hydrologique comporte certaines étapes essentielles (Boudahraa, 2007) :

- **Définir** le modèle et ses objectifs en termes de précision (Ambroise, 1998). Cette définition permettra de déterminer les choix à faire par la suite et donc de préciser les chemins à suivre dans l'élaboration des étapes suivantes.
- **Identifier** le modèle, pour pouvoir définir et caractériser le système, ses frontières et sa structure ; définir l'événement, les variables et les paramètres ; et émettre les hypothèses et le choix des échelles de temps et d'espace caractéristiques des processus de base.

- **Elaborer** l'algorithme à incorporer dans un outil informatique capable de procéder aux instructions. Cet algorithme doit être suivi de la vérification du logiciel lui-même (De Marsily et Ambroise, 1998).
- **Caler** le modèle, par estimation des paramètres du modèle, non mesurables, selon des critères déductifs ou des observations des entrées et des sorties. Il existe deux façons d'estimer les paramètres à partir d'un échantillon : la méthode passive (on prend tous les couples entrées-sorties disponibles, et par des méthodes statistiques, on évalue les coefficients des équations) et la méthode active (en donnant un poids spécifique plus grand à certaines observations ou groupe d'observations). Le calage peut être manuel ou automatique.
- **Evaluer** le modèle, en comparant la réponse simulée par le modèle à une sollicitation expérimentale et la réponse réelle, à partir de données différentes de celle utilisées pour le calage.
- **Définir** le domaine de validité du modèle élaboré (Ambroise, 1998). La formulation mathématique du modèle est basée sur des équations simplifiées, selon certaines hypothèses concernant les conditions initiales et aux limites.

III.6- TYPOLOGIE DE MODELES HYDROLOGIQUES

L'ambiguïté des interactions entre les différents éléments du bilan hydrologique et la complexité des systèmes étudiés ont permis l'émergence d'un nombre indénombrable de modèles " *il y a presque d'autant de modèles que d'hydrologues*", " *on ne trouve pas dans la littérature des catégories de modèles nettement distincts*" (Ambroise, 1998).

Beaucoup d'auteurs ont abordé le sujet de la classification des modèles. Rappelons à titre d'exemple les références suivantes : Singh (1995), Singh et Woolhiser (2002), Clarke (1973), Beven (1989), ASCE (1996), Wurbs (1998), Ambroise (1998) pour ne citer qu'eux. D'après Refsgaard (1997), les modèles hydrologiques peuvent être classés selon la description des processus physiques en tant que conceptuels ou physiques et selon la description spatiale des processus au niveau du bassin versant en tant que globaux ou distribués.

Selon Singh, 1995 (Fig. 7), un modèle est caractérisé par 5 éléments constitutifs : la géométrie du système (bassin versant), les entrées dans le système, les lois de formalisations des processus, l'état initial et les conditions aux limites du système et enfin les sorties. Singh (1995) a proposé trois critères pour classer les modèles hydrologiques qui sont : la description des processus, l'échelle spatio-temporelle et la méthode utilisée pour résoudre les équations. Selon la description des processus, on peut avoir plusieurs niveaux de classifications : modèle global ou distribué (Fig. 8) déterministe ou stochastique. La méthode de résolution employée peut également différencier les modèles en empirique ou conceptuel.

Les approches habituellement utilisées dans la modélisation pluie-débit apparaissent dans la Figure 9.

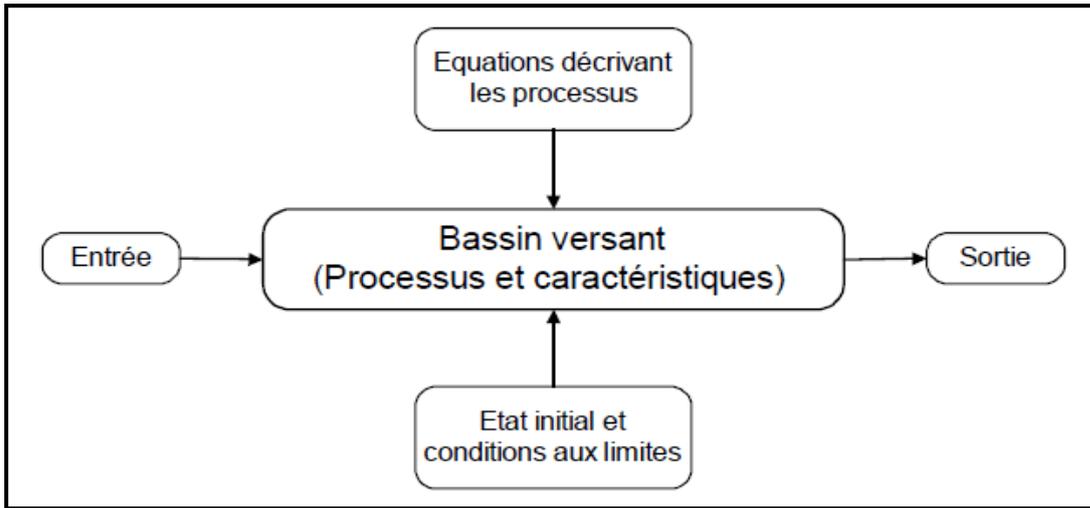
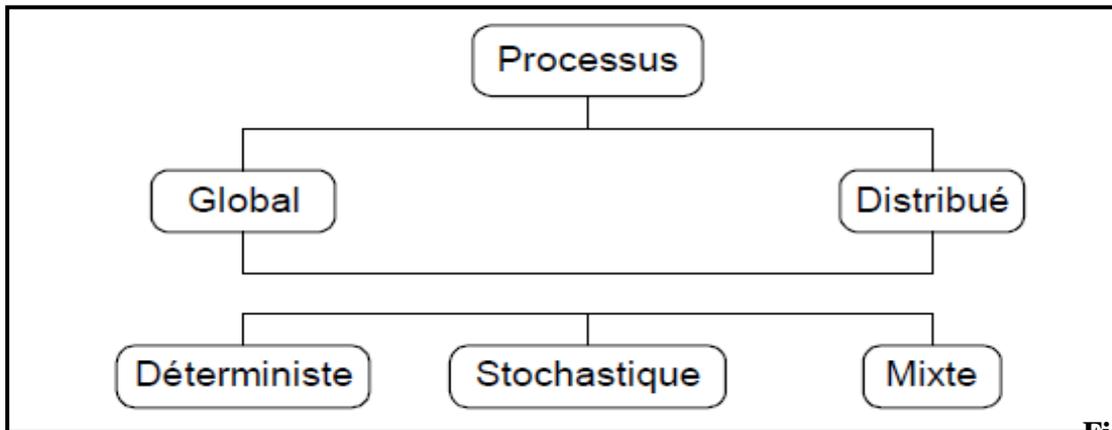


Figure 7 : Composants d'un modèle (d'après Singh, 1995).



Figure

8 : Classification des modèles proposée par Singh, 1995.

III.6.1- Selon le degré d'abstraction

Modèles physiques : Dont les équations ont été déduites à partir des principes de base de la physique (conservation de masse, quantité de mouvement, quantité d'énergie, ...), et dont la forme finale simplifiée contient des paramètres qui ont un sens physique. Ils représentent le système à une échelle réduite. Il existe plusieurs modèles à bases physiques comme le modèle KINEROS, LISEM, ABC,...

Modèles mathématiques : Ils décrivent le processus hydrologique à l'aide des équations mathématiques qui relient les variables d'entrée et de sortie.

III.6.2- Selon la nature des variables

Modèles déterministes : Dans lesquels la relation entre variables d'entrée et de sortie est phénoménologique et ne considère pas le caractère aléatoire de variable, la même entrée produit toujours la même sortie.

Modèles stochastiques (probabilistes) : Le terme stochastique est lié à la statistique et traduit le caractère aléatoire du modèle. Il permet de générer, aléatoirement, des données par des lois de distributions particulières.

III.6.3- Selon la discrétisation spatiale

Modèles globaux : D'après Maison (2000), le modèle global s'applique globalement sur l'ensemble d'un bassin versant (approche par bilan) qui est considéré comme entité homogène. On utilise dans ce type de modèles des valeurs représentatives moyennes.

Un exemple de ce type de modèle est le modèle GR (génie rural) (CEMAGRAF) que nous allons utiliser dans notre étude. C'est un modèle à réservoir, il fonctionne pour différents pas de temps annuel GR1A, mensuel GR2M et journalier GR4J.

Modèles spatialisés (distribués) : Ils tiennent en compte la variabilité spatiale de processus et de variables d'entrée, ils sont plus avantageux que les modèles globaux. Dans le cas où les composants du système ne sont pas complètement spatialisés, on parle de modèles semi spatialisés.

III.6.4- Selon la description des sous processus

Le processus hydrologique de transformation pluie-débit est composé d'autres sous-processus : précipitations, interception, infiltration, ... etc. Les modèles hydrologiques peuvent se classer selon la manière de décrire ces processus :

Modèles conceptuels : D'après Ambroise (1991), le modèle conceptuel considère le bassin versant comme un assemblage de réservoirs d'humidité, interconnectés et qui sont censés de représenter plusieurs niveaux de stockages, suivant une dimension verticale. Ce modèle est basé sur la connaissance des phénomènes physiques qui agissent sur les entrées pour obtenir les sorties.

Modèles empiriques : Ils sont utilisés pour reproduire le comportement global du système sans décrire les processus élémentaires. Ils sont généralement de type boîte noire sous la forme $\text{débit} = f(\text{pluie})$ où f est déterminée par une régression effectuée sur les chroniques pluies-débits (Ambroise, 1991).

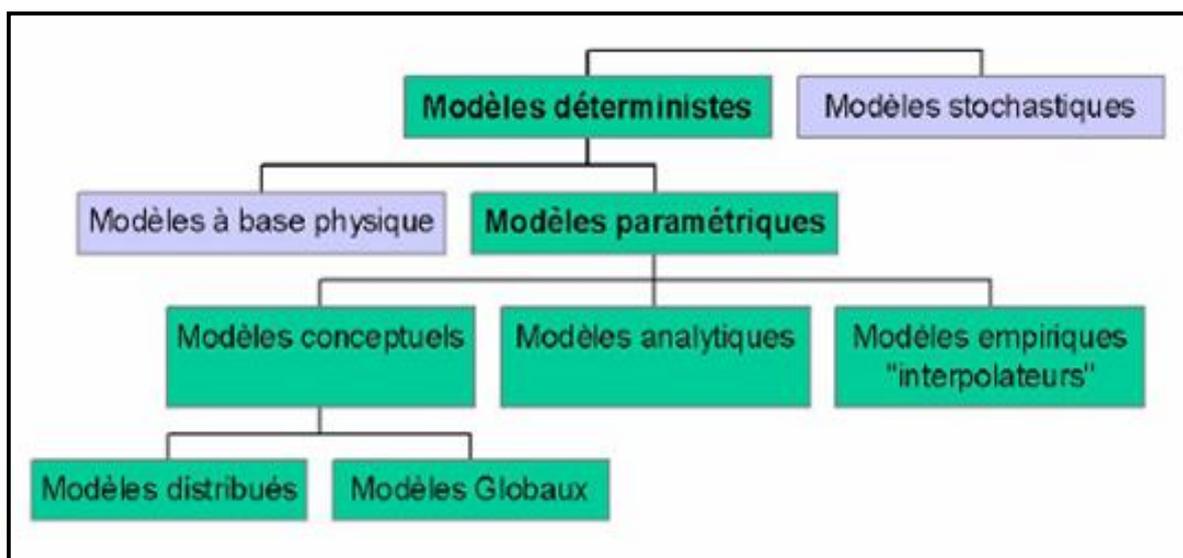


Figure 9 : Les différentes approches de modélisation (Gaume, 2002).

III.7- CRITERES D'EVALUTION DE LA MODELISATION

L'évaluation ou la mesure des performances d'un modèle se fait selon les objectifs qu'on se fixe, et par conséquent, le critère qu'on choisit. Un même modèle peut être évalué de plusieurs façons, l'unique contrainte étant l'objectif du jugement.

Pour satisfaire les différents objectifs, plusieurs critères d'évaluation ont été développés, qui sont soit des critères graphiques, soit des critères analytiques. Les plus utilisés en hydrologie sont (Boudahraa, 2007) :

III.7.1- Erreur moyenne

Elle est notée ε et définie par la moyenne des écarts entre les débits observés et les débits calculés (Habaieb, 1992 in Boudahraa, 2007) :

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{ci} - Q_{oi})$$

Avec :

n : nombre d'observations

Q_{ci} : débit calculé

Q_{oi} : débit observé

Plus cette erreur se rapproche de zéro, plus l'estimation des débits est considérée meilleure.

III.7.2- Erreur quadratique moyenne

Cette erreur se calcule comme étant la racine carrée de la moyenne des carrés des écarts entre les débits observés et les débits calculés (Habaieb, 1992 in Boudahraa, 2007) :

$$EQM = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{ci} - Q_{oi})^2 \right)}$$

Plus cette erreur quadratique tend vers zéro, plus l'estimation est meilleure. C'est le critère le plus utilisé en hydrologie pour quantifier l'erreur.

III.7.3- Coefficient de Nash

Ce critère, noté NTD, varie entre $-\infty$ et 1. Il tend vers 1 lorsque le débit calculé tend vers le débit observé. Une valeur du critère négative indique que le modèle donne des résultats moins bons que l'utilisation de la moyenne de l'échantillon.

Il est donné par la formule suivante (Nash et Sutcliffe, 1970) :

$$N = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{ci} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{ci} - Q_m)^2}$$

Avec :

Q_m : débit moyen observé

Cette formule traduit un certain rendement du modèle comparable au coefficient de détermination d'une régression. On considère généralement qu'un modèle hydrologique donne des résultats acceptables si la valeur du critère de Nash est supérieur à 0.8 (Gaume, 2002).

III.8- CALAGE DE MODELE HYDROLOGIQUE

Les étapes qui doivent être suivies dans toute modélisation hydrologique sont :

- La conceptualisation de la problématique.
- Choix du modèle correspondant.
- Introduction des données analysées et critiquées.
- Le calage de modèle avec des données observées.
- Validation avec d'autres données.
- Utilisation du modèle pour la prévision et la simulation hydrologique.
- Vérification des prévisions faites par le modèle (post-audit) (Kingumbi, 2006).

Le calage est donc une des étapes fondamentales dans la démarche de modélisation hydrologique. Elle consiste à rechercher les valeurs optimales des paramètres des différentes équations (régissant l'écoulement) utilisées dans le modèle hydrologique (Anderson et Woessner, 1992 in Kingumbi, 2006).

Le calage a pour but :

- De compenser les erreurs de mesures de données fournies aux modèles.
- Forcer les paramètres vers de valeurs dont l'interprétation ne correspond pas à la physique du modèle.
- Trouver une valeur moyenne pour un paramètre descripteur d'un bassin versant dont la variabilité spatiale n'est pas appréhendée par le modèle (Marchandise, 2007).

Pour caler un modèle, il faut choisir une série de référence (pluies-débits) et fixer un critère d'évaluation pour l'ajustement des simulations des modèles aux données de calage pour un jeu de paramètres donnés.

III.9- METHODES DE CALAGE DES MODELES PLUIES-DEBITS

On peut procéder au calage de modèle par trois méthodes :

III.9.1- Calage manuel

Cette méthode consiste à donner des valeurs aux paramètres du modèle et évaluer manuellement l'erreur entre les valeurs de sortie et les valeurs observées et l'échantillon de référence pour faciliter cette opération on a une représentation graphique.

III.9.2- Calage automatique

Ce calage optimise automatiquement les paramètres de modèle par l'utilisation d'un algorithme numérique pour trouver un extremum d'un critère numérique donné afin de déterminer l'ensemble des paramètres qui satisferont un critère donné de précision à travers différentes combinaisons possibles (Kingumbi, 2006).

III.9.3- Calage mixte

Le calage mixte consiste à combiner les deux méthodes précédentes. On détermine manuellement l'intervalle de variation des paramètres, puis on utilise la méthode automatique pour trouver les valeurs de paramètres optimales.

III.10- PRESENTATION DE QUELQUES MODELES

III.10.1- MIKE SHI

Ce modèle d'inspiration mécanique est le fruit d'une collaboration entre le Danish Hydrologic Institute, le British Institute of hydrology et la SOGREAH. Le logiciel MIKE SHE (Système Hydrologique Européen) a pour objet la modélisation de la partie continentale du cycle de l'eau et peut être, en théorie appliqué à des surfaces allant de la parcelle à la totalité du bassin versant (Abbott *et al.*, 1986 in Maison, 2000). Parmi les domaines d'application de MIKE SHI, nous retrouvons l'étude classique de la dynamique du bassin versant, ainsi que le suivi des pollutions, mais également, dans un contexte plus tourné vers la prévision, les études d'impacts relatives aux modifications du bassin (occupation des sols, aménagement, ...) ou de scénarios climatiques (sécheresse, fortes pluies, ...).

Le caractère mécaniste de ce modèle provient de l'utilisation de différents modèles mathématiques pour décrire chacune des composantes du cycle hydrologique (Fig. 10) et du cycle des polluants (Maftei, 2002).

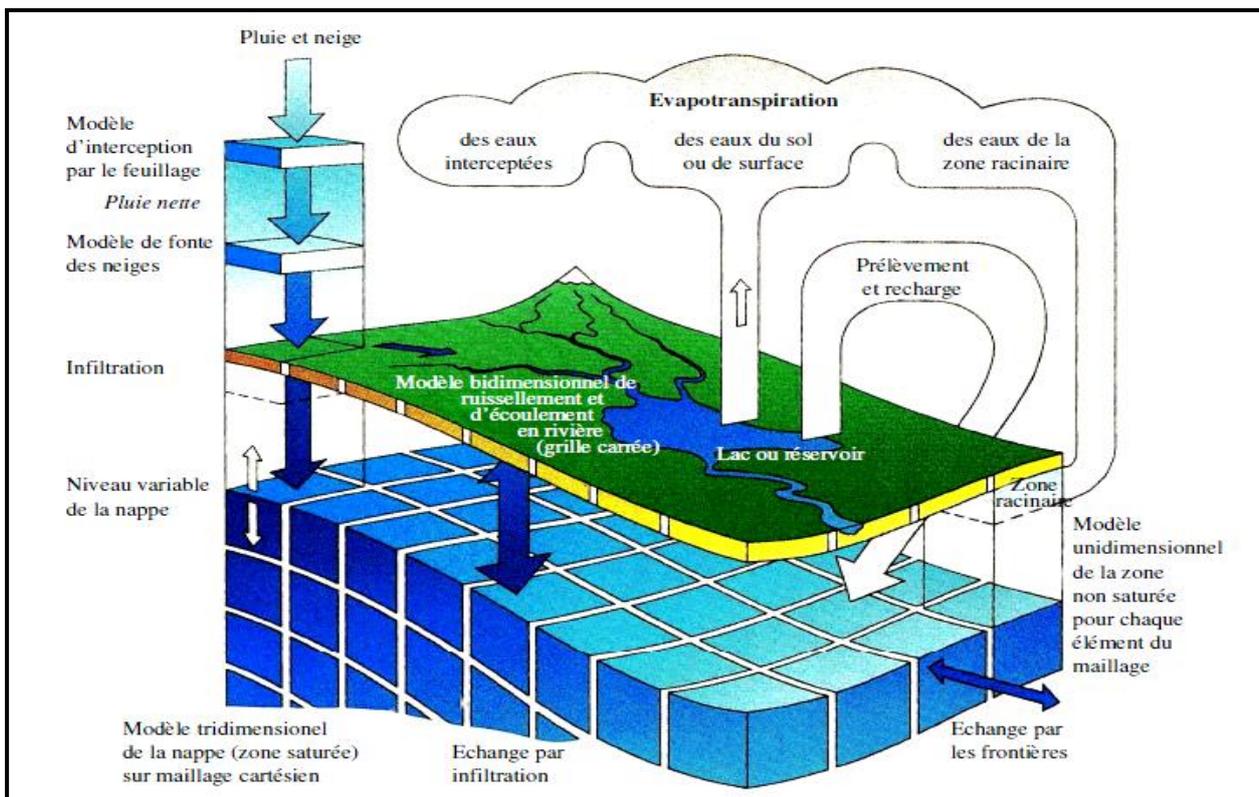


Figure 10 : Cycle de l'eau dans le logiciel MIKE SHI : processus modélisés (De Bruyn, 2004).

Le logiciel est distribué en mailles de calcul carrées. Le cœur du logiciel se nomme MIKE SHI WM (Water Movement). Il est constitué de 6 modules interconnectés qui représentent chacun un compartiment hydrologique (De Bruyn, 2004) :

- la fonte des neiges ;
- l'évapotranspiration et l'interception de la pluie par le feuillage ;
- les écoulements de surface (ruissellement et écoulement en rivière) ;
- les écoulements de la zone saturée ;
- l'irrigation.

D'autres modules spécifiques peuvent être couplés à MIKE SHI WM (concerne l'hydrodynamique du bassin) et notamment :

- MIKE SHI AD (Advection, Dispersion) qui permet la simulation du transport de substance (transport des solutés) ;
- MIKE SHE ADM (Adsorption, Dégradation, Module) qui simule l'adsorption et la dégradation de substances chimiques.

Le tableau 1 ci-dessous montre globalement les modèles utilisés dans le cadre de l'hydrodynamique.

Tableau 1 : Modélisation utilisée avec modèle hydrodynamique de MIKE SHE.

Interception et Evaporation	Kriston et Jensen (1975)
Ecoulement en zone non saturée	Richart (1931)
Ecoulement en zone saturée	Boussineq (1904)
Ruissellement	Ondes diffusives
Ecoulement dans le réseau hydrographique	Saint Venant (1871)

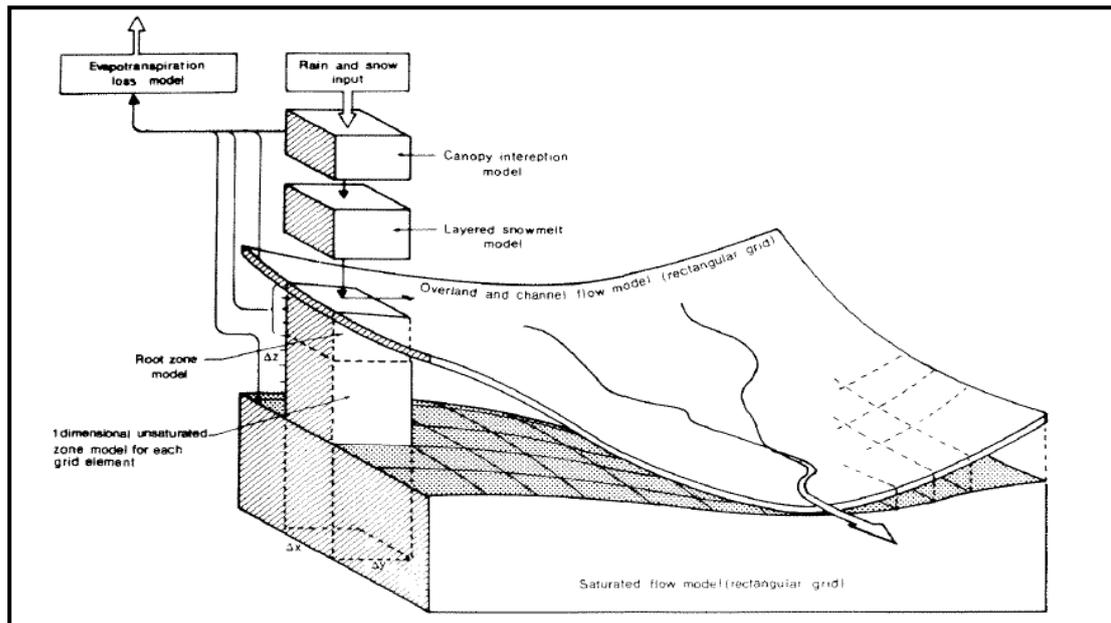


Figure 11 : Structure du modèle SHE (Beven *et al.*, 1980).

De ce fait, la discrétisation du bassin versant s'effectue classiquement par un découpage en strates horizontales et colonnes homogènes tridimensionnelles. La structure de ce modèle est représentée sur la (Fig. 11).

Du fait du caractère fortement mathématique de ce modèle, la connaissance préalable de nombreuses données s'avère indispensable. Nous notons entre autre la pluviométrie, les températures, l'occupation des sols, le type de culture, la texture des sols, les usages des sols, la topographie.

Toutefois, MIKE SHE dispose de nombreuses bases de données intégrées, ce qui lui confère un certain intérêt car la mise en place de campagne d'acquisition n'est indispensable que si l'utilisateur souhaite enrichir le plus possible la modélisation. Dans un premier temps, l'utilisation des banques de données peut se révéler suffisante.

III.10.2- CEQUEAU

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

Cela sous entend trois choses :

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

Le bassin versant est doublement découpé. Un premier découpage en carreaux entiers homogènes (Fig. 12) et un second, permettant de tenir compte de la topographie, et donc du sens d'écoulement de l'eau (Fig. 13). Les transferts sont assurés par la fonction de production, qui transforme les précipitations réelles en précipitations utiles pour le bassin (injectées dans le modèle, après épuration de l'évapotranspiration et répartition en fonction des différentes couches du sol), et par la fonction de transfert qui assure alors le cheminement de l'eau entre les carreaux partiels.

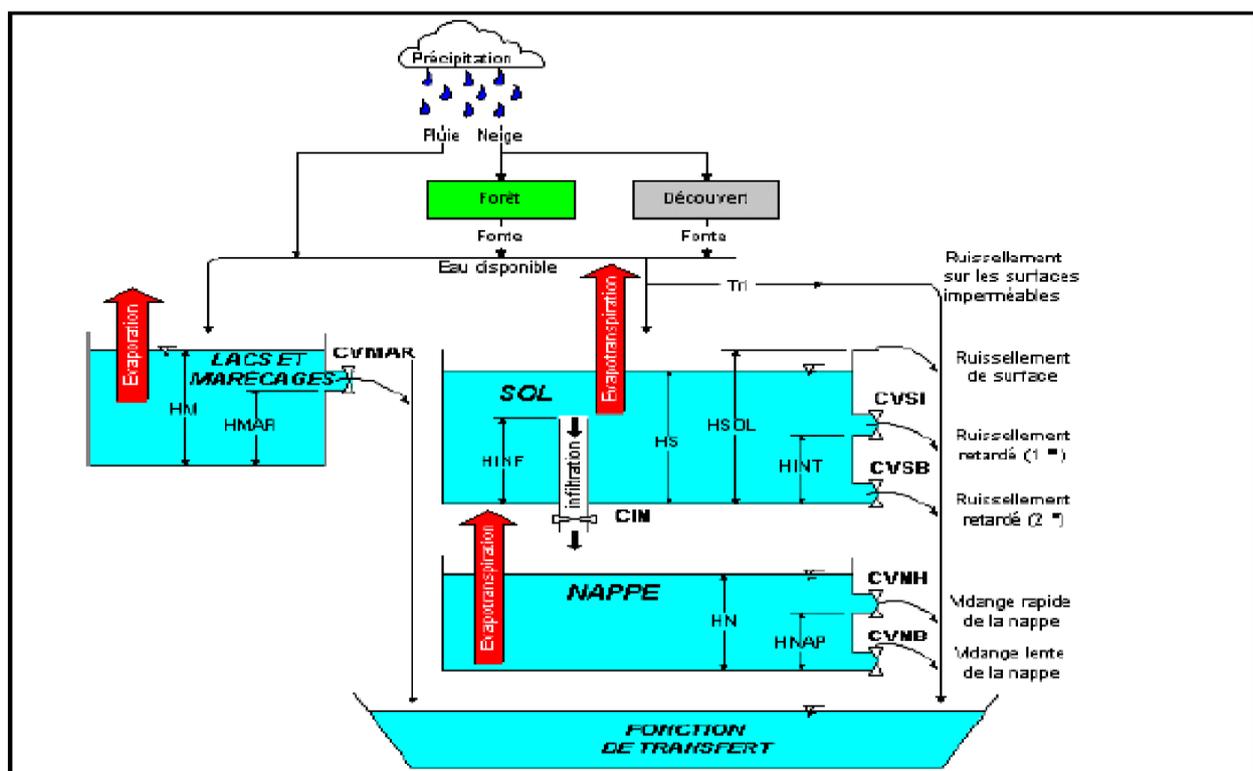


Figure 12 : Fonction de production du modèle CEQUEAU (Morin et Paquet, 1995).

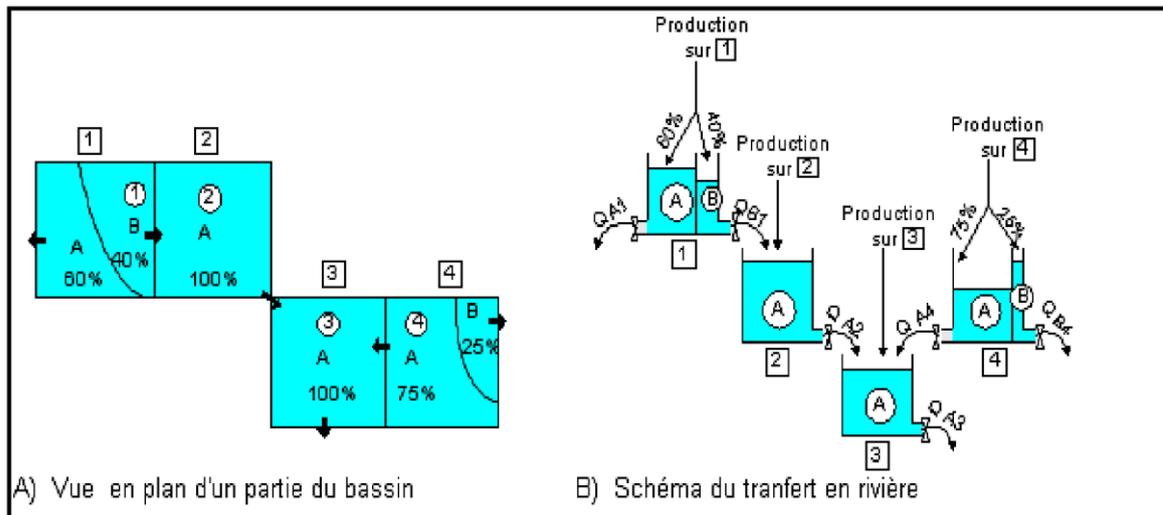


Figure 13: Fonction de transfert du modèle CEQUEAU (Morin et Paquet, 1995).

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

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

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

III.10.3- TOP MODEL

TOP MODEL (TOPography-based hydrological MODEL) est un modèle hydrologique initialement développé par (Beven et Kirkby, 1979 in Estupina Borrell, 2004), (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 façon suivante (Fig. 14) :

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

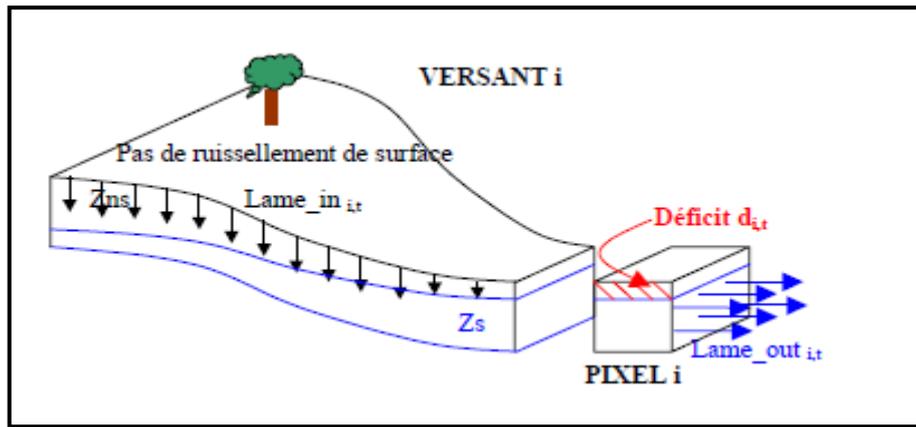


Figure 14 : Schématisation des écoulements sur le versant par TOPMODEL (Estupina, 2004).

TOPMODEL modélise donc les processus latéraux sous la forme d'une nappe temporaire s'écoulant vers le réseau hydrographique. On lui associe différents modules d'interception, de fonte des neiges, d'évapotranspiration, de transfert de surface (Fig. 15), ...

TOPMODEL n'a pas la prétention d'être un modèle complet, mais plutôt un ensemble de concepts qui doivent être utilisés de façon appropriée. Il est facile à mettre en œuvre, il utilise peu de paramètres, il est facile à initialiser en début d'événement et il est compatible avec les MNT et les SIG (Estupina, 2004).

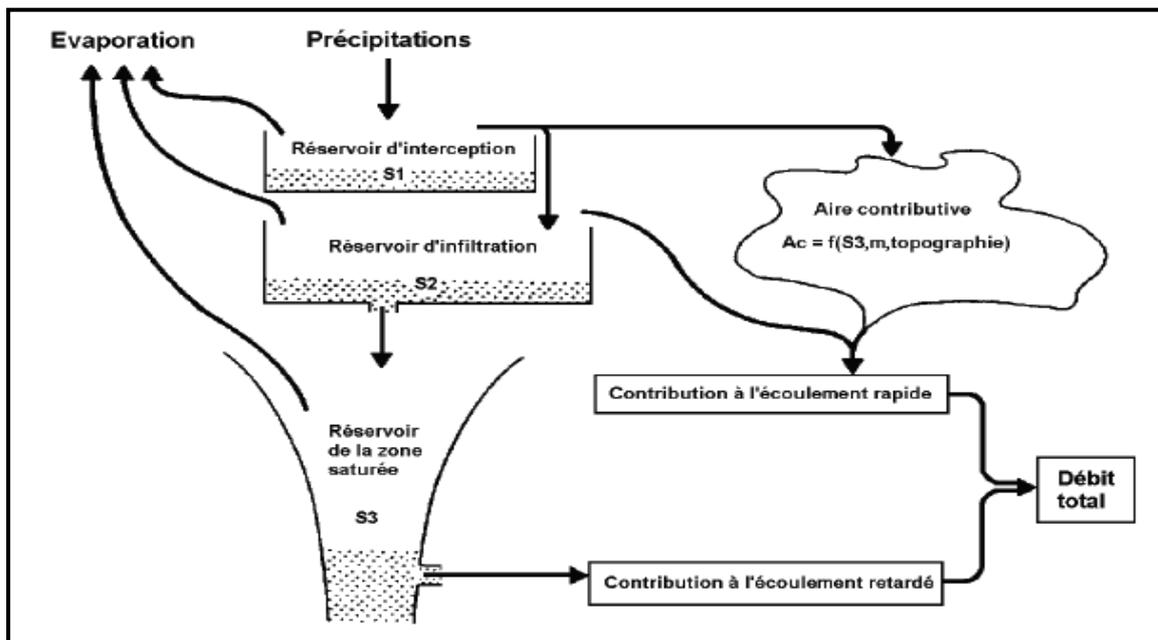


Figure 15 : Représentation schématique de TOPMODEL (S1, S2, S3 : niveaux dans les réservoirs ; m : un des paramètres du modèle) (d'après Beven et Kirkby, 1979 in Perrin, 2000).

III.10.4- WATER WARE

WATER WARE (Environmental Software and Service GmbH), il s'agit d'un modèle organisé autour d'un système d'information géographique (SIG) et de bases de données.

Ce logiciel est modulable et ainsi peuvent lui être adjoints de nouveaux modèles ou, au contraire, toute substitution est possible. La version classique de WATER WARE repose sur sept modèles. Nous notons à ce niveau la disparité des modélisations utilisées.

En effet, le ruissellement et le bilan hydrique en général sont modélisés à partir d'un modèle conceptuel à réservoirs, alors que la qualité des eaux simulée par un modèle monodimensionnel de transport par advection et la qualité des eaux est représentée par un modèle stochastique.

Ce modèle, est conçu dans une optique pratique. En effet, il ne s'agit pas du tout de réaliser un modèle de recherche dans lequel l'accent sera mis sur l'utilisation de modélisations mathématiques en vue d'améliorer ou de mieux appréhender leur résolution, mais plutôt d'un modèle à vocation pratique où les modèles utilisés ont déjà été éprouvés.

III.10.5- GIBSI

Ce modèle, développé à l'INRS-Eau du Québec (1995), est un système de modélisation intégrée incluant notamment un SIG et plusieurs modèles de simulation phénoménologique. L'objectif de ce modèle est d'être un outil convivial destiné à examiner l'impact de différents scénarios sur les ressources en eaux d'un bassin versant.

GIBSI repose sur l'utilisation de quatre modèles, ce qui lui confère un caractère modulaire et donc la possibilité d'ajouter ou de remplacer chacun des modèles. Le modèle HYDRTEL, qui constitue le noyau du modèle GIBSI permet notamment l'interpolation des données pluviométriques sur bassin versant (prise en compte de l'hétérogénéité des précipitations), le calcul de l'évapotranspiration, la simulation du ruissellement, de la fonte des neiges et de l'hydrodynamique classique en rivière. L'érosion est ensuite inspirée du modèle USLE/RUSLE (Universal Soil Erosion Equation) (Wischmeier et Smith, 1978 et Renard, 1997 *in* Maison, 2000), alors que le transport et la transformation de l'azote, du phosphore et des pesticides sont réalisés par le modèle SWAT/EPIC (Mitchell *et al.*, *in* Maison, 2000).

Il est intéressant de noter que ce modèle suit une chronologie bien précise en ce qui concerne l'application successive des différents modèles (Fig. 16).

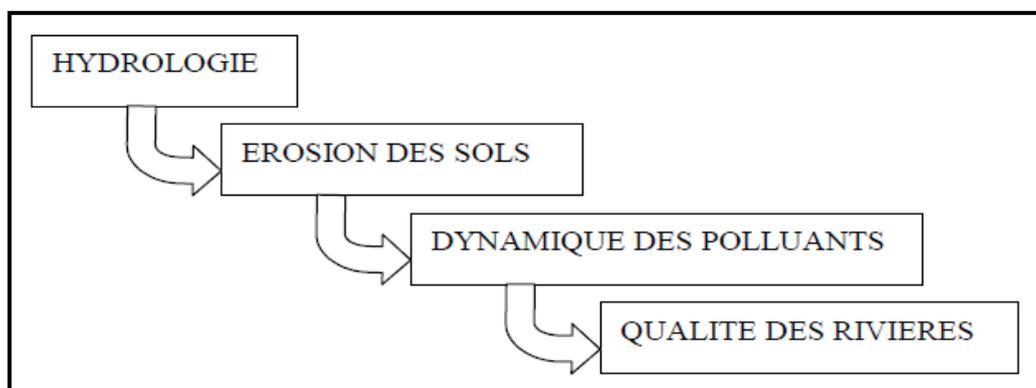


Figure 16 : Chronologie des modélisations utilisées dans GIBSI.

III.10.6- MODELES NEURONAUX

Les réseaux de neurones font partie de la catégorie des modèles « boîtes noires », c'est un nouveau type de modèle. Ils ont été bâtis en s'inspirant de systèmes nerveux biologiques mais c'est en s'éloignant de cette inspiration biologique pour prendre une tournure purement mathématique que les réseaux de neurones ont connu un essor. Les modèles à réseaux de neurones sont une alternative mathématique à la description physique des systèmes hydrologiques.

Un neurone formel est tout simplement la représentation physique d'un neurone biologique. Chaque neurone émet donc un signal en fonction des signaux lui parvenant des autres neurones (Fig. 17).

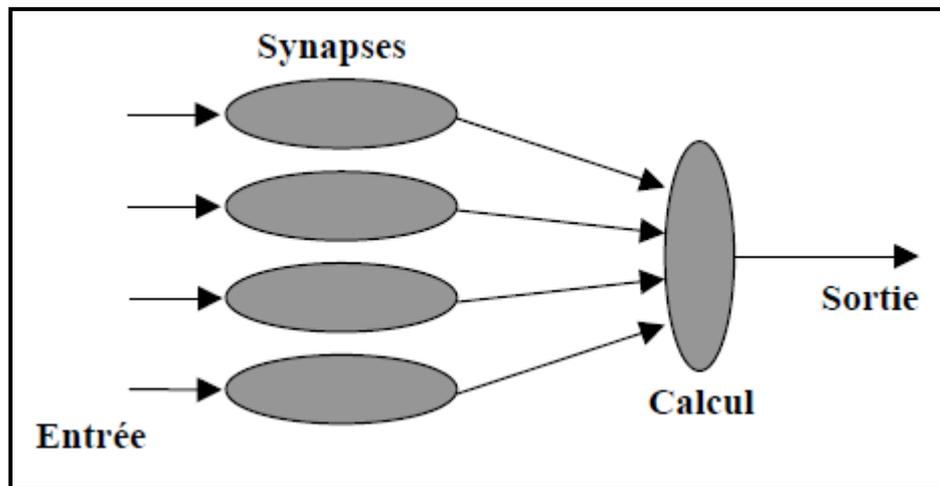


Figure 17 : Neurone formel (Maison, 2000).

Le réseau de neurones consiste alors en une arborescence de neurones avec des contacts synaptiques, tout comme dans un corps vivant (Fig. 18). Chaque signal (potentiel d'action) émis par un neurone sera pondéré afin de lui conférer une efficacité synaptique, tout comme les signaux électriques parcourant à plus ou moins forte intensité d'un système nerveux.

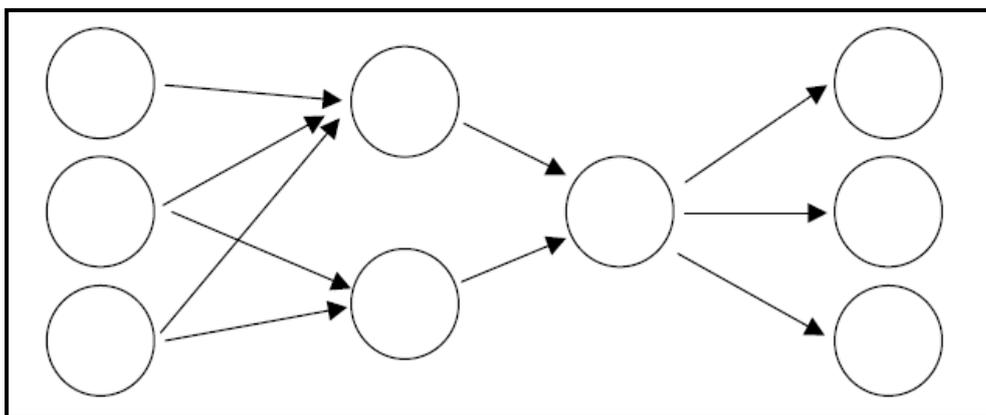


Figure 18 : Réseau de neurones (Maison, 2000).

La réalisation d'un réseau de neurones efficace passe donc par la réalisation d'une architecture adéquate et la pondération correcte de chaque potentiel d'action. Cette dernière est effectuée notamment par un forçage via un algorithme de convergence des poids de telle manière à ce que la présentation des objets d'entrée donne en sortie l'objet qui lui est associé. Il est intéressant de noter que chaque neurone ne fournit pas forcément une réponse linéaire,

somme pondérée des entrées, mais peut fournir une réponse qui est une fonction de ces entrées. C'est un système de calcul composé d'éléments de traitement simples fortement interconnectés, qui traitent l'information par leur changement d'état dynamique en réponse à une entrée externe (Riad, 2003).

Les réseaux de neurones constituent aujourd'hui un outil efficace lorsque les systèmes à modéliser sont fortement non-linéaires ou mal connus du point de vue de leur dynamique. Ils sont utilisés en hydrologie pour prédire les variations de débits des rivières au sein de leur bassin versant (Campolo *et al.*, 1999 *in* Maison, 2000), pour traiter les problèmes de pollution des sols (Krom, 1999 *in* Maison, 2000) ou encore pour décrire le comportement d'un bassin versant (Pulido *et al.*, 1999 *in* Maison, 2000).

C'est un outil efficace pour décrire les relations entrées-sorties d'un bassin versant, mais demeure une boîte noire en ce qui concerne la dynamique du système.

III.11- CHOIX DU MODELE UTILISE

Compte tenu de cette étude des modèles analysés et vu l'insuffisance de données spatialement réparties, et la qualité moyenne de quelques mesures météorologiques disponibles, on peut considérer le bassin de l'Oued Lakhdar comme un bassin mal jaugé, puisque même les données disponibles ne donnent une idée que d'une partie du bassin, la où se trouve la station hydrométrique 160601.

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

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

- le modèle GR est un modèle complet et simple, donc adapté théoriquement à n'importe quel type de climat et notamment à celui des zones arides, en plus il a la capacité de simuler aussi les pertes, l'écoulement de surface et l'écoulement souterrain;
- la fiabilité des résultats obtenus lors de son application à des sous bassins versants méditerranéens (Tafna (Bouanani, 2010), Mekerra (Bourek, 2010), Bassin de Oued Sikkak (Bouanani *et al.*, 2010)) nous a encouragés à appliquer ce modèle.

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

IV- MODELE GR

IV.1- INTRODUCTION

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

IV.1.1- 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 le dimensionnement et la gestion d'ouvrages, la prévision des crues ou des étiages, la détection d'impact, etc. C'est pour répondre à ces questions que le Cemagref

a commencé à développer au début des années 1980 des modèles hydrologiques (du Génie Rural – GR) permettant de faire le lien entre la lame d'eau précipitée sur un bassin versant et son débit à l'exutoire (Michel, 1983). Au-delà de leur aspect pratique, ces modèles ont soulevé des questions essentielles sur la façon de représenter la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant (Andréasian *et al.*, 2007).

IV.1.2- 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 (Andréasian *et al.*, 2006);
- évaluation d'un modèle par comparaison à d'autres structures du modèle.

IV.1.3- Principales caractéristiques

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

- au niveau des processus : les modèles GR proposent des relations comportementales simples à l'échelle du bassin, mises au point empiriquement et sans liens directs avec la physique des processus à petite échelle et pouvant représenter une moyenne de plusieurs processus;
- au niveau de l'espace : les modèles GR sont globaux, c'est-à-dire que, tout en reconnaissant l'extraordinaire hétérogénéité de tout bassin versant, ils considèrent le bassin versant comme un tout. Les tentatives de distribution progressive n'ont, jusqu'à présent, pas abouti à des résultats intéressants. C'est le comportement de la moyenne spatiale qui est étudié en priorité ;
- au niveau du temps : les modèles GR ont été développés pour des pas de temps de fonctionnement spécifiques : annuel (GR1A), mensuel (GR2M) et journalier (GR4J). Les différents modèles travaillent donc sur des moyennes temporelles. Notons que le développement d'un modèle au pas de temps horaire est en cours (Mathevet, 2005) et actuellement, le modèle journalier est appliqué au pas de temps horaire. Le modèle GR3H (horaire) utilisé dans certaines applications développées au Cemagref d'Aix-en-Provence (Fourmigué et Lavabre, 2005) correspond au modèle proposé par Edijatno (1991) au pas de temps journalier.

Dans la suite, on désignera par P (mm) la hauteur journalière de pluie, par E (mm) l'évapotranspiration potentielle journalière (ETP) et par Q (mm) le débit simulé (mm). P est une estimation de la pluie de bassin, calculée à partir de l'information pluviométrique

disponible (postes au sol notamment). E n'est pas nécessairement une donnée datée mais peut être issue d'une courbe de régime d'ETP moyenne interannuelle. Toutes les variables internes des modèles sont exprimées en mm.

IV.2- DESCRIPTION DU MODELE PLUIE-DEBIT ANNUEL GR1A

IV.2.1- 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).

IV.2.2- Description mathématique

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

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

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.

IV.2.3- Paramètre

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

IV.3- DESCRIPTION DU MODELE PLUIE-DEBIT MENSUEL GR2M

IV.3.1- Introduction

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) est un modèle pluie-débit global à deux paramètres optimisables : X_1 , capacité du réservoir de production (mm) ; X_2 , coefficient d'échanges souterrains (mm). Le modèle est à pas de temps mensuel. Il fonctionne autours de deux réservoirs, un de production (ou réservoir sol) et un de routage sur lesquels les ajustements et interception se font différemment sur les entrées. Le modèle utilise en entrées la pluie moyenne et l'ETP, et fournit en sortie le débit (Sossou, 2011). Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1980, avec des objectifs d'applications dans le domaine des ressources en eau et des étiages.

Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement par Kabouya (1990), Kabouya et Michel (1991), 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 (Perrin *et al.*, 2007).

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

IV.3.2- Description mathématique

Un schéma de la structure est donné à la (Fig. 19). 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 :

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

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 :

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

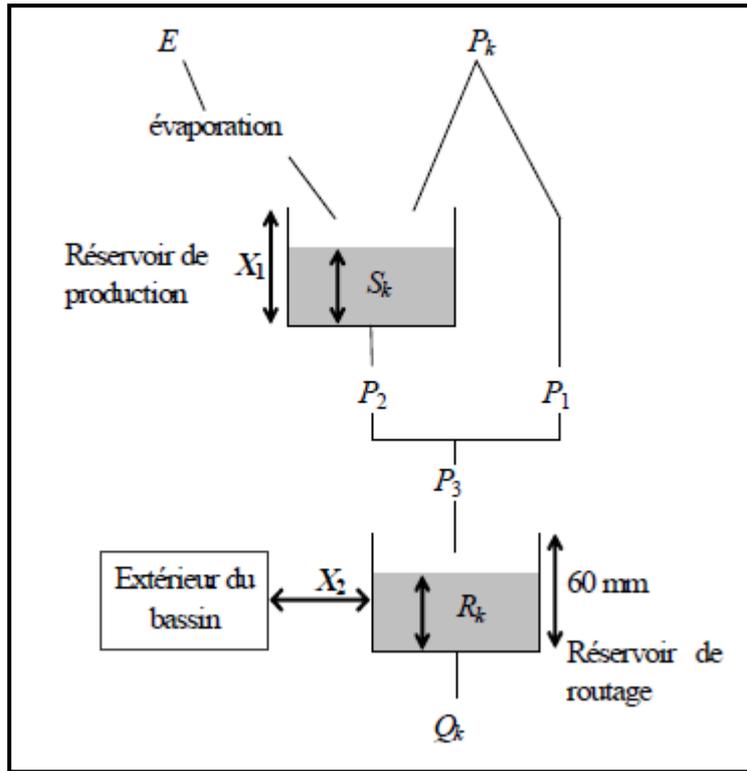


Figure 19: Schéma de la structure du modèle GR2M.

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

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

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 :

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

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 :

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

Le niveau R_k dans le réservoir devient alors R' :

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

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 :

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

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

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

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

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

Le contenu du réservoir est enfin actualisé par :

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

IV.3.3- 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 (Tab. 2).

Tableau 2 : Valeur des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants (Andreassian *et al.*, 2007).

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

IV.4- DESCRIPTION DU MODELE PLUIE-DEBIT JOURNALIER GR4J

IV.4.1- Introduction

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

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

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

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

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.

IV.4.2- Description mathématique

Un schéma de la structure est donné à la (Fig. 20). P_k est la pluie journalière du jour k et E l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même jour calendaire.

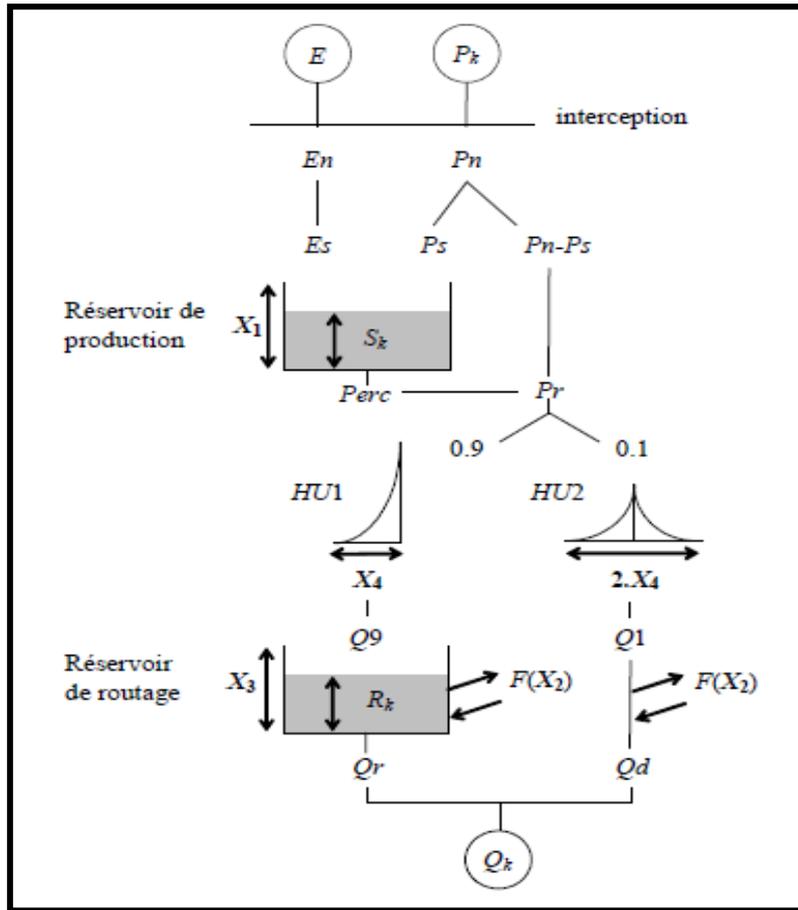


Figure 20 : Schéma de la structure du modèle GR4J.

- **Neutralisation**

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

Si $P_k > E$ alors $P_n = P_k - E$ et $E_n = 0$ Eq.15

Si $P_k < E$ alors $P_n = 0$ et $E_n = E - P_k$ 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 :

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

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

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

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

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 :

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

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 X_4 , temps de base de *HU1* exprimé en jours.

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

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

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

$$\text{Pour } t \geq X_4, \quad SH1(t) = 1 \quad \text{Eq.25}$$

SH2 est définie de façon similaire par :

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

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

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

$$\text{Pour } t \geq 2.X_4, \quad SH2(t) = 1 \quad \text{Eq.29}$$

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.

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

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

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

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

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

Un échange souterrain en eau est calculé par :

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

où R_k est le niveau dans le réservoir en début de pas de temps, X_3 la capacité à un jour du réservoir et X_2 le coefficient d'échange en eau qui peut être positif dans le cas d'apports, négatif dans le cas de pertes vers des nappes profondes ou nul. 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 $Q9$ de l'hydrogramme $HU1$ et F :

$$R' = \max(0; R_k + Q9(k) + F) \quad \text{Eq.35}$$

Il se vidange ensuite en une sortie Qr donnée par :

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

Le niveau dans le réservoir devient :

$$R_{k+1} = R' - Qr \quad \text{Eq.37}$$

• **Ecoulement total**

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

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

Le débit total *Q* est alors donné par :

$$Q_k = Qr + Qd \quad \text{Eq.39}$$

IV.4.3- 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, Andreassian *et al.*, 2007 ont obtenu les valeurs données dans le (Tab. 3).

Tableau 3 : Valeur des paramètres du modèle GR4J obtenues sur un large échantillon de bassins versants.

Paramètre	Médiane	Intervalle de confiance à 80%
X_1 (mm)	350	100 - 1200
X_2 (mm)	0	-5 à 3
X_3 (mm)	90	20 à 300
X_4 (jours)	1.7	1.1 à 2.9

IV.5- APPLICATIONS DES MODELES

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

- 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).

IV.6- CONCLUSIONS

Grâce aux progrès importants réalisés dans le domaine de l'informatique et des Systèmes d'Informations Géographiques les modèles hydrologiques et en particulier distribués utilisent une description de plus en plus complète du bassin versant et des termes du cycle hydrologique. Cependant, du fait du grand nombre de paramètres qui interviennent dans les processus hydrologiques et la complexité de ces bassins, cette approche pointue n'apporte pas forcément des résultats meilleurs. C'est pourquoi nous avons choisi un modèle hydrologique global, comportant peu de paramètres et pouvant rendre compte du comportement hydrologique du bassin. Les modèles du CEMAGREF, GR1A, GR2M et GR4J ont été retenus. L'objectif est de déterminer les paramètres caractéristiques de chacun de ces modèles pour un bassin versant donné.

Chapitre II :
**PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DE
L'OUED LAKHDAR**

I- PRESENTATION GENERALE DU BASSIN VERSANT DE LA TAFNA

Situé au Nord Ouest du territoire algérien, le bassin versant de la Tafna s'étend sur la totalité de la wilaya de Tlemcen sur une superficie de 7245 km² et déborde sur le royaume du Maroc (Fig. 21). Selon la nouvelle structuration des unités Hydrogéologiques en Algérie, le bassin versant de la Tafna appartient à l'ensemble de l'Oranie-Chott Chergui (Fig. 22).

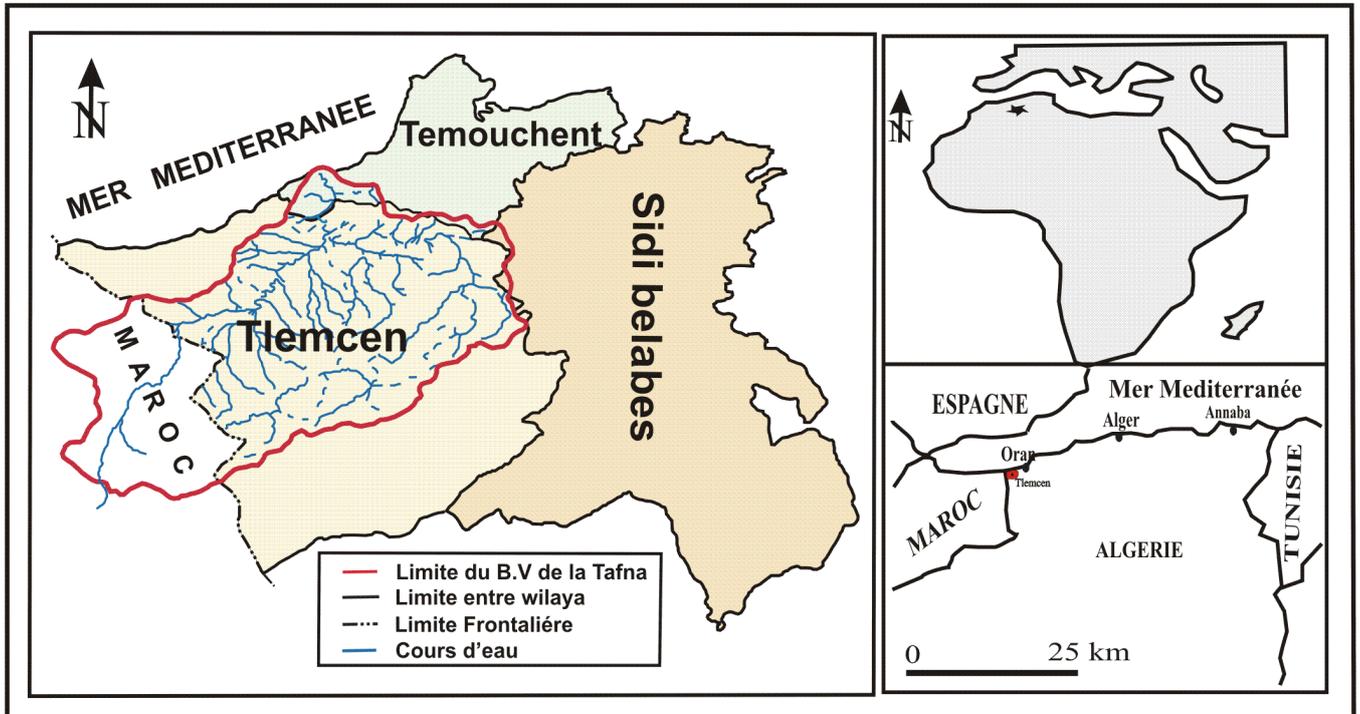


Figure 21 : Situation géographique du bassin versant de la Tafna.

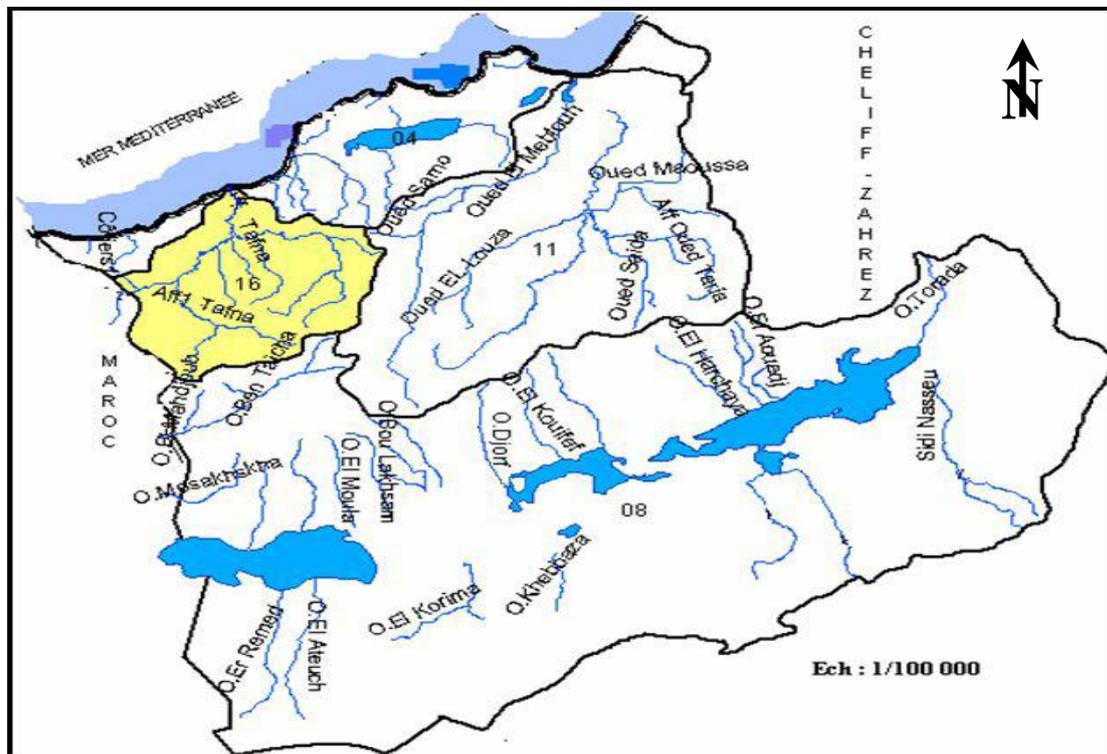


Figure 22 : Le bassin versant de la Tafna dans l'ensemble Oranie Chott Chergui (in Bouanani, 2004).

Globalement, le bassin versant peut être subdivisé en trois grandes parties (Fig. 22) :

- partie orientale : dont les principaux oueds sont Isser, oued Lakhdar (ex : Chouly) et Sikak ;
- partie occidentale : comprenant les principaux oueds dont : la haute Tafna, Mouilah et Khemis ;
- partie septentrionale : elle débute pratiquement du village Tafna et s'étend jusqu'à l'embouchure de la Tafna sur la mer (plage de Rechgoune). Les oueds Boukiou, Boumessaoud et Zitoun sont les principaux affluents de cette partie.

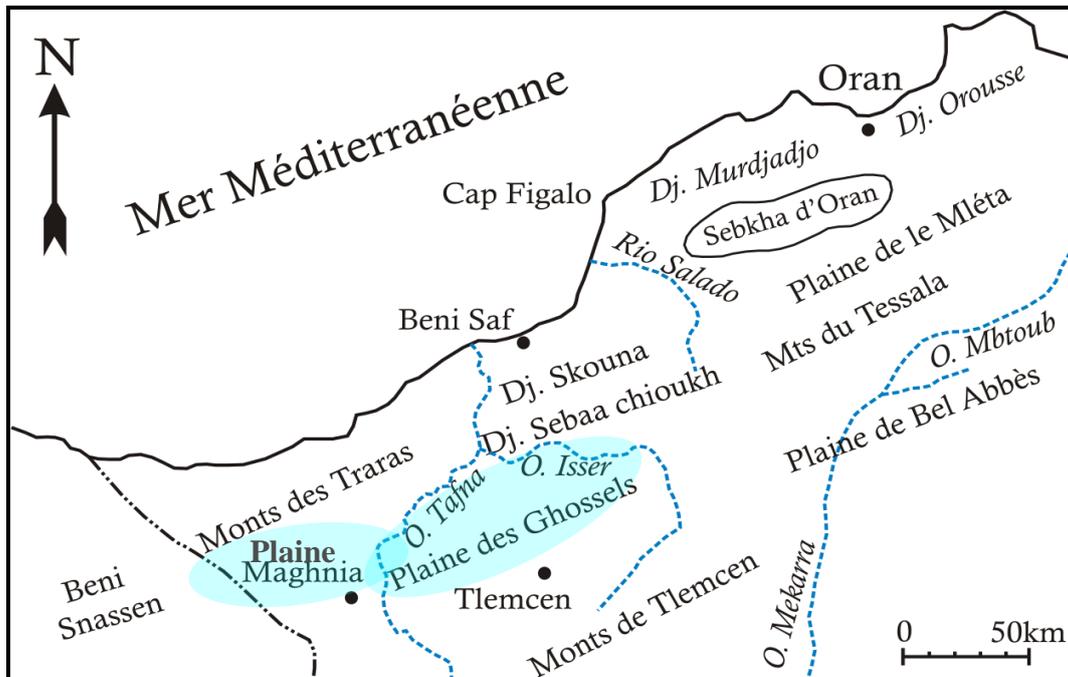


Figure 23 : Situation géographique du bassin de la Tafna (Perrodon, 1957 modifiée).

Le bassin de la Tafna correspond aux plaines qui s'étendent aux pieds des massifs 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 se situent au Nord des monts de Tlemcen (Meseta Oranaise) (Fig. 23), ils sont constitués de formations primaires et secondaires. Au Nord Ouest, ils 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.

La Tafna est un cours d'eau de 170 km de long, il prend sa source dans les Monts de Tlemcen (région de Sebdu). Du point de vue géomorphologique, le bassin versant de la Tafna peut se subdiviser en trois parties : la haute Tafna, la moyenne Tafna et la basse Tafna.

II- PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DE L'OUED LAKHDAR

Le bassin versant de l'Oued Lakhdar est un affluent de la Tafna (Fig. 24). Il occupe une superficie de 288.91 km² (3.98% de la superficie du bassin de la Tafna), dont la superficie du bassin contrôlé est de 170 Km² (Fig. 25).

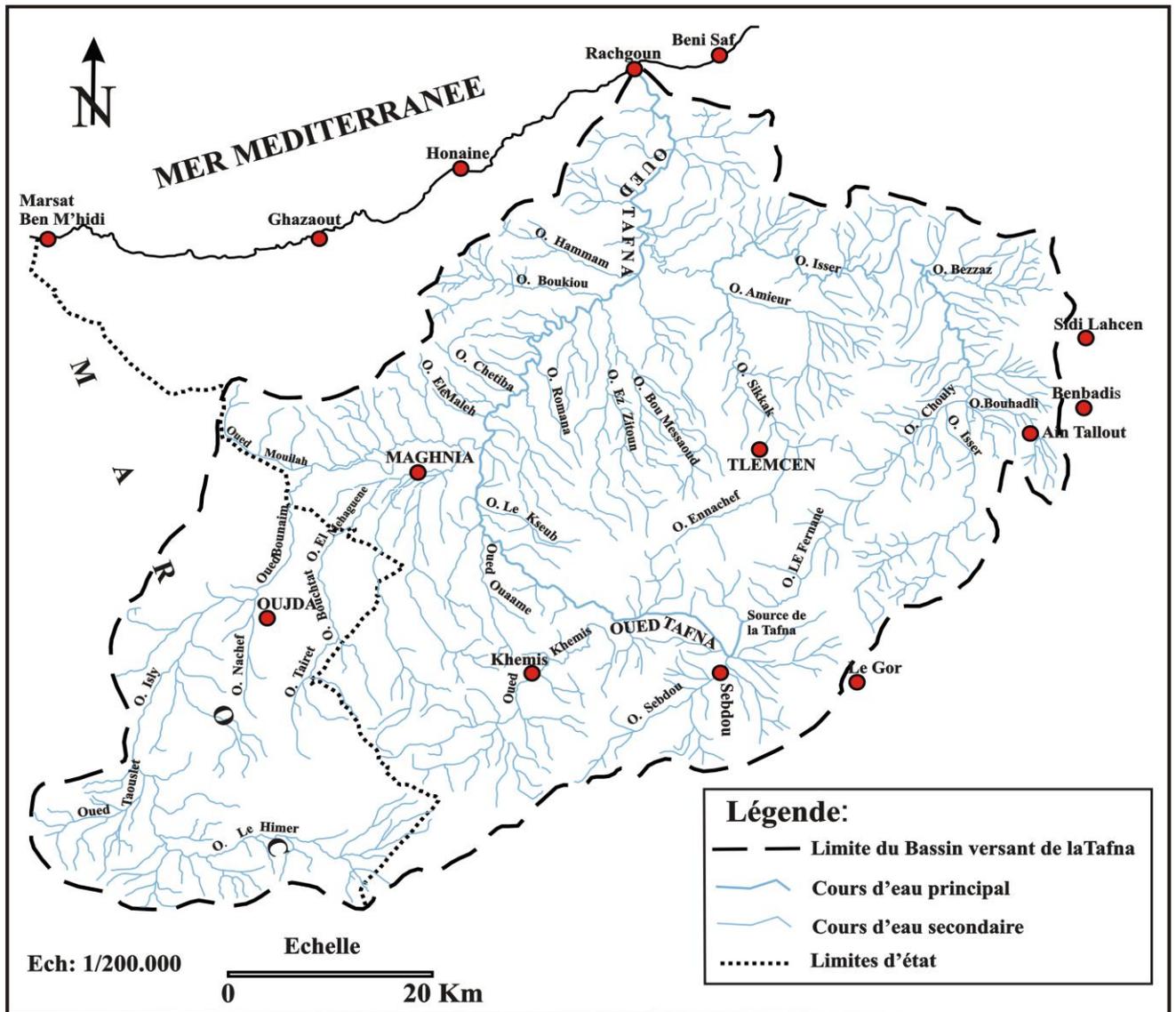


Figure 24 : Carte hydrographique du bassin versant de la Tafna.

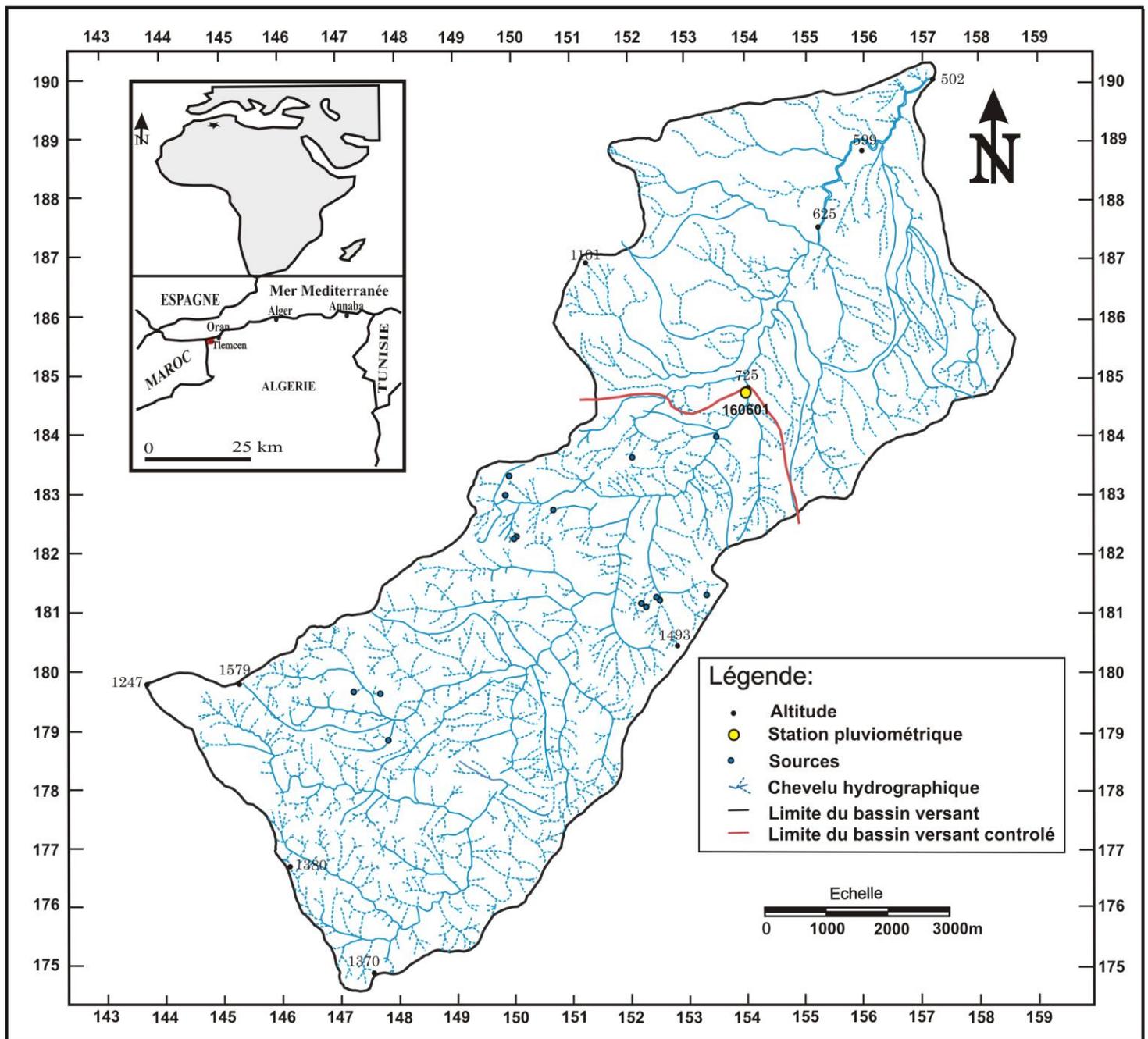


Figure 25 : Chevelu hydrographique du bassin versant de l'Oued Lakhdar.

Le bassin de l'Oued Lakhdar est limité :

- au Sud, par le sous bassin de Meffrouch ;
- à l'Est, par oued Isser ;
- à Ouest, le sous bassin de Sikkak.

Le réseau hydrographique de l'Oued Lakhdar (Fig. 25) est de direction SW – NE, c'est un cours d'eau à régime permanent qui doit sa pérennité aux nombreuses sources qui l'alimentent telles que : Aïn Tot Hamam, Aïn Ouissert et Aïn Béni Hella.

Le cours d'eau principal se jette plus bas dans oued Isser constituant ainsi son principal affluent (affluent rive gauche). Il prend sa source dans les monts de Tlemcen à environ 900 m

d'altitude, il draine le versant Nord de ces monts, sa vallée est surplombée par une série de massifs (Bouanani, 2004).

II.1- ETUDE MORPHOMETRIQUE

L'écoulement naturel des eaux dans un bassin versant est commandé à la fois par les conditions climatiques et par les caractéristiques physiques du bassin.

Les caractéristiques physiques les plus importantes qui jouent un rôle essentiel et qui font l'objet de l'analyse morphométrique sont : la forme, l'ordre des cours d'eau, le relief et les modèles de représentation.

Il existe un certain nombre de caractéristiques qui pourront compléter l'analyse morphométrique en particulier, tels que : la densité de drainage, la fréquence des cours d'eau, l'allongement et le profil des cours d'eau.

II.1.1- CARACTERISTIQUE DE FORME

Ce sont les caractères purement géométriques des bassins que l'on peut atteindre par le seul concours des relevés topographique. Leurs utilisations ont pour but, la quantification des facteurs caractéristiques du milieu physique d'un bassin versant.

Pour délimiter le bassin de l'Oued Lakhdar, nous avons utilisé les cartes topographiques à l'échelle 1/50 000 citées ci-dessus :

- Carte topographique de Tlemcen, N°270.
- Carte topographique de l'Ouled Mimoun, N°271.
- Carte topographique de Terny, N°300.
- Carte topographique de Beni-Smiel, N°301.

L'exutoire pris sur l'Oued est désigné par A (c'est le point de confluence avec l'oued Isser) dont l'altitude est de 502 m, et de coordonnées Lambert :

$$A \quad \left\{ \begin{array}{l} x = 157.4 \quad 3^{\circ} 75' 31'' \\ y = 190 \quad 38^{\circ} 84' \end{array} \right.$$

II.1.1.1- Indice de compacité de Gravelius (Kc)

Le coefficient de compacité de Gravelius est le rapport entre le périmètre (P) du bassin et la circonférence du cercle ayant la même superficie que le bassin (S). Il est donné par la relation suivante :

$$Kc = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}}$$

- Où :
- Kc** : Coefficient de compacité de Gravelius ;
 - P** : Périmètre du bassin versant (P= 115 km) ;
 - P** : Périmètre du bassin versant contrôlé (P= 60 km) ;
 - S** : Surface du bassin versant (A= 288.91 km²) ;
 - S** : Surface du bassin versant contrôlé (A= 170 Km²).

Le cercle étant par définition l'élément le plus compact, son indice de compacité Kc sera égal à 1. Cette valeur croîtra au fur et à mesure que la compacité du système diminue.

Sur le plan morphologique, la valeur élevée de l'indice de compacité (**Kc = 1.28**) traduit la forme allongée du bassin versant (contrôlé) de l'Oued Lakhdar.

II.1.1.2- Rectangle équivalent

Le rectangle équivalent permet de comparer l'influence de la forme sur l'écoulement dans les différents bassins versants (Fig. 26).

Longueur (L) :

$$L = \frac{K_c \sqrt{S}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right]$$

$$L = 21.7 \text{ km.}$$

Avec : **L** : la longueur du rectangle ;
l : la largeur du rectangle.

Largeur (l) :

$$l = \frac{K_c \sqrt{S}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right]$$

$$l = 7.68 \text{ km.}$$

Tableau 4 : Caractéristique de forme du bassin versant de l'Oued Lakhdar.

Bassin	Superficie (Km ²)	Périmètre (Km)	Kc	Rectangle équivalent	
				Longueur (Km)	Largeur (Km)
Oued Lakhdar	170	60	1.28	21.7	7.68

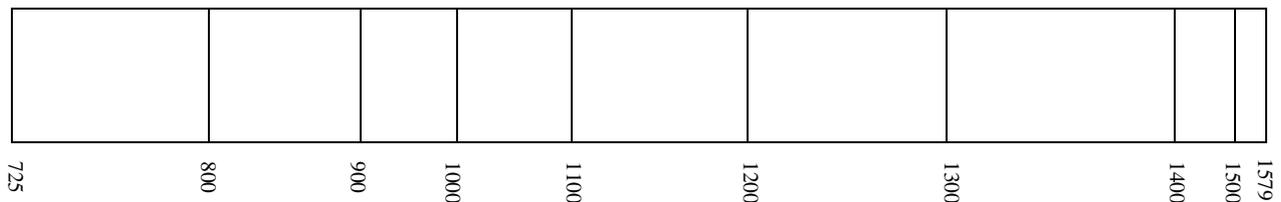
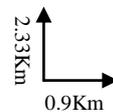


Figure 26 : Représentation graphique du rectangle équivalent du bassin versant de l'Oued Lakhdar.

II.1.2- ETUDE DU RELIEF

II.1.2.1- Courbe hypsométrique

Le relief est un facteur essentiel qui permet de déterminer en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains, l'infiltration et l'évaporation. C'est un élément capital dans le comportement hydrologique d'un bassin.

Partant de la répartition par tranche d'altitude du bassin (Tab. 5), nous avons établi la courbe hypsométrique (Fig. 27).

On tracera la courbe des fréquences altimétriques avec en abscisse les pourcentages des surfaces partielles et les altitudes en ordonnées tous les 100 m (Fig. 28).

- Altitudes caractéristiques
 - L'altitude de fréquence 1/2 = 1130 m.
 - L'altitude la plus fréquente = 1350 m.
- Avec :
- a : Surface partielle ;
 - A : Surface totale du bassin versant.

Tableau 5 : répartition hypsométrique du bassin versant de l'Oued Lakhdar.

Tranches d'altitudes (m)	Altitudes %	Surfaces partielles		Surfaces cumulées	
		Surface partielle (ai) (Km ²)	Fraction Surface parti. %	Surfaces cumulées (Km ²)	Fraction Surfaces cumulées %
725-800	45.91	27.02	15.89	27.02	15.89
800-900	50.66	20.82	12.24	47.84	28.13
900-1000	55.99	13.25	7.79	61.09	35.92
1000-1100	63.33	15.8	9.29	76.89	45.21
1100-1200	69.66	24.1	14.17	100.99	59.38
1200-1300	75.99	27.29	16.05	128.28	75.43
1300-1400	82.33	31.35	18.44	159.63	93.87
1400-1500	88.66	8.31	4.88	167.94	98.79
>1500	100	2.06	1.21	170	100

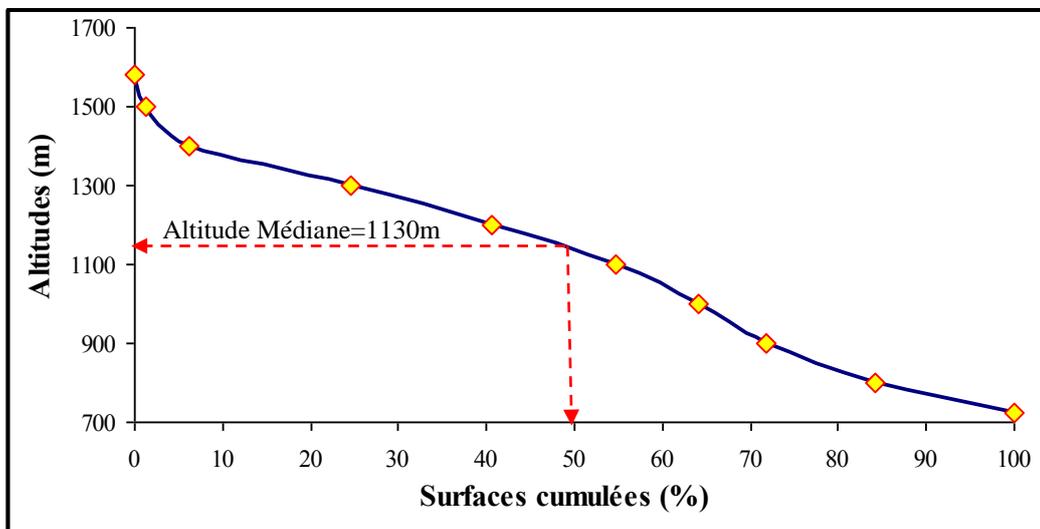


Figure 27 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued Lakhdar.

La courbe hypsométrique a une allure qui semble assez régulière (Fig. 27), vers le bas, à partir de 1200 m d'altitude on remarque une concavité qui se traduit par une variation de pentes qui s'accroissent de plus en plus à une altitude plus basse, cette concavité témoignant d'une érosion à une époque récente. La courbe fait ressortir aussi la présence de pente assez forte au niveau des basses altitudes qui indiquera la présence de plaines. La répartition altimétrique des surfaces est assez homogène (Fig. 29) et la courbe présente un état plutôt de jeunesse allant vers l'équilibre. La figure 28 explique bien l'état de jeunesse du cours d'eau.

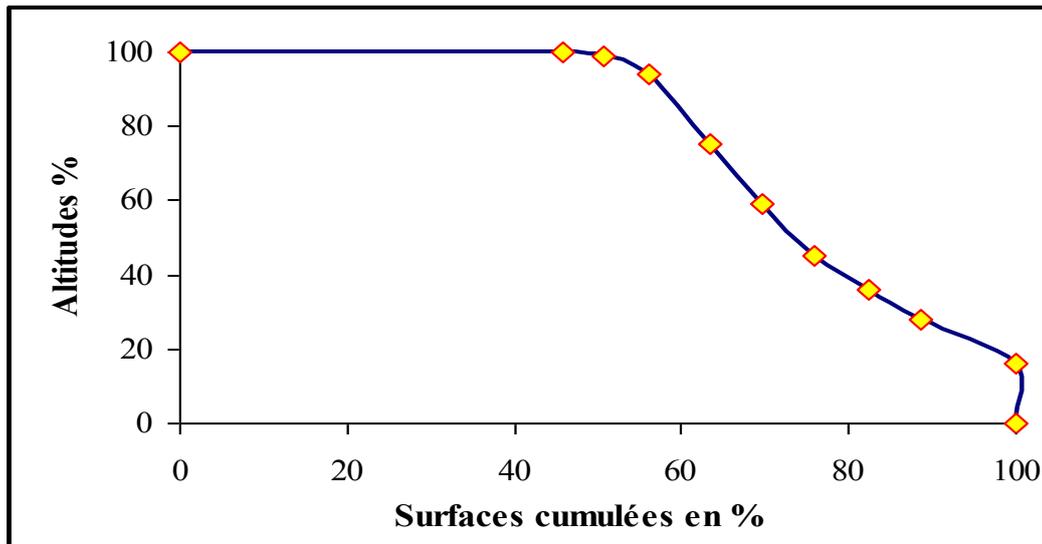


Figure 28 : Courbe représentative de l'état du bassin versant de l'Oued Lakhdar.

Tableau 6 : Altitudes caractéristiques du sous bassin de l'Oued Lakhdar.

Bassin	Altitude la plus fréquente en (m)	Altitude de fréquence 1/2 (m)	Observation
Oued Lakhdar	1400-1300	1350	Equilibre

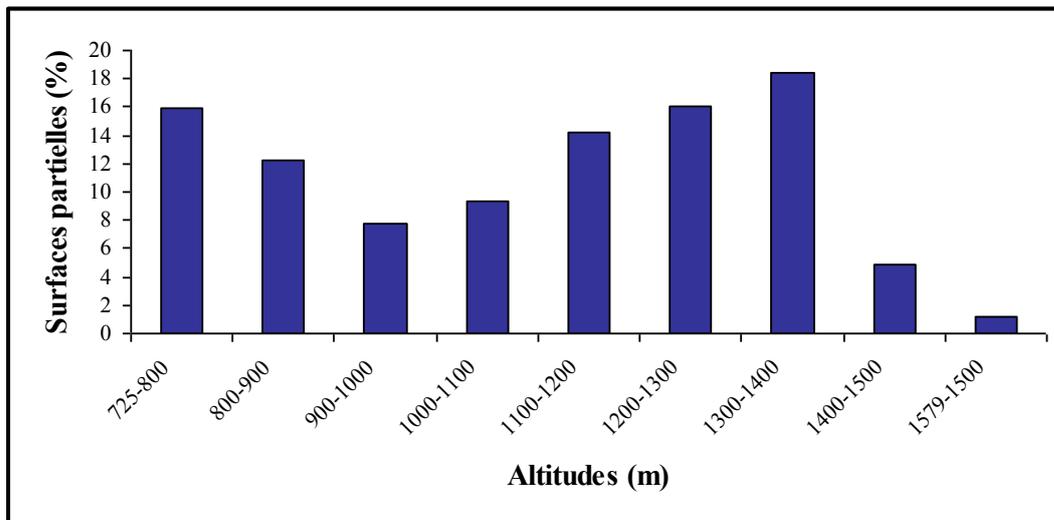


Figure 29 : Histogramme de fréquences altimétriques du bassin versant de l'Oued Lakhdar.

II.1.2.2- Indice de pente

a- Indice de pente (Ip)

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 de Roche Ip donné par la relation suivante :

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

β_i : fraction de la surface totale du bassin comprise entre les côtes a_i et a_{i-1} ; fonction donnée par le tableau hypsométrique ;

X_i : distance séparant de courbes de niveau sur le rectangle équivalent ;

L : longueur du rectangle équivalent ;

$a_i - a_{i-1}$: dénivelé entre deux courbes voisines (m).

$$I_p = 0.19$$

b- Indice de pente global (I_g)

Sur la courbe hypsométrique déjà tracé, on prend les points tels que la surface supérieure ou inférieure soit égale à 5 % de la surface totale.

$$I_g = D/L$$

Avec : D : dénivelée (m) : $H_{5\%}$, $H_{95\%}$ ($H_{5\%}$ et $H_{95\%}$ sont les altitudes entre lesquelles s'inscrivent 90% de la surface du bassin) ;

L : longueur du rectangle équivalent ;

I_g : indice de pente global de Roche.

La dénivelée D est donc égale à $D = H_{5\%} - H_{95\%}$: altitude exprimée en m

$$\begin{array}{l} H_{5\%} = 1400 \text{ m} \\ H_{95\%} = 800 \text{ m} \end{array} \rightarrow D = 600 \text{ m}$$

$$I_g = \frac{600}{21.7 \times 10^3} = 27.6 \times 10^{-3} = 0.0276 = 2.76\%$$

La valeur de I_g trouvée : $0.02 < I_g = 0.027 < 0.05$ indique suivant la classification de l'O.R.S.T.O.M. (Tab. 7) que le bassin de l'Oued Lakhdar a un relief assez fort.

Tableau 7 : Classification des reliefs selon I_g par l'O.R.S.T.O.M

Relief très faible	$I_g < 0.002 \text{ m/km}$
Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$
Relief assez faible	$0.005 < I_g < 0.01$
Relief modéré	$0.01 < I_g < 0.02$
Relief assez fort	$0.02 < I_g < 0.05$
Relief fort	$0.05 < I_g < 0.5$
Relief très fort	$0.5 \text{ m/km} < I_g$

c- Dénivelée spécifique (D_s)

I_g diminue quand L augmente (donc en général quand la surface du bassin versant augmente) ; il sera donc difficile de comparer deux bassins versants de taille différente. On définit donc une grandeur qui ne présente pas d'inconvénient. D_s : dénivelée spécifique :

$$D_s = I_g \sqrt{A}$$

$$D_s \text{ est proportionnelle à la largeur : } D_s = \frac{D}{L} \sqrt{L.1} = D \sqrt{\frac{1}{L}}$$

$$D_s = 356.9 \text{ m}$$

La dénivelée spécifique ne dépend donc que de l'hypsométrie ($D = H_{5\%} - H_{95\%}$) et de la forme du bassin ($1/L$). Elle donne lieu à une deuxième classification de l'O.R.S.T.O.M, indépendante des surfaces des bassins (Tab. 8) (Merrien, 2009) :

Tableau 8 : Classification du relief selon Ds.

Ds < 10 m	Relief très faible
10 m < Ds < 25 m	Relief faible
25 m < Ds < 50 m	Relief assez faible
50 m < Ds < 100 m	Relief modéré
100 m < Ds < 250 m	Relief assez fort
250 m < Ds < 500 m	Relief fort
Ds > 500 m	Relief très fort

La valeur de Ds (Tab. 8), traduit bien l'importance du volume montagneux et la forte incision du relief.

d- Indice de pente moyenne (Im)

Elle est donnée par la formule suivante :

$$I_p = \frac{H(0.5P_0 + P_1 + \dots + P_{n-1} + 0.5P_n)}{F}$$

H : différence entre deux courbes de niveau voisin ;

P₀ : longueur de la courbe de niveau inférieur ;

P_n : longueur de la courbe de niveau supérieur ;

P₁ et **P₂** : longueur des courbes de niveau intermédiaire.

Im = 21.6%

Cet indice montre le caractère montagneux de la zone de l'Oued Lakhdar. Il met en évidence que les pentes sont très élevées.

Tableau 9 : Indices de pentes et reliefs du sous bassin de l'Oued Lakhdar.

Sous bassin	Im	Ip	Ig	Relief selon Ig	Ds (m)	Relief selon Ds
Oued Lakhdar	0.216	0.19	0.027	Assez fort	356.9	relief fort

Conclusion

A partir des valeurs calculées, découlent les résultats suivants :

- L'indice de pente globale nous permet de classer la zone de l'Oued Lakhdar à relief fort.
- L'indice de pente moyenne montre le caractère montagneux.
- La courbe hypsométrique traduit bien l'aspect accidenté de la zone.

II.1.3- CARACTERISTIQUES HYDROGRAPHIQUES

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.

Le chevelu hydrographique suit pratiquement les accidents importants qui ont affecté les formations carbonatées du Jurassique et se modifie avec l'évolution de la tectonique.

Les paramètres importants qui régissent le régime hydrologique d'un cours d'eau sont : la densité de drainage (Dd), le rapport de confluence (Rc) et le rapport des longueurs (Rl).

II.1.3.1- Rapport de confluence

Il est défini par :

$$R_C = N_i / N_{i+1}$$

Le **Rc**, c'est le quotient de nombre de talwegs d'ordre i par celui des talwegs d'ordre supérieur (i+1) ; (Tab. 9).

Rc : rapport de confluence ;

N_n : nombre de cours d'eau d'ordre n ;

N_{n+1} : nombre de cours d'eau d'ordre n+1.

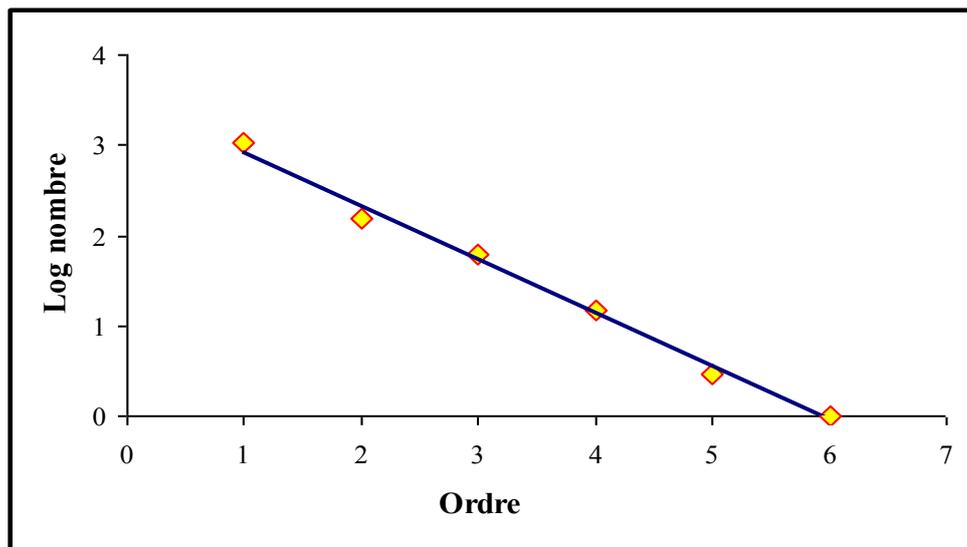


Figure 30 : Droite représentative du nombre de talwegs en fonction de l'ordre.

Pente moyenne est égale à 0.76%.

Rc=5.75.

La figure 30 montre que le réseau est bien organisé, les nombres de cours d'eau d'ordre successif croissant forment une série géométrique inverse.

II.1.3.2- Rapport des longueurs

$$R_L = L_{n+1} / L_n$$

L_n : longueur de cours d'eau d'ordre n (Tab. 10) ;

L_{N+1} : longueur de cours d'eau d'ordre n+1.

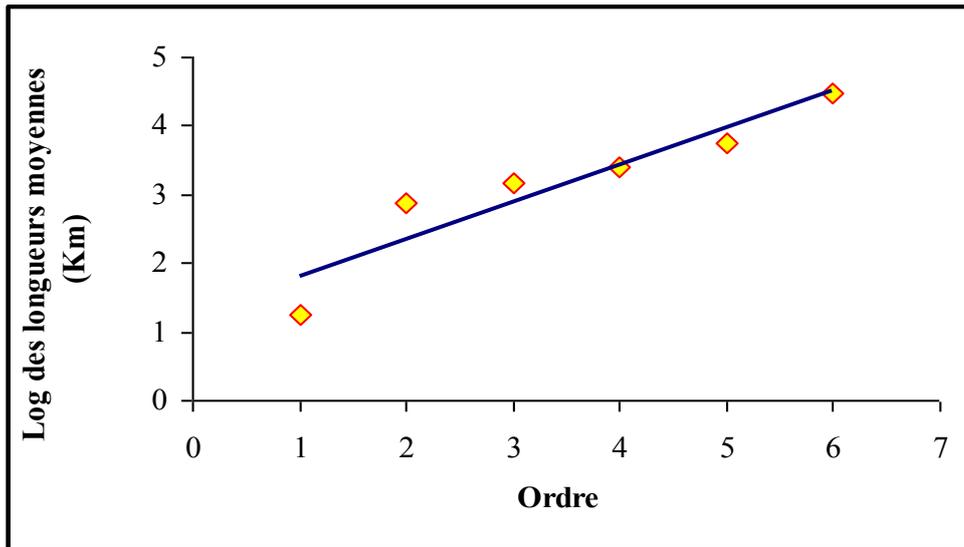


Figure 31 : Droite représentative du rapport des longueurs en fonction de l'ordre.

Tableau 10 : Paramètres morphométriques du B.V de l'Oued Lakhdar.

Ordre	Nombre	Rapport de confluence	Longueur cumulée (Km)	Longueur moyenne (Km)	Rapport des longueurs
1	1058	6.960	19.78	0.018	42.277
2	152	2.491	115.75	0.761	1.921
3	61	4.066	89.2	1.462	1.727
4	15	5	37.9	2.526	2.163
5	3	3	16.4	5.466	5.488
6	1	-	30	30	-
		Rc=4.30			

La figure 31 montre que le réseau est bien organisé, les longueurs moyennes des talwegs d'ordre successif croissant forment une série géométrique directe.

II.1.3.3- Densité de drainage

La densité de drainage permet l'identification du chevelu hydrographique d'un bassin versant.

Elle est définie comme étant la somme des longueurs des talwegs drainant sur la surface du bassin versant (Fig. 31).

$$D_d = \sum L / A$$

Où,

Dd : densité de drainage en km/km².

L : longueur cumulée de tous les thalwegs du bassin en km.

A : aire du bassin en km².

$$\begin{aligned} \sum L &= 12.36 \text{ km.} \\ S &= 170 \text{ km}^2. \end{aligned} \quad \longrightarrow \quad Dd = 0.072 \text{ km}^{-1}$$

II.1.3.4- Profil en long du cours d'eau principal

Il est établi en portant en abscisse les distances horizontales et en ordonnée l'altitude selon les courbes de niveau de la région, (Fig. 32).

La longueur de l'oued est de 30 km.

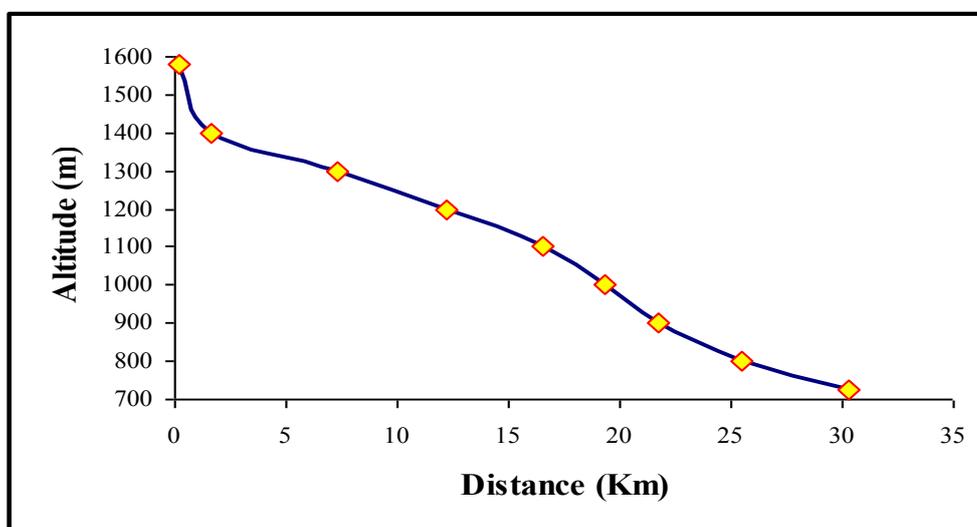


Figure 32 : Profil en long du cours d'eau principal de l'Oued Lakhdar.

Tableau 11 : Principaux paramètres du bassin versant de l'Oued Lakhdar.

Paramètres	Unité	Symbole	Oued Chouly
Superficie	Km ²	A	170
Périmètre	Km	P	60
Indice de compacité	-	K _c	1.28
Indice de pente de Roche	-	I _p	0.19
Indice de pente global	-	I _g	0.027
Longueur du rectangle équivalent	Km	L _{RE}	21.7
Longueur du talweg principal	Km	L _p	30
Densité de drainage	Km/Km ²	D _d	0.072
Altitude la plus fréquente	m	-	1350
Altitude minimale	m	H _{min}	725
Altitude maximale	m	H _{max}	1579

Conclusion

Le Profil en long de l'Oued Lakhdar (Fig. 32), montre dans sa partie aval, avant de se jeter dans Oued Isser, une pente relativement régulière et plutôt faible. Il faut noter l'existence de ruptures de pentes qui vont avec l'encaissement profond du lit de l'oued, ceci est dû à l'érosion causée premièrement par l'écoulement et par la présence de failles (dans les formations calcaires et dolomitiques du Jurassique) dans la partie amont : l'érosion s'établit différemment, selon que ce soit un terrain dur ou tendre, d'autre part par la présence de failles et fractures que connaît la région.

II.2- ETUDE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

La lithologie joue un rôle important sur le ruissellement, l'infiltration, l'érosion et le transport solide. Les matériaux géologiques se distinguent en formations meubles (sables, argiles, marnes) ou en formations consolidées (grès, calcaires, dolomies,...). La nature des affleurements a une influence sur l'hydrologie de surface et le type du dépôt alluvionnaire.

Nous allons présenter brièvement quelques caractères généraux sur la géologie de l'Oued Lakhdar.

II.2.1- DESCRIPTION LITHOSTRATIGRAPHIQUE (Fig. 33)

La lithologie dominante est la formation calcaire, la formation des grès de Boumediene constitue le "mègarylème" du Jurassique supérieur des monts de Tlemcen selon M. Benest 1985.

Ainsi le bassin versant de l'Oued Lakhdar se caractérise par cinq principales formations géologiques.

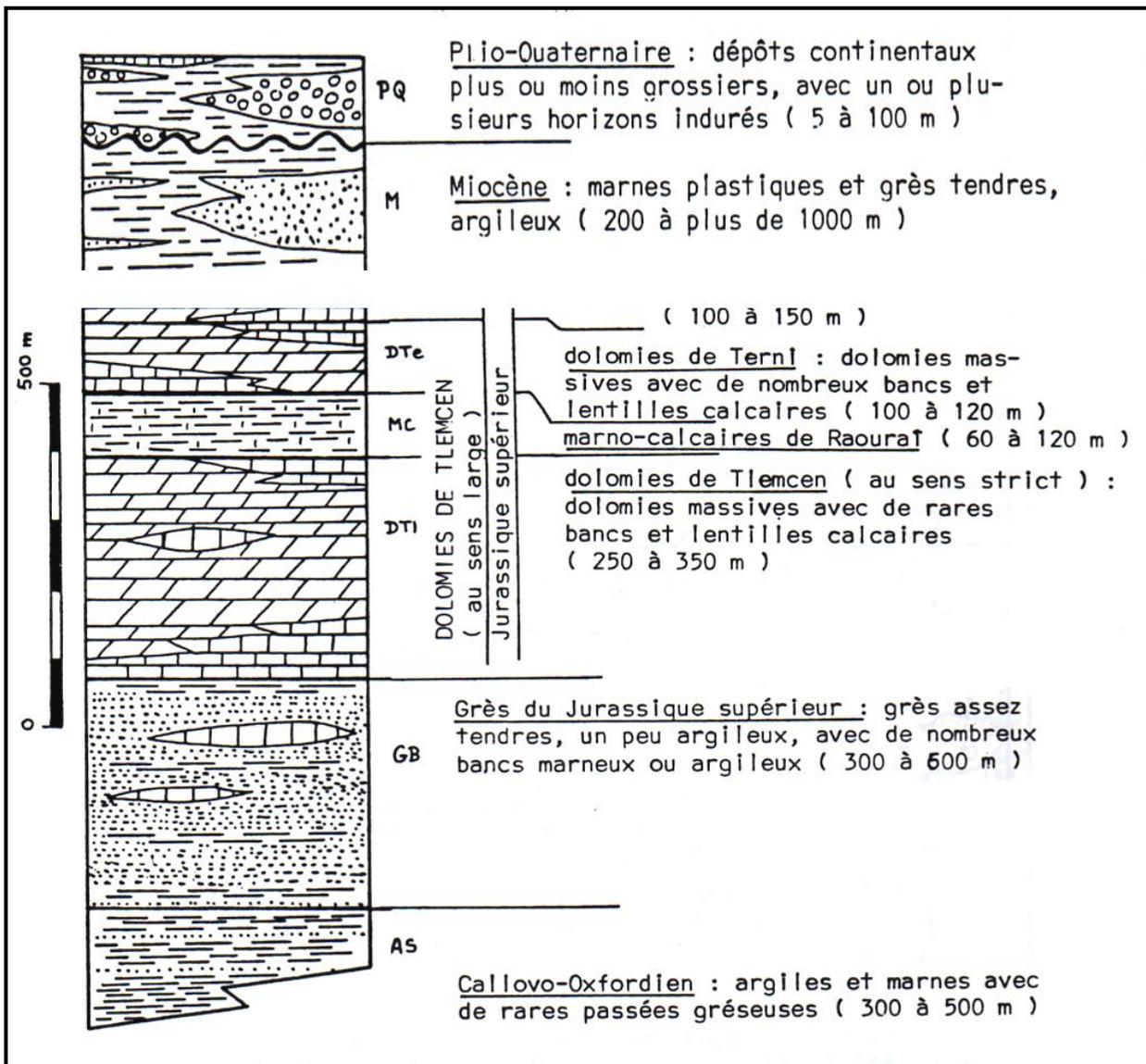


Figure 33 : Coupe synthétique des principales formations affleurant dans les monts de Tlemcen (jusqu'au callovo-oxfordien) (Collignon, 1986).

II.2.1.1- SECONDAIRE

A- Jurassique

A.1- Marnes et calcaires du Kimméridgien moyen

Constituant la partie Nord de l'Oued Lakhdar. Ce sont des marnes grises, blanchâtres en surfaces intercalées de nombreux lits et bancs de calcaire généralement marneux, parfois durs et sublithographiques.

A.2- Dolomies et calcaires du Kimméridgien supérieur

C'est la formation dominante, ce sont des calcaires gris en bancs cristallins à la base, surmontés de dolomies d'escarpement. Elle constitue donc avec les dolomies de Terny parfois mises en communication par faille, l'aquifère le plus important du secteur étudié.

B- Crétacé

B.1- Berriasien

Représenté au Sud de l'agglomération de l'Oued Lakhdar par des argiles, de grés et de calcaires.

Les argiles de couleur verdâtre sont intercalées entre les bancs de grés argileux, et d'autres bancs calcaires s'intercalent dans les parties supérieures.

II.2.1.2- TERTIAIRE

A- Pliocène continental

Affleurant au Nord de l'Oued Lakhdar, ce sont des dépôts alluvionnaires des plateaux caillouteux et limoneux parfois grés sableux.

II.2.1.3- QUATERNAIRE

Représenté par un faciès continental d'origine alluvial et colluvial.

A- Alluvions récentes et sub-actuelles

Sont des dépôts caillouteux et limoneux occupant les fonds des oueds, surmontant un niveau grossier au niveau de l'Oued Lakhdar et Oued Isser, les formations subactuelles se présentent en terrasse d'origine fluviocontinentales.

Le moulouyen: Conglomérat grossier à ciment calcaire protégé par une croûte calcaire.

II.2.2- TECTONIQUE

La tectonique se traduit par un massif Jurassique calcaréo-dolomitique peu plissé. La chaîne montagneuse Nord-Sud forme un anticlinal : c'est un pli de couverture souple bordé sur son flanc et représente un repli synclinal, sa forme en cuvette en fait un bon bassin de réception des eaux, et il donne ainsi naissance à Oued Tafna et à Oued Lakhdar.

La faille d'effondrement Nord (F₂) au niveau de la forêt de Zarifet est orientée Sud Ouest-Nord Est. Plus à l'Est une direction Est Ouest est présente jusqu'à l'agglomération de l'Oued Lakhdar où elle rencontre l'accident du fossé d'effondrement de Tlemcen (Fig. 34).

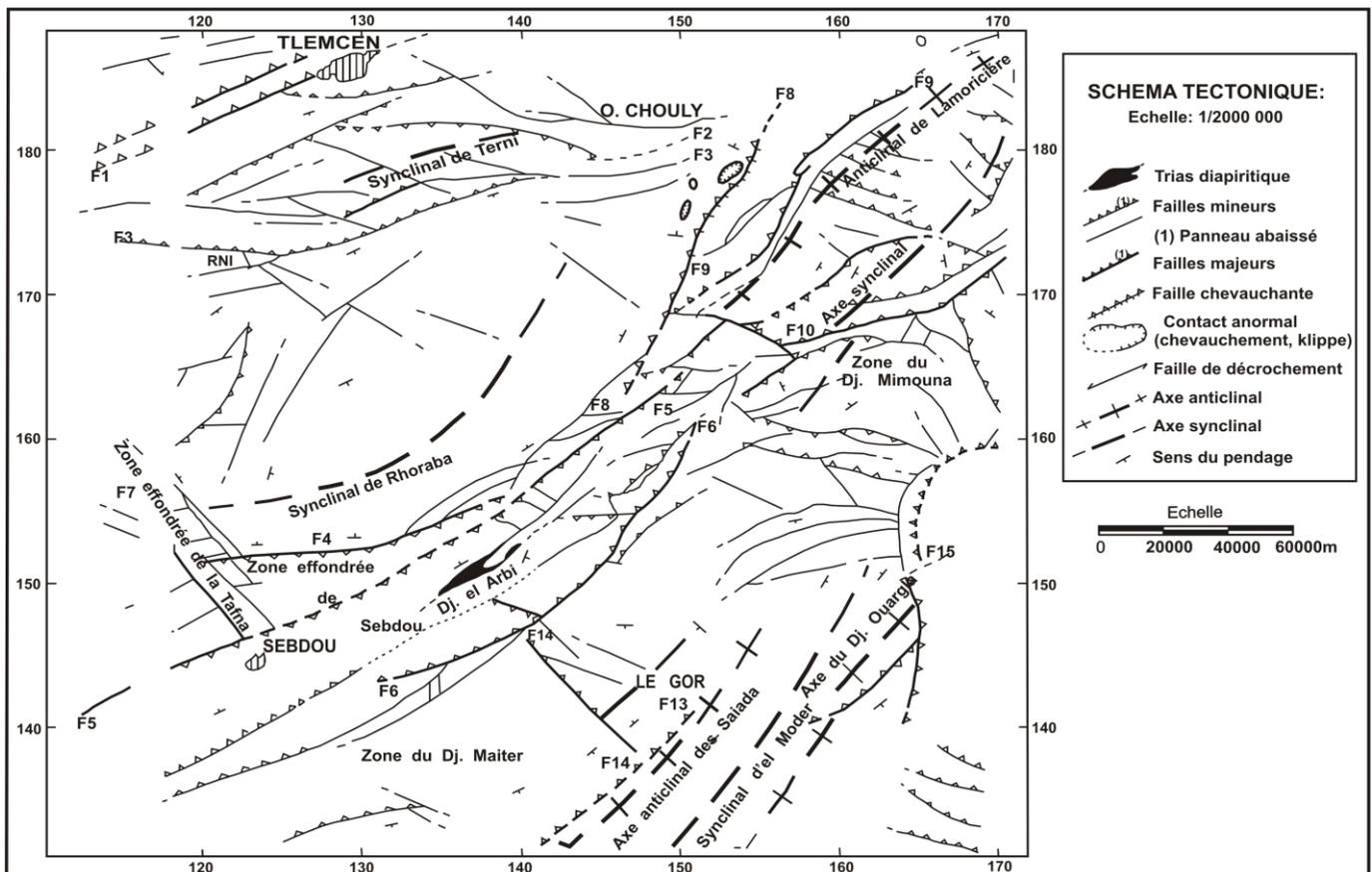


Figure 34 : Schéma tectonique du bassin de la Tafna (Auclair et Biehler, 1967).

II.2.3- HYDROGEOLOGIE

Esquisse hydrogéologique (Fig. 35) :

II.2.3.1- Aquifère

Les calcaires et dolomies du Jurassique supérieur est la formation qui a les plus vastes affleurements, et celle qui joint les meilleurs propriétés transmissives, elle recèle alors les aquifères.

L'intensité de la karstification et des fissures, ainsi que les nombreuses sources se localisent aux points bas, confèrent à ces formations un grand intérêt hydrogéologique.

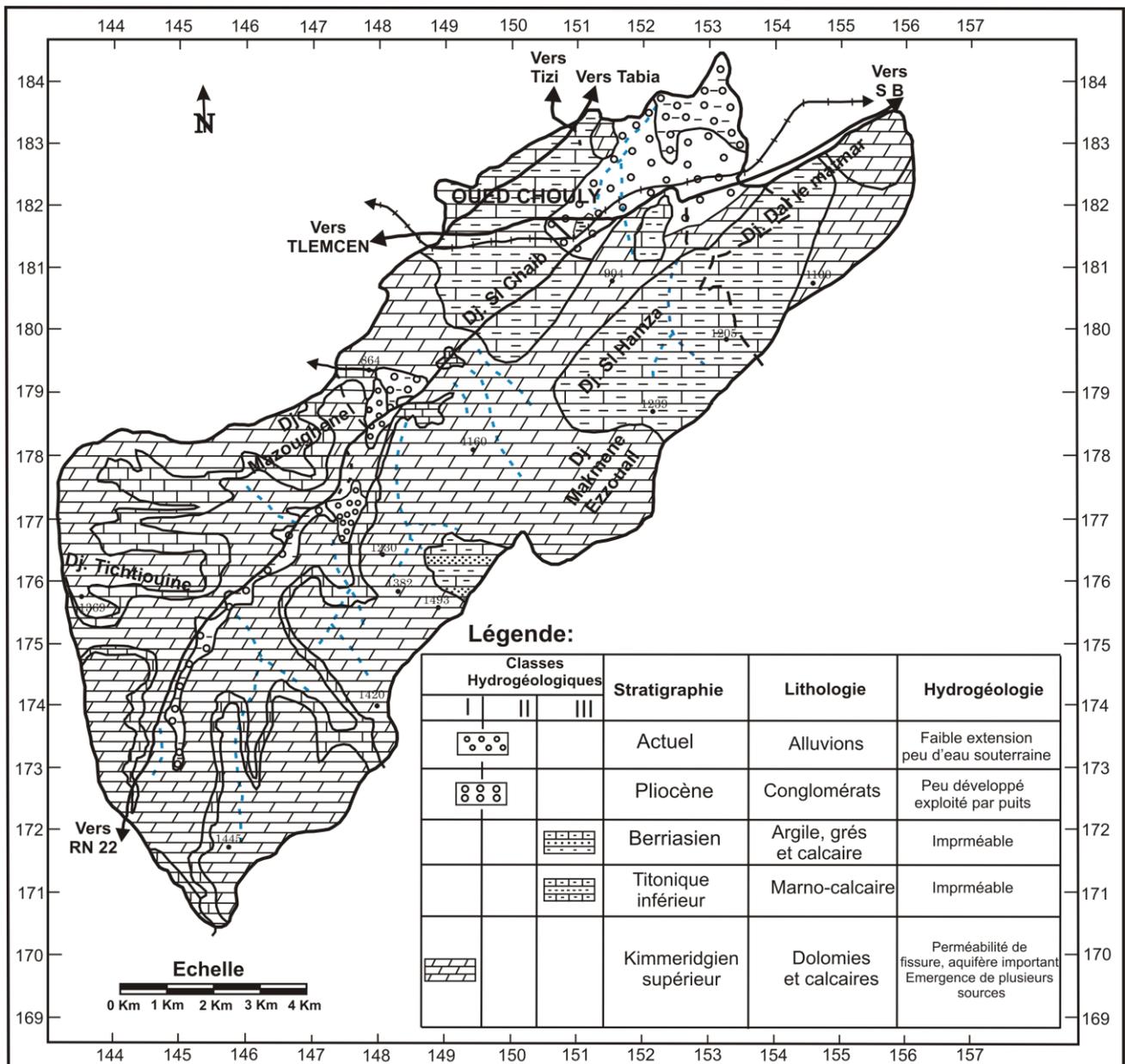


Figure 35 : Esquisse hydrogéologique de l'Oued Lakhdar (Mouzouna et Ould-Saadi, 1994).

II.2.3.2- Rôle de la tectonique dans l'hydrogéologie de la région

Les nombreuses failles et diaclases ont permis le développement de la karstification en profondeur. La plupart des sources émergent à la faveur des failles qui constituent par suite des drains actifs.

II.2.3.3- Relation fracturation et karstification

Grotte de Yebdar: Dont les coordonnées Lambert sont: $\left\{ \begin{array}{l} X=143 \\ Y=180.05 \\ Z=1101 \end{array} \right.$

Appelés grotte des Beni-Add ou grotte d'Ain Fezza. Elle se développe dans la formation des dolomies de Terny. L'analyse de la fissuration, à l'entrée de grotte donne une idée sur l'orientation de la fissure Nord-100° - Nord-Nord-120° Est (Mouzouna et Ould-Saadi, 1994).

II.2.3.4- Les eaux souterraines

Il existe une importante ressource en eau souterraine dans les formations karstiques et calcareo-dolomitiques, la zone favorable se situe au niveau de la bordure de cette formation géologique. Cette zone coïncide justement avec la partie Nord de l'Oued Lakhdar.

Il existe (Mouzouna et Ould-Saadi, 1994) :

- Des forages ;
- Des puits ;
- Les émergences : le Bassin versant se distingue principalement par de nombreuses émergences de sources. Deux facteurs contribuent à la multiplication des émergences :
 - * Le découpage du massif en horst et grabens délimitant des aquifères totalement disjoints.
 - * L'incision des vallées : 80% des sources jaillissent des calcaires et dolomies du Jurassique supérieur (ce qui souligne leur large prépondérance comme aquifère dans la région).

II.2.3.5- Ressources en eau superficielles

Les ressources en eau superficielle du bassin versant sont drainées par Oued Lakhdar et ses affluents (Oueds Gherzoun, Sbinou, Vlen, Tamekchent,...). Ce cours d'eau prend naissance dans les monts de Tlemcen au niveau d'un relief très accidenté, composé d'une série de Djebels (Sidi-Hamza, Dar Cheikh,...).

Oued Lakhdar est un cours d'eau véhiculant un apport d'eau très appréciable au sein du bassin versant de l'oued Isser.

Chapitre III :
**ETUDE DES PARAMETRES HYDROLOGIQUES
DU BASSIN VERSANT DE L'OUED LAKHDAR**

I- INTRODUCTION

Le climat en général et les précipitations en particulier sont de loin les plus importants éléments qui conditionnent les écoulements aussi bien de surface que souterrain. Leur étude est donc plus que nécessaire pour pouvoir d'une part comprendre et analyser le comportement hydrologique des oueds et d'autre part établir les bilans d'eau des bassins versants.

L'étude des séries hydrométriques menée sur une durée assez longue permet donc d'évaluer la réponse des rivières aux variations du climat. Dans cette optique, nous allons examiner l'évolution des précipitations et des écoulements au cours des dernières décennies dans le bassin versant de l'Oued Lakhdar.

II- ETUDE DES PARAMETRES HYDROLOGIQUES

II.1- PRESENTATION DES STATIONS

Tableau 12 : Description des stations hydrométéorologiques du secteur d'étude.

Nom	Coordonnées		Altitude (m)	Site d'implantation	Période d'observation	Paramètres mesurés
	Longitude	Latitude nord				
Chouly	1° 8W	34° 51	725		1956-2010	P et Q
Meffrouch	1° 17	34° 50	1106	Barrage	1971-2007	T, Evap, Humidité

II.2- ETUDE DES PRECIPITATIONS

D'une manière générale, les précipitations déterminent la variabilité ou, mieux, l'irrégularité inter-saisonnière et interannuelle de l'écoulement de surface. Elles représentent la part essentielle de l'alimentation fluviale. Par ailleurs, le climat et les variations hydroclimatiques (températures, précipitations et drainage) représentent l'un des principaux facteurs de contrôle des processus de la géodynamique externe des bassins versants.

En Algérie, la pluviométrie a été étudiée par plusieurs auteurs, (P. Seltzer, 1913-1938, H. Gausson, 1918-1947, G. Medinger, 1913-1953, M. Chaumont et C. Paquin, 1913-1963 in Bouanani, 2004). Pendant la guerre d'Algérie, les observations dans la plupart des stations du bassin, ont été arrêtées, d'autres ont subi des modifications après 1962. Ceci se traduit par des résultats entachés d'erreur, et des lacunes d'observations.

Les données utilisées proviennent de l'organisme responsable du réseau pluviométrique A.N.R.H (l'Agence Nationale des Ressources Hydraulique) observées au niveau de la station de Chouly et Meffrouch (Tab. 12) et (Fig. 36).

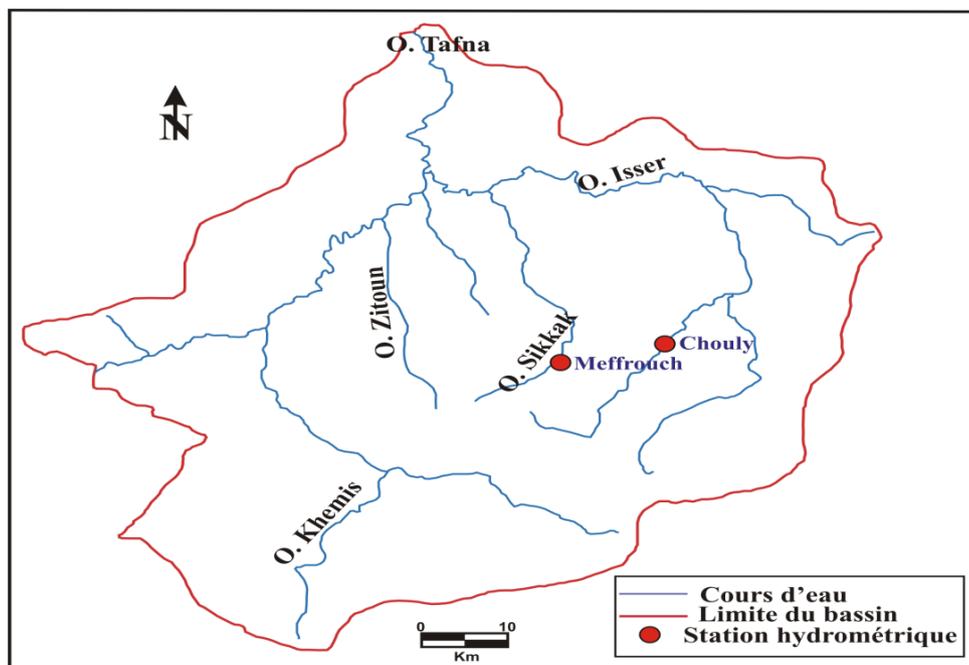


Figure 36 : Localisation des stations hydrométriques retenue pour l'étude.

II.2.1- ETUDE DES PRECIPITATIONS ANNUELLES

II.2.1.1- ETUDE DE LA VARIABILITE INTERANNUELLES DES PRECIPITATIONS

Le régime annuel est très irrégulier d'une année à une autre. Sur une période de 49 ans (Fig. 37), 23 années ont enregistré des hauteurs de pluie supérieures à la moyenne qui est de 483,03mm.

Entre 1970/1971 – 1979/1980, les précipitations sont supérieures à la moyenne avec un maximum en 1974/1975 de 636,7 mm, ceci caractérise une période relativement humide.

A partir de 1980/1981, et pour le reste de la série d'observation, règne une période relativement sèche avec un minimum de 218,4 mm en 1987/1988 à l'exception des années 1986/1987 – 1990/1991 – 1995/1996 – 2003/2004 – 2008/2009 – 2009/2010 où les précipitations sont supérieures à la moyenne.

Sur une période de 49 ans les précipitations ont subi une diminution importante de 91,87 mm.

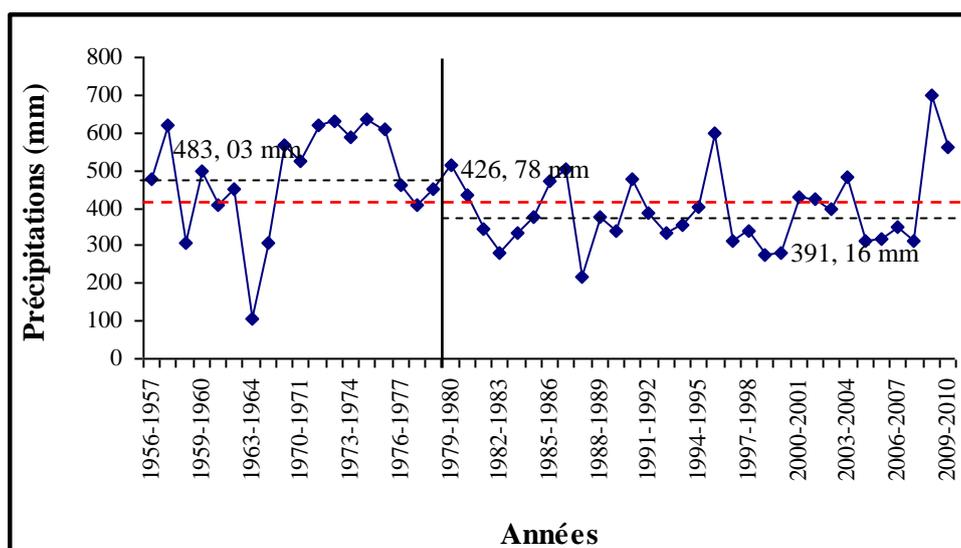


Figure 37 : Variations interannuelles des précipitations à la station de O.Lakhdar (1956 – 2010).

II.2.1.2- ETUDE STATISTIQUE DES PRECIPITATIONS

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.

Afin de découvrir la structure des variations des débits annuels et pour faire une analyse détaillée de ces données, l'ajustement statistique a été réalisé grâce au logiciel Statistica7. 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.

- **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 Khi^2 , le test de Kolmogorov, et on peut aussi utiliser un test qui considère les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement. Le test de Khi^2 mesure l'écart qu'il y a entre les fréquences observées et les fréquences théoriques, il est donné par la statistique du X^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 X^2 sur les données de notre bassin versant.

II.2.1.2.1- Adéquation des données à une loi statistique

L'analyse statistique des précipitations permet de préciser les conditions du régime pluviométrique dans notre secteur d'étude, elle nous conduira également à estimer les précipitations pour des récurrences données. Elle nous permettra aussi de déterminer la loi d'ajustement des précipitations de notre station. Nous avons porté sur les annexes (Tab. I.1) les valeurs des précipitations observées par ordre croissant de la station de Chouly.

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)

La série pluviométrique obtenue, nous permet de calculer les paramètres statistiques et de juger la distribution des précipitations annuelles. Les résultats de l'étude statistique sont portés sur le tableau 13.

Nous avons soumis notre série à 2 lois de probabilités :

- La loi normale ;
- Loi log normale.

Tableau 13 : Paramètres de position des précipitations de la station de Chouly.

Paramètres	Formules	Valeurs
Moyenne	$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a p_i$	426.78
Variance	$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a (p_i^2 - \bar{p}^2)$	15659.69
Ecart-type	$\Gamma = \sqrt{S^2}$	125.14
Coefficient de variation	$Cv = \frac{\Gamma}{\bar{P}}$	0.293

Le coefficient de variation $Cv < 0.5$, cela nous laisse penser fortement que l'ajustement suit une loi normale ($Cv < 0.3$), le test X^2 permettra de vérifier cette adéquation.

a- Ajustement par la loi normale

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

a.1- Test graphique

Le test graphique (Fig. 38), montre que la distribution de la loi normale s'ajuste mieux que les autres types de distributions.

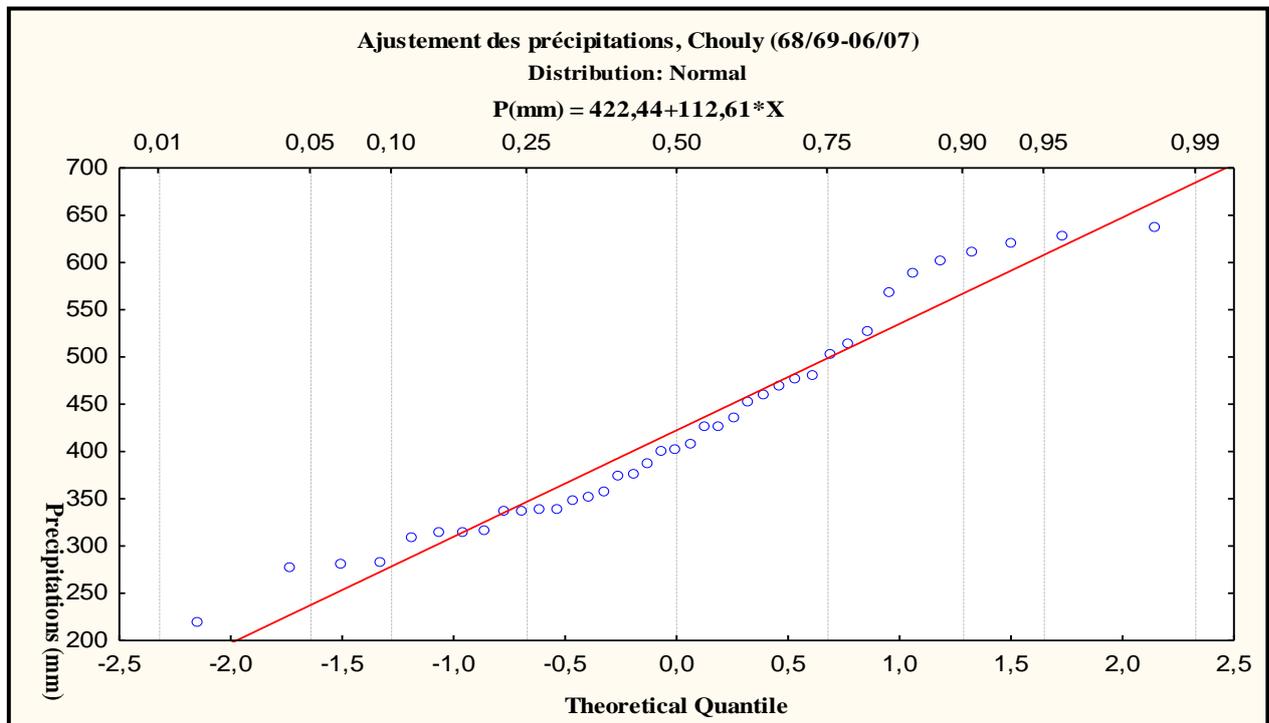


Figure 38 : Ajustement graphique des précipitations annuelles à la loi de distribution normale.

D'après la figure 38 : On remarque que la distribution des précipitations à la loi normale fournit un alignement de points acceptables.

a.2- Test du X^2

Afin de déterminer la valeur du X^2 , nous avons repris les séries des précipitations (voir annexes) tableau I.1 et nous avons réparti ces valeurs en classes. Les résultats sont donnés au tableau 14.

Tableau 14 : Calcul du X^2 .

Nombre de classes	Limites de classes	Bornes standardisées	Fréquence cumulée à la borne >	Fréquence simple théorique	Effectifs observés (ni)	Effectifs théoriques (npi)	(ni-npi) ² /(npi)
1	<307,5	<-0,95	0,1711	0,1711	7	8,3839	0,2284
2	[307,5;338,6[	[-0,95;-0,70[	0,242	0,07	7	3,43	3,7157
3	[338,6;386,9[	[-0,70;-0,31[	0,3783	0,1363	7	6,6787	0,015
4	[386,9;434,3[	[-0,31;0,06[	0,5239	0,1456	7	7,1344	0,0025
5	[434,3;480[	[0,06;0,425[	0,6628	0,1389	7	6,8061	0,005
6	[480;589[	[0,425;1,29[	0,9014	0,2386	7	11,6914	1,18825
7	>589	>1,29	1	0,098	7	4,802	1

X^2 calculé = 6,154

X^2 tabulé = 9,488

Avec un seuil de probabilité de 5% (0.05), le degré de liberté est égale à :
ddl = 7-2-1=4 \longrightarrow X^2 tabulé = 9,488

Le X^2 calculé étant inférieur au X^2 tabulé ($X^2_c < X^2_t$), l'ajustement permet donc d'admettre une distribution normale des précipitations.

Malgré cela, nous avons tout de même jugé intéressant de vérifier la série à la loi log normale.

b- Ajustement par la loi log normale

$$\text{Log}P = \text{Log}\bar{P} + S\text{Log}u$$

La variable statistique dans ce cas n'exprime pas les précipitations, mais leurs logarithmes, les résultats obtenus sont donnés au tableau I.1 (voir annexes).

b.1- Test graphique

Tableau 15 : Paramètres de position pour la loi log normale de la station de Chouly.

Paramètres	Formules	Valeurs
Moyenne	$\bar{P} \log = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a p_i \log$	6.008
Variance	$S^2 \log = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a (p_i^2 i \log - \bar{p}^2 \log)$	0.112
Ecart-type	$r = \sqrt{S^2 \log}$	0.334

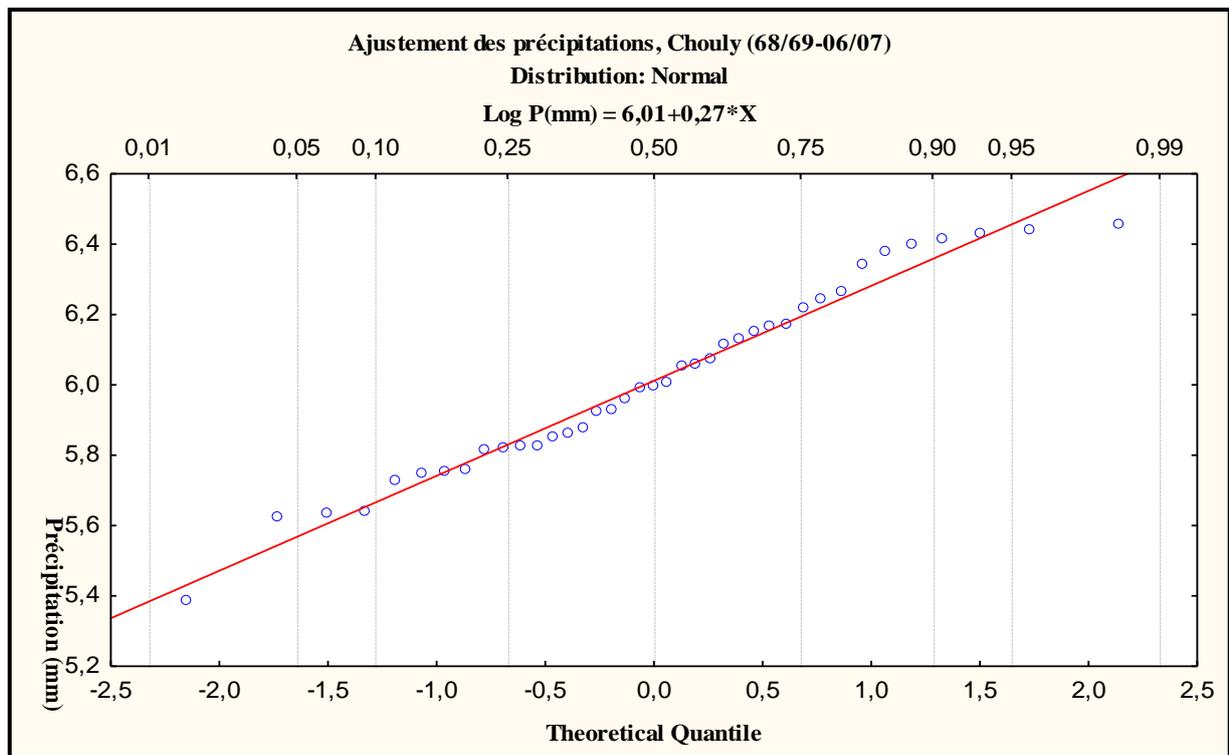


Figure 39 : Ajustement graphique des précipitations annuelles à la loi de distribution normale.

D'après la figure 39 : On remarque que la distribution des précipitations à la loi normale fournit un alignement de points acceptables.

b.2- Test du X^2

Le calcul du X^2 est donné au tableau 16.

Tableau 16 : Calcul du X^2 .

Nombre de classes	Limites de classes	Bornes standardisées	Fréquence cumulée à la borne >	Fréquence simple théorique	Effectifs observés (ni)	Effectifs théoriques (npi)	$(ni-npi)^2/(npi)$
1	<5,728	<-0,83	0,2033	0,2033	6	9,9617	1,5755
2	[5,728;5,816[	[-0,83;-0,57[	0,2843	0,081	6	3,969	1,0392
3	[5,816;5,878[	[-0,57;-0,38[	0,352	0,067	6	3,283	2,2485
4	[5,878;6,007[	[-0,38;-0,002[	0,5	0,148	6	7,252	0,2161
5	[6,007;6,114[	[0,002;0,13[	0,5517	0,051	6	2,499	4,9047
6	[6,114;6,210[	[0,13;0,60[	0,7257	0,174	6	8,525	0,7478
7	[6,210;6,378[	[0,60;1,10[	0,8643	0,138	6	6,762	0,0858
8	>6,378	>1,10	1	0,135	7	6,615	0,0224

$$X^2 \text{ calculé} = 10,84$$

$$X^2 \text{ tabulé} = 9,488$$

Avec un seuil de probabilité de 5% (0.05), le degré de liberté est égale à :
 $ddl = 8-3-1=4 \longrightarrow X^2 \text{ tabulé} = 9,488$

Le X^2 calculé étant supérieur au X^2 tabulé ($X^2c > X^2t$), l'ajustement à la loi log normale n'est pas acceptable.

c- Calcul des précipitations pour une période de récurrence donnée

A partir des résultats obtenus des ajustements on peut conclure que l'adéquation la plus satisfaisante est celle donnée par la loi normale et c'est-elle que nous retiendrons pour effectuer les calculs des volumes de pluies correspondants à des récurrences données. Ceci confirme ce qui a été mentionné dans les tests du X^2 .

On peut calculer les valeurs des précipitations pour une période de retour des précipitations présentant une valeur connue.

Partant de l'équation de la loi normal : $P = 426.78 + 125.14.U$

A partir de cette équation, on peut calculer un certain nombre de précipitations types, en remplaçant « U » par sa valeur. Les résultats sont donnés au tableau 17.

Tableau 17 : Calcul des précipitations pour une période de récurrence donnée.

Précipitations types	Stations	Chouly
Précipitations décennales (u=1.28) (mm)		586.95
Précipitations centennales (u=2.32) (mm)		717.10
Précipitations millénaires (u=3.29) (mm)		838.49

II.2.2- ETUDE DES PRECIPITATIONS MENSUELLES

Tableau 18 : Valeurs moyennes mensuelles des précipitations.

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
P (mm)	18,82	35,49	51,79	56,40	51,65	57,38	59,84	45,03	31,83	10,28	4,34	3,94

La répartition des précipitations moyennes mensuelles pour la période (1956-2010) (Fig. 40), montre que le minimum des précipitations s'observe au mois de Juillet et Août (3.94 mm) (mois les plus secs), et le maximum au mois de Mars avec (59.84 mm) (mois le plus pluvieux).

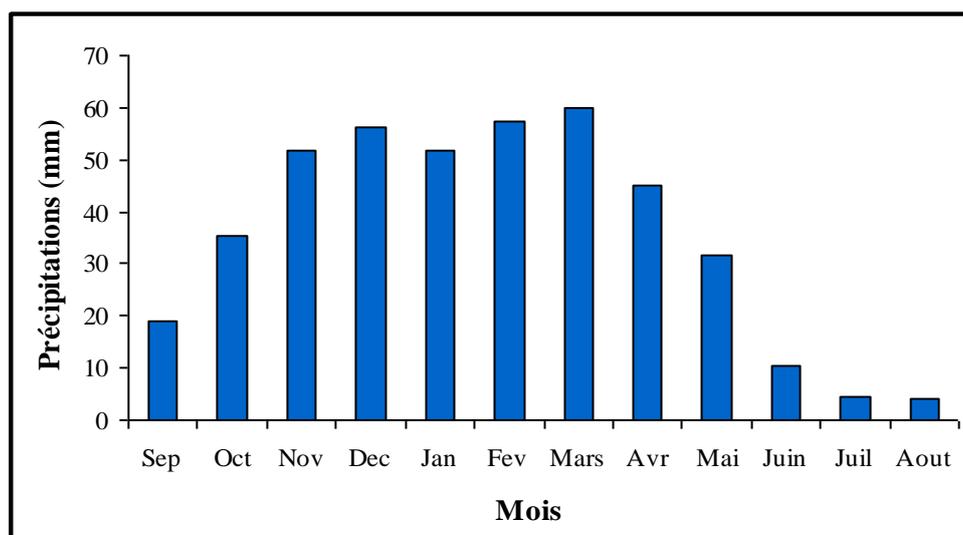


Figure 40 : Variation des précipitations moyennes mensuelles (1956-2010).

Tableau 19 : Valeurs des précipitations mensuelles minimales, moyennes et maximales.

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Pm(mm)	18,82	35,49	51,79	56,40	51,65	57,38	59,84	45,03	31,83	10,28	4,34	3,94
Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maximum	124	162,8	145,6	236,4	147,4	195,4	232	194	148	45,3	73	32
Moy M+m	62,1	81,38	72,8	118,2	73,7	97,7	116	96,8	74,1	22,65	36,5	16

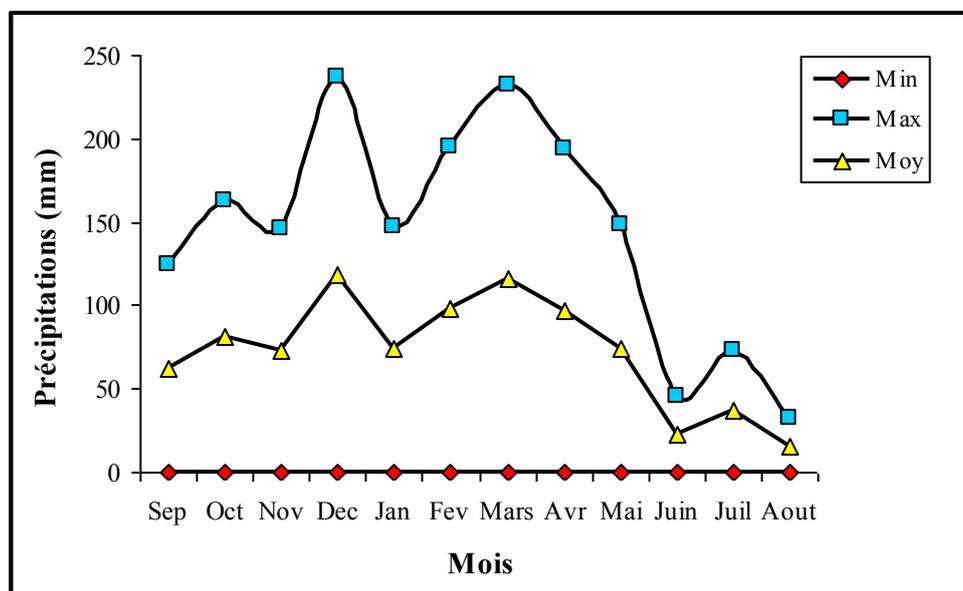


Figure 41 : Variation des précipitations mensuelles minimales, moyennes et maximales (1956-2010).

- **Les minima :** Les valeurs minimales sont nulles.
- **Les maxima :** Les valeurs les plus basses apparaissent en Juin, Juillet et Août, alors que les valeurs les plus élevées se présentent en Décembre et Mars.
- **Les précipitations moyennes :** Le maximum apparaît en Décembre et Mars, et le minimum aux mois de Juin et Août.

II.2.3- ETUDE DES PRECIPITATIONS SAISONNIERES

Tableau 20 : Répartition des précipitations saisonnière.

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Saison	Automne			Hiver			Printemps			Été		
	106,10			165,42			136,70			18,56		

L'étude de la variabilité saisonnière est indispensable, pour voir si la baisse ou la hausse de la pluviométrie est spécifique à une saison particulière ou à plusieurs saisons.

La distribution saisonnière des précipitations (Fig. 42) montre, que l'été correspond à la saison la plus sèche. L'ensemble de l'hiver et du printemps forme une saison humide ou s'effectueraient la plus grande partie des écoulements.

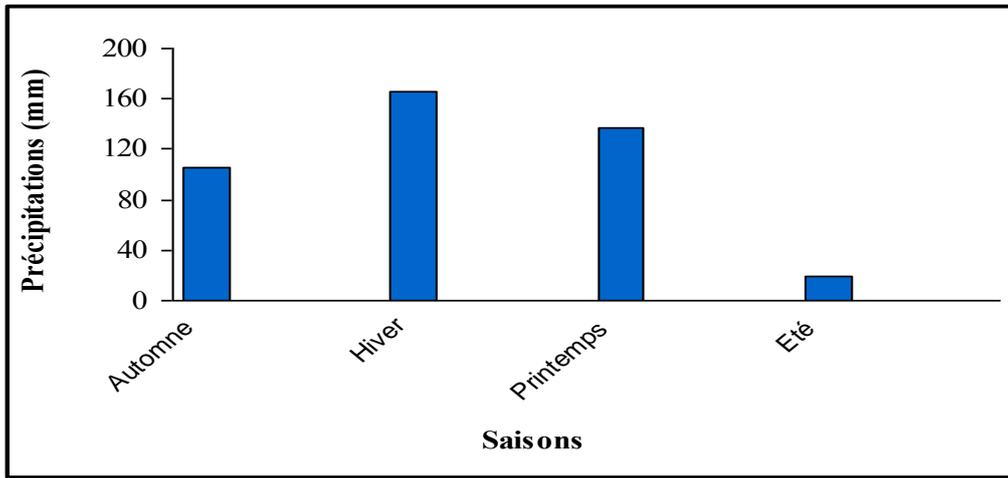


Figure 42 : Variations saisonnières des précipitations (1956-2010).

II.2.4- ETUDE DES PRECIPITATIONS JOURNALIERES

La variation des précipitations moyennes journalières s'effectue en dents de scie. On enregistre des augmentations suivies de diminutions continues et progressives d'un jour à un autre avec une baisse importante enregistrée durant les mois d'été (Fig. 43).

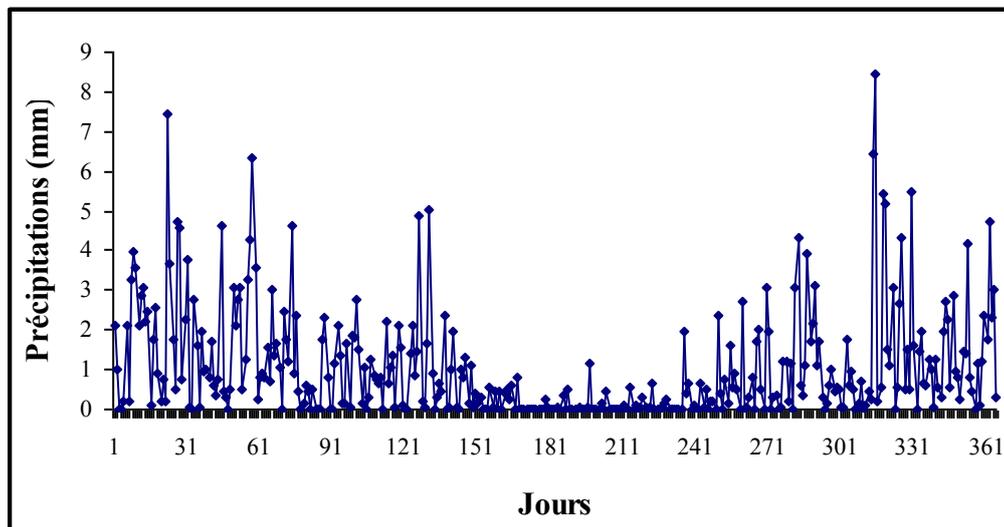


Figure 43 : Variation des précipitations moyennes journalières (1995-2005).

II.3- ETUDE DES ECOULEMENTS

L'écoulement des Oueds, dépend essentiellement du régime des précipitations qui dépendent du climat de la région, on notera une variation importante des régimes d'écoulement, mensuels, saisonniers, et interannuels.

Le bassin de l'Oued Lakhdar est caractérisé par des précipitations très irrégulières, ceci va entraîner des écoulements très irréguliers.

L'évolution des débits de surface, sur le secteur étudié nous est connue par des stations hydrométriques qui ont été installées et sont surveillées par l'A.N.R.H.

Dans ce travail nous prenons en considération la station de :

Chouly sur Oued Lakhdar (1966/1967 – 2006/2007).

La variable étudiée est la lame d'eau écoulee enregistrée au niveau de la station de Chouly.

II.3.1- VARIATION ANNUELLES DES ECOULEMENTS

Avec un module de 55.42 mm, les variations de l'écoulement dans le bassin versant de l'Oued Lakhdar pendant la période 1966 – 2007 (Fig. 44), se traduisent par une diminution progressive. Le module annuel maximal s'est présenté en 1972 /1973 avec 166.9 mm, alors que le module minimal est enregistré en 2006/2007 avec 9.05 mm. On enregistre quelques pics en 1986/1987 et 1991/1992 respectivement avec 95.35 mm et 117.86 mm.

Sur une période de 41 ans les lames d'eau écoulées ont subi une diminution importante de 53,07 mm.

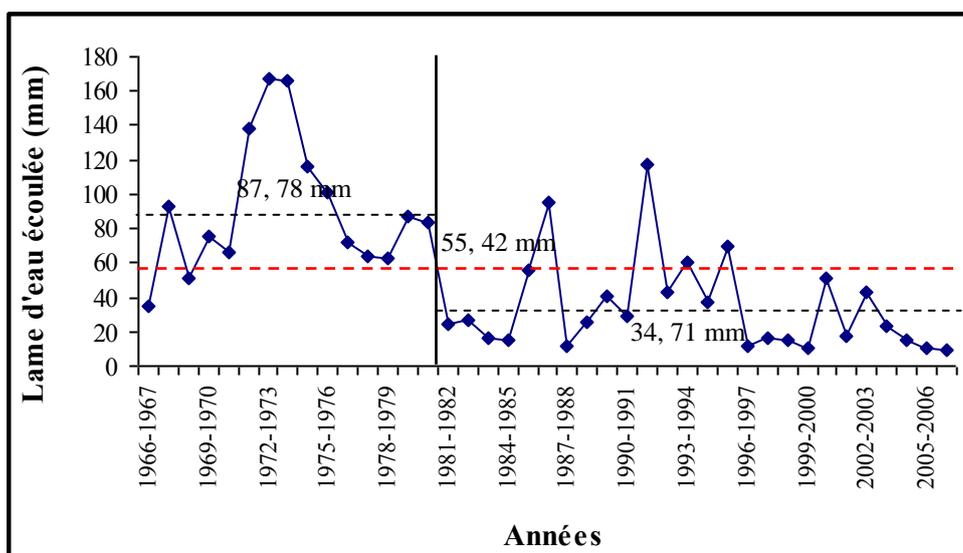


Figure 44 : Variations interannuelles des lames d'eau écoulées (1966-2007).

II.3.2- ETUDE STATISTIQUE DES ECOULEMENTS

L'analyse statistique des données hydrométriques vise à définir les régimes à travers certaines valeurs caractéristiques et représentatives. La distribution des lames d'eau annuelles est donnée au tableau II.1 (voir annexes).

Tableau 21 : Paramètres de distribution des lames d'eau écoulées de la station de Chouly.

Paramètres	Formules	Valeurs
Moyenne	$\bar{Le} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a Lei$	55.42
Variance	$\delta^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a (Le_i^2 - \bar{Le}^2)$	1806,67
Ecart-type	$\sigma = \sqrt{\delta^2}$	42.50
Coefficient de variation	$Cv = \frac{\sigma}{Le}$	0.76

La forte dispersion des lames d'eau écoulées mise en lumière par la valeur élevée du coefficient de variation laisse supposer une distribution dissymétrique à notre série.

$Cv > 0.5$ on peut supposer qu'une adéquation à une loi log normale est possible.

a- Ajustement des lames d'eau écoulées annuels à la loi normale

$$E = \bar{E} + \delta u$$

a.1- Test graphique

Le test graphique (Fig. 45), montre que la distribution normale s'ajuste mieux que les autres types de distributions.

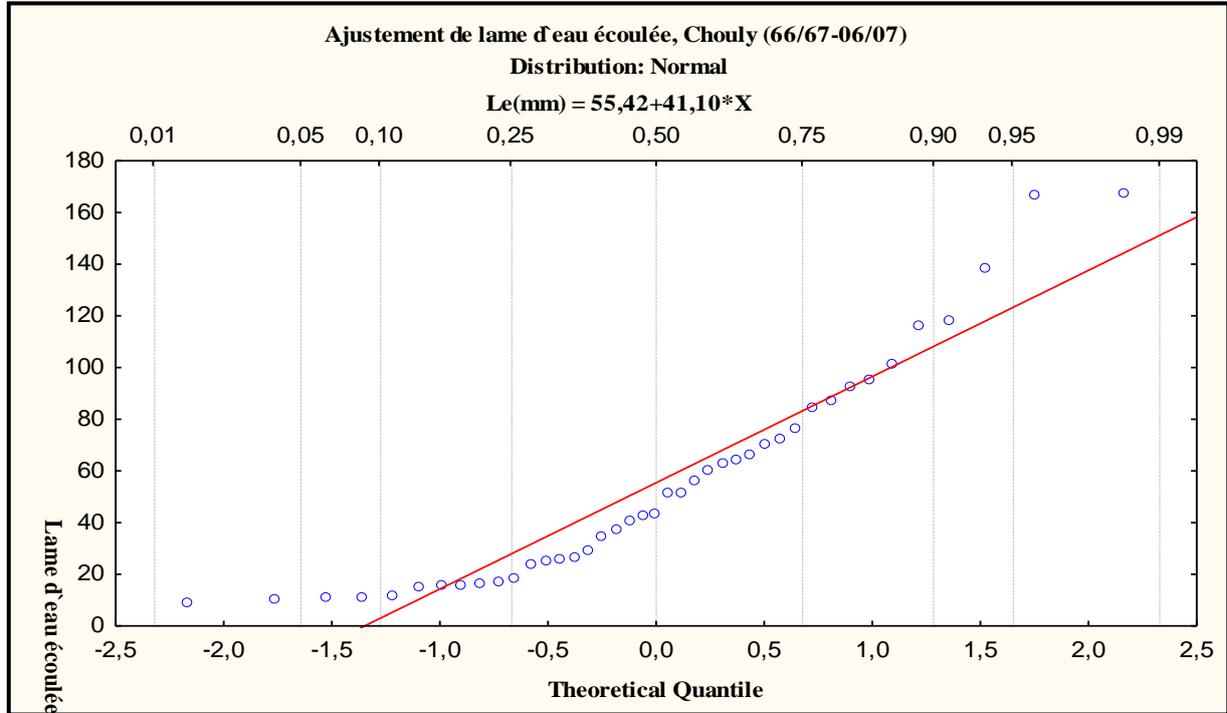


Figure 45 : Ajustement graphique des lames d'eau écoulées annuelles à une loi normale.

a.2- Test du X^2

Le calcul du X^2 est donné au tableau 22.

Tableau 22 : Calcul du X^2 .

Nombre de classes	Limites de classes	Bornes standardisées	Fréquence cumulée à la borne >	Fréquence simple théorique	Effectifs observés (ni)	Effectifs théoriques (npi)	(ni-npi) ² /(npi)
1	<15,545	<-0,93	0,1762	0,1762	8	7,2242	0,083
2	[15,545;29,134[	[-0,93;-0,61[	0,2709	0,0947	8	3,8827	4,366
3	[29,134;55,94[	[-0,61;0,012[	0,504	0,2331	8	9,5571	0,253
4	[55,94;84,18[	[0,012;0,67[	0,7486	0,2446	8	10,0228	0,408
5	>84,18	>0,67	1	0,2514	9	10,3074	0,165

X^2 calculé = 5,275

X^2 tabulé = 5.991

Pour un seuil de probabilité de 5% (0.05), le degré de liberté est égale à :
ddl = 5-2-1=5 \longrightarrow X^2 tabulé = 5.991.

Le X^2 calculé étant légèrement inférieur au X^2 tabulé ($X^2_c < X^2_t$), l'adéquation pour une loi normale peut être acceptable.

Malgré cela, nous avons tout de même jugé intéressant de vérifier la série à la loi log normale.

b- Ajustement des lames d'eau écoulées annuels à la loi log normale

b.1- Test graphique

Le test graphique (Fig. 46), montre que la distribution normale s'ajuste mieux que les autres types de distributions.

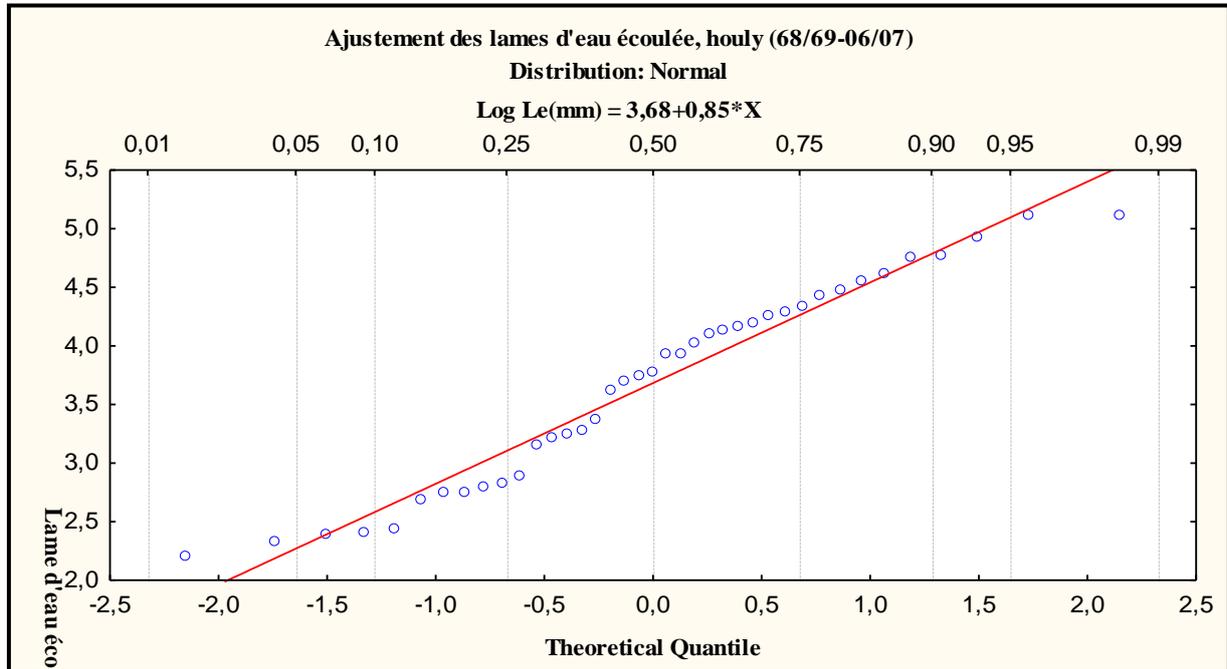


Figure 46 : Ajustement graphique des lames d'eau écoulées annuelles à la loi de distribution normale.

b.2- Test du X^2

Le calcul du X^2 est donné au tableau 23.

Tableau 23 : Calcul du X^2 .

Nombre de classes	Limites de classes	Bornes standardisées	Fréquence cumulée à la borne >	Fréquence simple théorique	Effectifs observés (ni)	Effectifs théoriques (npi)	$(ni-npi)^2/(npi)$
1	<2,741	-1,13	0,1292	0,1292	7	5,2972	0,5473
2	[2,741;3,243[	[-1,13;-0,54[	0,2946	0,1654	7	6,7814	0,007
3	[3,243;3,770[	[-0,54;0,08[	0,5319	0,2373	7	9,7293	0,7656
4	[3,770;4,190[	[0,08;0,58[	0,719	0,1871	7	7,6711	0,058
5	[4,190;4,558[	[0,58;1,01[	0,8438	0,1248	7	5,1168	0,693
6	>4,558	>1,01	1	0,1562	6	6,4042	0,025

$$X^2 \text{ calculé} = 2.0959$$

$$X^2 \text{ tabulé} = 5.991$$

Pour un seuil de probabilité de 5% (0.05), le degré de liberté est égale à :
 $ddl = 6-3-1=2 \longrightarrow X^2 \text{ tabulé} = 5.991$.

Le X^2 calculé étant inférieur au X^2 tabulé ($X^2_c < X^2_t$), l'ajustement permet donc d'admettre une distribution log normale des lames d'eau écoulées.

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

A partir des résultats obtenus des ajustements nous constatons que l'adéquation la plus satisfaisante est celle donnée par la loi log normale, et c'est elle que nous retiendrons pour

effectuer les calculs des volumes des lames d'eau écoulées correspondants à des récurrences données.

Partant de l'équation de la loi log normal : $\text{Log } E = 3.7 + 0.84.U$

A partir de cette équation, on peut calculer un certain nombre de précipitations types, en remplaçant « U » par sa valeur. Les résultats sont donnés au tableau 24.

Tableau 24 : Calcul des lames d'eau écoulées pour une période de récurrence donnée.

Stations	Chouly
Lames d'eau écoulées	
Lames d'eau écoulées décennales (u=1.28) (mm)	118.53
Lames d'eau écoulées centennales (u=2.32) (mm)	283.95
Lames d'eau écoulées millénaires (u=3.29) (mm)	641.36

II.3.3- VARIATIONS MENSUELLES DES LAMES D'EAU ECOULEES

Tableau 25 : Valeurs moyennes mensuelles de la lame d'eau écoulée.

Année	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
E (mm)	1,263	1,996	2,302	3,285	5,678	8,167	14,786	6,965	5,857	2,768	1,307	1,021

L'évolution des débits (lames d'eau) mensuels (Fig. 47), montre un minimum en Août de 1.02 mm et évolue vers des valeurs plus importantes ; il atteint son maximum en Mars avec 14.78 mm.

A partir de Septembre on observe un léger relèvement (en liaison avec la diminution de l'évapotranspiration potentielle) et surtout des premières pluies de l'automne.

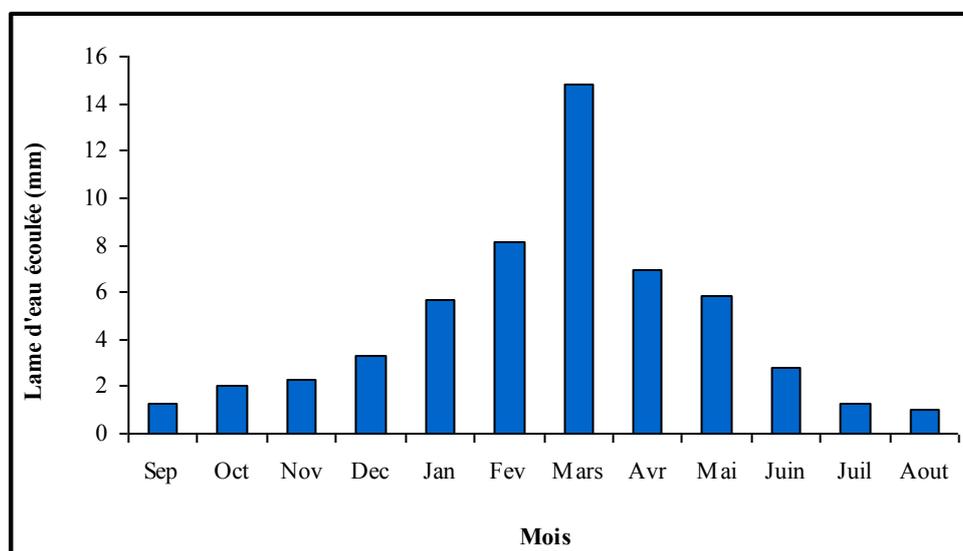


Figure 47 : Variations mensuelles des lames d'eau écoulées (1966-2007).

II.3.4- VARIATIONS SAISONNIERES DES LAMES D'EAU ECOULEES

Tableau 26 : Répartition des lames d'eau écoulées saisonnière.

Année	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Saison	Automne			Hiver			Printemps			Eté		
	5,56			17,13			27,61			5,10		

La distribution saisonnière des débits (Fig. 48) montre, que c'est au printemps et en hiver que s'effectuent l'essentiel des écoulements. Le maximum est enregistré au printemps, cela explique la présence de fortes pluies durant cette saison.

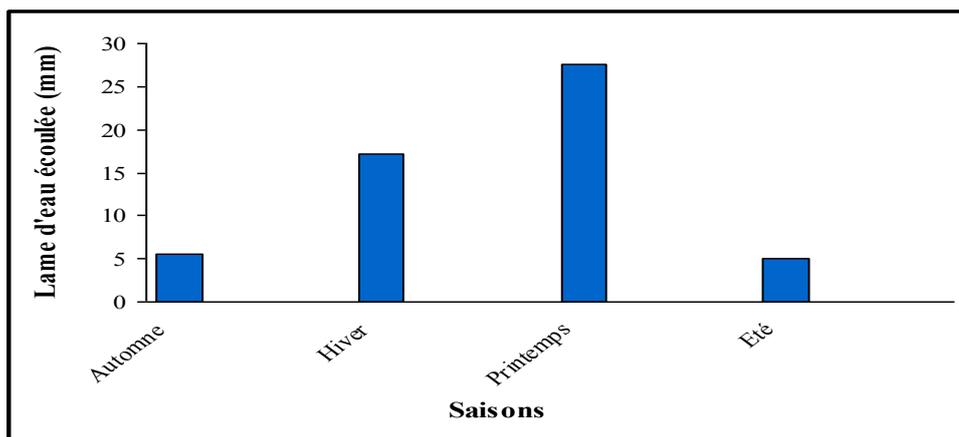


Figure 48 : Variations saisonnières des lames d'eau écoulées (1966-2007).

II.3.5- VARIATIONS JOURNALIERES DES LAMES D'EAU ECOULEES

Pour les débits journaliers, on observe une augmentation générale des débits de Février à Mars, et un pic enregistré le mois de Novembre, un autre pic observé le mois de Juin dû aux averses orageuses et violentes, puis une baisse de Mai à Octobre. Cependant, ces augmentations et diminutions s'effectuent en dents de scie. En effet, on peut avoir un faible débit un jour, il peut doubler le lendemain et diminuer fortement le surlendemain (Fig. 49).

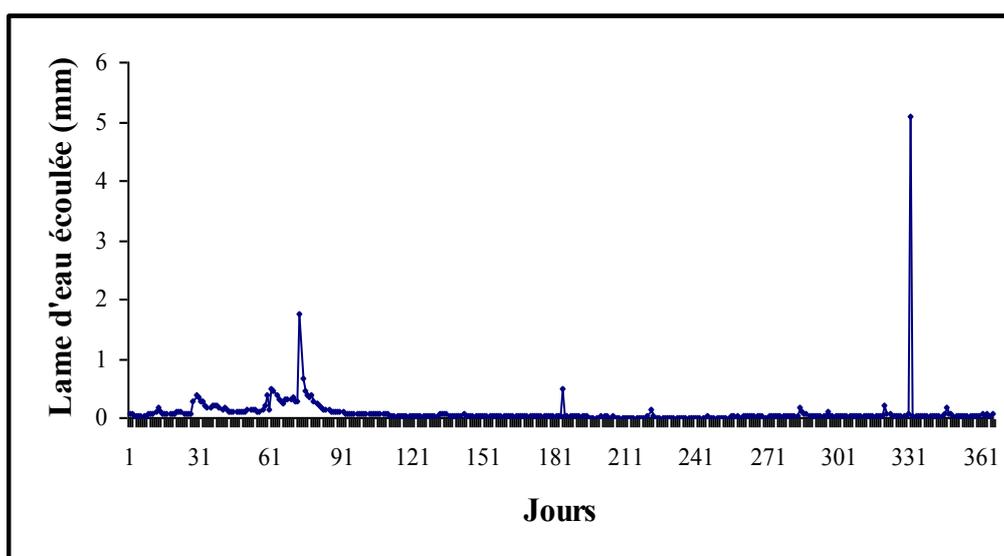


Figure 49 : Variation des lames d'eau écoulées moyennes journalières (1995-2005).

II.4- ETUDE DES TEMPERATURES

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.

Pour la réalisation de cette étude, nous disposons des mesures effectuées sur la station d'El Meffrouch période 1970 à 2007 (Tab. 27). Ceci en l'absence de mesure sur la station de Chouly.

II.4.1- TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES

Les températures moyennes mensuelles de la station d'El Meffrouch sont portées dans le Tableau 27.

Tableau 27 : Valeurs moyennes mensuelles des températures de la station d'El Meffrouch (1970-2007).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Année
T°(C)	22,44	18,10	13,77	11,40	09,74	10,77	13,01	14,11	17,08	21,92	25,51	25,78	17,00

Les variations des températures moyennes mensuelles à la station d'El Meffrouch (Fig. 50) : montrent que le mois de Janvier avec 9,74°C est le plus froid, et les mois de Juillet et d'Août avec 25,78°C sont les plus chauds. La température moyenne annuelle est de 17°C.

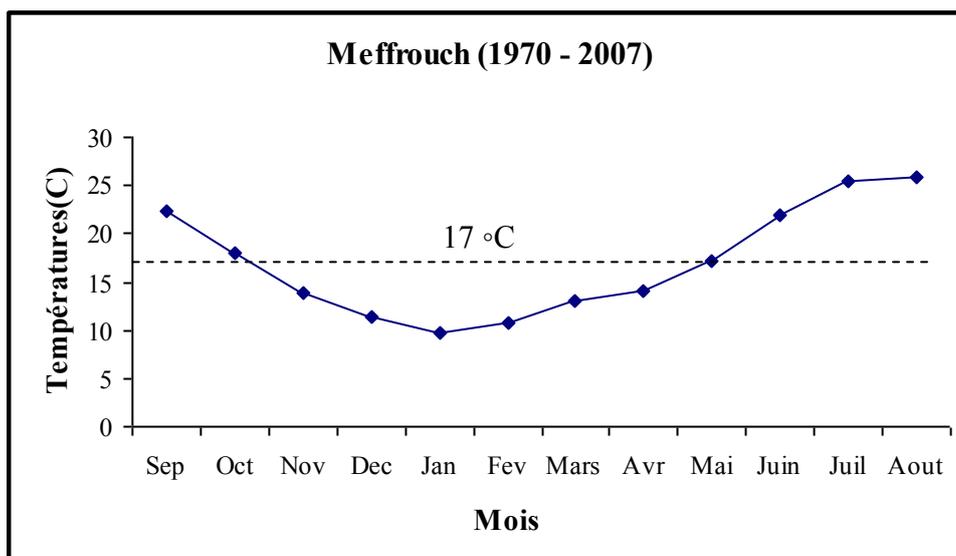


Figure 50 : Variation des températures moyennes mensuelles (1970-2007).

II.4.2- TEMPERATURES MOYENNES ANNUELLES

La courbe de la figure 51, montre que les températures moyennes annuelles sont irrégulières, elles ont tendance à augmenter d'une année à l'autre.

Entre 1970 et 1983 les températures étaient de 16.1°C, à partir de 1983 elles sont au dessus de la moyenne pour atteindre 17.5°C et donc une augmentation de 1.5°C, cette variabilité est due au changement climatique globale.

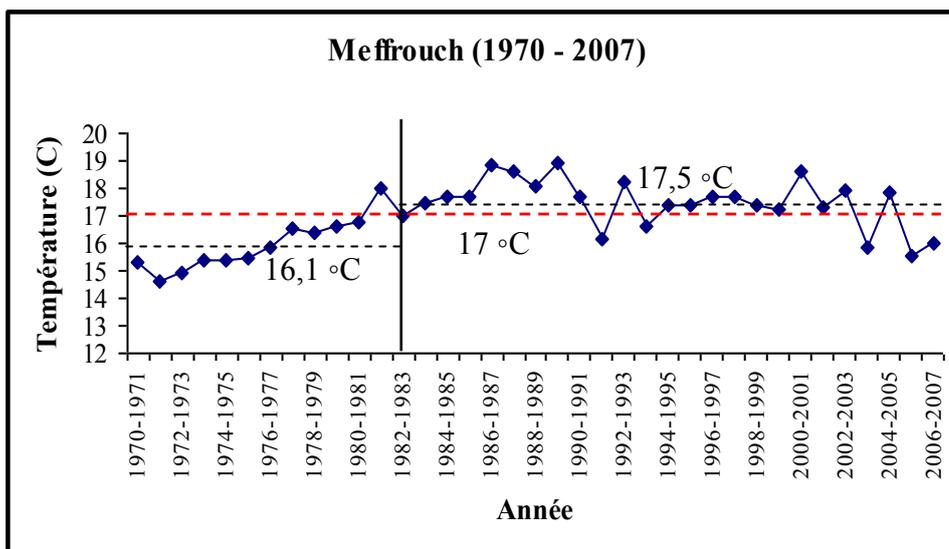


Figure 51 : Variation des températures moyennes annuelles (1970-2007).

Le climat du bassin de la Tafna s'apparente à celui de toute la région méditerranéenne de l'Afrique du Nord, il est doux et humide. Les deux mois les plus chauds sont juillet et août, et ont une température moyenne de 26°C (Dakiche, 1993).

II.5- ETUDE DE L'EVAPOTRANSPIRATION

On désigne sous le nom d'évaporation une perte en eau subie par les surfaces d'eau libres.

L'évapotranspiration est la somme de toutes les pertes par retour à l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau. Elle résulte de deux phénomènes l'un est physique (évaporation) l'autre biologique (transpiration).

II.5.1- NOTION D'EVAPOTRANSPIRATION REELLE ET POTENTIELLE

On appelle évapotranspiration réelle (notée ETR), la quantité d'eau généralement exprimée en millimètres, évaporée ou transpirée par le sol, les végétaux et les surfaces libres d'un bassin versant.

L'évapotranspiration potentielle (notée ETP) est la quantité d'eau qui serait évaporée ou transpirée à partir d'un bassin versant si l'eau disponible pour l'évapotranspiration n'était pas un facteur limitant.

II.5.1.1- ESTIMATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION

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

II.5.1.1.1- Formule de Turc

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

$$Etp = 0.4(Ig + 50)k \frac{t}{t + 15}$$

Avec :

Etp : évapotranspiration potentielle mensuelle (en mm d'eau) ;

T : température moyenne mensuelle de l'air (en °C) ;

Igf : radiation globale moyenne mensuelle reçue au sol (en calorie/cm²/jour) ;

K : un coefficient égal à 1 si l'humidité relative *hr* est supérieur à 50% (généralement le cas sous nos climats) ;

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

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

$$I_g = I_g A \left(0.18 + 0.62 \frac{h}{H} \right)$$

Avec :

IgA : radiation globale théorique (en cal/cm²/jour) ;

H : durées théoriques des jours du mois.

Pour le calcul de l'ETP par la méthode de Turc nous avons utilisé la feuille de calcul élaborée par (Benadda, 2000).

II.5.1.1.2- Formule de Thornthwaite (1948-1955)

Thornthwaite a proposé également une formule basée essentiellement sur les températures de l'air :

$$ETP = 1.6 \left(\frac{10t}{I} \right)^a .K \text{ et}$$

$$I = \sum_1^{12} i \text{ Avec } i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514}$$

$$a = \frac{1.6}{100} I - 0.5$$

Où :

ETP : Evapotranspiration potentielle du mois considéré (en mm d'eau) ;

t : température moyenne mensuelle du mois considéré en °C ;

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

Cette méthode est largement utilisée mais tend à surestimer les valeurs de l'ETP, particulièrement en période estivale, probablement à cause du rôle prépondérant occupé par la température (Shaw, 1994 in Oudin, 2004).

Sur le plan de l'évapotranspiration, on s'intéressera à l'évapotranspiration calculée par l'application des formules de Turc et Thornthwaite. Ces calculs sont réalisés par l'utilisation d'une série de températures annuelles, mensuelles et journalières mesurées au niveau du barrage d'El Meffrouch (1970/1971-2001/2002).

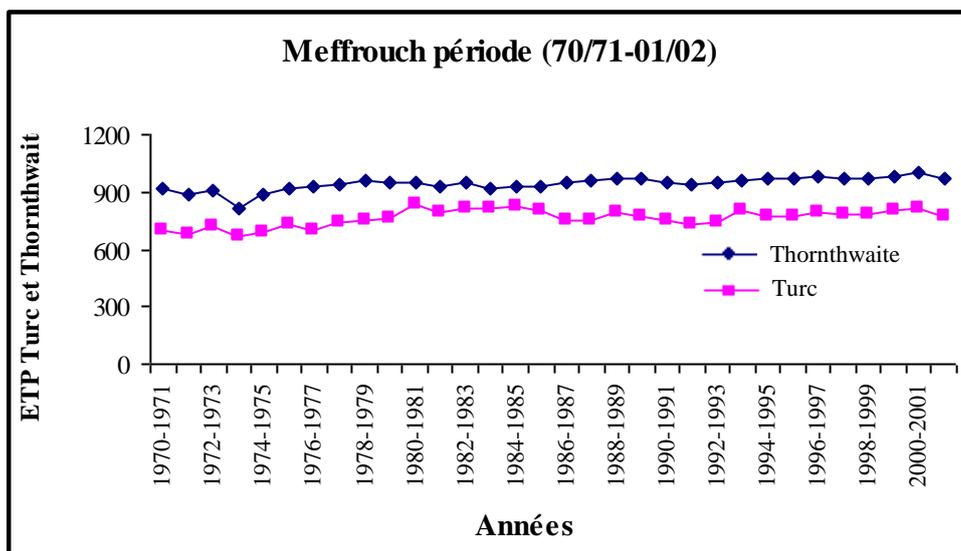


Figure 52 : Variation des ETP Turc et Thornthwaite (1970-2002).

Les courbes (Fig. 52) montrent que les valeurs annuelles de l'ETP de Turc sont supérieures à celles de l'ETP de Thornthwaite et que l'évapotranspiration a tendance à une stabilisation. La méthode de Thornthwaite surestime les valeurs de l'ETP.

II.5.1.1.3- Formule d'Oudin

Dans le but d'améliorer la performance des modèles hydrologiques (Oudin *et al.*, 2004) ont fait plusieurs tests sur les différentes méthodes d'ETP par la simulation des débits.

Après classement des différents résultats, il s'est avéré que la méthode Mc Guinness est la meilleure méthode (Oudin, Hervieu *et al.*, 2004 *in* Mahzoum, 2009). Ils se sont donc basés sur cette formule en ajustant les paramètres pour proposer la formule suivante :

$$PE = \frac{R_e T_a + K_2}{\lambda \rho K_1}$$

Si $T_a + K_2 > 0$

Sinon $PE = 0$

Avec :

PE : Evapotranspiration potentielle (mm/jour) ;

Re : Radiation extra-terrestre (MJ m⁻²/jour) calculée en fonction de la latitude et du jour ;

Ta : Température journalière en °C ;

λ : Flux de chaleur latente (2.48 MJ/Kg) ;

ρ : Densité de l'eau (Kg/m³).

II.5.2- CALCUL DE L'ETR

II.5.2.1- BILAN MOYEN ANNUEL DE L'ÉCOULEMENT

Nous exprimons par P la tranche d'eau précipitée et par E la lame d'eau écoulee équivalente en mm. La différence de ces deux notions P-E donne ce qu'on appelle : déficit moyen annuel de l'écoulement (D) en mm.

Le rapport E / P est appelé, coefficient moyen annuel de l'écoulement "C" (ETR). Les résultats sont présentés dans le tableau suivant (Tab. 28) :

Tableau 28 : Bilan moyen annuel de l'écoulement au niveau de la station de Chouly.

Bassin	Période	P (mm)	E (mm)	D (mm)	C (%)
O.Lakhdar	1968-2007	422.44	55.219	367.22	13.07

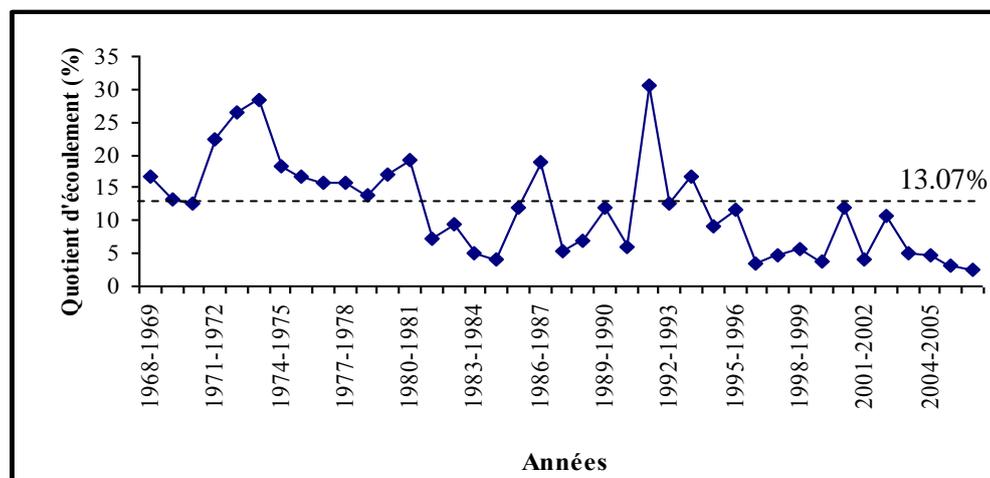


Figure 53 : Variation du coefficient moyen annuel de l'écoulement (1968-2007).

Le régime annuel du coefficient de l'écoulement est très irrégulier d'une année à une autre. Sur une période de 39 ans (Fig. 53), 14 années ont enregistré des coefficients d'écoulements supérieurs à la moyenne qui est de 13.07%.

Entre 1970/1971 – 1980/1981, les écoulements sont supérieurs à la moyenne avec un maximum en 1973/1974 de 28.2 %, ceci caractérise une période relativement humide.

A partir de 1981/1982, et pour le reste de la série d'observation, règne une période relativement sèche avec un minimum de 2.6 % en 2006/2007 à l'exception de l'année 1991/1992 où les écoulements étaient supérieurs à la moyenne suite à des pluies irrégulières, orageuses et violentes qui ont provoqué des écoulements brefs et temporaires après l'averse.

II.5.2.2- BILAN MOYEN MENSUEL DE L'ÉCOULEMENT

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant (Tab. 29) :

Tableau 29 : Bilan moyen mensuel de l'écoulement au niveau de la station de Chouly.

	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Annuel
P (mm)	17,33	34,00	50,81	47,35	50,88	60,18	63,32	45,68	35,54	8,15	4,84	4,36	422,44
Le (mm)	1,27	1,87	2,30	3,20	5,69	8,36	15,06	7,01	5,43	2,76	1,28	1,00	55,22
D (mm)	16,06	32,13	48,51	44,15	45,19	51,82	48,26	38,68	30,12	5,39	3,56	3,36	367,22
C (%)	7,3	5,5	4,5	6,7	11,2	13,9	23,8	15,3	15,3	33,9	26,4	22,9	13,071

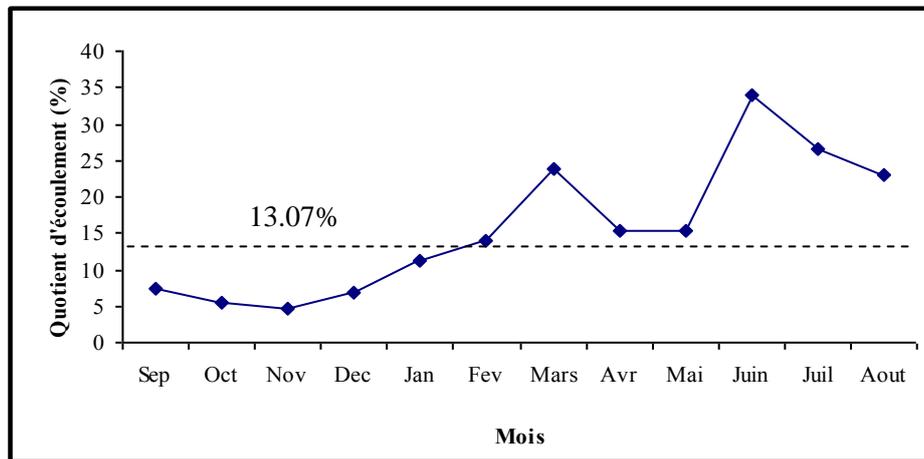


Figure 54 : Variation du coefficient moyen mensuel de l'écoulement (1968-2007).

Le régime mensuel du coefficient de l'écoulement (Fig. 54), montre que le minimum des écoulements s'observe au mois de Septembre, Octobre, Novembre, Décembre et Janvier (4.5 %), donc les pluies du début de l'année climatique (Septembre- Août) n'interviennent pas efficacement au soutien de l'écoulement superficiel. A partir du mois de Février le taux des écoulements augmente et dépasse la moyenne avec un pic enregistré au mois de Juin (33.9 %) survenue sûrement à la suite d'orages violents. L'intensité des pluies orageuses entraîne un écoulement plus important que les précipitations hivernales.

Il existe d'autres méthodes pour le calcul du déficit d'écoulement, fondée sur la connaissance de deux paramètres P et T. On utilise donc la méthode de Turc et les données de températures et précipitations de la station de Chouly et Meffrouch sur une période allant de 1970-2007.

II.5.2.3- CALCUL DE L'EVAPOTRANSPIRATION REEL (ETR)

a- Formule de Turc : calcul de l'ETR

Grâce a des observations faites sur 254 bassins sous tous les climats du globe Turc a établi la relation :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Avec :

ETR : évapotranspiration réelle annuelle en (mm) ;

P : précipitations moyennes annuelles en (mm) ;

T : température moyenne annuelle en (°C).

$$L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$$

Les résultats obtenus sont données dans le tableau 30 :

Tableau 30 : Calcul de l'ETR d'après la méthode de Turc de la station de Chouly (1966-2007).

Station \ Paramètres	P (mm)	T (°C)	L	ETR (mm/an)	Ecoulement et infiltration P-ETR
O.Lakhdar	426.78	17	970.65	408.40 mm soit 95.69 % des P	18.38 mm soit 4.30 % des P

Nous remarquons que l'ETR dépasse les 90 % des précipitations.

b- Méthode de Coutagne

Selon cet auteur, le déficit d'écoulement qui est l'équivalent de l'évapotranspiration réelle se déduit par la formule :

$$D = P - \lambda P^2 \quad \text{avec :}$$

- D** : Déficit d'écoulement en (m/an) ;
- P** : Précipitations moyennes annuelles en (m/an) ;
- T** : Température moyenne annuelle en (°C).

Le paramètre λ a pour expression : $\lambda = \frac{1}{\sqrt{0.8 + 0.14T}}$

Il est à noter que cette méthode n'est applicable que pour P comprise entre ($1/2\lambda > P > 1/8\lambda$).

Si par contre :

- $P < 1/8\lambda$: le D est égale aux précipitations et l'écoulement sera nul ;
- $P > 1/2\lambda$: le D est pratiquement indépendant de P et D sera égale : $D=0.20+0.35T$

Les calculs sont donnés dans le tableau 31.

Station \ Paramètres	P (m)	T (°C)	λ	$1/2\lambda$	$1/8\lambda$
Chouly	426.78 mm 0.42678 m	17	0.31	1.61	0.40

P étant comprise entre $1/2\lambda$ et $1/8\lambda$ ($1/2\lambda > P > 1/8\lambda$)
($1.61 > 0.426 > 0.40$)

Donc la méthode de M. Coutagne est applicable pour la station de Chouly.

Le calcul du déficit d'écoulement est donné dans le tableau 32.

Tableau 32 : Calcul du déficit d'écoulement (méthode de Coutagne) période (1956-2010).

Station \ Paramètres	P (m)	D (m/an)	Ecoulement et infiltration P-ETR
Chouly	426.78 mm 0.42678 m	0.376 Soit 88.10 %	50.78 mm Soit 11.26 %

Le déficit d'écoulement est de 376,78 mm/an soit 88.10 % des précipitations annuelles.

Nous constatons que les trois méthodes ont donné des résultats différents, la méthode de Turc a sous estimé les valeurs de l'écoulement, tandis que la méthode de Coutagne donne une valeur de l'écoulement proche de celle mesurée.

Conclusion

Il ressort de cette étude que notre bassin est soumis à un climat caractérisé par une saison pluvieuse allant en moyenne d'Octobre à Mai et par un été chaud et sec.

La moyenne pluviométrique enregistrée sur une période de 49 ans (1956-1957 / 2009-2010) est de 426.78 mm/an.

Sur le plan mensuel, le mois de Mars est généralement le plus humide ; Juillet et Août étant les plus secs.

La température moyenne annuelle enregistrée au niveau de la station d'El Maffrouch (1970-2007) est de 17°C.

Le mois de Janvier est le plus froid avec 9.74°C ; et Juillet-Août sont les plus chauds avec 25.78°C.

L'étude hydrologique de l'Oued Chouly nous montre que ce cours d'eau est caractérisé par un régime d'écoulement irrégulier dans l'ensemble.

D'une moyenne égale à 55.42 mm, le module annuel de la série de l'Oued Lakhdar (1966-2007) suit une loi normale.

Les débits mensuels atteignent leurs maximums en Mars alors que le minimum s'observe en Août.

L'évapotranspiration réelle est de 408.40 mm/an soit 95.69% des précipitations.

Le ruissellement est de 18.38 mm/an soit 4.30% des précipitations.

Les méthodes de calcul de l'ETR ont données des résultats différents, la méthode de Turc a sous estimé les valeurs de l'écoulement.

La méthode de Coutagne a donné une valeur de l'écoulement proche de celle mesurée elle est de 50.78 mm/an soit 11.26% des précipitations.

La comparaison entre les précipitations mensuelles et journalières, nous montre que les précipitations mensuelles varient de façon continue. Les maximas se trouvent au mois de Mars et les minimas aux mois de Juillet/Août. Pour ce qui est journalier, on a constaté une tendance différente. En effet, les précipitations ne varient pas de façon continue mais plutôt en dent de scie entre les mois de Janvier/Mai et Septembre/Décembre. La même chose est observée pour les débits mensuels et annuels.

Chapitre IV :
MODELISATION PLUIE-DEBIT

INTRODUCTION

Pour une meilleure gestion des ressources en eau et des quantités d'eau disponible, il est nécessaire de transformer les données pluviométriques en données hydrométriques. D'où l'intérêt de la modélisation pluie-débit basée sur l'utilisation de modèles simulant la réalité.

En hydrologie, la simulation de la transformation de la pluie en débit dans les rivières constitue un axe de recherche dynamique. Dans notre cas, nous avons utilisés le modèle GR (Génie Rural).

Avant l'application du modèle Génie Rural annuelle, mensuelle et journalier nous avons essayé le modèle corrélatore simple entre les précipitations et les lames d'eau écoulées pour la série de données disponible (1968-2007).

II- RELATION PLUIE-DEBIT

II.1- ETUDE DE LA RELATION PLUIE-DEBIT

Les figures 55, 56 et 57, nous permettent de voir les réactions du cours d'eau aux précipitations.

Globalement, il ressort de l'examen de ces figures que le cours d'eau répond presque instantanément aux fortes chutes de pluie qui surviennent en hiver et au printemps. Le débit d'un cours d'eau n'est pas toujours en relation directe avec les précipitations tombant sur son bassin versant.

On observe ainsi une décroissance progressive du débit en fonction du temps jusqu'au tarissement bien que lors de cette période, il tombe des pluies non négligeables.

Il faut toujours garder à l'esprit que le plus souvent le débit d'une rivière est en quelque sorte un résidu aléatoire des précipitations et non un pourcentage quasi-constant de celles-ci (G. Remeniéras, 1986) par ailleurs, il ne faut pas oublier qu'un cours d'eau ne draine pas forcément toutes les eaux précipitées sur son bassin.

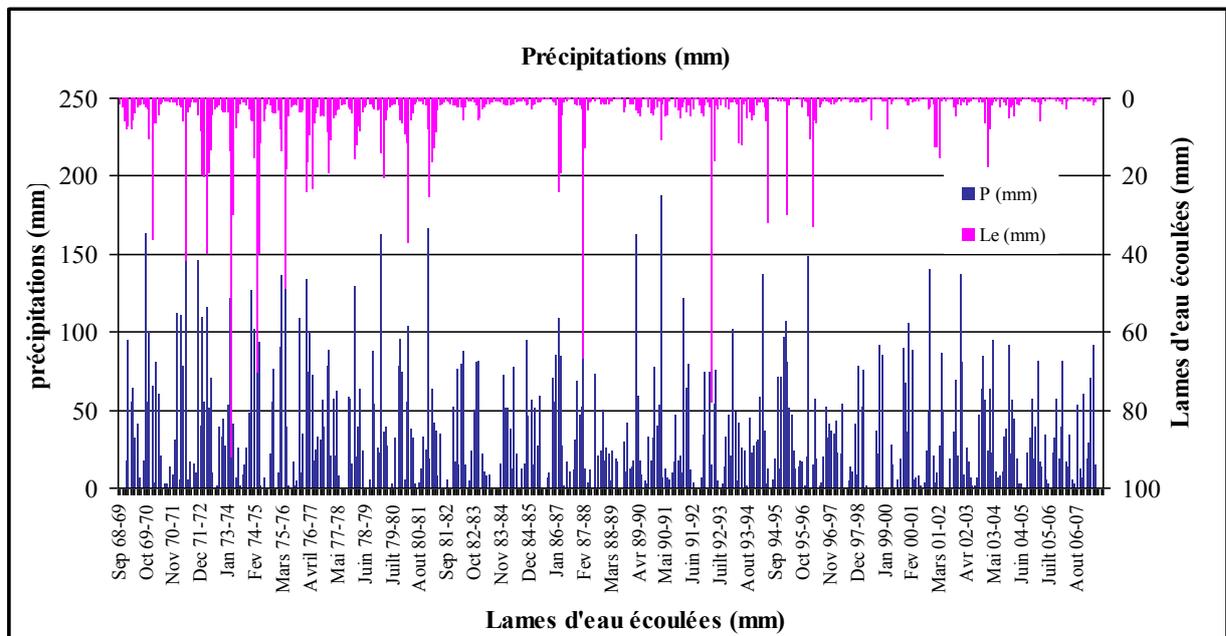


Figure 55 : Variations mensuelles et interannuelles des précipitations et des lames d'eau écoulées (1968-2007).

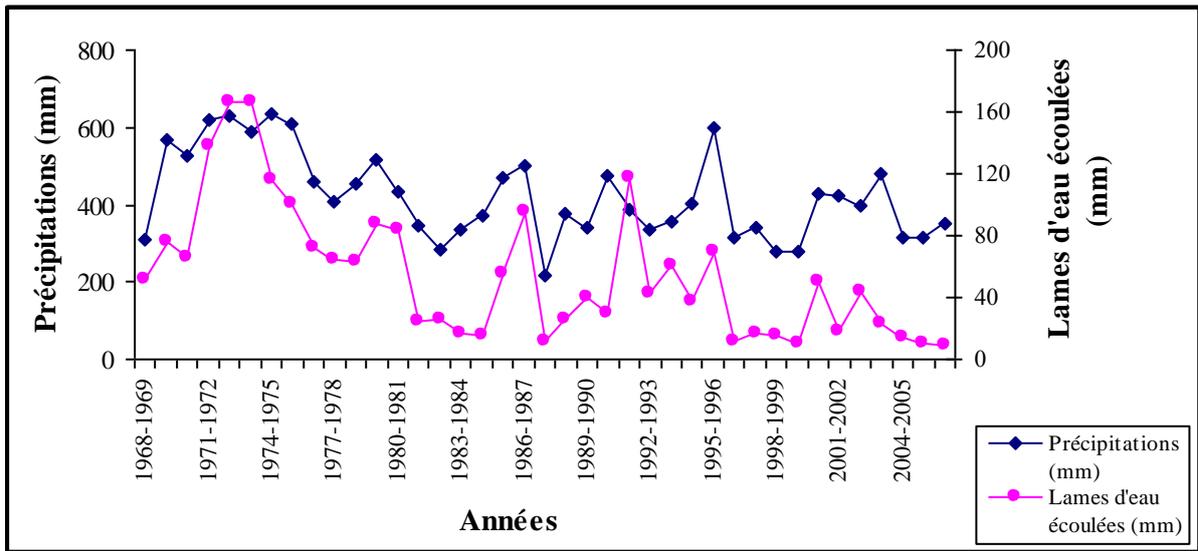


Figure 56 : Variations interannuelles des précipitations et des lames d'eau écoulées (1968-2007).

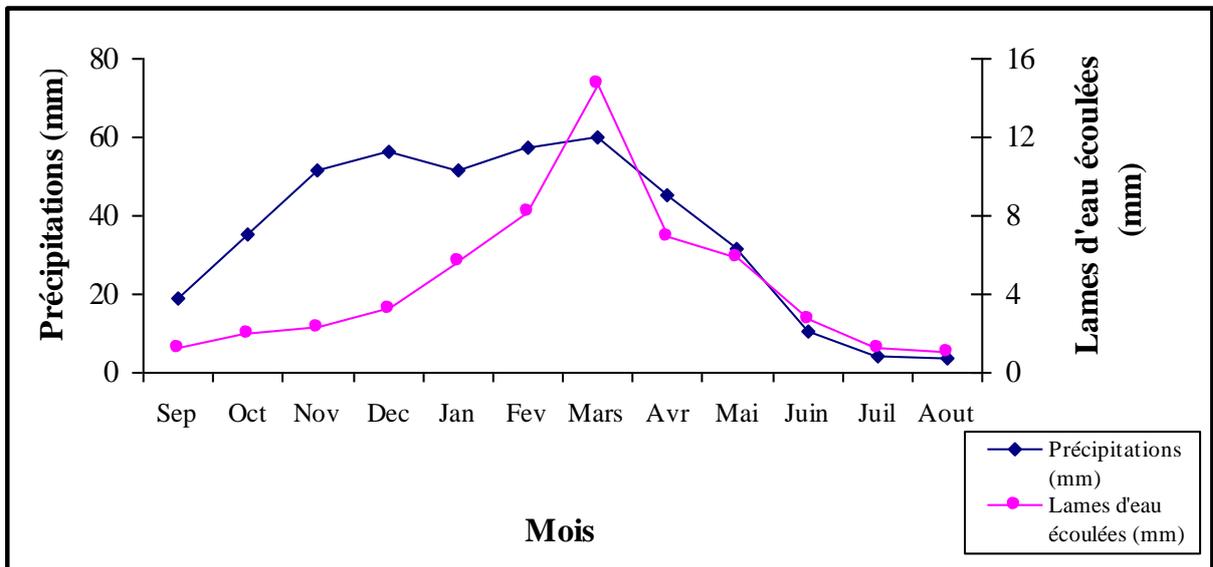


Figure 57 : Variations mensuelles des précipitations et des lames d'eau écoulées (1968-2007).

II.2- MODELISATION PAR CORRELATION

Nous avons soumis nos données annuelles et mensuelles, à un traitement statistique par la méthode des régressions.

- **Les régressions simples :**
Coefficient de corrélation.
- **Corrélation linéaire :**
 $Y = bx + a$

Cette méthode n'est efficace que si le coefficient de corrélation est assez élevé.

La représentation simultanée des droites $Y = f(x)$ dans le repère, met en évidence l'angle θ qui correspond à l'angle de régression auquel est liée la validité de la loi linéaire. On appelle le coefficient de corrélation :

$$r = \sqrt{\frac{[\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2}}$$

Tel que : "r" toujours compris entre - (1) et + (1) ainsi :

Si : $r = +1$ où $r = -1$, la relation est dite fonctionnelle ;

Si : $r = 0$, les variables sont indépendantes.

Un simple changement de variable peut nous conduire à une corrélation non linéaire (multiplicative ou exponentielle). Où : $Y = a \cdot x^h$

$$Y = \exp (bx + a)$$

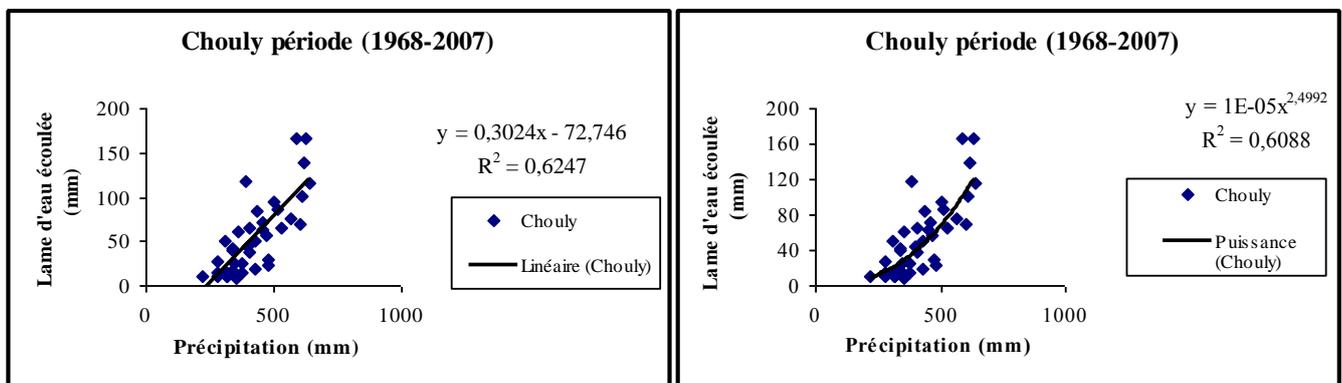
II.2.1- CORRELATION ANNUELLE

Le Tableau 33 montre les résultats du coefficient de détermination et le modèle qui relie les paramètres pluies-débits.

Tableau 33 : Représentation des différents types de régression.

Type de régression	Station Chouly
Linéaire	Le=0.302P-72.74 R²=0.62
Logarithmique	Le=122.96Ln (P)-684.16 R²=0.58
Polynomiale	Le=0.0005P ² -0.165P+24.739 R²=0.65
Puissance	Le=10 ⁻⁵ P ^{2.499} R²=0.61
Exponentiel	Le=3.241e ^{0.0059P} R²=0.61

La relation qui lie les lames d'eau écoulées et les précipitations annuelles est représentée par le modèle Polynomiale. De même, le modèle Puissance et Exponentiel peuvent 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 les formations adjacentes).



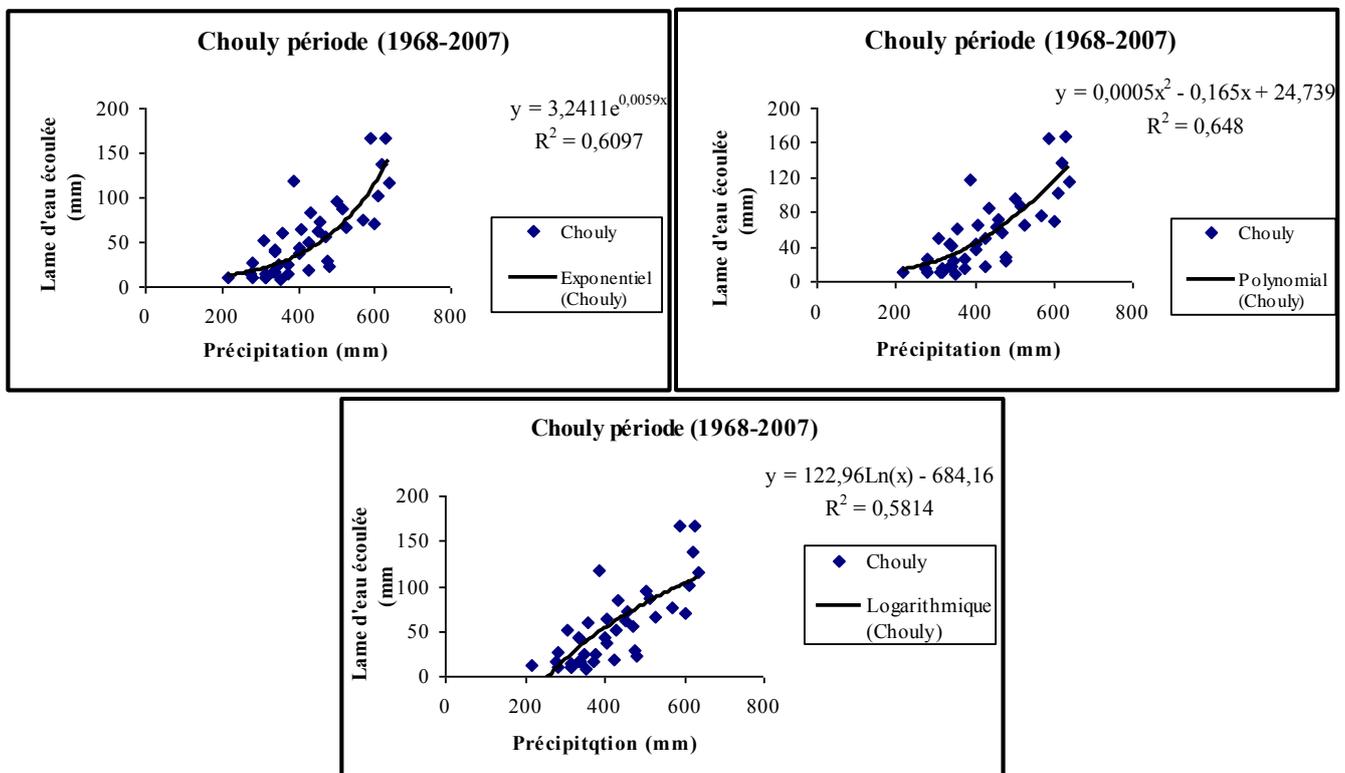


Figure 58 : Corrélation Pluie-Débit annuel (1968-2007).

La modélisation par corrélation entre les données annuelles (pluies et les lames d'eau écoulées) donne des coefficients de corrélation moyenne comprise entre 0.58 et 0.65 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.

II.2.2- CORRELATION MENSUELLE

Tableau 34 : Représentation des différents types de régression.

Type de régression	Station Chouly
Linéaire	$Le=0.124P+0.165$ $R^2=0.27$
Logarithmique	$Le=2.0366\ln(P)-1.1146$ $R^2=0.057$
Polynomiale	$Le=0.0013P^2-0.057P+3.157$ $R^2=0.37$
Puissance	$Le=0.8195P^{0.3267}$ $R^2=0.16$
Exponentiel	$Le=1.177e^{0.016P}$ $R^2=0.28$

Le modèle Polynomiale présente mieux mais faiblement significatif la relation entre les précipitations et les lames d'eau écoulées.

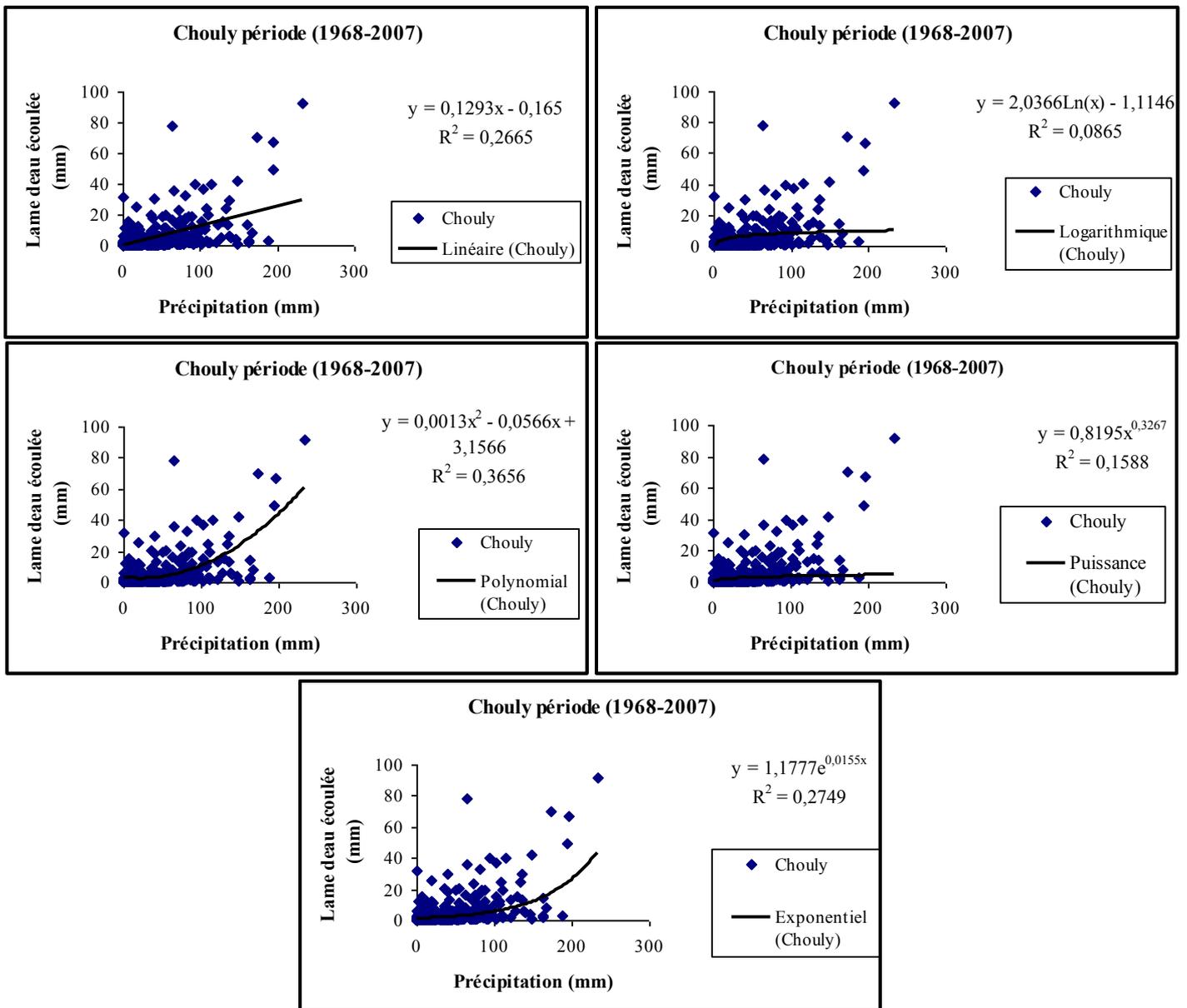


Figure 59 : Corrélation Pluie-Débit mensuel (1968-2007).

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.

II.2.3- CORRELATION JOURNALIERE

Tableau 35 : Représentation des différents types de régression.

Type de régression	Station Chouly
Linéaire	$Le=0.0003P+0.1203$ R²=0.0001
Logarithmique	$Le=0.0095Ln(P)+0.1119$ R²=0.002
Polynomiale	$Le=-10^{-4}P^2+0.0046P+0.1041$ R²=0.0051

Puissance	$Le=0.0454P^{0.0464}$ R²=0.0036
Exponentiel	$Le=0.047e^{0.0026P}$ R²=0.0005

Aucun des modèles n'est représentatif de la relation pluie-lame d'eau écoulée, les coefficients de corrélation sont trop faibles, inférieurs à 0.002.

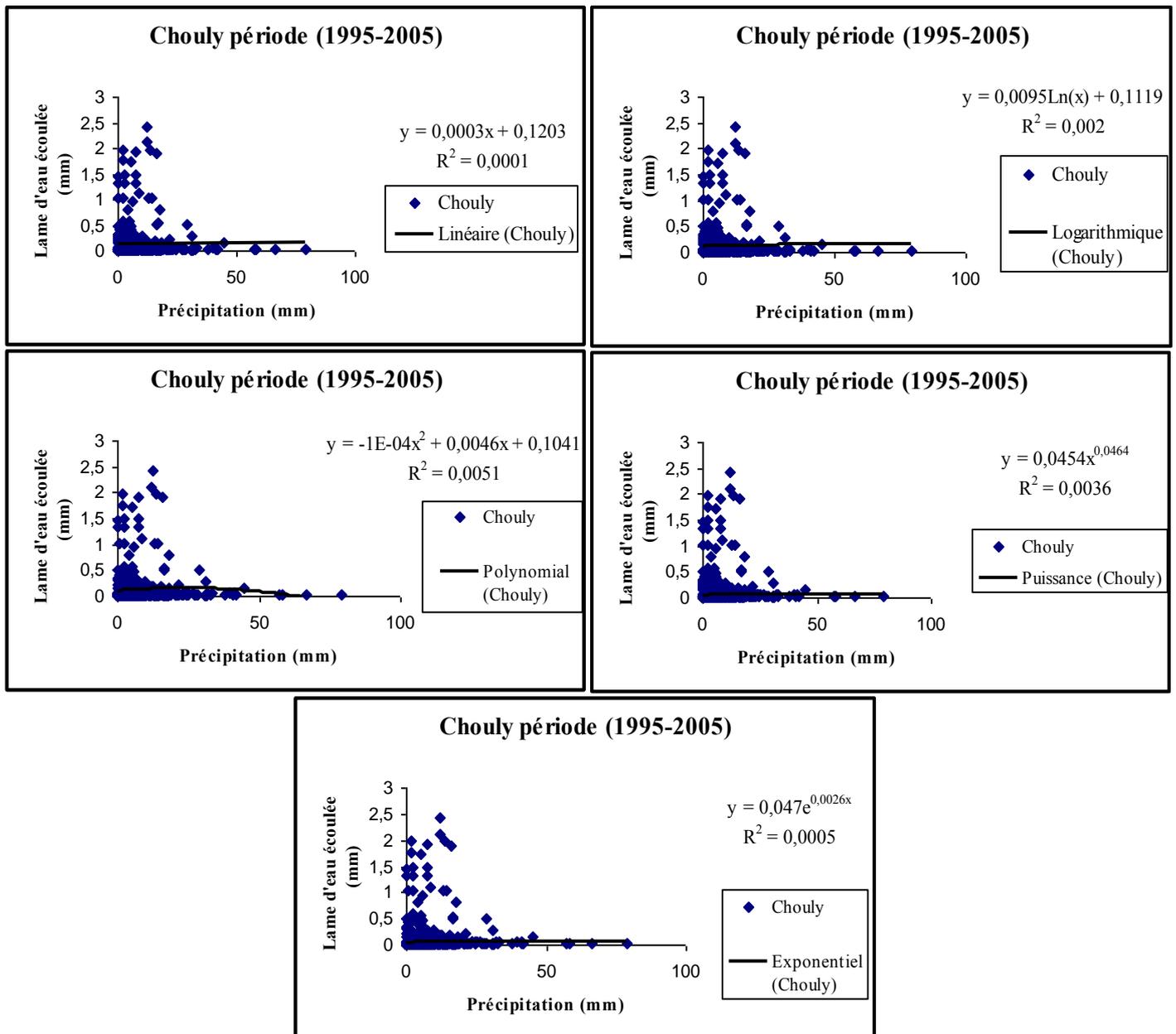


Figure 60 : Corrélation Pluie-Débit journalière (1995-2005).

Les corrélations entre les pluies et les lames d'eau écoulées donnent des relations journalières très faibles inférieures à 0.002.

Les résultats obtenus de la modélisation par la recherche de la relation entre pluie-lame d'eau écoulée à l'aide de corrélation simple semblent mal appropriés, et elle ne peut être utilisée pour des fins de prévision d'aménagement.

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

C'est pour ces raisons que nous avons choisi pour notre bassin versant le modèle GR (Génie Rural) qui tient compte aussi bien du pas de temps choisi ainsi que d'autres paramètres d'échanges entre le bassin et l'atmosphère d'une part et entre les bassins voisins entre eux d'autre part.

II.3- MODELISATION DE LA RELATION PLUIE-DEBIT PAR L'UTILISATION DU MODELE GR

De nombreux modèles hydrologiques ont vu le jour au cours des vingt dernières années surtout en regard de la relation pluie – débit, ils sont devenus aujourd'hui des outils indispensables à toutes les études et recherches dans le domaine de l'estimation, de la valorisation et de la gestion des ressources en eau.

Parmi ces modèles, les modèles du Génie Rural, leurs avantages c'est qu'ils comportent peu de paramètres et peuvent rendre compte du comportement hydrologique du bassin. Ils ont été testés sur des bassins versants allant de moins de 10 Km² à plus de 100 000Km² et des contextes climatiques très variés. Ils sont également utilisés pour une large gamme d'application opérationnelle telles que la prédétermination des crues, la prévision des crues et d'étiage, la détection d'impact, la gestion ou dimensionnement d'ouvrage.

La version que nous avons retenue est la version Excel disponible dans le site du CEMAGREF.

II.3.1- MODELE ANNUEL GR1A

Le modèle GR1A (modèle du Génie Rural à 1 paramètre Annuel) est un modèle pluie-débit global à un seul paramètre qui a un 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 (Andreassian *et al.*, 2007).

Dans cette étude, pour prédire le débit à une année donnée on utilise à l'entrée du modèle des valeurs des pluies annuelles observées en mm, des ETP calculées par la méthode de Turc et Thornthwaite en mm, et des débits annuels (exprimée en lames d'eau écoulées) en mm.

II.3.1.1- Calage du modèle

Le calage du modèle a été réalisé après le passage par un certain nombre de simulations. Nous avons procédé au calage du paramètre X du modèle en appliquant des changements sur ce dernier en commençant comme point de départ par une valeur fixée à 0.13 et la faisant croître successivement avec un intervalle de 0.01 jusqu'à la valeur supérieure limite donnée par le modèle 3.5 jusqu'à l'obtention d'un critère de Nash optimum égale ou supérieure à 70% (sachant qu'un bon critère de Nash-Sutcliffe a une valeur proche de 1) et un coefficient de corrélation entre les débits simulés et les débits observés plus acceptable. Les résultats du calage sont présentés dans le Tableau 36.

La validation du calage est effectuée en appliquant le test de performance du modèle de coefficient de détermination R^2 Tableau 36.

Tableau 36 : Représentation des résultats obtenus par l'utilisation de GR1A.

Données annuelles	ETP (Turc)				ETP (Thornthwaite)			
	X	Nash	Bilan	Coefficient de corrélation (R^2)	X	Nash	Bilan	Coefficient de corrélation (R^2)
O. Lakhdar (1970-1995)	1.0	71.6%	82.4%	0.853	1.05	83.2%	97.3%	0.838

A partir des valeurs des coefficients de détermination, le calage paraît correct. Les valeurs du critère de Nash obtenues sont bonnes, elles sont comprises entre (Q)=82.4% et 83.2% (Tab. 36). Le bilan est assez équilibré, il est de 97.3% pour la formule de Thornthwaite. Toutefois, l'évapotranspiration résultante de la formule de Thornthwaite donne de meilleurs résultats que celle de Turc.

Le coefficient de correction de l'évapotranspiration $X_1=1$, ce qui nous laisse penser que l'évapotranspiration est importante. Il traduit aussi les échanges avec des nappes profondes d'où une infiltration souterraine vers l'alimentation des nappes tout au long de l'oued. En effet, le caractère karstique de notre bassin nous laisse penser qu'il existe des échanges tout au long de l'oued.

Aussi, pour améliorer le calage du modèle, nous avons procédé au changement d'une valeur brute de débit (mm) celle de (1991-1992), qui présente une différence assez importante par rapport aux débits simulés et paraît ne pas correspondre aux pluies qui leurs ont donné naissance.

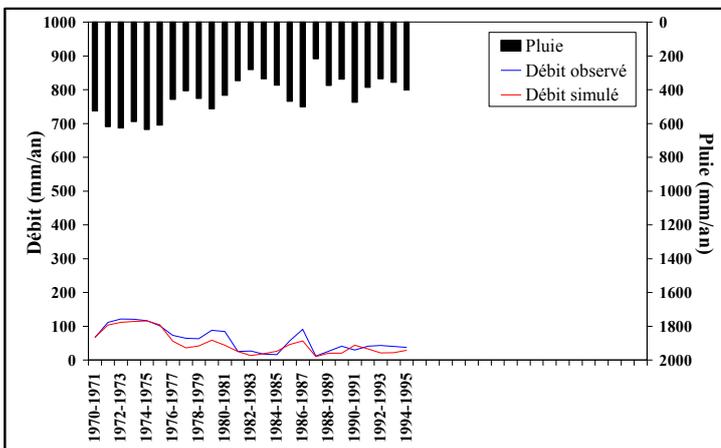


Figure 61 : Visualisation de la qualité du calage.

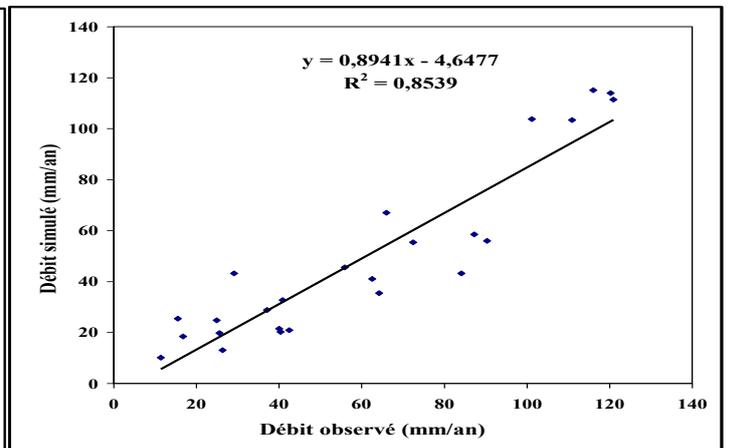


Figure 62 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés.

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

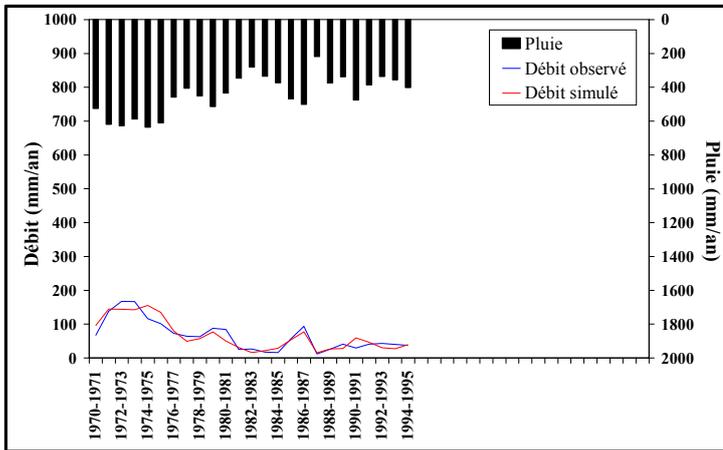


Figure 63 : Visualisation de la qualité du calage.

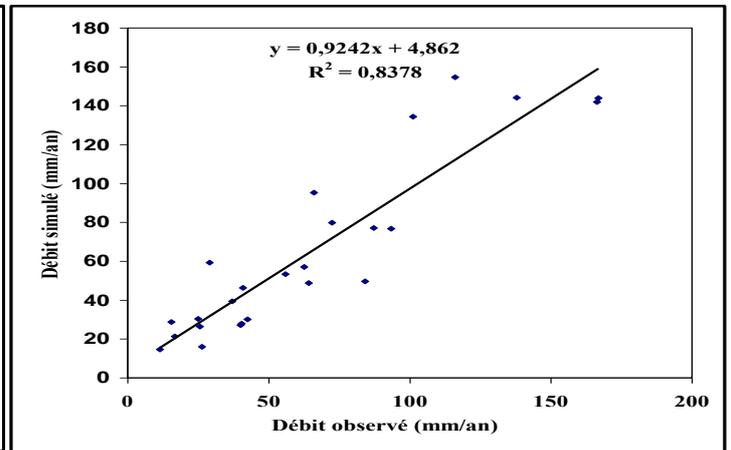


Figure 64 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés.

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

Les courbes des lames d'eau écoulées calculés et celles mesurées montrent une meilleure superposition pour la formule de Thornthwaite que celles de turc (Fig. 61, 63).

11.3.1.2- 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 (1995-2002). Le Tableau 18 et la Figure 63 présentent les résultats de cette validation.

Le Tableau 37 donne les variations du coefficient de corrélation des Q simulés et Q observés relative à la période de validation avec l'utilisation des deux méthodes (Turc et Thornthwaite) pour l'évapotranspiration.

Tableau 37 : Les variations du coefficient de corrélation.

Données annuelles	Coefficient de corrélation (R ²)	
	ETP (Turc)	ETP (Thornthwaite)
O. Lakhdar	0.70	0.69

A partir des résultats obtenus (Tab. 37), la modélisation pluie-débit élaborée par utilisation du GR1A sur nos données donne des résultats acceptables.

Nous avons jugé utile de représenter la répartition des points selon la droite $y = x$ pour mieux apprécier la qualité des résultats de la validation.

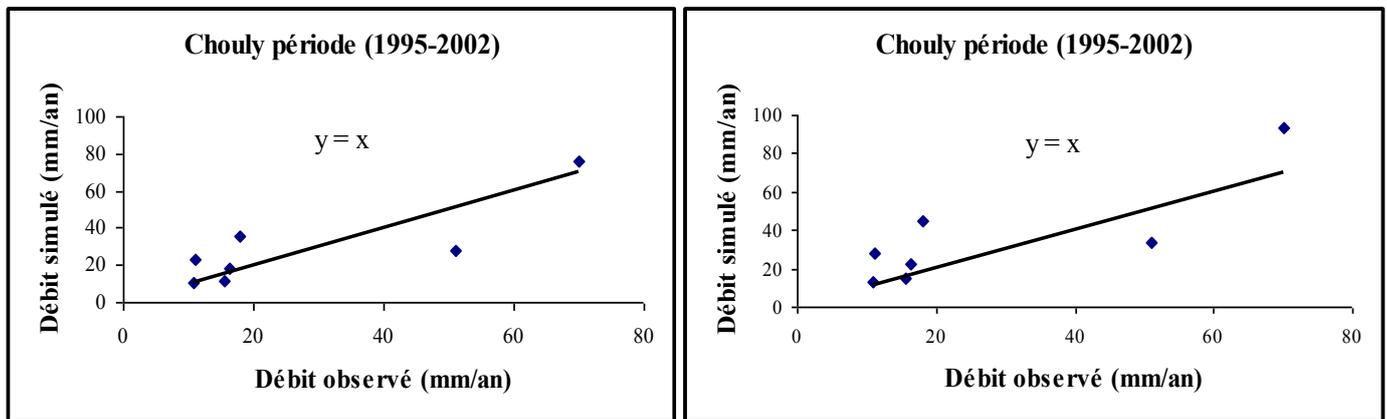


Figure 65 : Validation du modèle GR1A selon l'ETP de Turc et Thornthwaite.

A partir de la figure 65, nous constatons que les points ne s'alignent pas tous sur la droite $y = x$ toutefois la répartition globale des points paraît acceptable.

11.3.2- MODELE MENSUEL GR2M

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) est un modèle pluie-débit global à deux paramètres optimisables : X_1 : capacité du réservoir de production (mm) ; X_2 : coefficient d'échanges souterrains (mm). Il fonctionne autour de deux réservoirs, un de production (ou réservoir sol) (Sossou *et al.*, 2011) gère, en fonction de son taux de remplissage, la part de pluie qui se transforme en pluie nette et un de routage, associé à un hydrogramme unitaire, permet d'étaler le temps de cette pluie nette pour obtenir le débit de sortie (Randrianasolo, 2009) et sur lesquels les ajustements et interceptions se font différemment sur les entrées. Il s'est distingué comme le modèle fournissant globalement les meilleurs résultats de modélisation.

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).

Les données utilisées sont relatives aux périodes (1971-1972 / 2000-2001) mesurés aux niveaux de la station de Oued Chouly.

11.3.2.1- Calage du modèle

Le calage du modèle se fait par introduction des données, et la vérification de l'ajustement du modèle par analyse des résultats numériques et graphiques. Afin de quantifier la précision des résultats, deux critères d'ajustement sont retenus, soit le coefficient de corrélation R et le coefficient de Nash N.

Nous avons procédé aux changements des valeurs des paramètres X_1 et X_2 du modèle entre les valeurs limites comprises entre 140 et 2640 (mm) pour X_1 et 0.21 à 1.31 (mm) pour X_2 avec un intervalle de 0.001 jusqu'à l'obtention des valeurs optimum des coefficients de détermination, et le critère de Nash (valeur égale ou supérieur à 70%). Les résultats du calage, coefficient de détermination, et le Nash sont présentés dans le Tableau 20.

Pour améliorer le calage nous avons procédé à la correction de valeurs observées du débit du moi d'Avril 1967 qui présente une différence assez importante par rapport aux débits simulés.

Tableau 38 : Représentation des résultats obtenus par l'utilisation de GR2M.

Critères		Chouly (1971-1982)
ETP Turc	X ₁	196.37
	X ₂	0.76
	Nash%	84.1
	Bilan%	86.2
	R ₀	30
	R ²	0.825
ETP Thornthwaite	X ₁	639.06
	X ₂	0.86
	Nash%	82.9
	Bilan%	96.6
	R ₀	30
	R ²	0.714

X₁ : capacité du réservoir de production (mm) ;

X₂ : Paramètre d'échange (mm) ;

R₀ : Niveau de remplissage initial (max. : 60mm) ;

R² : Coefficient de corrélation.

D'après les résultats (Tab. 38) et la coïncidence des deux courbes, celle des débits simulés et calculés (Fig. 66, 70), nous pouvons dire que le modèle est assez bien calé, toutefois l'évapotranspiration résultant de la formule de Turc donne un meilleur résultat que celle de Thornthwaite.

Selon le graphe de l'évolution du taux de remplissage du réservoir de production (Fig. 68), nous pouvons dire qu'une partie importante reste sous forme de perte par infiltration au niveau du réseau de failles caractérisant le bassin qui fait retarder la réponse au niveau de la station hydrométrique.

Ainsi l'évolution du taux de remplissage du réservoir de routage (Fig. 69) peut expliquer un échange avec les formations adjacentes.

La variabilité mensuelle de l'écoulement est plus importante que celle annuelle, traduit par l'effet de compensation statistique qui règle la moyenne annuelle. Cette irrégularité des débits mensuels se traduit dans le modèle par le niveau de réservoir de production qui varie entre 113.64 mm et 32.93 mm (Fig. 68) et la capacité du réservoir de routage qui varie entre 31.90 mm et 10.04 mm (Fig. 69) pour Turc. Pour Thornthwaite, la capacité de réservoir de production varie entre 351.22 mm et 116.48 mm (Fig. 72) et de 33.28 mm et 7.32 mm (Fig. 73) pour la capacité du réservoir de routage (Tab. 39).

La réponse des pluies est plus lente dûe aux formations karstiques qui retardent leur arrivée et les pertes en profondeur, l'amplitude de variation des niveaux dans les réservoirs de production et de routage est plus importante et la réponse plus aléatoire.

Tableau 39 : Valeurs des paramètres après calibration et performances du modèle.

Bassin versant	ETP Turc		ETP Thornthwaite	
	S	R	S	R
O. Lakhdar	32.93-113.64	10.04-31.90	116.48-351.22	7.32-33.28

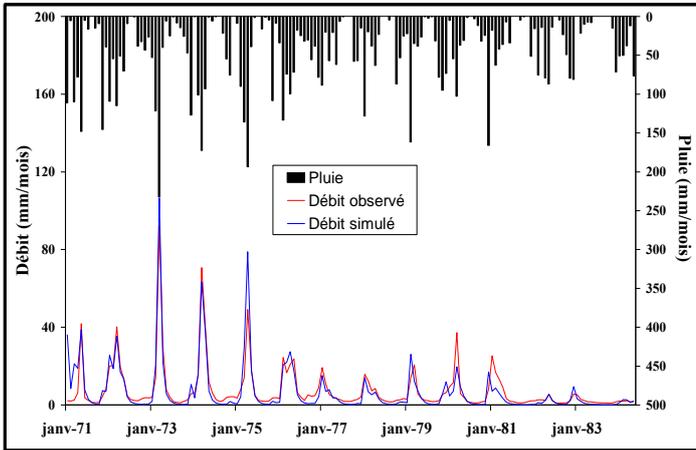


Figure 66 : Visualisation de la qualité du calage.

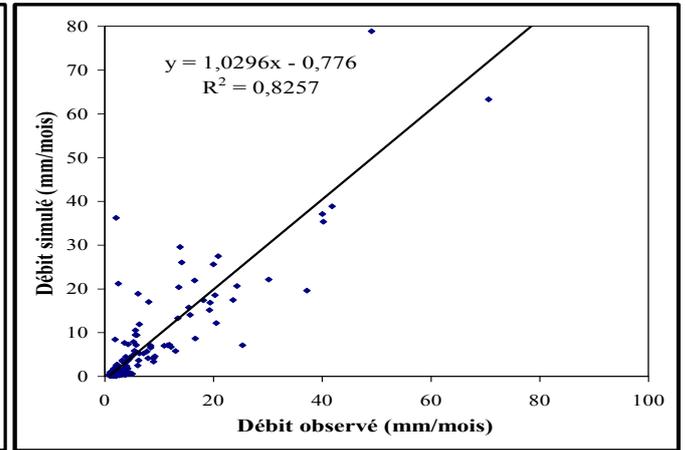


Figure 67 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés.

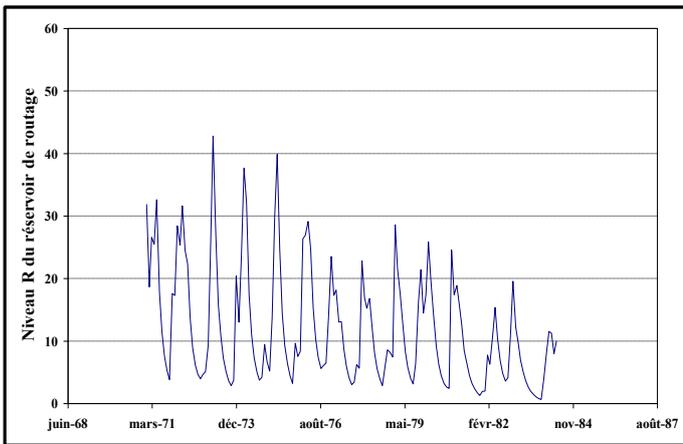


Figure 68 : Courbe du niveau S du réservoir de production.

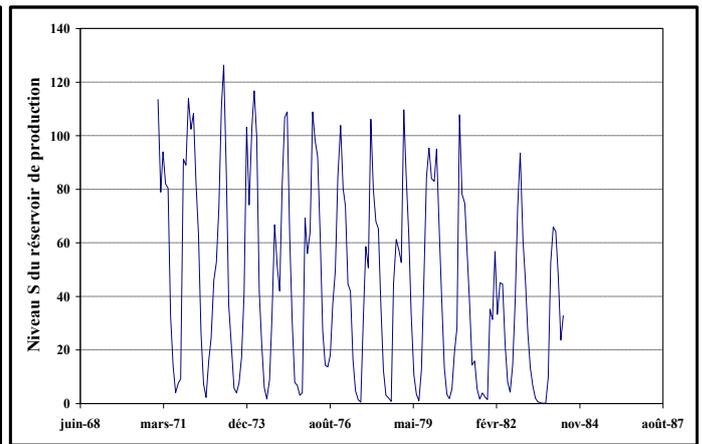


Figure 69 : Courbe du niveau R du réservoir de routage.

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

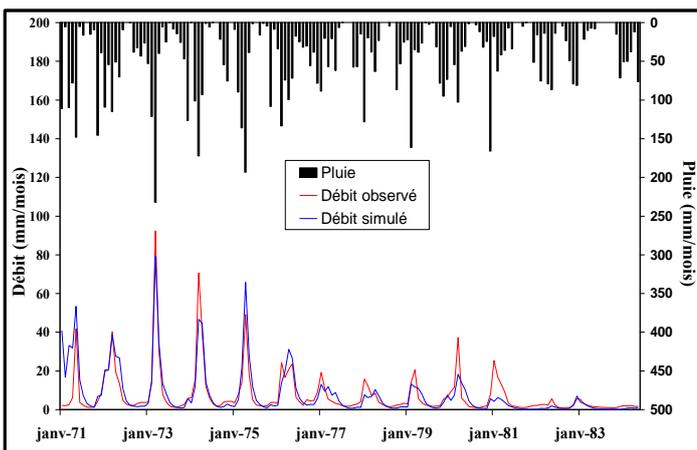


Figure 70 : Visualisation de la qualité du calage.

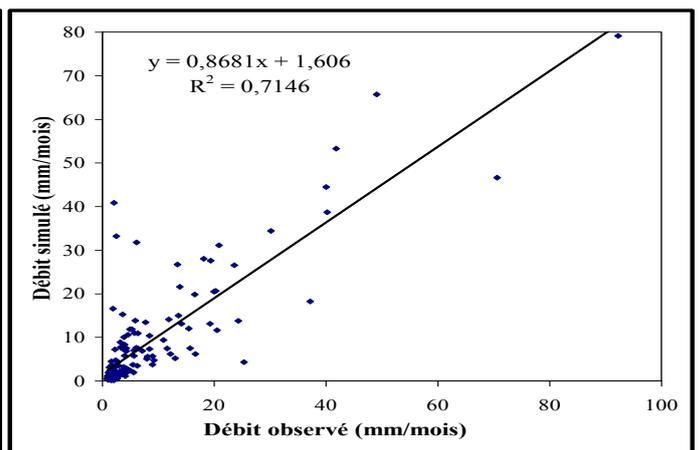


Figure 71 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés.

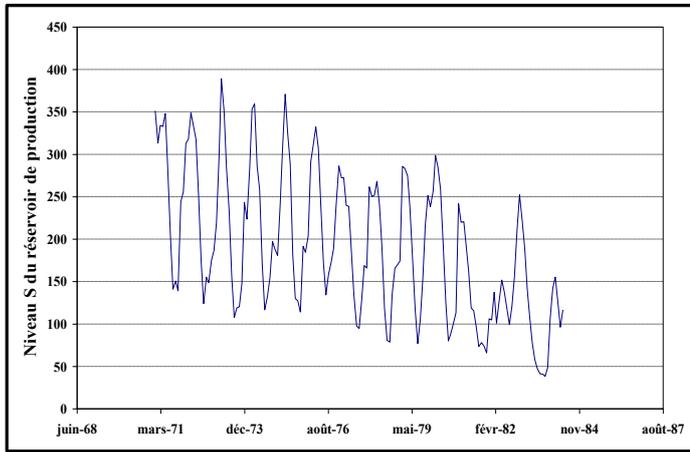


Figure 72 : Courbe du niveau S du réservoir de production.

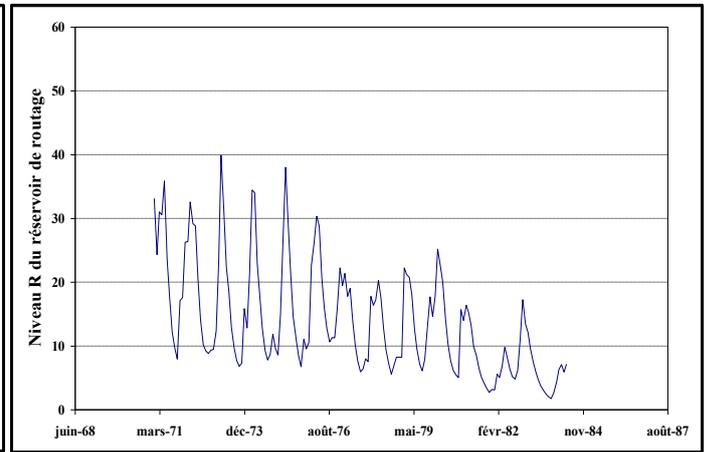


Figure 73 : Courbe du niveau R du réservoir de routage.

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

11.3.1.2- Validation du modèle

Pour la validation nous avons utilisé de nouvelles données des précipitations et d'évapotranspirations correspondant à la période (Janvier 1983/Décembre 2001) et qui n'ont pas été utilisées lors du calage.

Le Tableau 40 montre les variations du coefficient de corrélation par les deux types de données de l'évapotranspiration (Turc et Thornthwaite).

Tableau 40 : Les 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)
O. Lakhdar	0.340	0.287

Selon le coefficient de corrélation de la fonction débit observée et débit simulé (Tab. 40), la modélisation pluie-débit réalisée par l'utilisation du GR2M donne de faible résultat.

C'est pour cela que nous jugeons utile de représenter la répartition des points selon la droite $y = x$ pour mieux apprécier la qualité de la validation.

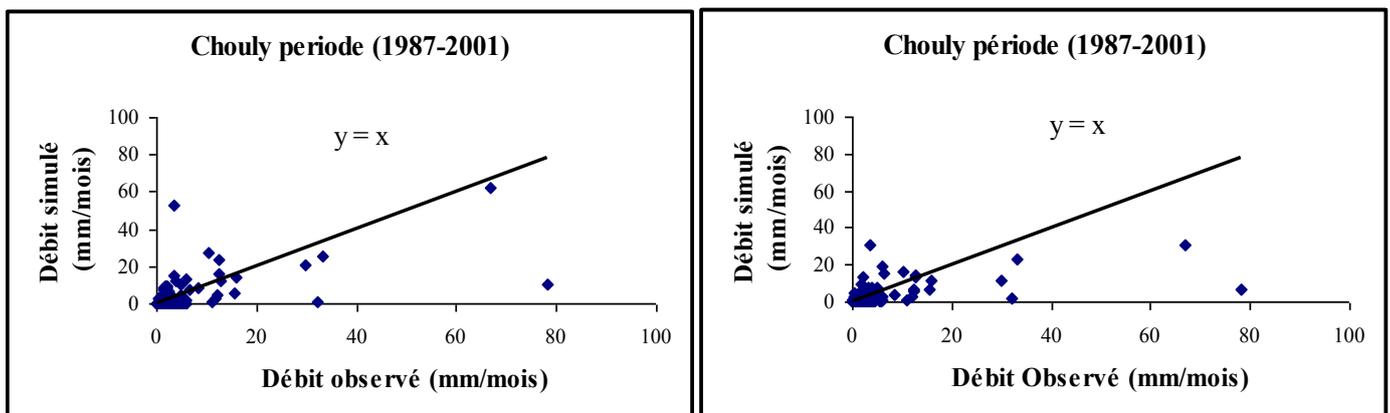


Figure 74 : Validation du modèle GR2M selon l'ETP de Turc et Thornthwaite.

L'analyse, graphique (Fig. 74), montre que l'alignement des points selon la droite d'équation $y=x$ donne de faible résultat (les points ne s'alignent pas bien sur la droite).

Ce résultat est probablement dû au fait qu'à partir de 1983, la région a connu une sécheresse qui a considérablement affecté les écoulements de surface et l'apport des sources.

11.3.2- MODELE JOURNALIER GR4J

Le modèle GR4j est, quant à lui, un modèle journalier à 4 paramètres de réglage. La version utilisée a été mise au point par Perrin en 2002 et améliorée par Perrin et al. en 2003. Les paramètres de réglages sont les mêmes que pour le modèle mensuel avec en plus deux autres paramètres supplémentaires : la capacité à un jour du réservoir de routage et le délai (temps de base de l'hydrogramme unitaire) (Marion, 2009). Tout comme le modèle GR2M, il contient deux réservoirs, un de routage et un réservoir sol.

Pour prédire le débit journalier nous avons utilisé à l'entrée du modèle des valeurs des pluies journalières observées (mm), l'ETP calculée par la méthode de Oudin (mm) et des débits journaliers observés exprimés en lames d'eau écoulées (mm).

Les données utilisées sont relatives aux périodes (2000-2001) mesurés aux niveaux de la station de Chouly.

11.3.2.1- Calage du modèle

Nous avons procédé aux changements des valeurs des paramètres X_1 , X_2 , X_3 et X_4 du modèle entre les valeurs limites proposés par le Cemagref comprises entre 100 et 1200 (mm) pour X_1 , -5 à 3 (mm) pour X_2 , 20 à 300 (mm) pour X_3 , et 1.1 à 2.9 (j) pour X_4 avec un intervalle de 0.001 jusqu'à l'obtention des valeurs optimum des coefficients de détermination, et du critère de Nash (valeur égale ou supérieur à 70%). Les résultats du calage, coefficient de détermination, et le Nash sont présentés dans le Tableau 41.

Pour améliorer le calage nous avons procédé à la correction de valeurs observées du débit du 23, 24, 25 Octobre 2000, 15 Novembre 2000, 28, 29, 30 Janvier 2001, 10 Octobre 2001, 10 Novembre 2001 qui présente une différence assez importante par rapport aux débits simulés.

Tableau 41 : Représentation des résultats obtenus par l'utilisation de GR4J.

Critères		Chouly (1971-1982)
ETP	X_1	387.61
	X_2	0.00
	X_3	35.87
	X_4	2.43
Oudin	Nash%	79.1
	Bilan%	139.3
	R_0	0.70
	S_0	0.60
	R^2	0.754

X_1 : capacité du réservoir de production (mm) ;

X_2 : Paramètre d'échange (mm) ;

X_3 : Capacité rés. routage (mm) ;

X_4 : Délai (jours) ;

R_0 : Capacité du réservoir de routage (max. : 60mm) ;

R^2 : Coefficient de corrélation.

D'après les résultats (Tab. 42) et la bonne superposition des deux courbes, des débits simulés et calculés (Fig. 76), nous pouvons dire que le modèle est assez bien calé.

Selon l'évolution du taux de remplissage du réservoir de routage (Fig. 78), nous pouvons dire qu'une partie importante 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 de réservoir de production qui varie entre 0.588 mm et 0.381 mm (Fig. 77) et la capacité du réservoir de routage qui varie entre 0.639 mm et 0.418 mm (Fig. 78) (Tab. 42).

Tableau 42 : Valeurs des paramètres après calibration et performances du modèle.

ETP Oudin		
Bassin versant	S	R
O. Lakhdar	0.381-0.588	0.418-0.639

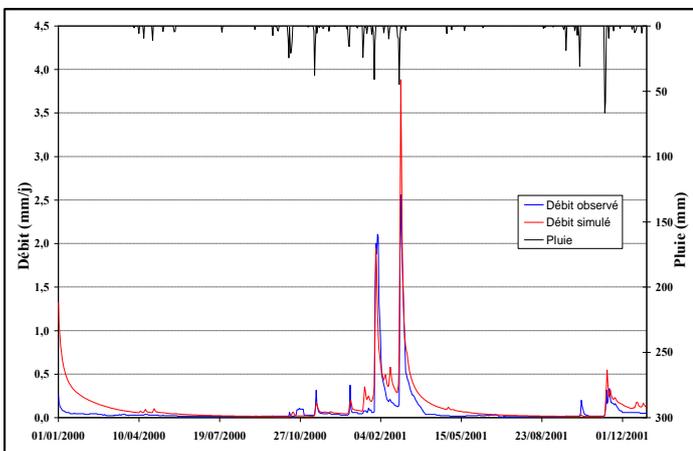


Figure 75 : Visualisation de la qualité du calage.

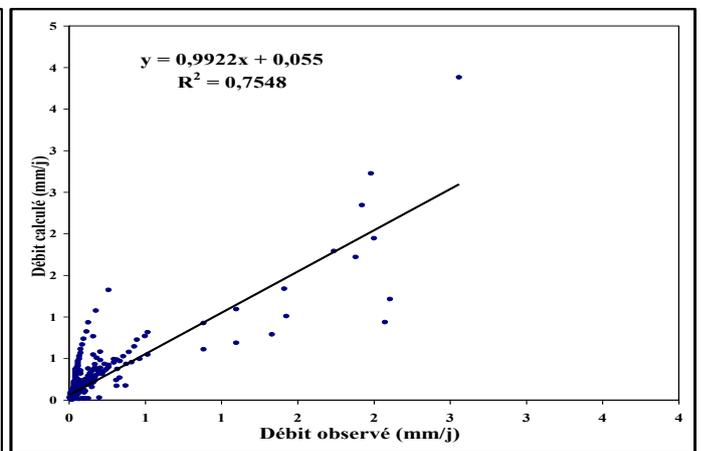


Figure 76 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés.

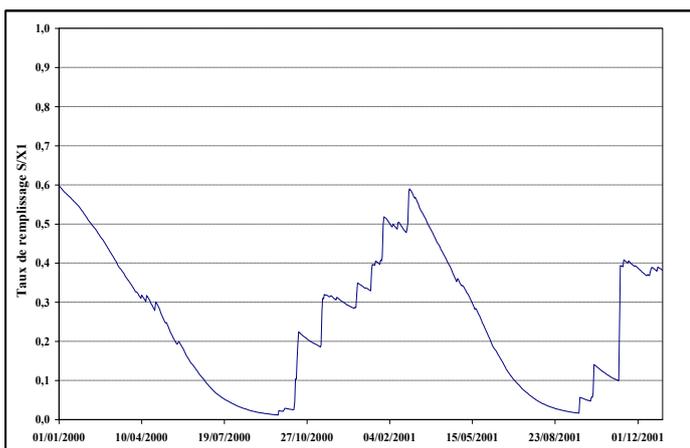


Figure 77 : Courbe du niveau S du réservoir de production.

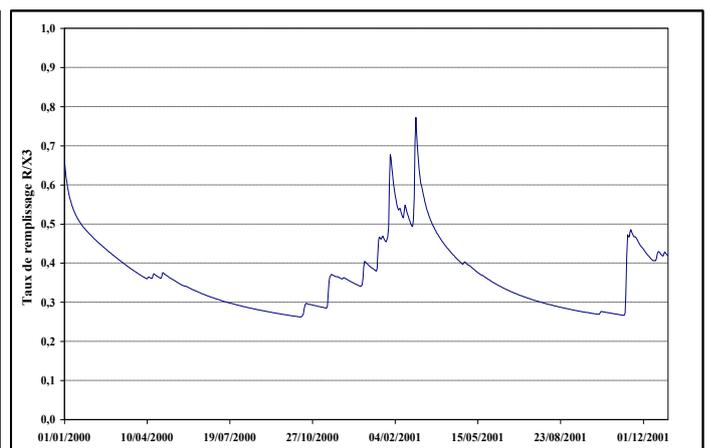


Figure 78 : Courbe du niveau R du réservoir de routage.

Résultats obtenus par le modèle GR4J.

I1.3.1.2- Validation du modèle

Pour la validation nous avons utilisé de nouvelles données des précipitations et d'évapotranspirations correspondant à la période (2002-2003) et qui n'ont pas été utilisées lors du calage.

Le Tableau 43 montre les variations du coefficient de corrélation.

Tableau 43 : Le coefficient de corrélation entre les débits simulés et calculés au cours de la validation.

Données journalières	Coefficient de corrélation (R ²)
O. Lakhdar	0.479

Selon le coefficient de corrélation de la fonction débit observée et débit simulée (Tab. 43), la modélisation pluie-débit réalisée par l'utilisation du GR4J donne des résultats moyens.

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

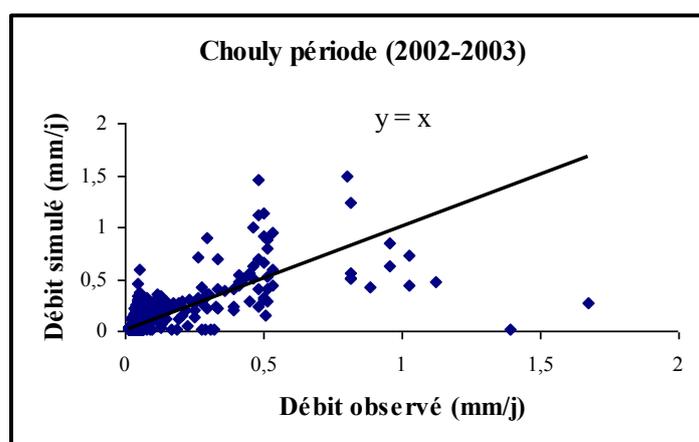


Figure 79 : Validation du modèle GR4J selon l'ETP de Oudin.

L'analyse, graphique (Fig. 79), montre que les nuages de points sont alignés harmonieusement autour de la droite d'équation $y=x$ à l'exception de quelques points.

Conclusion

La modélisation pluie-débit à l'aide du logiciel GR donne des résultats plus performants et représentatifs que celle par approche corrélatrice.

Les résultats de la validation entre débits observés et débits simulés sont bons à moyen, ils varient en fonction du pas de temps utilisé. Le coefficient de corrélation varie entre 0.7 et 0.28 pour toutes les applications. Pour le modèle annuel, le coefficient de corrélation est significatif, il est de 0.7 (Turc) et 0.69 (Thorntwaite) (Tab. 37). A l'échelle mensuel et journalier, les coefficients de corrélation sont faibles, ceci peut s'expliquer par l'irrégularité des précipitations au cours des mois et des jours et surtout de l'état du sol et des conditions géologiques (saturation et occupation).

Le modèle annuel paraît être le modèle le mieux adapté et le plus performant pour notre étude.

Les périodes de mises en routes et périodes de tests du modèle journalier sont plus longues et de ce fait, on a une réponse plus précise des débits simulés. Par exemple, les débits observés des mois de Mai sont en général plus faibles que ceux des mois d'Avril, cette tendance est retrouvée sur les débits simulés du modèle journalier alors qu'on ne la voit pas sur le modèle mensuel.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de cette étude était d'effectuer une étude de modélisation hydrologique Pluie-Débit du bassin versant de l'Oued Lakhdar affluent de la Tafna-NW-algérien.

Nous nous sommes efforcés tout d'abord de caractériser les principaux facteurs physico-géographiques agissant sur l'écoulement.

L'étude morphométrique : nous a permis de caractériser la forme, les altitudes moyennes et les altitudes les plus fréquentes de notre bassin. La superficie et le périmètre stylisé, a permis de quantifier des paramètres tels que : le coefficient de compacité, la densité de drainage etc....

Le bassin de l'Oued Lakhdar à une forme allongée favorisant une érosion linéaire et régressive avec un chevelu assez dense.

L'étude géologique et structurale : a été fondée sur les travaux de Benest (1985), Auclair et Biehler (1967) et Collignon (1986). La description lithostratigraphique montre que la série type des monts de Tlemcen affleure dans le bassin étudié (calcaire, marne et dolomie).

L'étude climatologique : il ressort de cette étude que le bassin est caractérisé par une saison pluvieuse et un été chaud et sec avec une moyenne de 426.78 mm/an (1959-2010). La série des précipitations suit une loi normale. Deux saisons sont à distinguer :

* Saison humide, qui va s'étendre d'Octobre à Mai, avec des pluies irrégulières ;

* Saison sèche, de Juin à Septembre, où la pluviométrie est relativement faible.

La moyenne des températures est de 17 °C, le régime thermique est caractérisé par des amplitudes annuelles assez fortes qui permettent d'accentuer le phénomène de l'évapotranspiration.

La valeur de la lame d'eau écoulée mesurée est de 55.21 mm soit un coefficient d'écoulement de 13.07%.

L'évapotranspiration réelle calculée par Turc est de 408.40 mm/an soit 95.69% des précipitations et le ruissellement est de 18.38 mm/an soit 4.30% des précipitations.

L'étude hydrologique : reflète un régime d'écoulement irrégulier d'une moyenne de 55.42 mm lié à l'irrégularité du régime pluvial.

Statistique : L'étude des ajustements des précipitations et lames d'eau écoulées montrent que ces derniers suivent une loi normale.

La modélisation : Nous avons tenté une modélisation pluie-débit par approche corrélatoire dont les essais de régression effectués entre les précipitations et les lames d'eau écoulées aussi bien mensuelles qu'annuelles ont donné des coefficients de corrélation moyens. Les corrélations entre les pluies et les lames d'eau écoulées donnent des relations journalières très faibles inférieures à 0.002. Les résultats obtenus par corrélation simple n'étaient pas concluants, elle semble mal appropriée, et elle ne peut être utilisée pour des fins de prévision d'aménagement.

C'est pour ces raisons que nous avons choisi pour notre bassin versant le modèle GR (Génie Rural) qui tient compte aussi bien du pas de temps choisi ainsi que d'autres paramètres

d'échanges entre le bassin et l'atmosphère d'une part et entre les bassins voisins entre eux d'autre part.

Ce modèle est de type globale, dont les paramètres d'entrées sont les précipitations et l'ETP (calculée par deux méthodes différentes celles de Turc et celle de Thornthwaite) et le paramètre de sortie est constitué par les lames d'eau écoulées.

Les résultats obtenus par l'application du modèle GR s'avèrent intéressantes et donnent des résultats appréciables à savoir :

- 1- Pour le GR1A, les valeurs du critère de Nash obtenues sont bonnes, elles sont comprises entre (Q)=82.4% (Turc) et 83.2% (Thornthwaite). Le bilan est assez équilibré, il est de 97.3% pour la formule de Thornthwaite. Toutefois, l'évapotranspiration résultante de la formule de Thornthwaite donne de meilleur résultat que celle de Turc.
Pour le coefficient de corrélation R^2 , il varie entre 0.85 pour la méthode Turc et de 0.83 pour la méthode de Thornthwaite.
- 2- Pour le GR2M, les valeurs du critère de Nash obtenues sont bonnes, elles sont comprises entre (Q)=84.1% (Turc) et 82.9% (Thornthwaite). Le bilan est assez équilibré, il est de 96.6% pour la formule de Thornthwaite. Toutefois, l'évapotranspiration résultante de la formule de Turc donne de meilleur résultat que celle de Thornthwaite.
Le coefficient de corrélation R^2 , varie entre 0.82 pour la méthode Turc et de 0.71 pour la méthode de Thornthwaite.
- 3- Pour le GR4J, la valeur du critère de Nash est acceptable, elle est de 79.1%, le bilan est équilibré, avec une valeur de 139.1%. De même, le coefficient de corrélation entre les lames écoulées mesurées et calculées, est moyen d'une valeur de 0.75.

La validation a donné de bon résultat pour le pas de temps annuel confirmant le bon calage du modèle et l'excellente performance quant à l'utilisation du modèle GR pour un bassin à climat semi-aride méditerranéen. Pour le modèle mensuel et journalier, les résultats du calage sont bons, par contre ce n'est pas le cas pour la validation. Ceci peut être due probablement à la sécheresse qui a frappé la région à partir de 1983 et qui a considérablement affecté les écoulements de surface et l'apport des sources.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGOSTA C.** 2007. Naturalisation des débits et modélisation hydrologique sur des sous-bassins versant de la Garonne à Lamagistère. *Master 2, Univ. Pierre et Marie*, 51 p.
- AMBROISE B.** 1991. Hydrologie des petits bassins versants ruraux en milieu tempéré, processus et modèles. Séminaire du Conseil Scientifique du département « Science du sol » de l'Institut National de Recherches Agronomiques de Dijon, p.
- AMBROISE B.** 1998. La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant. Processus, Facteur, Modèles. H.G.A. (Ed.), Bucarest, 200 p.
- ANDREASSIAN V., CHARLES P., CLAUDE M.** 2007. Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR)-Cemagref, *UR Hydrosystèmes et Bioprocédés*, 16 p.
- ANDREASSIAN V., HALL A., CHAHINIAN N., SCHAAKE J.** 2006. Introduction and Synthesis: Why should hydrologists work on a large number of basin data sets? In: V. Andréassian, A. Hall, N. Chahinian and J. Schaake (Editors), large sample basin experiments for hydrological model parameterization: Results of the Model Parameter Experiment - *MOPEX. IAHS Publication n° 307*, pp. 1-5.
- ANDREASSIAN V.** 2002. Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants. *Thèse de Doctorat, Univ. Pierre et Marie Curie Paris VI, Cemagref (Antony)*, 276 p.
- AUCLAIR D., BIEHLER J.** 1967. Etudes géologiques des Hautes Plaines Oranaises entre Tlemcen et Saïda. *Publ. Serv. Géol. Algérie. Ann. Ser. n° 34*, pp. 3 - 45., 8 fig.
- BENEST M.** 1985. Evolution de la plate forme de l'Ouest algérien et du Nord - Est Marocain au cours du Jurassique supérieur et au Crétacé : Stratigraphie, milieux de dépôts et dynamique sédimentaire. *Doc. Lab. Géol., Univ, Lyon1. Fasc. I et II*, 367 p.
- BEVEN K.J, WARREN R., ZAOUI J.** 1980. SHE: towards a methodology for physically based distributed forecasting in hydrology. *Hydrological forecasting (Proceedings of the Oxford Symposium): IAHS – AISH Publ. n° 129*, pp. 133-137., 1 fig.
- BEVEN K.J** 1992. The future of distributed modelling. *Hydrol. Processes*, n° 6, pp. 253-254.
- BEVEN K.J.** 1989. Changing ideas in hydrology, the case of physically-based models. *Journal of hydrology*, n° 105, pp. 157-172.
- BENADDA L.** 2000. Etude d'un projet de mise en valeur par irrigation du périmètre d'El-Fhoul à partir d'Oued Sikkak. *Mem .Ing., Univ. Tlemcen*, 196 p.
- 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., 81 Fig.

- 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). *1^{er} Congrès sur la géologie du Maghreb*, pp. 83-87., 4 fig.
- BOUANANI R.** 2010. Modélisation de la fonction pluie - débit. Application au bassin versant de la Tafna (NW Algérien). *Mém. Magister, Univ. Tlemcen*, 110 p., 72 fig.
- BOUDAHRAA H.** 2007. Modélisation pluie - débit à base géomorphologique en milieu semi-aride rural Tunisien : Association d'approches directe et inverse. *Thèse de Doctorat, Univ. 7 novembre Carthage (Tunisie)*, 227 p., 129 fig.
- BOUKHARI K., ER-ROUANE S., GOUZROU A.** 2004. Analyse statistique du régime hydrologique sur la plaine de Mejjate et sa bordure occidentale, (Maroc). *Larhyss Journal*, n° 03, 14 p.
- BOUREK R.** 2010. Modélisation pluie – débit. Application au bassin versant de la Mactaa (NW Algérien). *Mém. Magister, Univ. Tlemcen*, 118 p., 57 fig.
- CHACHOUA A.** (2010) - Gestion de crue dans un bassin versant. Etude hydrologique, hydraulique et aménagement. *Mém. Magister, Univ. Tlemcen*, 134 p.
- COLLIGNON B.** 1986. Hydrogéologie appliquée des aquifères karstiques des Monts de Tlemcen. *Thèse de Doctorat, Univ. Avignon, France*, Tome 1 et 2, 282 p., 13 annexes.
- DAKICHE A.** 1993. Etude statistique multidimensionnelle du régime pluviométrique et des crues. Application au bassin versant de la Tafna. *Rapp. ANRH. (Inédit)*.
- DE BRUYN B.** 2004. Etude de la vulnérabilité des eaux aux produits phytosanitaires : Indicateur environnemental et modèle mécaniste, en vue d'une meilleure gestion du bassin versant de la Leysse (Savoie). *Thèse de Doctorat, Univ. Joseph Fourier – Grenoble 1*, 256 p.
- DOOGE J.C.I.** 1988. Hydrology past and present. *Journal of Hydraulic Research*, pp. 5-26.
- EDIJATNO** 1991. Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier. *Thèse de Doctorat, Univ. Louis Pasteur/ENGEES, Strasbourg*, 242 p.
- EDIJATNO., NASCIMENT N.O., YANG X., MAKHLOUF Z., MICHEL C.** 1999. GR3J : a daily watershed model with three free parameters. *Hydrological Sciences Journal*, n° 44 (2), pp. 263-277.
- ESTUPINA BORRELL V.** 2004. Vers une modélisation 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*, 254 p., 167 fig.
- FANDI O.** 1999. Etude hydrogéologique des sous bassins versants de la Tafna (Isser, Sikkak et Lakhdar). Recherche d'un modèle pluies – débits. *Mém. Ingénieur d'état, Univ. Tlemcen*, 197 p., 105 fig.

- FOURMIGUE P., LAVABRE J.** 2005. Prédiction de crues avec le modèle conceptuel pluie-débit GR3H. *Revue des Sciences de l'Eau*, n° 18(1), pp. 87-102.
- 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.
- GAUME E.** 2009. Hydrologie de versants et de bassins versants et modélisation pluie-débit. *Master2 Sciences et Génie de l'environnement*, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 86 p.
- KABOUYA M.** 1990. Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale. *Thèse de Doctorat, Univ. Paris Sud Orsay*, 347 p.
- KABOUYA M., MICHEL C.** 1991. Estimation des ressources en eau superficielle aux pas de temps mensuel et annuel, application à un pays semi-aride. *Revue des Sciences de l'Eau*, n° 4(4), pp. 569-587.
- KHALDI A.** 2005. Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien "Monts de Tlemcen-Saida". *Thèse de Doctorat, Univ. Oran (Algérie)*, 239 p., 196 fig.
- KINGUMBI A.** 2006. Modélisation hydrologique d'un bassin affecté par des changements d'occupation. Cas du Merguellil en Tunisie centrale. *Thèse de Doctorat, Institut National d'Ingénieur*, 199 p.
- MAFTEI C.P** 2002. Etude concernant les écoulements superficiels, modélisation spatialisée de l'écoulement sur le bassin versant de Voinesti-Roumani, 75 p.
- MAHZOUM H.** 2009. Etude du fonctionnement hydrologique du bassin du Lunain. *Lab. Sisyphe, Univ. Pierre et Marie Curie (Paris VI)*, pp. 4-49., 38 fig.
- MAIDMENT. D.R.** 1992. Hydrology. *In: Applied Hydrology*, D. R. Maidment *Ed.*, McGraw Hill, New-York, 1412 p.
- MAISON P.** 2000. Un modèle hydrologique de suivi de la pollution diffuse en bassin versant. Approche mécaniste simplifiée de la zone non saturée. *Thèse de Doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse en Science de la terre et environnement*, 303 p., 161 fig.
- MAKHLOUF Z.** 1994. Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. *Thèse de Doctorat, Univ. Paris XI Orsay*, 426 p.
- MAKHLOUF Z., MICHEL C.** 1994. A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology*, n° 162, pp. 299-318.
- MARCHANDISE A.** 2007. Modélisation hydrologique distribuée sur le gardon d'Anduze : étude comparative de différents modèles pluie-débit, extrapolation de la normale à l'extrême et tests d'hypothèses sur les processus hydrologiques. *Thèse de Doctorat, Univ. Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc*, 214 p., 26 fig.

- MARION D.** 2009. Caractérisation hydrologique du bassin versant de Chalpi Grande. Versant oriental de la cordillère des Andes en équateur. *Stage de césure*, ENSAR 157, 67 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 p.
- MERRIEN-SOUKATCHOFF V.** 2009. Hydrologie et hydrogéologie. Ecole des mines de Nancy, 107 p., 72 fig.
- MICHEL C.** 1983. Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre ? *La Houille Blanche* (1), pp. 39-44.
- MORIN G., PAQUET P.** 1995. Le modèle de simulation de quantité et de qualité CEQUEAU, guide de l'utilisateur, version 1.0B windows – *Rapport de recherche n° 435, INRS-Eau, Québec*.
- MOUELHI S.** 2003. Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. *Thèse de Doctorat, ENGREF*, Cemagref (Antony), France, 323 p., 134 fig.
- MOUELHI S., MICHEL C., PERRIN C., ANDREASSIAN V.** 2006a. Linking stream flow to rainfall at the annual time step: the Manabe bucket model revisited. *Journal of Hydrology* n°328, pp. 283-296.
- MOUELHI S., MICHEL C., PERRIN, C. ET ANDREASSIAN V.** 2006b - Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology* n° 318(1-4), pp. 200-214.
- MOUZOUNA C., OULD SAADI Z.** 1994. Contribution à l'aménagement hydraulique de la vallée de oued Lakhdar (ex : oued Chouly). *Mém. Ingéniorat d'état, Univ. Tlemcen*, 164 p., 49 fig.
- NASCIMENTO N.O.** 1995. Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'action anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. *Thèse de Doctorat, CERGRENE/ENPC*, Paris, 550 p.
- NASH J.E., SUTCLIFFE J.V.** 1970. River flow forecasting through conceptuel models. Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, n° 10, pp. 282-290.
- UDIN L.** 2004. Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. *Thèse de Doctorat*, Cemagref. Ecole Nationale du Génie Rural, des eaux et des forêts, centre de Paris, 495 p., 13 fig.
- PERRIN C.** 2000. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. *Thèse de Doctorat, INPG (Grenoble) / Cemagref* (Antony), 530 p., 112 fig.

- PERRIN C.** 2002. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. *La Houille Blanche* (6/7), pp. 84-91.
- PERRIN C., MICHEL C., ANDRÉASSIAN V.** 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology* 279 (1-4), pp. 275-289.
- PERRIN C., SAMIE R., HENDRICKX F.** 2009. Les outils du projet : modélisation hydrologique et représentation des usages. *Journée de restitution du projet, EDF (Toulouse)* / Cemagref, 27 p.
- PERRODON A.** 1957. Etude géologique des bassins néogènes sublittoraux de l'Algérie occidentale. Service de la Carte Géologique de l'Algérie, Alger. 328 p., 96 fig., 8 photos, 4 pl. h-t.
- RANDRIANASOLO R. A.** 2009. Evaluation de la qualité des prévisions pour l'alerte aux crues. *Master 2.* Cemagref, 50 p., 24 fig.
- REFSGAARD J.** 1997. Parametrisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology* 198, p. 69-97.
- REMENIERAS G.** 1986. L'hydrologie de l'ingénieur. *Collect. Dir. Etudes. Rech. Electr. France. Ed. Eyrolles.* 465 p., 149 fig.
- RIAD S.** 2003. Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles à partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc. *Thèse de Doctorat, Univ, Ibnou Zohr d'Agadir (Maroc)*, 154 p.
- ROCHE M.** 1963. Hydrologie de surface- *Paris, Gauthier – Villars*, 430 p.
- SINGH V.P** 1995. Accuracy of kinematic and diffusion wave approximations for space independent flows on infiltrating surfaces. *Hydrological Processes*, Vol. 9, pp. 1-18.
- SOSSOU S., MASSECK B., BADJI ANSOU M., EDMOND NICAISE .M., ANSOUMANA B., KURUMA M., MARIKO A., BAMBA F., DACOSTA H., MALOU R., BARRY A., KANE A., FALL AWA N., HAM ADOUN S.** 2011. Calage et validation des modèles hydrologiques GR4J et GR2M sur le bassin du Bafing en amont de Bafing-Makana : vers l'étude de l'impact du climat sur les ressources en eau de la retenue de Manatali. *Journées scientifiques du 2iE*, 6ème édition 2011, Campus 2iE Ouagadougou, 6 p., 4 fig.
- YANG X., PARENT E., MICHEL C., ROCHE P.A.** 1991. Gestion d'un réservoir pour la régularisation des débits. *La Houille Blanche* (6), pp. 433-440.
- YONABA H.** 2009. Modélisation hydrologique hybride : réseau de neurones - Modèle conceptuel. *Thèse de Doctorat, Univ. Laval, Québec*, 182 p., 30 fig.

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

LISTE DES FIGURES

	Pages
Fig. 1 : Le cycle hydrologique (d'après Maidment, 1992).....	7
Fig. 2 : Limites d'un bassin versant (d'après Roche, 1963).....	8
Fig. 3 : Représentation schématique d'un modèle hydrologique (Perrin et <i>al.</i> , 2009).....	9
Fig. 4 : Schéma d'un modèle hydrologique.....	10
Fig. 5 : Les quatre opérations de la modélisation.....	10
Fig. 6 : Les différentes applications de la modélisation pluie-débit (Perrin, 2000).....	11
Fig. 7 : Composants d'un modèle (d'après Singh, 1995).....	13
Fig. 8 : Classification des modèles proposée par Singh, 1995.....	13
Fig. 9 : Les différentes approches de modélisation (Gaume, 2002).....	14
Fig. 10 : Cycle de l'eau dans le logiciel MIKE SHI: processus modélisés (De Bruyn, 2004).....	17
Fig. 11 : Structure du modèle SHE (Beven <i>et al.</i> , 1980).....	18
Fig. 12 : Fonction de production du modèle CEQUEAU (Morin et Paquet, 1995).....	19
Fig. 13 : Fonction de transfert du modèle CEQUEAU (Morin et Paquet, 1995).....	20
Fig. 14 : Schématisation des écoulements sur le versant par TOPMODEL.....	21
Fig. 15 : Représentation schématique de TOPMODEL (S1, S2, S3: niveaux dans les réservoirs; m: un des paramètres du modèle) (d'après Beven et Kirkby, 1979 in Perrin, 2000).....	21
Fig. 16 : Chronologie des modélisations utilisées dans GIBSI.....	22
Fig. 17 : Neurone formel (Maison, 2000).....	23
Fig. 18 : Réseau de neurones (Maison, 2000).....	23
Fig. 19 : Schéma de la structure du modèle GR2M.....	28
Fig. 20 : Schéma de la structure du modèle GR4J.....	31
Fig. 21 : Situation géographique du bassin versant de la Tafna.....	36
Fig. 22 : Le bassin versant de la Tafna dans l'ensemble Oranie Chott Chergui (<i>in</i> Bouanani, 2004).....	36
Fig. 23 : Situation géographique du bassin de la Tafna (Perrodon, 1957 modifiée).....	37
Fig. 24 : Carte hydrographique du bassin versant de la Tafna.....	38
Fig. 25 : Chevelu hydrographique du bassin versant de l'Oued Lakhdar.....	39
Fig. 26 : Représentation graphique du rectangle équivalent du bassin versant de Oued Chouly.....	41
Fig. 27 : Courbe hypsométrique du bassin versant de Oued Chouly.....	42
Fig. 28 : Courbe représentative de l'état du bassin versant de l'Oued Lakhdar.....	43
Fig. 29 : Histogramme de fréquence altimétrique du bassin versant de Oued Chouly.....	43
Fig. 30 : Droite représentative du nombre de talwegs en fonction de l'ordre.....	46
Fig. 31 : Droite représentative du rapport des longueurs en fonction de l'ordre.....	47
Fig. 32 : Profil en long du cours d'eau principal de oued Chouly.....	48
Fig. 33 : Coupe synthétique des principales formations affleurant dans les monts de Tlemcen (jusqu'au callovo-oxfordien) (Extrait de Collignon, 1986).....	49
Fig. 34 : Schéma tectonique du bassin de la Tafna (Auclair et Biehler).....	51
Fig. 35 : Esquisse hydrogéologique de l'Oued Lakhdar.....	52
Fig. 36 : Localisation des stations hydrométriques retenue pour l'étude.....	55
Fig. 37 : Variations interannuelles des précipitations à la station de Chouly (1956 – 2010).....	55
Fig. 38 : Ajustement graphique des précipitations annuelles à la loi de distribution de normale.....	57
Fig. 39 : Ajustement graphique des précipitations annuelles à la loi de distribution normale.....	59
Fig. 40 : Variation des précipitations moyennes mensuelles (1956-2010).....	60
Fig. 41 : Variation des précipitations mensuelles minimales, moyennes et maximales (1956-2010).....	61
Fig. 42 : Variations saisonnières des précipitations (1956-2010).....	62

Fig. 43 : Variation des précipitations moyennes journalières (1995-2005).....	62
Fig. 44 : Variations interannuelles des lames d'eau écoulées (1966-2007).....	63
Fig. 45 : Ajustement graphique des lames d'eau écoulées annuelles à une loi normale.....	64
Fig. 46 : Ajustement graphique des lames d'eau écoulées annuelles à une loi normale.....	65
Fig. 47 : Variations mensuelles des lames d'eau écoulées (1966-2007).....	66
Fig. 48 : Variations saisonnières des lames d'eau écoulées (1966-2007).....	67
Fig. 49 : Variation des lames d'eau écoulées moyennes journalières (1995-2005).....	67
Fig. 50 : Variation des températures moyennes mensuelles (1970-2007).....	68
Fig. 51 : Variation des températures moyennes annuelles (1970-2007).....	69
Fig. 52 : Variation des ETP Turc et Thornthwaite (1970-2002).....	71
Fig. 53 : Variation du coefficient moyen annuel de l'écoulement (1968-2007).....	72
Fig. 54 : Variation du coefficient moyen mensuel de l'écoulement (1968-2007).....	73
Fig. 55 : Variations mensuels et interannuelles des précipitations et des lames d'eau écoulées (1968-2007).....	76
Fig. 56 : Variations interannuelles des précipitations et des lames d'eau écoulées (1968-2007).....	77
Fig. 57 : Variations mensuels des précipitations et des lames d'eau écoulées (1968-2007).....	77
Fig. 58 : Corrélation Pluie-Débit annuel (1968-2007).....	79
Fig. 59 : Corrélation Pluie-Débit mensuel (1968-2007).....	80
Fig. 60 : Corrélation Pluie-Débit journalière (1995-2005).....	81
Fig. 61 : Visualisation de la qualité du calage.....	83
Fig. 62 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés.....	83
Fig. 63 : Visualisation de la qualité du calage.....	84
Fig. 64 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés.....	84
Fig. 65 : Validation du modèle GR1A selon l'ETP de Turc et Thornthwaite.....	85
Fig. 66 : Visualisation de la qualité du calage.....	87
Fig. 67 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés.....	87
Fig. 68 : Courbe du niveau S du réservoir de production.....	87
Fig. 69 : Courbe du niveau R du réservoir de routage.....	87
Fig. 70 : Visualisation de la qualité du calage.....	87
Fig. 71 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés.....	87
Fig. 72 : Courbe du niveau S du réservoir de production.....	88
Fig. 73 : Courbe du niveau R du réservoir de routage.....	88
Fig. 74 : Validation du modèle GR2M selon l'ETP de Turc et Thornthwaite.....	88
Fig. 75 : Visualisation de la qualité du calage.....	90
Fig. 76 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés.....	90
Fig. 77 : Courbe du niveau S du réservoir de production.....	90
Fig. 78 : Courbe du niveau R du réservoir de routage.....	90
Fig. 79 : Validation du modèle GR4J selon l'ETP de Oudin.....	91

LISTE DES TABLEAUX

	Pages
Tab. 1 : Modélisation utilisée avec modèle hydrodynamique de MIKE SHE.....	18
Tab. 2 : Valeur des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants..	29
Tab. 3 : Valeur des paramètres du modèle GR4J obtenues sur un large échantillon de bassins versants...	34
Tab. 4 : Caractéristique de forme du bassin versant de l'Oued LAKhdar.....	41
Tab. 5 : répartition hypsométrique du bassin versant de l'Oued Lakhdar.....	42
Tab. 6 : Altitudes caractéristiques du sous bassin de l'Oued Lakhdar.....	43
Tab. 7 : Classification des reliefs selon Ig par l'O.R.S.T.O.M.....	44
Tab. 8 : Classification du relief selon Ds.....	45
Tab. 9 : Indices de pentes et reliefs du sous bassin de l'Oued Lakhdar.....	45
Tab. 10 : Paramètres morphométriques du B.V de l'Oued Lakhdar.....	47
Tab. 11 : Principaux paramètres du bassin versant de l'Oued Chouly.....	48
Tab. 12 : Description des stations hydrométéorologiques du secteur d'étude.....	54
Tab. 13 : Paramètres de position des précipitations de la station de Chouly.....	57
Tab. 14 : Calcul du X^2	58
Tab. 15 : Paramètres de position pour la loi log normale de la station de Chouly.....	58
Tab. 16 : Calcul du X^2	59
Tab. 17 : Calcul des précipitations pour une période de récurrence donnée.....	60
Tab. 18 : Valeurs moyennes mensuelles des précipitations.....	60
Tab. 19 : Valeurs des précipitations mensuelles minimales, moyennes et maximales.....	61
Tab. 20 : Répartition des précipitations saisonnière.	61
Tab.21 : Paramètres de distribution des lames d'eau écoulées de la station de Chouly	63
Tab. 22 : Calcul du X^2	64
Tab. 23 : Calcul du X^2	65
Tab. 24 : Calcul des lames d'eau écoulées pour une période de récurrence donnée.....	66
Tab. 25 : Valeurs moyennes mensuelles de la lame d'eau écoulée.	66
Tab. 26 : Répartition des lames d'eau écoulées saisonnière.	67
Tab. 27 : Valeurs moyennes mensuelles des températures de la station d'El Meffrouch (1970-2007).....	68
Tab. 28 : Bilan moyen annuel de l'écoulement au niveau de la station de Chouly.	72
Tab. 29 : Bilan moyen mensuel de l'écoulement au niveau de la station de Chouly.....	72
Tab. 30 : Calcul de ETR d'après la méthode de Turc de la station de Chouly (1966-2007).....	74
Tab. 31 : Calcul du paramètres λ	74
Tab. 32 : Calcul du déficit d'écoulement (méthode de Coutagne) période (1956-2010).....	74
Tab. 33 : Représentation des différents types de régression.	78
Tab. 34 : Représentation des différents types de régression.	79
Tab.35 : Représentation des différents types de régression.....	81
Tab. 36 : Représentation des résultats obtenus par l'utilisation de GR1A.	83
Tab. 37 : Les variations du coefficient de corrélation.	84
Tab. 38 : Représentation des résultats obtenus par l'utilisation de GR2M.	86
Tab. 39 : Valeurs des paramètres après calibration et performances de modèle.....	86
Tab. 40 : Les coefficients de corrélation entre les débits simulés et calculés au cours de la validation.....	88
Tab. 41 : Représentation des résultats obtenus par l'utilisation de GR4J.....	89
Tab. 42 : Valeurs des paramètres après calibration et performances de modèle.....	90
Tab. 43 : Le coefficient de corrélation entre les débits simulés et calculés au cours de la validation.....	91

ANNEXES

ANNEXE I : DONNES DES PRECIPITATIONS

Tableau I.1 : Distribution des précipitations annuelles de la station de Chouly, période (1956-2010).

Rang (R)	P (mm)	Prbabilité Fi= R/N+1	Nbr d'années (N)	Log In
1	104,3	0,020	1963-1964	4,647
2	218,4	0,040	1987-1988	5,386
3	276,3	0,060	1998-1999	5,621
4	280,4	0,080	1999-2000	5,636
5	281,3	0,100	1982-1983	5,639
6	307,3	0,120	1958-1959	5,728
7	307,5	0,140	1968-1969	5,728
8	313,3	0,160	1996-1997	5,747
9	314,4	0,180	2007-2008	5,751
10	314,8	0,200	2004-2005	5,752
11	316,3	0,220	2005-2006	5,757
12	335,7	0,240	1983-1984	5,816
13	336,4	0,260	1992-1993	5,818
14	338,6	0,280	1997-1998	5,825
15	338,9	0,300	1989-1990	5,826
16	346,8	0,320	1981-1982	5,849
17	351,9	0,340	2006-2007	5,863
18	357	0,360	1993-1994	5,878
19	374	0,380	1984-1985	5,924
20	375,2	0,400	1988-1989	5,927
21	386,9	0,420	1991-1992	5,958
22	400	0,440	2002-2003	5,991
23	402,4	0,460	1994-1995	5,997
24	406,3	0,480	1960-1961	6,007
25	406,6	0,500	1977-1978	6,008
26	424,9	0,520	2001-2002	6,052
27	426,7	0,540	2000-2001	6,056
28	434,3	0,560	1980-1981	6,074
29	449,7	0,580	1961-1962	6,109
30	452,3	0,600	1978-1979	6,114
31	458,6	0,620	1976-1977	6,128
32	469,4	0,640	1985-1986	6,151
33	476	0,660	1956-1957	6,165
34	476	0,680	1990-1991	6,165
35	480	0,700	2003-2004	6,174
36	497,6	0,720	1959-1960	6,210
37	502	0,740	1986-1987	6,219
38	514,2	0,760	1979-1980	6,243
39	526	0,780	1970-1971	6,265
40	560,6	0,800	2009-2010	6,329
41	567,39	0,820	1969-1970	6,341
42	589	0,840	1973-1974	6,378
43	600,9	0,860	1995-1996	6,398
44	610,7	0,880	1975-1976	6,415

45	619,4	0,900	1971-1972	6,429
46	619,9	0,920	1957-1958	6,430
47	628	0,940	1972-1973	6,443
48	636,7	0,960	1974-1975	6,456
49	701,1	0,980	2008-2009	6,553
Moyenne	426,78		N=49	6,008
Ecart Type	125,14			0,334
Variance	15659,69			0,112
C,variation	0,293			0,056

ANNEXE II : DONNES DES LAMES D'EAU ECOULEES

Tableau II.1 : Distribution des lames d'eau écoulées annuelles de la station de Chouly, période (1966-2007).

Rang (R)	Lame (mm)	Prbabilité Fi= R/N+1	Nbr d'années (N)	Log IN
1	9,052	0,024	2006-2007	2,203
2	10,290	0,048	2005-2006	2,331
3	10,844	0,071	1999-2000	2,384
4	11,073	0,095	1996-1997	2,405
5	11,41	0,119	1987-1988	2,434
6	14,687	0,143	2004-2005	2,687
7	15,50	0,167	1984-1985	2,741
8	15,545	0,190	1998-1999	2,744
9	16,392	0,214	1997-1998	2,797
10	16,80	0,238	1983-1984	2,821
11	17,963	0,262	2001-2002	2,888
12	23,519	0,286	2003-2004	3,158
13	24,96	0,310	1981-1982	3,217
14	25,621	0,333	1988-1989	3,243
15	26,35	0,357	1982-1983	3,271
16	29,134	0,381	1990-1991	3,372
17	34,63	0,405	1966-1967	3,545
18	37,102	0,429	1994-1995	3,614
19	40,415	0,452	1989-1990	3,699
20	42,486	0,476	1992-1993	3,749
21	43,365	0,500	2002-2003	3,770
22	50,962	0,524	2000-2001	3,931
23	51,08	0,548	1968-1969	3,933
24	55,94	0,571	1985-1986	4,024
25	60,080	0,595	1993-1994	4,096
26	62,59	0,619	1978-1979	4,137
27	64,24	0,643	1977-1978	4,163
28	66	0,667	1970-1971	4,190
29	70,089	0,690	1995-1996	4,250
30	72,47	0,714	1976-1977	4,283
31	75,94	0,738	1969-1970	4,330
32	84,18	0,762	1980-1981	4,433
33	87,29	0,786	1979-1980	4,469
34	92,64	0,810	1967-1968	4,529
35	95,35	0,833	1986-1987	4,558
36	101,2	0,857	1975-1976	4,617
37	116,1	0,881	1974-1975	4,754
38	117,867	0,905	1991-1992	4,770
39	137,9	0,929	1971-1972	4,927
40	166,3	0,952	1973-1974	5,114
41	166,9	0,976	1972-1973	5,117
Moyenne	55,42		N=41	3,700
Ecart Type	42,50			0,844
Variance	1806,67			0,713
C,variation	0,767			0,228

ANNEXE III : MODELISATION PLUIE-DEBIT GR

Tableau III.1 : Données et les résultats du modèle GR1A.

Années	Pluie (mm)	Débit (mm)	Etp Turc		ETP Thornthwaite	
			ETP (mm)	Débit Simulé (mm)	ETP (mm)	Débit Simulé (mm)
1970-1971	526	66	914	66,73	694,51	88,37
1971-1972	619,4	137,9	890,1	103,02	673,13	134,54
1972-1973	628	166,9	904,24	111,00	720,17	134,21
1973-1974	589	166,3	818,93	113,57	666,26	132,61
1974-1975	636,7	116,1	888,41	114,72	685,95	144,60
1975-1976	610,7	101,2	920,08	103,40	733,26	125,24
1976-1977	458,6	72,47	930	55,17	703,12	73,89
1977-1978	406,6	64,24	943,51	35,28	743,98	44,90
1978-1979	452,3	62,59	957,86	40,85	749,65	52,56
1979-1980	514,2	87,29	947,67	58,26	760,86	71,22
1980-1981	434,3	84,18	948,07	43,06	831,75	45,62
1981-1982	346,8	24,96	933,01	24,65	792,39	27,74
1982-1983	281,3	26,35	952,32	13,00	814,02	14,53
1983-1984	335,7	16,80	923,22	18,35	811,74	19,44
1984-1985	374	15,50	931,71	25,32	829,3	26,22
1985-1986	469,4	55,94	925,89	45,34	803,2	48,98
1986-1987	502	90,35	952,8	55,72	746,98	70,82
1987-1988	218,4	11,41	962,87	10,04	749,58	13,33
1988-1989	375,2	25,621	969,95	19,68	789,23	24,03
1989-1990	338,9	40,415	966	20,14	768,56	25,53
1990-1991	476	29,134	948,74	43,07	749,79	54,52
1991-1992	386,9	40,867	939,92	32,60	730,02	42,61
1992-1993	336,4	42,486	950,72	20,77	736,44	27,58
1993-1994	357	40,080	964,121	21,40	806,44	24,81
1994-1995	402,4	37,102	971,16	28,67	773,83	36,08

Données de validation						
1995-1996	600,9	70,089	968,66	75,98	773,59	93,22
1996-1997	313,3	11,073	980,84	23,03	795,06	28,10
1997-1998	338,6	16,392	967,34	18,14	783,07	22,34
1998-1999	276,3	15,545	971,9	11,84	782,57	14,79
1999-2000	280,4	10,844	976,01	10,75	804,43	12,88
2000-2001	426,7	50,962	1000,62	28,02	815,13	33,99
2001-2002	424,9	17,963	969,24	35,64	771,96	44,66

Tableau III.2 : Données et les résultats du modèle GR2M.

Années	Pluie (mm)	Débit (mm)	ETP Turc		ETP Thornthwaite	
			ETP (mm)	Débit simulé (mm)	ETP (mm)	Débit simulé (mm)
janv-71	111,3	2,054	39,60	36,22	26,73	13,63
févr-71	5,5	1,925	48,92	8,4	36,33	1,03
mars-71	110,1	2,509	59,67	21,21	46,37	5,54
avr-71	78,2	6,153	72,26	18,86	44,96	4,51
mai-71	148,2	41,81	97,28	38,83	68,31	15,26
juin-71	5,4	3,641	108,76	7,63	85,9	0,86
juil-71	16,4	2,279	130,08	2,7	137,81	0,12
août-71	0	1,279	124,22	1,1	135,77	0,02
sept-71	15,2	1,081	93,14	0,52	9,53	0,00
oct-71	9,4	1,241	62,89	0,26	48,21	0,00
nov-71	145,6	4,31	42,73	7,3	31,67	0,79
déc-71	39,2	8,465	34,59	7	22,92	0,73
janv-72	109,4	19,96	33,92	25,56	19,29	7,64
févr-72	54,5	20,29	42,22	18,56	25,61	4,38
mars-72	115	40,2	51,19	35,31	31,97	13,08
avr-72	51	19,38	67,6	16,83	39,18	3,69
mai-72	70,3	13,42	93,3	13,28	62,28	2,41
juin-72	9,2	4,598	111,06	4,08	94,52	0,26
juil-72	0	2,715	129,32	1,55	136,23	0,04
août-72	0,6	2,231	121,86	0,68	126,7	0,01
sept-72	38,4	2,149	94,97	0,39	10,41	0,00
oct-72	32,4	3,062	72,69	0,28	79,19	0,00
nov-72	43,3	3,691	39,34	0,39	26,73	0,00
déc-72	26,6	3,636	32,62	0,48	21,02	0,00
janv-73	53,1	3,807	33,81	1,73	17,99	0,05
févr-73	121,6	13,64	36,06	20,35	16,43	5,15
mars-73	232,3	92,24	47,96	106,55	25,69	68,17
avr-73	40,1	30,14	74,16	22,12	48,58	5,96
mai-73	6	7,735	102	5,66	79,77	0,49
juin-73	25,2	3,965	114,73	2,39	103,79	0,09
juil-73	0,6	1,692	132,57	0,99	148,97	0,02
août-73	8,4	1,196	127,04	0,47	149,4	0,00
sept-73	14,6	1,169	88,99	0,24	8,08	0,00
oct-73	25,7	1,839	67,99	0,14	61,76	0,00
nov-73	47,2	2,664	46,19	0,24	39,7	0,00
déc-73	126,9	5,676	32,74	10,52	20,01	1,57
janv-74	0,4	6,235	39,83	3,62	28,09	0,21
févr-74	101,3	15,46	38,29	15,76	19,72	3,28
mars-74	172,5	70,59	53,25	63,28	34,76	32,48
avr-74	93,2	40,06	64,38	37,1	33,88	14,18
mai-74	1,1	11,88	103,36	7,23	84,73	0,78
juin-74	5,8	6,082	83,1	2,5	39,65	0,10
juil-74	0,3	2,912	133,27	1,03	153,01	0,02
août-74	0	1,732	124,98	0,48	139,95	0,00
sept-74	21,6	2,089	97,74	0,25	11,57	0,00
oct-74	54,7	3,82	67,29	0,31	60,82	0,00
nov-74	75,5	4,238	47,76	1,78	44,88	0,05
déc-74	0	4,201	28,68	0,82	15,2	0,01

janv-75	9	3,436	39,8	0,49	27,55	0,00
févr-75	90	7,965	42,95	4,14	25,78	0,27
mars-75	136,1	13,84	51,59	29,54	31,43	9,75
avr-75	193,5	49,09	69,94	78,86	41,57	44,79
mai-75	38,9	18,14	96,82	17,38	68,01	3,90
juin-75	1,4	4,915	82,01	4,55	37,62	0,32
juil-75	0	2,402	138,23	1,69	178,34	0,05
août-75	16	1,925	126,88	0,76	148,8	0,01
sept-75	1,2	1,716	94,14	0,36	9,97	0,00
oct-75	4,5	2,005	63,36	0,18	49,89	0,00
nov-75	108,5	3,566	46,32	1,85	40,44	0,06
déc-75	8,7	3,755	36,36	1,08	26,55	0,02
janv-76	34	3,189	33,64	1,35	16,4	0,03
févr-76	133,5	24,35	39,43	20,62	18,95	5,27
mars-76	74,3	16,52	53,63	21,92	32,32	5,87
avr-76	99,7	20,865	68,91	27,44	37,17	8,61
mai-76	72	23,62	102,61	17,46	78,6	3,94
juin-76	17,6	6,347	118,45	5,25	114,43	0,42
juil-76	24,7	4,001	134,04	2,12	154,41	0,07
août-76	32	2,256	126,85	1,04	147,26	0,02
sept-76	30,5	5,045	92,8	0,57	9,19	0,01
oct-76	55,7	4,462	71,61	0,69	71,42	0,01
nov-76	38,5	4,667	43,59	0,78	31,75	0,01
déc-76	78,3	8,976	34,54	4,14	21,36	0,27
janv-77	88,5	19,25	37,37	15,16	22,01	3,06
févr-77	20,4	10,92	47,38	6,99	32,03	0,73
mars-77	57,1	5,289	62,77	7,87	52,59	0,91
avr-77	20,7	4,272	83,3	3,64	68,03	0,21
mai-77	62	3,237	100,11	3,64	73,19	0,21
juin-77	6,6	2,729	113,98	1,48	99,66	0,04
juil-77	0,3	1,858	125,59	0,66	118,62	0,01
août-77	0	1,756	119,08	0,32	113,21	0,00
sept-77	0	1,675	93,9	0,16	9,7	0,00
oct-77	57,8	2,316	66,13	0,2	55,02	0,00
nov-77	57	2,879	40,23	0,73	25,84	0,01
déc-77	15	4,114	40,16	0,59	33,22	0,01
janv-78	128,2	15,69	34,17	14,04	15,25	2,66
févr-78	19,7	12,21	49,89	6,73	34,18	0,68
mars-78	38,1	7,141	57,83	5,21	37,25	0,42
avr-78	63,1	8,453	72,23	6,53	39,53	0,64
mai-78	23,1	3,821	97,76	3,15	62,92	0,16
juin-78	0	2,561	111,91	1,25	88,45	0,03
juil-78	0	1,851	137,43	0,57	170,69	0,01
août-78	4,6	1,521	126,74	0,28	144,68	0,00
sept-78	0	1,596	94,37	0,14	9,52	0,00
oct-78	86,9	2,358	70,97	0,62	66,08	0,01
nov-78	53,3	2,648	47,1	1,43	37,56	0,03
déc-78	25,3	3,189	43,1	1,31	37,87	0,03
janv-79	22,3	2,987	44,09	1,06	30,48	0,02
févr-79	161,6	14,18	44,43	26,04	22,88	7,88
mars-79	35,1	20,52	54,18	12,17	29,21	2,05
avr-79	38,3	5,758	75,07	7,14	43,13	0,76
mai-79	26,6	3,288	105,61	3,43	81,21	0,19

juin-79	0,2	2,394	119,67	1,35	113,95	0,03
juil-79	2,5	2,056	133,82	0,61	149,21	0,01
août-79	0,2	1,628	125,2	0,3	146,07	0,00
sept-79	31,7	1,771	97,71	0,17	10,9	0,00
oct-79	78,3	2,166	68,59	0,75	56,71	0,01
nov-79	95,1	5,468	45,47	5,83	32,27	0,52
déc-79	73,4	6,359	42,02	11,89	33,63	1,97
janv-80	5,3	9,241	18,13	4,58	20,83	0,32
févr-80	54,5	11,58	48,77	7,09	32,08	0,75
mars-80	103	37,16	56,99	19,57	35,94	4,81
avr-80	37,1	5,866	75,34	9,41	45,63	1,28
mai-80	30,9	3,881	97,83	4,48	63,53	0,31
juin-80	1,7	1,591	119,51	1,69	115,55	0,05
juil-80	0	1,245	134,34	0,74	153,73	0,01
août-80	3,2	0,98	125,97	0,35	163,5	0,00
sept-80	11,8	0,9824	93,9	0,18	9,36	0,00
oct-80	31,9	1,438	69,47	0,12	61,4	0,00
nov-80	24,4	1,858	44,83	0,1	32,32	0,00
déc-80	166,1	8,071	38,59	17	26,99	3,75
janv-81	17,9	25,32	53,08	7,12	55,98	0,76
févr-81	63	16,68	63,63	8,65	79,73	1,09
mars-81	42	13	78,08	5,77	107,76	0,51
avr-81	36,1	8,994	98,73	3,36	121,35	0,18
mai-81	7,1	3,234	117,86	1,38	124,89	0,03
juin-81	34	1,913	115,86	0,76	96,06	0,01
juil-81	0	1,603	109,37	0,36	62,14	0,00
août-81	0	1,078	115,95	0,18	93,19	0,00
sept-81	5,1	0,9488	53,77	0,1	1,35	0,00
oct-81	0,2	1,065	51,34	0,05	20,28	0,00
nov-81	0	1,593	48,3	0,03	37,28	0,00
déc-81	51,4	2,052	42,11	0,06	31,74	0,00
janv-82	15,7	2,088	51,37	0,07	51,16	0,00
févr-82	75,6	2,611	65,11	1,15	90,4	0,02
mars-82	14,1	2,596	82,35	0,74	141,33	0,01
avr-82	79,3	2,402	97,07	2,33	114,33	0,09
mai-82	86,9	5,582	115,73	5,3	117,47	0,43
juin-82	14	2,227	103,61	2,13	64,07	0,07
juil-82	0	0,9547	103,51	0,9	53,37	0,01
août-82	4,5	0,8400	108,63	0,42	73,44	0,00
sept-82	23,6	0,9435	67,52	0,23	2,82	0,00
oct-82	49,2	1,045	52,64	0,3	23,42	0,00
nov-82	79,5	2,074	43,71	2,41	28,03	0,09
déc-82	81,3	5,624	41,77	9,46	32,55	1,29
janv-83	0	5,152	50,88	3,12	47,38	0,15
févr-83	21,7	2,808	65,44	1,87	90,73	0,06
mars-83	10,3	2,234	79,66	0,92	118,43	0,01
avr-83	7,5	1,659	97,42	0,45	113,9	0,00
mai-83	8,2	1,530	120,25	0,23	137,35	0,00
juin-83	0	1,236	116,41	0,12	97,96	0,00
juil-83	0	1,078	112,24	0,06	68,51	0,00
août-83	0	0,9718	97,6	0,03	47,21	0,00
sept-83	0	0,9447	70,95	0,02	3,1	0,00
oct-83	0	0,9165	50,82	0,01	19,64	0,00

nov-83	15,3	1,051	46,92	0,01	33,61	0,00
déc-83	71,6	1,584	43,72	0,25	36,2	0,00
janv-84	50,7	1,973	44,69	1,24	32,04	0,03
févr-84	50,3	1,900	61,26	2,75	70,1	0,12
mars-84	37,9	2,111	83,1	2,59	148,35	0,11
avr-84	12,1	1,659	99,09	1,23	126,34	0,02
mai-84	76,7	1,588	119,01	2,02	134,01	0,07
juin-84	21,1	1,274	105,54	1,04	69,55	0,02
juil-84	0	0,9588	106,27	0,48	59,43	0,00
août-84	0	0,8400	113,28	0,24	87,7	0,00
sept-84	12,5	0,8129	58,73	0,13	1,93	0,00
oct-84	15,2	0,9506	47,15	0,07	17,56	0,00
nov-84	94,5	1,848	40,09	1,44	21,98	0,03
déc-84	45,6	1,632	45,01	2,95	42,75	0,14
janv-85	55,8	2,673	48,74	5,28	41,05	0,43
févr-85	14,5	1,839	62,89	2,63	66,41	0,11
mars-85	50,5	1,492	82,07	2,84	137,98	0,13
avr-85	26,4	1,221	101,82	1,65	148,93	0,04
mai-85	58,7	1,378	120,09	1,69	137,37	0,05
juin-85	0	0,6412	115,41	0,74	95,52	0,01
juil-85	0,3	0,5129	107,56	0,35	59,38	0,00
août-85	0	0,5006	84,16	0,18	29,4	0,00
sept-85	5,8	0,4729	60,02	0,09	1,9	0,00
oct-85	8,8	0,5229	63,5	0,05	41,35	0,00
nov-85	70	0,6965	39,74	0,3	20,05	0,00
déc-85	54,4	1,076	44,71	1,45	39,96	0,03
janv-86	85,2	1,980	19,63	9,4	71,84	1,27
févr-86	107,8	24,48	62,02	29,32	74,95	9,62
mars-86	84,2	19,31	53,08	25,09	29,98	7,40
avr-86	26,1	4,284	68,91	9,01	34,3	1,18
mai-86	1	1,134	108,47	2,88	92,24	0,13
juin-86	16,3	0,8406	117,38	1,26	106,97	0,03
juil-86	0	0,5971	135,39	0,57	159,09	0,01
août-86	9,8	0,5465	125,34	0,28	148,03	0,00
sept-86	10,8	0,5012	61,32	0,15	2,28	0,00
oct-86	30,3	1,532	53,04	0,1	25,59	0,00
nov-86	68,1	2,056	41,43	0,69	25,23	0,01
déc-86	46,1	2,118	41,16	1,79	32,7	0,05

Données de Validation						
janv-87	51,5	2,951	28,15	4	20,48	2,79
févr-87	195,4	66,88	43,91	61,88	22,98	30,49
mars-87	11,8	12,80	59,18	12,1	39,87	14,58
avr-87	3,4	3,094	84,49	3,73	66,81	7,26
mai-87	11,6	1,334	104,21	1,57	78,83	4,44
juin-87	0	0,7006	119,23	0,69	112,94	2,23
juil-87	73	0,9124	130,44	0,88	134,07	3
août-87	0	0,4965	126,27	0,41	142,04	1,51
sept-87	19,9	0,4959	95,91	0,22	10,17	0,99
oct-87	23,4	1,426	71,12	0,14	66,39	0,76
nov-87	49,3	1,299	45,06	0,25	32,39	0,94
déc-87	17,6	1,499	35,04	0,24	20,01	0,85
janv-88	25,4	1,736	41,15	0,31	23,95	0,95

févr-88	21,1	1,535	43,66	0,33	21,14	1,04
mars-88	3,6	0,9218	60,16	0,19	39,92	0,78
avr-88	23	0,6812	79,65	0,16	51,83	0,84
mai-88	18,4	0,5259	101,62	0,12	69,12	0,77
juin-88	16,7	0,4553	114,65	0,07	94,2	0,63
juil-88	0	0,4194	134,2	0,04	150,36	0,38
août-88	0	0,4153	128,55	0,02	153,2	0,24
sept-88	29,1	3,522	98,94	0,02	11,45	0,18
oct-88	10,4	2,363	72,55	0,01	69,4	0,14
nov-88	41,7	0,145	46,76	0,04	34,7	0,16
déc-88	12,1	1,497	40,99	0,04	30,31	0,14
janv-89	13,5	1,639	37,91	0,04	17,56	0,13
févr-89	16,8	1,423	43,91	0,05	20,26	0,15
mars-89	161,7	3,435	61,12	14,72	40,22	4,64
avr-89	58,9	3,873	75,37	12,17	40,85	7,47
mai-89	16,9	4,884	104,49	4,42	74,35	4,97
juin-89	8,1	2,272	122,14	1,72	121,26	2,74
juil-89	4,2	0,284	137,65	0,75	168,46	1,47
août-89	1,8	0,284	129,39	0,36	156,89	0,82
sept-89	11,9	2,409	97,79	0,18	10,66	0,51
oct-89	6,3	4,081	75,25	0,1	79,86	0,32
nov-89	33,4	4,254	49,84	0,08	41,71	0,27
déc-89	6,4	2,946	34,81	0,05	17,15	0,19
janv-90	109,9	2,584	35,36	3,3	14,21	1,12
févr-90	0	0,982	50,2	1,39	31,27	0,8
mars-90	16	10,981	62,05	0,89	42,23	0,8
avr-90	37,3	1,632	75,97	0,9	41,79	1,19
mai-90	92,5	4,979	104,49	4,02	74,1	4,11
juin-90	20,4	4,574	120,61	1,92	114,23	2,85
juil-90	0,9	0,835	134	0,83	147	1,48
août-90	3,9	0,158	125,91	0,39	136,36	0,84
sept-90	32,5	0,549	97,96	0,23	10,72	0,62
oct-90	17,5	2,316	74,24	0,14	73,99	0,46
nov-90	31,5	3,126	50,48	0,12	43,56	0,43
déc-90	77,4	5,136	44,74	1,33	39,1	1,12
janv-91	39,5	2,552	37,17	2,22	17,93	1,66
févr-91	52,4	1,395	39,8	4,43	16,36	3,3
mars-91	187,2	3,466	56,05	53,29	32,05	30,4
avr-91	6,1	2,028	73,22	9,7	39,28	13,23
mai-91	11,8	5,010	100,72	3,44	67,4	7,68
juin-91	6	2,973	120,17	1,38	115,47	3,93
juil-91	4,8	0,299	136,54	0,62	163,82	2,03
août-91	9,3	0,284	130,54	0,31	165,83	1,15
sept-91	16	2,165	102,14	0,16	13,35	0,72
oct-91	46,5	3,876	71,48	0,17	65,87	0,69
nov-91	17,3	4,681	46,57	0,13	34,57	0,53
déc-91	19,9	2,190	34,36	0,12	17,86	0,48
janv-92	9	1,166	35,89	0,08	18,09	0,39
févr-92	121,4	2,329	45,61	6,14	26,69	3,35
mars-92	63,8	78,146	54,38	10,09	31,85	6,65
avr-92	78,8	16,011	79,38	13,96	55,06	12
mai-92	11,1	1,859	106,12	4,46	86,11	6,18
juin-92	3,1	3,034	110,36	1,68	85,3	3,12

juil-92	0	2,158	133,19	0,74	148,51	1,58
août-92	0	0,252	129,21	0,35	153,54	0,87
sept-92	0	0,29	96,78	0,18	10,69	0,51
oct-92	5,9	2,458	66,39	0,09	53,01	0,32
nov-92	33,6	2,653	45,83	0,07	35,29	0,27
déc-92	74	1,260	37,78	0,87	25,88	0,61
janv-93	0	1,292	38,39	0,43	20,59	0,43
févr-93	74,2	1,124	41,18	2,83	18,87	1,6
mars-93	13,8	1,780	59,92	1,71	41,11	1,48
avr-93	53,4	11,848	78,28	2,53	50,67	2,72
mai-93	75	12,195	101,32	4,7	70,62	5,5
juin-93	3,6	1,662	117,62	1,79	107,02	2,82
juil-93	0,4	0,756	133,6	0,78	148,96	1,46
août-93	2,5	5,168	127,17	0,37	146,57	0,82
sept-93	12,9	3,675	99,1	0,19	11,7	0,52
oct-93	32	5,467	67,43	0,13	54,22	0,43
nov-93	46,9	4,574	48,14	0,25	39,88	0,52
déc-93	20,3	1,828	38,57	0,25	26,23	0,5
janv-94	101,2	1,355	38,27	5,47	19,02	2,66
févr-94	48,3	1,295	44,89	7,28	22,75	4,53
mars-94	4,2	1,213	59,92	2,74	39,01	3,05
avr-94	41,9	2,318	76,56	2,42	44,74	4,06
mai-94	25,2	5,971	109,72	1,43	92,84	3,34
juin-94	0,3	32,021	121,27	0,64	119,26	1,73
juil-94	23	0,205	140,98	0,34	192,02	1,19
août-94	0,8	0,158	130,05	0,17	162,2	0,68
sept-94	44,6	0,443	91,95	0,15	8,27	0,52
oct-94	22,5	0,620	68,03	0,11	53,76	0,42
nov-94	26,4	0,600	44,09	0,11	28,28	0,39
déc-94	29,3	0,694	38,38	0,17	24,29	0,45
janv-95	30,5	0,874	39,34	0,31	20,46	0,6
févr-95	58	0,610	49,38	1,55	30,66	1,53
mars-95	136,3	29,819	58,42	20,86	35,6	11,1
avr-95	36,2	1,853	77,99	9,72	47,42	9,65
mai-95	1,9	0,471	110,7	3,08	95,94	4,55
juin-95	12,1	0,404	117,86	1,29	104,87	2,68
juil-95	0	0,362	134,6	0,58	151,83	1,38
août-95	4,6	0,352	126,63	0,28	141,65	0,79
sept-95	18,2	0,351	95,01	0,15	9,48	0,52
oct-95	70,8	2,580	72,37	0,43	68,04	0,75
nov-95	12,1	0,620	49,52	0,28	41,81	0,56
déc-95	71,2	1,090	39,34	1,48	26,07	1,32
janv-96	96,4	4,874	43,85	10,78	28,85	5,25
févr-96	106,6	10,378	41,58	27,68	17,96	16,26
mars-96	80,3	33,102	58,42	25,64	35,69	23,22
avr-96	50,9	5,810	79,11	13,46	49,97	19,41
mai-96	46,8	6,458	103,93	7,24	74,54	15,09
juin-96	22,8	2,483	122,57	2,91	124,88	7,88
juil-96	12,1	1,492	133,8	1,22	145,63	3,82
août-96	12,7	0,851	124,22	0,57	129,17	2,05
sept-96	17,3	0,915	93,52	0,29	8,86	1,27
oct-96	15,7	0,983	74,07	0,16	74,93	0,87
nov-96	0,6	1,097	51,56	0,08	48,62	0,53

déc-96	19,5	1,565	42,02	0,05	32,49	0,41
janv-97	147,4	1,523	42,22	8,66	24,52	3,75
févr-97	0	1,245	49,38	2,96	29,66	2,4
mars-97	14,1	0,803	62,05	1,58	42,38	2,03
avr-97	56,5	0,991	82,78	2,18	57,35	3,47
mai-97	18,7	0,582	105,86	1,18	78,27	2,6
juin-97	1	0,450	131,42	0,54	173,7	1,38
juil-97	2,8	0,450	130,2	0,27	128,26	0,79
août-97	19,7	0,469	124,41	0,14	128,72	0,52
sept-97	51,7	1,241	93,52	0,19	8,71	0,49
oct-97	31,1	0,883	70	0,19	58,3	0,5
nov-97	40,8	1,071	48,18	0,32	36,8	0,67
déc-97	36,6	1,284	40,81	0,58	28,39	0,93
janv-98	34,5	1,161	41,79	0,93	23,46	1,31
févr-98	42,7	1,416	48,53	1,7	27,68	2,19
mars-98	22,5	1,063	59,18	1,33	35,57	2,27
avr-98	20,8	0,721	77,99	0,9	45,62	2,15
mai-98	53,7	0,722	101,32	1,22	65,38	3,34
juin-98	0	0,543	123,4	0,56	126,69	1,74
juil-98	0	5,829	136,16	0,27	185,91	0,95
août-98	4,2	0,458	128,38	0,14	150,28	0,56
sept-98	13	0,432	97,46	0,08	10,44	0,36
oct-98	10,5	0,425	74,4	0,04	74,44	0,24
nov-98	40	0,478	49,19	0,06	39,35	0,22
déc-98	8,1	0,640	39,53	0,04	25,25	0,17
janv-99	78	0,788	40,03	1,05	21,14	0,55
févr-99	51,2	0,932	39,65	3,03	15,23	1,34
mars-99	74,6	8,298	59,42	8,7	37,06	4,27
avr-99	0	1,623	82,78	2,81	58,08	2,5
mai-99	0,9	0,633	112,12	1,15	100,41	1,43
juin-99	0	0,458	123,4	0,53	127,95	0,82
juil-99	0	0,427	134,8	0,26	152,23	0,48
août-99	0	0,411	126,27	0,13	139,09	0,3
sept-99	36,2	0,488	97,29	0,09	10,47	0,23
oct-99	21,6	0,492	71,48	0,07	64,07	0,19
nov-99	90,6	0,675	45,48	1,35	35,46	0,63
déc-99	85,1	2,052	37,17	8,32	21,38	2,61
janv-00	0	2,135	35,89	2,98	15,55	1,85
févr-00	0	1,103	48,38	1,23	30,55	1,3
mars-00	0,1	0,874	59,92	0,56	38,6	0,91
avr-00	27,7	0,905	76,85	0,4	44,89	1,09
mai-00	14,3	0,719	107,7	0,24	85,52	0,9
juin-00	0	0,534	125,23	0,12	137,68	0,54
juil-00	4,8	0,442	135,58	0,07	157,75	0,35
août-00	0	0,425	128,38	0,04	151,57	0,22
sept-00	18,3	0,471	94,28	0,02	9,75	0,15
oct-00	89,2	2,739	74,89	0,62	78,18	0,34
nov-00	67	2,592	43,67	2,47	27,08	0,85
déc-00	35,9	1,585	35,26	2,95	28,5	1,28
janv-01	105,4	12,443	42,01	16,36	21,53	6,51
févr-01	88,3	12,580	60,62	23,44	60,78	13,56
mars-01	5,3	15,547	66,13	6,05	49,52	6,73
avr-01	6	0,888	81,76	2,26	50,5	3,94

mai-01	6,8	0,565	105,04	0,98	70,89	2,42
juin-01	1,4	0,803	127,16	0,46	142,47	1,32
juil-01	0	0,352	136,16	0,23	155,06	0,74
août-01	3,1	0,397	128,21	0,12	145,99	0,45
sept-01	23,6	0,411	96,08	0,07	9,4	0,31
oct-01	48,9	2,494	69,04	0,13	51,31	0,33
nov-01	140	4,848	46,39	9,93	29,22	2,97
déc-01	20,5	1,743	42,02	5,3	28,46	2,85

Tableau III.3 : Données et les résultats du modèle GR4J.

Années	Pluie (mm)	Débit (mm)	ETP Oudin	
			ETP (mm)	Débit simulé
01/01/2000	0	0,261	0,566	0,566
02/01/2000	0	0,177	0,816	0,816
03/01/2000	0	0,127	0,734	0,734
04/01/2000	0	0,117	0,858	0,858
05/01/2000	0	0,097	0,861	0,861
06/01/2000	0	0,086	0,792	0,792
07/01/2000	0	0,076	0,940	0,940
08/01/2000	0	0,076	0,748	0,748
09/01/2000	0	0,067	0,584	0,584
10/01/2000	0	0,067	0,675	0,675
11/01/2000	0	0,058	0,663	0,663
12/01/2000	0	0,058	0,630	0,630
13/01/2000	0	0,058	0,596	0,596
14/01/2000	0	0,058	0,712	0,712
15/01/2000	0	0,051	0,678	0,678
16/01/2000	0	0,043	0,910	0,910
17/01/2000	0	0,043	0,801	0,801
18/01/2000	0	0,043	0,691	0,691
19/01/2000	0	0,043	0,834	0,834
20/01/2000	0	0,043	0,762	0,762
21/01/2000	0	0,051	0,963	0,963
22/01/2000	0	0,043	0,631	0,631
23/01/2000	0	0,043	0,755	0,755
24/01/2000	0	0,043	0,824	0,824
25/01/2000	0	0,043	0,927	0,927
26/01/2000	0	0,043	1,259	1,259
27/01/2000	0	0,043	1,391	1,391
28/01/2000	0	0,043	1,361	1,361
29/01/2000	0	0,043	0,940	0,940
30/01/2000	0	0,043	1,048	1,048
31/01/2000	0	0,043	1,462	1,462
01/02/2000	0	0,043	1,448	1,448
02/02/2000	0	0,043	1,331	1,331
03/02/2000	0	0,036	1,282	1,282
04/02/2000	0	0,036	1,572	1,572
05/02/2000	0	0,036	1,459	1,459
06/02/2000	0	0,036	1,448	1,448
07/02/2000	0	0,036	1,210	1,210
08/02/2000	0	0,036	1,175	1,175
09/02/2000	0	0,043	1,414	1,414
10/02/2000	0	0,043	1,288	1,288
11/02/2000	0	0,043	1,207	1,207
12/02/2000	0	0,043	1,217	1,217
13/02/2000	0	0,043	1,123	1,123
14/02/2000	0	0,043	1,334	1,334
15/02/2000	0	0,043	1,317	1,317
16/02/2000	0	0,043	1,552	1,552
17/02/2000	0	0,043	1,537	1,537
18/02/2000	0	0,043	1,580	1,580
19/02/2000	0	0,036	1,674	1,674

20/02/2000	0	0,036	1,689	1,689
21/02/2000	0	0,036	1,471	1,471
22/02/2000	0	0,036	1,279	1,279
23/02/2000	0	0,036	1,445	1,445
24/02/2000	0	0,036	1,562	1,562
25/02/2000	0	0,029	1,818	1,818
26/02/2000	0	0,029	1,908	1,908
27/02/2000	0	0,036	1,967	1,967
28/02/2000	0	0,029	1,790	1,790
29/02/2000	0	0,029	1,741	1,741
01/03/2000	0	0,023	1,756	1,756
02/03/2000	0	0,023	1,882	1,882
03/03/2000	0	0,023	1,987	1,987
04/03/2000	0	0,023	2,083	2,083
05/03/2000	0	0,023	1,907	1,907
06/03/2000	0	0,023	2,003	2,003
07/03/2000	0	0,023	1,904	1,904
08/03/2000	0	0,023	1,920	1,920
09/03/2000	0	0,023	2,088	2,088
10/03/2000	0	0,029	1,987	1,987
11/03/2000	0	0,023	2,540	2,540
12/03/2000	0	0,029	2,824	2,824
13/03/2000	0	0,029	2,241	2,241
14/03/2000	0	0,029	1,648	1,648
15/03/2000	0,1	0,029	1,538	1,638
16/03/2000	0	0,029	1,674	1,674
17/03/2000	0	0,036	1,811	1,811
18/03/2000	0	0,029	1,825	1,825
19/03/2000	0	0,029	1,521	1,521
20/03/2000	0	0,036	1,916	1,916
21/03/2000	0	0,036	2,637	2,637
22/03/2000	0	0,036	2,591	2,591
23/03/2000	0	0,036	1,892	1,892
24/03/2000	0	0,036	1,879	1,879
25/03/2000	0	0,029	1,693	1,693
26/03/2000	0	0,029	1,865	1,865
27/03/2000	0	0,029	2,186	2,186
28/03/2000	0	0,023	2,227	2,227
29/03/2000	0	0,029	2,011	2,011
30/03/2000	0	0,029	2,297	2,297
31/03/2000	0	0,029	2,202	2,202
01/04/2000	0	0,029	2,465	2,465
02/04/2000	0	0,029	2,549	2,549
03/04/2000	0	0,029	1,920	1,920
04/04/2000	1,5	0,029	1,621	3,121
05/04/2000	0	0,029	1,702	1,702
06/04/2000	0	0,029	2,282	2,282
07/04/2000	0	0,029	3,084	3,084
08/04/2000	0	0,029	1,904	1,904
09/04/2000	0	0,029	2,321	2,321
10/04/2000	5,7	0,029	2,333	8,033
11/04/2000	0	0,029	1,906	1,906
12/04/2000	0	0,029	2,550	2,550

13/04/2000	0	0,029	2,222	2,222
14/04/2000	0	0,029	2,427	2,427
15/04/2000	0	0,029	3,067	3,067
16/04/2000	9,3	0,029	2,601	11,901
17/04/2000	0	0,036	1,964	1,964
18/04/2000	0	0,036	2,276	2,276
19/04/2000	0	0,036	2,561	2,561
20/04/2000	0	0,036	3,062	3,062
21/04/2000	0	0,036	3,460	3,460
22/04/2000	0	0,029	3,707	3,707
23/04/2000	0	0,029	2,606	2,606
24/04/2000	0	0,029	3,037	3,037
25/04/2000	0	0,029	3,518	3,518
26/04/2000	0	0,029	2,826	2,826
27/04/2000	11,2	0,029	2,206	13,406
28/04/2000	0	0,029	2,025	2,025
29/04/2000	0	0,029	2,778	2,778
30/04/2000	0	0,029	3,187	3,187
01/05/2000	0	0,029	2,878	2,878
02/05/2000	0	0,029	4,252	4,252
03/05/2000	0	0,029	4,990	4,990
04/05/2000	0	0,029	5,006	5,006
05/05/2000	0	0,023	4,212	4,212
06/05/2000	0	0,023	3,575	3,575
07/05/2000	0	0,023	4,156	4,156
08/05/2000	0	0,023	3,351	3,351
09/05/2000	0	0,023	3,607	3,607
10/05/2000	4,2	0,029	3,699	7,899
11/05/2000	0	0,023	4,286	4,286
12/05/2000	0	0,023	4,462	4,462
13/05/2000	0	0,023	4,308	4,308
14/05/2000	0	0,023	5,149	5,149
15/05/2000	0	0,023	4,911	4,911
16/05/2000	0	0,023	4,589	4,589
17/05/2000	0	0,023	4,231	4,231
18/05/2000	0	0,023	4,190	4,190
19/05/2000	0	0,023	3,947	3,947
20/05/2000	0	0,023	4,241	4,241
21/05/2000	0	0,023	3,372	3,372
22/05/2000	0	0,023	3,885	3,885
23/05/2000	1,4	0,023	4,146	5,546
24/05/2000	4,6	0,023	3,187	7,787
25/05/2000	4,1	0,023	2,887	6,987
26/05/2000	0	0,023	3,486	3,486
27/05/2000	0	0,023	3,747	3,747
28/05/2000	0	0,018	3,974	3,974
29/05/2000	0	0,018	4,185	4,185
30/05/2000	0	0,018	4,532	4,532
31/05/2000	0	0,018	4,624	4,624
01/06/2000	0	0,018	5,401	5,401
02/06/2000	0	0,018	5,407	5,407
03/06/2000	0	0,018	5,550	5,550
04/06/2000	0	0,018	5,160	5,160

05/06/2000	0	0,018	4,614	4,614
06/06/2000	0	0,018	4,394	4,394
07/06/2000	0	0,018	4,656	4,656
08/06/2000	0	0,018	4,797	4,797
09/06/2000	0	0,018	4,749	4,749
10/06/2000	0	0,018	3,145	3,145
11/06/2000	0	0,018	3,769	3,769
12/06/2000	0	0,018	4,151	4,151
13/06/2000	0	0,018	4,066	4,066
14/06/2000	0	0,018	4,725	4,725
15/06/2000	0	0,018	4,554	4,554
16/06/2000	0	0,018	4,503	4,503
17/06/2000	0	0,018	5,889	5,889
18/06/2000	0	0,018	5,630	5,630
19/06/2000	0	0,018	4,903	4,903
20/06/2000	0	0,018	4,764	4,764
21/06/2000	0	0,018	4,331	4,331
22/06/2000	0	0,018	4,330	4,330
23/06/2000	0	0,018	4,762	4,762
24/06/2000	0	0,018	5,021	5,021
25/06/2000	0	0,018	6,057	6,057
26/06/2000	0	0,018	5,848	5,848
27/06/2000	0	0,018	5,447	5,447
28/06/2000	0	0,018	5,790	5,790
29/06/2000	0	0,018	5,752	5,752
30/06/2000	0	0,018	5,576	5,576
01/07/2000	0	0,016	5,745	5,745
02/07/2000	0	0,016	5,258	5,258
03/07/2000	0	0,016	5,340	5,340
04/07/2000	0	0,016	5,956	5,956
05/07/2000	0	0,016	5,760	5,760
06/07/2000	0	0,016	6,407	6,407
07/07/2000	0	0,016	5,885	5,885
08/07/2000	0	0,016	6,136	6,136
09/07/2000	0	0,014	5,444	5,444
10/07/2000	0	0,014	4,958	4,958
11/07/2000	0	0,014	4,405	4,405
12/07/2000	0	0,014	4,740	4,740
13/07/2000	0	0,014	5,057	5,057
14/07/2000	0	0,014	4,981	4,981
15/07/2000	0	0,014	5,228	5,228
16/07/2000	0	0,014	6,152	6,152
17/07/2000	0	0,014	4,872	4,872
18/07/2000	0	0,014	4,644	4,644
19/07/2000	0	0,014	5,057	5,057
20/07/2000	0	0,014	5,468	5,468
21/07/2000	0	0,014	5,541	5,541
22/07/2000	4,8	0,014	6,250	11,050
23/07/2000	0	0,014	5,485	5,485
24/07/2000	0	0,014	4,622	4,622
25/07/2000	0	0,014	5,011	5,011
26/07/2000	0	0,014	4,999	4,999
27/07/2000	0	0,014	5,716	5,716

28/07/2000	0	0,014	5,620	5,620
29/07/2000	0	0,014	5,440	5,440
30/07/2000	0	0,014	5,476	5,476
31/07/2000	0	0,014	5,412	5,412
01/08/2000	0	0,014	5,609	5,609
02/08/2000	0	0,014	5,593	5,593
03/08/2000	0	0,014	5,902	5,902
04/08/2000	0	0,014	4,928	4,928
05/08/2000	0	0,014	4,848	4,848
06/08/2000	0	0,014	4,318	4,318
07/08/2000	0	0,014	4,978	4,978
08/08/2000	0	0,014	4,962	4,962
09/08/2000	0	0,014	5,025	5,025
10/08/2000	0	0,014	5,484	5,484
11/08/2000	0	0,014	5,861	5,861
12/08/2000	0	0,014	4,577	4,577
13/08/2000	0	0,014	4,607	4,607
14/08/2000	0	0,014	4,824	4,824
15/08/2000	0	0,014	5,040	5,040
16/08/2000	0	0,014	5,129	5,129
17/08/2000	0	0,014	5,263	5,263
18/08/2000	0	0,014	5,395	5,395
19/08/2000	0	0,014	5,449	5,449
20/08/2000	0	0,014	5,655	5,655
21/08/2000	0	0,014	4,839	4,839
22/08/2000	0	0,014	4,590	4,590
23/08/2000	0	0,014	4,750	4,750
24/08/2000	0	0,014	5,253	5,253
25/08/2000	0	0,014	5,228	5,228
26/08/2000	0	0,014	4,534	4,534
27/08/2000	0	0,014	4,364	4,364
28/08/2000	0	0,014	5,005	5,005
29/08/2000	0	0,014	4,759	4,759
30/08/2000	0	0,014	4,633	4,633
31/08/2000	0	0,014	4,782	4,782
01/09/2000	2,7	0,016	4,771	7,471
02/09/2000	0	0,016	3,942	3,942
03/09/2000	0	0,016	3,849	3,849
04/09/2000	0	0,016	3,870	3,870
05/09/2000	0	0,014	3,707	3,707
06/09/2000	0	0,014	4,134	4,134
07/09/2000	0	0,014	3,692	3,692
08/09/2000	0	0,014	3,600	3,600
09/09/2000	0	0,016	3,372	3,372
10/09/2000	0	0,016	3,488	3,488
11/09/2000	0	0,016	3,874	3,874
12/09/2000	0	0,016	3,620	3,620
13/09/2000	0	0,016	3,757	3,757
14/09/2000	0	0,016	3,973	3,973
15/09/2000	0	0,016	3,973	3,973
16/09/2000	0	0,016	4,144	4,144
17/09/2000	0	0,016	4,155	4,155
18/09/2000	0	0,016	3,633	3,633

19/09/2000	0	0,016	3,479	3,479
20/09/2000	0	0,016	2,789	2,789
21/09/2000	0	0,016	3,112	3,112
22/09/2000	0	0,016	3,657	3,657
23/09/2000	7,4	0,020	3,105	10,505
24/09/2000	0	0,016	3,107	3,107
25/09/2000	0	0,016	3,219	3,219
26/09/2000	0	0,016	3,220	3,220
27/09/2000	0,8	0,016	3,110	3,910
28/09/2000	0	0,016	2,893	2,893
29/09/2000	3,5	0,016	2,309	5,809
30/09/2000	3,9	0,018	2,053	5,953
01/10/2000	0	0,016	2,061	2,061
02/10/2000	0	0,016	2,395	2,395
03/10/2000	0	0,016	2,491	2,491
04/10/2000	0	0,016	2,770	2,770
05/10/2000	0	0,016	2,793	2,793
06/10/2000	0	0,016	2,838	2,838
07/10/2000	0	0,016	2,759	2,759
08/10/2000	0	0,016	2,513	2,513
09/10/2000	0	0,016	2,592	2,592
10/10/2000	0	0,016	2,570	2,570
11/10/2000	0	0,016	2,331	2,331
12/10/2000	9,8	0,016	2,150	11,950
13/10/2000	24,5	0,018	1,599	26,099
14/10/2000	1,1	0,065	1,374	2,474
15/10/2000	20,8	0,023	1,435	22,235
16/10/2000	20,6	0,018	1,942	22,542
17/10/2000	12,1	0,018	2,069	14,169
18/10/2000	0,3	0,018	2,051	2,351
19/10/2000	0	0,018	1,983	1,983
20/10/2000	0	0,018	2,156	2,156
21/10/2000	0	0,023	1,789	1,789
22/10/2000	0	0,029	2,020	2,020
23/10/2000	0	1,008	1,612	1,612
24/10/2000	0	0,368	1,520	1,520
25/10/2000	0	0,338	1,536	1,536
26/10/2000	0	0,107	1,617	1,617
27/10/2000	0	0,097	1,603	1,603
28/10/2000	0	0,097	1,729	1,729
29/10/2000	0	0,097	1,622	1,622
30/10/2000	0	0,097	1,672	1,672
31/10/2000	0	0,097	1,366	1,366
01/11/2000	0	0,029	1,354	1,354
02/11/2000	0	0,029	1,629	1,629
03/11/2000	0	0,029	1,509	1,509
04/11/2000	0	0,029	1,364	1,364
05/11/2000	0	0,029	1,266	1,266
06/11/2000	0,9	0,029	1,601	2,501
07/11/2000	0	0,029	1,245	1,245
08/11/2000	0	0,029	1,175	1,175
09/11/2000	0	0,029	1,250	1,250
10/11/2000	0	0,029	1,466	1,466

11/11/2000	0	0,029	1,662	1,662
12/11/2000	0	0,029	1,715	1,715
13/11/2000	3,3	0,029	1,596	4,896
14/11/2000	37,8	0,031	1,202	39,002
15/11/2000	14,1	1,033	0,887	14,987
16/11/2000	0,1	0,313	0,880	0,980
17/11/2000	5,6	0,151	0,874	6,474
18/11/2000	0	0,107	0,923	0,923
19/11/2000	0	0,067	0,924	0,924
20/11/2000	1,3	0,058	0,957	2,257
21/11/2000	0	0,051	1,005	1,005
22/11/2000	0	0,051	1,152	1,152
23/11/2000	0,3	0,051	1,221	1,521
24/11/2000	1,6	0,051	1,046	2,646
25/11/2000	2	0,051	1,115	3,115
26/11/2000	0	0,051	1,349	1,349
27/11/2000	0	0,051	1,527	1,527
28/11/2000	0	0,051	1,667	1,667
29/11/2000	0	0,051	1,253	1,253
30/11/2000	0	0,043	1,196	1,196
01/12/2000	0	0,051	1,241	1,241
02/12/2000	4,1	0,051	1,199	5,299
03/12/2000	0	0,051	1,013	1,013
04/12/2000	0	0,043	1,117	1,117
05/12/2000	0	0,036	1,399	1,399
06/12/2000	0	0,036	1,537	1,537
07/12/2000	0	0,036	1,425	1,425
08/12/2000	0	0,036	1,314	1,314
09/12/2000	0,6	0,036	0,956	1,556
10/12/2000	0	0,036	0,953	0,953
11/12/2000	0	0,036	1,127	1,127
12/12/2000	0	0,036	1,230	1,230
13/12/2000	0	0,036	1,122	1,122
14/12/2000	0	0,036	1,435	1,435
15/12/2000	0	0,036	0,720	0,720
16/12/2000	0	0,029	0,768	0,768
17/12/2000	0	0,029	0,733	0,733
18/12/2000	0	0,029	0,906	0,906
19/12/2000	0	0,029	0,976	0,976
20/12/2000	0	0,029	0,697	0,697
21/12/2000	0	0,029	0,787	0,787
22/12/2000	0	0,029	0,802	0,802
23/12/2000	0	0,029	0,907	0,907
24/12/2000	2,4	0,029	0,978	3,378
25/12/2000	0	0,029	0,874	0,874
26/12/2000	12,8	0,036	1,015	13,815
27/12/2000	15,9	0,051	0,596	16,496
28/12/2000	0	0,371	0,738	0,738
29/12/2000	0	0,119	0,880	0,880
30/12/2000	0,1	0,067	0,918	1,018
31/12/2000	0	0,058	0,849	0,849
01/01/2001	0	0,058	1,062	1,062
02/01/2001	0	0,058	0,994	0,994

03/01/2001	0	0,058	0,926	0,926
04/01/2001	0	0,058	1,072	1,072
05/01/2001	0	0,058	1,327	1,327
06/01/2001	1,6	0,058	1,260	2,860
07/01/2001	0	0,043	0,542	0,542
08/01/2001	0	0,043	0,814	0,814
09/01/2001	0	0,043	0,839	0,839
10/01/2001	0	0,043	1,173	1,173
11/01/2001	0	0,043	1,105	1,105
12/01/2001	0	0,043	0,793	0,793
13/01/2001	24,3	0,051	0,596	24,896
14/01/2001	7,3	0,076	0,637	7,937
15/01/2001	0	0,076	0,693	0,693
16/01/2001	1	0,076	0,652	1,652
17/01/2001	0	0,076	0,816	0,816
18/01/2001	5,8	0,058	0,883	6,683
19/01/2001	0	0,067	0,780	0,780
20/01/2001	0	0,107	0,825	0,825
21/01/2001	0	0,086	1,018	1,018
22/01/2001	0	0,086	1,222	1,222
23/01/2001	0	0,086	1,231	1,231
24/01/2001	6,7	0,058	1,360	8,060
25/01/2001	0	0,058	1,088	1,088
26/01/2001	5,4	0,058	0,853	6,253
27/01/2001	41,1	0,067	0,876	41,976
28/01/2001	12,2	2,425	1,031	13,231
29/01/2001	0	3,332	0,499	0,499
30/01/2001	0	2,880	0,629	0,629
31/01/2001	0	2,106	0,803	0,803
01/02/2001	0	2,074	1,448	1,448
02/02/2001	0	1,332	1,331	1,331
03/02/2001	0	1,098	1,282	1,282
04/02/2001	0	0,884	1,572	1,572
05/02/2001	0	0,516	1,459	1,459
06/02/2001	0	0,464	1,448	1,448
07/02/2001	0	0,411	1,210	1,210
08/02/2001	5,3	0,376	1,175	6,475
09/02/2001	0	0,335	1,414	1,414
10/02/2001	0	0,295	1,288	1,288
11/02/2001	0	0,233	1,207	1,207
12/02/2001	0	0,206	1,217	1,217
13/02/2001	0	0,194	1,123	1,123
14/02/2001	10	0,182	1,334	11,334
15/02/2001	2,2	0,206	1,317	3,517
16/02/2001	0,3	0,206	1,552	1,852
17/02/2001	0	0,182	1,537	1,537
18/02/2001	0	0,171	1,580	1,580
19/02/2001	0	0,171	1,674	1,674
20/02/2001	0	0,159	1,689	1,689
21/02/2001	0	0,147	1,471	1,471
22/02/2001	0	0,137	1,279	1,279
23/02/2001	0,7	0,137	1,445	2,145
24/02/2001	0	0,127	1,562	1,562

25/02/2001	7,9	0,127	1,818	9,718
26/02/2001	9,6	0,127	1,908	11,508
27/02/2001	44,9	0,159	1,967	46,867
28/02/2001	7,4	1,923	1,790	9,190
01/03/2001	0	2,559	1,741	1,741
02/03/2001	1,8	1,982	1,865	3,665
03/03/2001	0	1,738	1,970	1,970
04/03/2001	0	1,413	2,065	2,065
05/03/2001	0	1,098	1,891	1,891
06/03/2001	0	0,884	1,987	1,987
07/03/2001	3,5	0,516	1,889	5,389
08/03/2001	0	0,499	1,904	1,904
09/03/2001	0	0,446	2,071	2,071
10/03/2001	0	0,429	1,971	1,971
11/03/2001	0	0,394	2,519	2,519
12/03/2001	0	0,356	2,802	2,802
13/03/2001	0	0,315	2,223	2,223
14/03/2001	0	0,295	1,635	1,635
15/03/2001	0	0,261	1,526	1,526
16/03/2001	0	0,261	1,661	1,661
17/03/2001	0	0,247	1,797	1,797
18/03/2001	0	0,233	1,811	1,811
19/03/2001	0	0,206	1,510	1,510
20/03/2001	0	0,194	1,902	1,902
21/03/2001	0	0,182	2,618	2,618
22/03/2001	0	0,159	2,573	2,573
23/03/2001	0	0,147	1,879	1,879
24/03/2001	0	0,137	1,866	1,866
25/03/2001	0	0,127	1,682	1,682
26/03/2001	0	0,117	1,852	1,852
27/03/2001	0	0,097	2,171	2,171
28/03/2001	0	0,086	2,212	2,212
29/03/2001	0	0,067	1,998	1,998
30/03/2001	0	0,058	2,282	2,282
31/03/2001	0	0,043	2,188	2,188
01/04/2001	0	0,036	2,449	2,449
02/04/2001	0	0,036	2,534	2,534
03/04/2001	0	0,036	1,909	1,909
04/04/2001	0	0,036	1,612	1,612
05/04/2001	0	0,036	1,692	1,692
06/04/2001	0	0,036	2,269	2,269
07/04/2001	0	0,036	3,067	3,067
08/04/2001	0	0,036	1,894	1,894
09/04/2001	0	0,036	2,308	2,308
10/04/2001	0	0,036	2,321	2,321
11/04/2001	0	0,036	1,896	1,896
12/04/2001	0	0,036	2,243	2,243
13/04/2001	0	0,036	2,211	2,211
14/04/2001	0	0,029	2,414	2,414
15/04/2001	0	0,029	3,052	3,052
16/04/2001	0	0,029	2,588	2,588
17/04/2001	0	0,029	1,954	1,954
18/04/2001	0	0,029	2,266	2,266

19/04/2001	0	0,023	2,549	2,549
20/04/2001	0,2	0,023	3,049	3,249
21/04/2001	0	0,023	3,445	3,445
22/04/2001	0	0,023	3,691	3,691
23/04/2001	0	0,023	2,595	2,595
24/04/2001	0	0,023	3,025	3,025
25/04/2001	0	0,023	3,504	3,504
26/04/2001	0	0,023	2,815	2,815
27/04/2001	5,8	0,023	2,198	7,998
28/04/2001	0	0,023	2,017	2,017
29/04/2001	0	0,023	2,768	2,768
30/04/2001	0	0,023	3,175	3,175
01/05/2001	0	0,016	1,992	1,992
02/05/2001	0	0,016	2,238	2,238
03/05/2001	2,9	0,016	2,166	5,066
04/05/2001	0	0,016	1,932	1,932
05/05/2001	0	0,016	2,422	2,422
06/05/2001	0	0,016	2,430	2,430
07/05/2001	0	0,016	2,763	2,763
08/05/2001	0	0,016	2,934	2,934
09/05/2001	0,2	0,016	2,403	2,603
10/05/2001	0	0,016	2,246	2,246
11/05/2001	0	0,016	2,827	2,827
12/05/2001	0	0,016	3,132	3,132
13/05/2001	0	0,016	3,338	3,338
14/05/2001	0	0,016	3,264	3,264
15/05/2001	0	0,016	3,322	3,322
16/05/2001	0	0,016	4,079	4,079
17/05/2001	0	0,016	4,255	4,255
18/05/2001	0	0,016	3,846	3,846
19/05/2001	3,7	0,016	2,715	6,415
20/05/2001	0	0,014	2,771	2,771
21/05/2001	0	0,023	3,282	3,282
22/05/2001	0	0,023	3,743	3,743
23/05/2001	0	0,023	3,463	3,463
24/05/2001	0	0,023	3,926	3,926
25/05/2001	0	0,023	4,018	4,018
26/05/2001	0	0,023	4,415	4,415
27/05/2001	0	0,023	4,422	4,422
28/05/2001	0	0,023	4,480	4,480
29/05/2001	0	0,023	4,350	4,350
30/05/2001	0	0,023	4,441	4,441
31/05/2001	0	0,023	4,618	4,618
01/06/2001	0	0,023	4,161	4,161
02/06/2001	0	0,023	4,372	4,372
03/06/2001	0	0,023	4,806	4,806
04/06/2001	0	0,023	4,828	4,828
05/06/2001	0	0,029	5,177	5,177
06/06/2001	0	0,029	5,285	5,285
07/06/2001	0	0,029	5,393	5,393
08/06/2001	0	0,023	6,001	6,001
09/06/2001	0	0,023	4,901	4,901
10/06/2001	0	0,023	4,282	4,282

11/06/2001	1,4	0,023	3,888	5,288
12/06/2001	0	0,023	3,077	3,077
13/06/2001	0	0,023	3,985	3,985
14/06/2001	0	0,023	4,983	4,983
15/06/2001	0	0,029	5,106	5,106
16/06/2001	0	0,029	4,571	4,571
17/06/2001	0	0,029	4,555	4,555
18/06/2001	0	0,023	5,075	5,075
19/06/2001	0	0,029	4,249	4,249
20/06/2001	0	0,029	5,024	5,024
21/06/2001	0	0,029	5,076	5,076
22/06/2001	0	0,029	5,768	5,768
23/06/2001	0	0,029	6,062	6,062
24/06/2001	0	0,029	6,580	6,580
25/06/2001	0	0,029	6,561	6,561
26/06/2001	0	0,036	5,832	5,832
27/06/2001	0	0,029	4,498	4,498
28/06/2001	0	0,029	5,447	5,447
29/06/2001	0	0,029	5,410	5,410
30/06/2001	0	0,029	5,096	5,096
01/07/2001	0	0,010	4,438	4,438
02/07/2001	0	0,010	5,400	5,400
03/07/2001	0	0,008	5,344	5,344
04/07/2001	0	0,008	5,340	5,340
05/07/2001	0	0,008	5,077	5,077
06/07/2001	0	0,010	4,608	4,608
07/07/2001	0	0,018	4,724	4,724
08/07/2001	0	0,014	4,719	4,719
09/07/2001	0	0,012	4,713	4,713
10/07/2001	0	0,012	5,016	5,016
11/07/2001	0	0,012	5,813	5,813
12/07/2001	0	0,012	6,028	6,028
13/07/2001	0	0,012	5,900	5,900
14/07/2001	0	0,012	5,364	5,364
15/07/2001	0	0,012	4,811	4,811
16/07/2001	0	0,012	5,008	5,008
17/07/2001	0	0,012	5,050	5,050
18/07/2001	0	0,012	5,160	5,160
19/07/2001	0	0,012	4,391	4,391
20/07/2001	0	0,012	4,889	4,889
21/07/2001	0	0,012	5,468	5,468
22/07/2001	0	0,012	5,877	5,877
23/07/2001	0	0,012	5,999	5,999
24/07/2001	0	0,012	5,184	5,184
25/07/2001	0	0,012	4,839	4,839
26/07/2001	0	0,012	5,078	5,078
27/07/2001	0	0,012	5,232	5,232
28/07/2001	0	0,012	5,302	5,302
29/07/2001	0	0,012	5,867	5,867
30/07/2001	0	0,012	5,688	5,688
31/07/2001	0	0,012	6,413	6,413
01/08/2001	0	0,012	6,232	6,232
02/08/2001	0	0,012	5,364	5,364

03/08/2001	0	0,012	5,137	5,137
04/08/2001	0	0,012	5,008	5,008
05/08/2001	0	0,012	4,863	4,863
06/08/2001	0	0,012	5,010	5,010
07/08/2001	0	0,014	5,445	5,445
08/08/2001	0	0,014	5,347	5,347
09/08/2001	0	0,014	3,522	3,522
10/08/2001	0	0,012	5,344	5,344
11/08/2001	0	0,014	5,055	5,055
12/08/2001	0	0,014	4,831	4,831
13/08/2001	0	0,014	4,861	4,861
14/08/2001	0	0,014	5,267	5,267
15/08/2001	0	0,014	5,247	5,247
16/08/2001	0	0,014	4,603	4,603
17/08/2001	0	0,014	4,320	4,320
18/08/2001	0	0,014	4,334	4,334
19/08/2001	0	0,014	4,470	4,470
20/08/2001	0	0,014	4,528	4,528
21/08/2001	0	0,014	4,707	4,707
22/08/2001	0	0,014	4,793	4,793
23/08/2001	0	0,014	4,848	4,848
24/08/2001	0	0,014	5,429	5,429
25/08/2001	1,8	0,012	5,328	7,128
26/08/2001	0	0,012	4,556	4,556
27/08/2001	1,3	0,012	4,757	6,057
28/08/2001	0	0,012	4,586	4,586
29/08/2001	0	0,012	4,269	4,269
30/08/2001	0	0,012	4,100	4,100
31/08/2001	0	0,012	3,861	3,861
01/09/2001	0	0,014	4,000	4,000
02/09/2001	0	0,014	3,964	3,964
03/09/2001	0	0,012	4,372	4,372
04/09/2001	0	0,012	4,491	4,491
05/09/2001	0	0,012	4,579	4,579
06/09/2001	0,9	0,012	3,735	4,635
07/09/2001	0	0,012	3,685	3,685
08/09/2001	0	0,012	3,914	3,914
09/09/2001	0	0,012	3,960	3,960
10/09/2001	0	0,012	4,170	4,170
11/09/2001	0	0,012	3,283	3,283
12/09/2001	0	0,012	3,330	3,330
13/09/2001	0	0,012	3,714	3,714
14/09/2001	0	0,012	3,838	3,838
15/09/2001	0	0,012	3,999	3,999
16/09/2001	0	0,012	3,377	3,377
17/09/2001	0	0,012	3,289	3,289
18/09/2001	0	0,012	3,240	3,240
19/09/2001	2,7	0,012	2,725	5,425
20/09/2001	1,1	0,012	3,118	4,218
21/09/2001	0	0,012	3,019	3,019
22/09/2001	18,8	0,019	3,125	21,925
23/09/2001	0	0,018	2,699	2,699
24/09/2001	0	0,018	2,567	2,567

25/09/2001	0	0,018	2,858	2,858
26/09/2001	0,1	0,018	3,330	3,430
27/09/2001	0	0,018	3,220	3,220
28/09/2001	0	0,018	3,341	3,341
29/09/2001	0	0,018	3,135	3,135
30/09/2001	0	0,018	3,326	3,326
01/10/2001	0	0,018	3,323	3,323
02/10/2001	0	0,018	3,650	3,650
03/10/2001	3,7	0,018	3,563	7,263
04/10/2001	0	0,018	3,534	3,534
05/10/2001	0	0,018	3,391	3,391
06/10/2001	7,2	0,018	3,192	10,392
07/10/2001	0	0,018	2,601	2,601
08/10/2001	6,8	0,018	2,781	9,581
09/10/2001	31	0,023	2,224	33,224
10/10/2001	0,2	1,467	2,206	2,406
11/10/2001	0	0,200	2,624	2,624
12/10/2001	0	0,127	2,732	2,732
13/10/2001	0	0,097	2,473	2,473
14/10/2001	0	0,067	2,590	2,590
15/10/2001	0	0,036	2,483	2,483
16/10/2001	0	0,036	2,808	2,808
17/10/2001	0	0,029	3,012	3,012
18/10/2001	0	0,029	2,780	2,780
19/10/2001	0	0,023	2,929	2,929
20/10/2001	0	0,023	2,327	2,327
21/10/2001	0	0,018	2,357	2,357
22/10/2001	0	0,018	2,684	2,684
23/10/2001	0	0,018	2,779	2,779
24/10/2001	0	0,018	2,735	2,735
25/10/2001	0	0,018	2,566	2,566
26/10/2001	0	0,018	2,255	2,255
27/10/2001	0	0,018	2,445	2,445
28/10/2001	0	0,018	2,329	2,329
29/10/2001	0	0,018	2,805	2,805
30/10/2001	0	0,018	2,595	2,595
31/10/2001	0	0,018	2,389	2,389
01/11/2001	0	0,018	2,186	2,186
02/11/2001	0	0,018	1,806	1,806
03/11/2001	0	0,018	1,791	1,791
04/11/2001	0	0,018	1,687	1,687
05/11/2001	0	0,018	1,611	1,611
06/11/2001	0	0,018	1,876	1,876
07/11/2001	0	0,018	1,991	1,991
08/11/2001	0	0,018	1,871	1,871
09/11/2001	66,5	0,028	1,447	67,947
10/11/2001	58,1	1,377	0,422	58,522
11/11/2001	0	0,318	0,570	0,570
12/11/2001	0	0,159	0,582	0,582
13/11/2001	0	0,192	0,891	0,891
14/11/2001	9,3	0,310	0,859	10,159
15/11/2001	0	0,333	0,650	0,650
16/11/2001	0	0,220	1,048	1,048

17/11/2001	0	0,171	1,240	1,240
18/11/2001	0	0,171	1,152	1,152
19/11/2001	0,4	0,159	1,025	1,425
20/11/2001	3,9	0,159	1,198	5,098
21/11/2001	0	0,147	1,283	1,283
22/11/2001	0	0,159	1,352	1,352
23/11/2001	0	0,147	1,443	1,443
24/11/2001	0	0,127	1,144	1,144
25/11/2001	0	0,117	0,933	0,933
26/11/2001	0	0,097	0,927	0,927
27/11/2001	0	0,086	1,049	1,049
28/11/2001	1,8	0,076	1,080	2,880
29/11/2001	0	0,076	0,986	0,986
30/11/2001	0	0,076	1,106	1,106
01/12/2001	0	0,058	1,137	1,137
02/12/2001	0	0,058	1,131	1,131
03/12/2001	0	0,058	1,090	1,090
04/12/2001	0	0,058	1,194	1,194
05/12/2001	0	0,058	1,297	1,297
06/12/2001	0	0,058	1,507	1,507
07/12/2001	0	0,058	1,144	1,144
08/12/2001	0	0,058	0,997	0,997
09/12/2001	0	0,058	0,994	0,994
10/12/2001	0	0,058	1,097	1,097
11/12/2001	0	0,058	0,918	0,918
12/12/2001	0	0,058	0,880	0,880
13/12/2001	2,5	0,058	0,949	3,449
14/12/2001	0	0,058	0,982	0,982
15/12/2001	0	0,058	1,120	1,120
16/12/2001	5,1	0,058	0,888	5,988
17/12/2001	4,5	0,058	0,768	5,268
18/12/2001	2,8	0,058	0,767	3,567
19/12/2001	0	0,058	0,662	0,662
20/12/2001	0	0,058	0,753	0,753
21/12/2001	0	0,058	0,976	0,976
22/12/2001	0	0,058	1,150	1,150
23/12/2001	0	0,051	1,115	1,115
24/12/2001	0	0,051	1,046	1,046
25/12/2001	5,6	0,051	0,838	6,438
26/12/2001	0	0,051	0,706	0,706
27/12/2001	0	0,051	0,700	0,700
28/12/2001	0	0,051	0,771	0,771
29/12/2001	0	0,051	0,808	0,808
30/12/2001	0	0,051	1,197	1,197
31/12/2001	0	0,051	1,235	1,235

Données de Validation				
Années	Pluie (mm)	Débit (mm)	ETP (mm)	Débit simulé
01/01/2002	0	0,043	1,118	0,116
02/01/2002	0	0,043	1,051	0,113
03/01/2002	0	0,043	1,125	0,11
04/01/2002	0	0,043	0,893	0,107
05/01/2002	0	0,043	0,703	0,104

06/01/2002	0	0,043	0,612	0,102
07/01/2002	0	0,043	0,615	0,099
08/01/2002	0	0,043	0,835	0,097
09/01/2002	0	0,043	0,934	0,095
10/01/2002	0	0,043	0,770	0,092
11/01/2002	0	0,043	0,848	0,09
12/01/2002	0	0,043	0,815	0,088
13/01/2002	0	0,043	0,894	0,086
14/01/2002	0	0,043	0,936	0,084
15/01/2002	0	0,043	0,753	0,083
16/01/2002	0	0,043	0,652	0,081
17/01/2002	0	0,043	0,648	0,079
18/01/2002	2,9	0,043	0,614	0,08
19/01/2002	0	0,043	0,719	0,088
20/01/2002	0	0,043	0,895	0,095
21/01/2002	0	0,043	1,018	0,087
22/01/2002	0	0,043	1,104	0,08
23/01/2002	0	0,043	1,192	0,077
24/01/2002	0	0,043	1,000	0,076
25/01/2002	0	0,127	1,088	0,074
26/01/2002	0	0,127	1,178	0,073
27/01/2002	0	0,127	1,228	0,071
28/01/2002	0	0,127	1,320	0,07
29/01/2002	0	0,127	1,289	0,069
30/01/2002	0	0,127	1,676	0,067
31/01/2002	0	0,127	1,310	0,066
01/02/2002	0	0,029	1,474	0,065
02/02/2002	0	0,029	1,632	0,064
03/02/2002	0	0,023	1,386	0,063
04/02/2002	0	0,023	1,136	0,062
05/02/2002	0	0,023	1,163	0,06
06/02/2002	0,3	0,029	1,066	0,059
07/02/2002	0	0,029	0,821	0,058
08/02/2002	0	0,029	1,193	0,057
09/02/2002	0	0,029	1,322	0,056
10/02/2002	0	0,029	1,518	0,056
11/02/2002	0	0,029	1,578	0,055
12/02/2002	0	0,023	1,742	0,054
13/02/2002	0	0,023	1,710	0,053
14/02/2002	0	0,023	1,620	0,052
15/02/2002	0	0,023	1,317	0,051
16/02/2002	0	0,023	1,407	0,05
17/02/2002	0	0,029	1,321	0,05
18/02/2002	0	0,029	1,185	0,049
19/02/2002	8,6	0,029	0,996	0,053
20/02/2002	0	0,029	1,106	0,074
21/02/2002	0	0,029	1,298	0,093
22/02/2002	0	0,029	1,330	0,076
23/02/2002	0	0,029	1,518	0,061
24/02/2002	0	0,029	1,510	0,057
25/02/2002	0	0,029	1,681	0,056
26/02/2002	0	0,029	1,696	0,055
27/02/2002	0	0,029	1,818	0,054

28/02/2002	0	0,023	1,920	0,053
01/03/2002	0	0,036	1,958	0,052
02/03/2002	0	0,036	1,372	0,052
03/03/2002	0,3	0,029	1,882	0,051
04/03/2002	0	0,029	1,060	0,05
05/03/2002	5,2	0,029	1,126	0,052
06/03/2002	5	0,036	1,078	0,064
07/03/2002	9,4	0,036	0,916	0,091
08/03/2002	4,2	0,043	0,866	0,122
09/03/2002	0	0,043	1,222	0,144
10/03/2002	0	0,043	1,936	0,125
11/03/2002	0	0,043	2,366	0,097
12/03/2002	0	0,036	2,146	0,085
13/03/2002	0	0,036	2,343	0,081
14/03/2002	0	0,036	1,877	0,079
15/03/2002	0	0,036	2,319	0,078
16/03/2002	2	0,036	1,845	0,076
17/03/2002	0	0,036	1,550	0,075
18/03/2002	0	0,036	2,061	0,073
19/03/2002	0	0,036	2,580	0,072
20/03/2002	0	0,036	2,916	0,07
21/03/2002	0	0,029	3,001	0,068
22/03/2002	0	0,029	3,216	0,067
23/03/2002	0	0,029	3,304	0,065
24/03/2002	0	0,029	2,936	0,064
25/03/2002	0	0,029	2,956	0,062
26/03/2002	0	0,029	2,712	0,061
27/03/2002	0	0,029	2,797	0,06
28/03/2002	0,3	0,029	2,682	0,059
29/03/2002	0	0,029	2,227	0,058
30/03/2002	0	0,029	2,853	0,056
31/03/2002	0	0,029	2,666	0,055
01/04/2002	11,5	0,043	1,885	0,06
02/04/2002	21,7	0,043	1,661	0,097
03/04/2002	15,1	0,043	1,741	0,197
04/04/2002	0	0,058	1,261	0,308
05/04/2002	0,1	0,058	2,214	0,305
06/04/2002	8,5	0,058	2,624	0,23
07/04/2002	0,5	0,058	2,140	0,219
08/04/2002	0	0,058	2,338	0,234
09/04/2002	0	0,058	2,885	0,207
10/04/2002	9	0,058	2,654	0,193
11/04/2002	10,9	0,058	2,042	0,236
12/04/2002	1,5	0,076	1,466	0,326
13/04/2002	0,3	0,117	1,739	0,351
14/04/2002	0	0,107	1,970	0,289
15/04/2002	0	0,097	1,861	0,246
16/04/2002	0	0,086	2,244	0,228
17/04/2002	0	0,076	2,676	0,216
18/04/2002	0	0,076	2,568	0,204
19/04/2002	6,7	0,076	2,504	0,201
20/04/2002	0	0,067	2,515	0,219
21/04/2002	0	0,067	2,680	0,233

22/04/2002	0	0,067	2,461	0,21
23/04/2002	0	0,058	2,780	0,189
24/04/2002	0	0,058	2,792	0,178
25/04/2002	0	0,058	3,037	0,17
26/04/2002	0	0,051	3,362	0,163
27/04/2002	0	0,043	3,689	0,156
28/04/2002	0	0,036	3,624	0,149
29/04/2002	0	0,029	3,638	0,143
30/04/2002	0	0,029	3,413	0,138
01/05/2002	0	0,023	3,665	0,133
02/05/2002	0	0,023	2,798	0,128
03/05/2002	0,2	0,023	2,166	0,123
04/05/2002	0	0,023	2,415	0,119
05/05/2002	0	0,018	2,907	0,115
06/05/2002	40,9	0,029	2,187	0,157
07/05/2002	2	0,051	1,869	0,373
08/05/2002	0	0,051	2,119	0,59
09/05/2002	0	0,043	2,338	0,454
10/05/2002	2,9	0,043	2,295	0,338
11/05/2002	0	0,043	2,466	0,301
12/05/2002	0	0,043	2,297	0,285
13/05/2002	0	0,043	3,801	0,265
14/05/2002	0	0,036	4,142	0,247
15/05/2002	0	0,036	4,816	0,232
16/05/2002	0	0,029	5,244	0,219
17/05/2002	0	0,036	4,505	0,207
18/05/2002	0	0,036	3,345	0,196
19/05/2002	0	0,036	3,687	0,186
20/05/2002	0	0,036	4,031	0,177
21/05/2002	0	0,029	4,173	0,169
22/05/2002	0	0,029	3,912	0,161
23/05/2002	0	0,029	2,956	0,154
24/05/2002	0	0,029	3,385	0,147
25/05/2002	0	0,029	3,729	0,141
26/05/2002	0	0,029	3,651	0,135
27/05/2002	0	0,029	3,742	0,13
28/05/2002	0	0,029	3,662	0,125
29/05/2002	2,7	0,029	4,009	0,12
30/05/2002	0	0,029	4,441	0,116
31/05/2002	0	0,029	5,131	0,112
01/06/2002	0	0,029	5,138	0,108
02/06/2002	0	0,029	4,801	0,105
03/06/2002	0	0,029	4,377	0,101
04/06/2002	0	0,029	3,552	0,098
05/06/2002	0	0,029	3,440	0,095
06/06/2002	0	0,029	3,443	0,092
07/06/2002	0	0,029	3,480	0,089
08/06/2002	0	0,029	3,138	0,086
09/06/2002	0	0,029	3,227	0,084
10/06/2002	0	0,029	3,972	0,082
11/06/2002	0	0,029	4,354	0,079
12/06/2002	0	0,029	5,273	0,077
13/06/2002	0	0,029	5,189	0,075

14/06/2002	0	0,023	5,278	0,073
15/06/2002	0	0,029	5,626	0,071
16/06/2002	0,2	0,029	6,060	0,07
17/06/2002	0	0,023	6,408	0,068
18/06/2002	0	0,023	5,803	0,066
19/06/2002	0	0,029	5,977	0,065
20/06/2002	0	0,029	5,492	0,063
21/06/2002	0	0,023	5,457	0,062
22/06/2002	0	0,023	5,370	0,06
23/06/2002	0	0,023	5,196	0,059
24/06/2002	0	0,023	5,195	0,058
25/06/2002	0	0,023	5,627	0,056
26/06/2002	0	0,023	6,231	0,055
27/06/2002	0	0,023	6,142	0,054
28/06/2002	0	0,023	5,793	0,053
29/06/2002	0	0,023	5,099	0,052
30/06/2002	0	0,023	4,319	0,051
01/07/2002	0	0,018	4,109	0,05
02/07/2002	0	0,018	4,313	0,049
03/07/2002	0	0,023	4,913	0,048
04/07/2002	0	0,023	5,254	0,047
05/07/2002	0	0,018	4,888	0,046
06/07/2002	0	0,023	4,986	0,045
07/07/2002	0	0,023	4,518	0,045
08/07/2002	0	0,018	4,375	0,044
09/07/2002	0	0,018	4,748	0,043
10/07/2002	0	0,018	4,913	0,042
11/07/2002	0	0,018	4,993	0,042
12/07/2002	0	0,018	4,696	0,041
13/07/2002	0	0,018	4,860	0,04
14/07/2002	0	0,018	4,682	0,04
15/07/2002	0	0,018	4,505	0,039
16/07/2002	0	0,018	4,957	0,038
17/07/2002	0	0,018	5,169	0,038
18/07/2002	0	0,018	4,906	0,037
19/07/2002	0	0,018	4,813	0,037
20/07/2002	0	0,018	5,057	0,036
21/07/2002	0	0,018	5,552	0,035
22/07/2002	0	0,018	5,037	0,035
23/07/2002	0	0,018	4,860	0,034
24/07/2002	0	0,018	4,682	0,034
25/07/2002	0	0,018	4,755	0,033
26/07/2002	0	0,018	5,344	0,033
27/07/2002	0	0,016	6,145	0,033
28/07/2002	0	0,016	5,799	0,032
29/07/2002	0	0,016	5,867	0,032
30/07/2002	0	0,016	5,193	0,031
31/07/2002	0	0,016	5,015	0,031
01/08/2002	0	0,016	4,920	0,03
02/08/2002	0	0,016	5,364	0,03
03/08/2002	0	0,016	5,006	0,03
04/08/2002	0	0,016	5,284	0,029
05/08/2002	0	0,016	5,512	0,029

06/08/2002	0	0,016	5,285	0,028
07/08/2002	0	0,016	4,752	0,028
08/08/2002	0	0,016	4,657	0,028
09/08/2002	0	0,016	4,481	0,027
10/08/2002	0	0,016	4,626	0,027
11/08/2002	0	0,016	4,260	0,027
12/08/2002	0	0,016	4,673	0,026
13/08/2002	0	0,016	6,313	0,026
14/08/2002	0,6	0,016	4,481	0,026
15/08/2002	0	0,016	3,994	0,026
16/08/2002	0	0,016	4,447	0,025
17/08/2002	0	0,016	4,429	0,025
18/08/2002	0	0,016	4,411	0,025
19/08/2002	0	0,016	4,516	0,024
20/08/2002	0	0,016	4,451	0,024
21/08/2002	0	0,016	4,478	0,024
22/08/2002	0	0,016	4,337	0,024
23/08/2002	17,4	0,018	4,317	0,024
24/08/2002	0	0,018	3,770	0,024
25/08/2002	0	0,018	3,722	0,025
26/08/2002	0	0,018	4,183	0,024
27/08/2002	0	0,016	3,642	0,023
28/08/2002	0	0,016	4,334	0,023
29/08/2002	0	0,016	4,342	0,022
30/08/2002	0	0,016	4,276	0,022
31/08/2002	0	0,016	4,225	0,022
01/09/2002	0	0,016	4,377	0,022
02/09/2002	0	0,016	3,964	0,021
03/09/2002	0	0,016	4,372	0,021
04/09/2002	0	0,016	4,491	0,021
05/09/2002	0	0,016	4,579	0,021
06/09/2002	0	0,016	3,735	0,021
07/09/2002	0	0,016	3,685	0,02
08/09/2002	0	0,016	3,970	0,02
09/09/2002	0	0,016	4,528	0,02
10/09/2002	0	0,016	4,432	0,02
11/09/2002	0	0,016	4,308	0,02
12/09/2002	0	0,016	4,404	0,019
13/09/2002	0	0,016	4,659	0,019
14/09/2002	0	0,016	4,361	0,019
15/09/2002	0	0,016	4,479	0,019
16/09/2002	0	0,016	4,370	0,019
17/09/2002	0	0,016	4,367	0,019
18/09/2002	0	0,016	4,390	0,018
19/09/2002	0	0,018	4,373	0,018
20/09/2002	0	0,016	4,252	0,018
21/09/2002	0	0,016	3,774	0,018
22/09/2002	0	0,016	2,985	0,018
23/09/2002	0	0,016	2,926	0,018
24/09/2002	0	0,018	3,005	0,018
25/09/2002	0	0,018	3,567	0,017
26/09/2002	0	0,018	3,330	0,017
27/09/2002	0	0,016	3,673	0,017

28/09/2002	0	0,018	3,402	0,017
29/09/2002	0	0,018	3,135	0,017
30/09/2002	0	0,018	3,326	0,017
01/10/2002	0	0,018	3,323	0,017
02/10/2002	0	0,018	3,650	0,016
03/10/2002	0	0,018	3,563	0,016
04/10/2002	0,1	0,018	3,534	0,016
05/10/2002	0	0,018	3,391	0,016
06/10/2002	0	0,018	3,192	0,016
07/10/2002	0	0,018	2,601	0,016
08/10/2002	21,6	0,053	2,781	0,016
09/10/2002	13,2	0,290	2,224	0,018
10/10/2002	0,7	0,318	2,206	0,021
11/10/2002	0	0,097	2,624	0,022
12/10/2002	0	0,043	2,732	0,019
13/10/2002	0	0,036	2,473	0,016
14/10/2002	0	0,029	2,590	0,016
15/10/2002	0	0,029	2,483	0,016
16/10/2002	0	0,029	2,808	0,016
17/10/2002	0	0,029	3,012	0,016
18/10/2002	0	0,029	2,780	0,015
19/10/2002	0	0,029	2,929	0,015
20/10/2002	0	0,029	2,327	0,015
21/10/2002	0	0,023	2,357	0,015
22/10/2002	0	0,023	2,684	0,015
23/10/2002	0	0,023	2,779	0,015
24/10/2002	0	0,018	2,735	0,015
25/10/2002	0	0,018	2,566	0,015
26/10/2002	0	0,018	2,255	0,015
27/10/2002	0	0,018	2,445	0,014
28/10/2002	0	0,018	2,329	0,014
29/10/2002	0	0,018	2,805	0,014
30/10/2002	0	0,018	2,595	0,014
31/10/2002	0	0,018	2,389	0,014
01/11/2002	0	0,023	2,186	0,014
02/11/2002	0	0,018	1,806	0,014
03/11/2002	0	0,018	1,791	0,014
04/11/2002	0	0,018	1,687	0,014
05/11/2002	0	0,018	1,611	0,014
06/11/2002	0	0,018	1,876	0,013
07/11/2002	0	0,018	1,991	0,013
08/11/2002	0	0,018	1,871	0,013
09/11/2002	0	0,018	1,447	0,013
10/11/2002	0	0,018	0,422	0,013
11/11/2002	0	0,018	0,570	0,013
12/11/2002	0	0,018	0,582	0,013
13/11/2002	0	0,023	0,891	0,013
14/11/2002	4	0,018	0,859	0,013
15/11/2002	0	0,023	0,650	0,013
16/11/2002	0	0,023	1,048	0,014
17/11/2002	0,5	0,023	1,240	0,013
18/11/2002	0	0,023	1,152	0,013
19/11/2002	5,2	0,023	1,025	0,013

20/11/2002	0,6	0,023	1,198	0,013
21/11/2002	0	0,023	1,283	0,014
22/11/2002	0	0,029	1,352	0,013
23/11/2002	0	0,023	1,443	0,012
24/11/2002	0	0,029	1,144	0,012
25/11/2002	57,3	0,275	0,933	0,021
26/11/2002	0	0,223	0,927	0,057
27/11/2002	0	0,067	1,049	0,091
28/11/2002	0,9	0,051	1,080	0,057
29/11/2002	0	0,043	0,986	0,029
30/11/2002	0,8	0,043	1,106	0,023
01/12/2002	0	0,043	1,137	0,023
02/12/2002	0,8	0,043	1,131	0,023
03/12/2002	0	0,043	1,090	0,022
04/12/2002	0	0,043	1,194	0,022
05/12/2002	4,1	0,043	1,297	0,023
06/12/2002	0	0,043	1,507	0,026
07/12/2002	0	0,043	1,144	0,029
08/12/2002	0	0,036	0,997	0,026
09/12/2002	0	0,036	0,994	0,023
10/12/2002	0	0,036	1,097	0,022
11/12/2002	1,5	0,036	0,918	0,022
12/12/2002	0	0,036	0,880	0,023
13/12/2002	0	0,029	0,949	0,023
14/12/2002	0	0,029	0,982	0,022
15/12/2002	0	0,029	1,120	0,022
16/12/2002	0	0,029	0,888	0,021
17/12/2002	0	0,029	0,768	0,021
18/12/2002	0	0,029	0,767	0,021
19/12/2002	3	0,036	0,662	0,022
20/12/2002	1	0,036	0,753	0,024
21/12/2002	0	0,036	0,976	0,027
22/12/2002	0	0,036	1,150	0,024
23/12/2002	0	0,036	1,115	0,022
24/12/2002	0	0,036	1,046	0,021
25/12/2002	0	0,036	0,838	0,021
26/12/2002	0	0,036	0,706	0,021
27/12/2002	9,7	0,036	0,700	0,023
28/12/2002	0	0,036	0,771	0,035
29/12/2002	0	0,036	0,808	0,045
30/12/2002	0	0,036	1,197	0,035
31/12/2002	0	0,029	1,235	0,026
01/01/2003	0	0,036	1,118	0,024
02/01/2003	0	0,036	1,051	0,024
03/01/2003	0	0,036	1,125	0,023
04/01/2003	0	0,036	0,893	0,023
05/01/2003	2,4	0,036	0,703	0,023
06/01/2003	13,6	0,043	0,612	0,031
07/01/2003	0	0,036	0,615	0,053
08/01/2003	32,7	0,064	0,835	0,09
09/01/2003	6	0,208	0,934	0,159
10/01/2003	23,3	0,276	0,770	0,274
11/01/2003	0,6	0,300	0,848	0,353

12/01/2003	0,5	0,335	0,815	0,404
13/01/2003	0	0,137	0,894	0,3
14/01/2003	5,5	0,117	0,936	0,236
15/01/2003	6,5	0,117	0,753	0,26
16/01/2003	0	0,117	0,652	0,329
17/01/2003	0	0,127	0,648	0,341
18/01/2003	0	0,147	0,614	0,289
19/01/2003	0	0,171	0,719	0,253
20/01/2003	0	0,324	0,895	0,236
21/01/2003	7,6	0,481	1,018	0,238
22/01/2003	1	0,516	1,104	0,284
23/01/2003	0	0,499	1,192	0,321
24/01/2003	0	0,446	1,000	0,28
25/01/2003	0	0,394	1,088	0,246
26/01/2003	0	0,335	1,178	0,229
27/01/2003	0	0,295	1,228	0,218
28/01/2003	0	0,247	1,320	0,207
29/01/2003	7,5	0,220	1,289	0,21
30/01/2003	8	0,247	1,676	0,267
31/01/2003	21,4	0,274	1,310	0,421
01/02/2003	0	0,261	1,474	0,72
02/02/2003	0	0,295	1,632	0,895
03/02/2003	0	0,335	1,386	0,697
04/02/2003	0	0,411	1,136	0,55
05/02/2003	0,2	1,119	1,163	0,481
06/02/2003	0	1,027	1,066	0,438
07/02/2003	8,5	0,884	0,821	0,429
08/02/2003	2	0,813	1,193	0,514
09/02/2003	0	0,534	1,322	0,586
10/02/2003	0	0,813	1,518	0,514
11/02/2003	0	0,534	1,578	0,439
12/02/2003	3,8	0,516	1,742	0,402
13/02/2003	0	0,481	1,710	0,401
14/02/2003	28,8	0,464	1,620	0,501
15/02/2003	0	0,464	1,317	0,999
16/02/2003	2,5	0,481	1,407	1,45
17/02/2003	0	0,499	1,321	1,135
18/02/2003	5,5	0,499	1,185	0,913
19/02/2003	0,2	0,516	0,996	0,875
20/02/2003	0	0,955	1,106	0,848
21/02/2003	0	1,027	1,298	0,722
22/02/2003	0	0,955	1,330	0,623
23/02/2003	0	0,813	1,518	0,557
24/02/2003	5,9	0,516	1,510	0,527
25/02/2003	17,9	0,499	1,681	0,653
26/02/2003	5	0,481	1,696	1,124
27/02/2003	0	0,802	1,818	1,484
28/02/2003	0	0,813	1,920	1,238
01/03/2003	0	0,534	1,958	0,955
02/03/2003	0	0,516	1,372	0,794
03/03/2003	0	0,481	1,882	0,695
04/03/2003	0	0,464	1,060	0,622
05/03/2003	0	0,446	1,126	0,562

06/03/2003	0	0,429	1,078	0,514
07/03/2003	0	0,411	0,916	0,474
08/03/2003	0	0,411	0,866	0,439
09/03/2003	0	0,394	1,222	0,41
10/03/2003	0	0,356	1,936	0,385
11/03/2003	0	0,295	2,366	0,363
12/03/2003	0	0,295	2,146	0,343
13/03/2003	0	0,261	2,343	0,325
14/03/2003	0	0,233	1,877	0,308
15/03/2003	0	0,206	2,319	0,293
16/03/2003	0	0,194	1,845	0,279
17/03/2003	0	0,171	1,550	0,267
18/03/2003	0	0,171	2,061	0,255
19/03/2003	1	0,171	2,580	0,245
20/03/2003	0	0,159	2,916	0,235
21/03/2003	0	0,147	3,001	0,226
22/03/2003	0	0,159	3,216	0,217
23/03/2003	0	0,147	3,304	0,209
24/03/2003	0	0,147	2,936	0,201
25/03/2003	0	0,117	2,956	0,193
26/03/2003	0	0,147	2,712	0,186
27/03/2003	4,8	0,107	2,797	0,183
28/03/2003	2,1	0,127	2,682	0,194
29/03/2003	0	0,127	2,227	0,202
30/03/2003	0	0,127	2,853	0,187
31/03/2003	0	0,127	2,666	0,174
01/04/2003	0	0,097	1,885	0,166
02/04/2003	1,6	0,097	1,661	0,161
03/04/2003	0	0,097	1,741	0,155
04/04/2003	0	0,097	1,261	0,151
05/04/2003	0	0,086	2,214	0,146
06/04/2003	0	0,076	2,624	0,142
07/04/2003	0	0,067	2,140	0,137
08/04/2003	0	0,058	2,338	0,133
09/04/2003	0	0,067	2,885	0,129
10/04/2003	0	0,067	2,654	0,125
11/04/2003	0	0,067	2,042	0,122
12/04/2003	0	0,058	1,466	0,118
13/04/2003	0	0,058	1,739	0,115
14/04/2003	0	0,058	1,970	0,112
15/04/2003	0	0,058	1,861	0,109
16/04/2003	4,7	0,067	2,244	0,109
17/04/2003	0	0,067	2,676	0,119
18/04/2003	8,5	0,058	2,568	0,136
19/04/2003	0	0,058	2,504	0,158
20/04/2003	0	0,067	2,515	0,177
21/04/2003	0	0,067	2,680	0,152
22/04/2003	10,3	0,067	2,461	0,143
23/04/2003	0	0,086	2,780	0,182
24/04/2003	0	0,076	2,792	0,219
25/04/2003	0	0,067	3,037	0,187
26/04/2003	0	0,067	3,362	0,159
27/04/2003	0	0,058	3,689	0,148

28/04/2003	0	0,043	3,624	0,143
29/04/2003	0	0,043	3,638	0,137
30/04/2003	0	0,043	3,413	0,133
01/05/2003	0	0,051	3,665	0,128
02/05/2003	0	0,043	2,798	0,123
03/05/2003	0	0,036	2,166	0,119
04/05/2003	0	0,036	2,415	0,115
05/05/2003	14,8	0,036	2,907	0,125
06/05/2003	0,5	0,043	2,187	0,178
07/05/2003	0	0,043	1,869	0,224
08/05/2003	0	0,043	2,119	0,185
09/05/2003	0	0,043	2,338	0,152
10/05/2003	0	0,043	2,295	0,141
11/05/2003	0	0,036	2,466	0,136
12/05/2003	0	0,036	3,297	0,131
13/05/2003	0	0,036	3,801	0,126
14/05/2003	0	0,036	4,142	0,122
15/05/2003	1,4	0,036	4,816	0,118
16/05/2003	0	0,036	5,244	0,114
17/05/2003	0	0,036	4,505	0,11
18/05/2003	0	0,036	3,345	0,106
19/05/2003	0	0,029	3,687	0,103
20/05/2003	0	0,029	4,031	0,1
21/05/2003	0	0,029	4,173	0,097
22/05/2003	0	0,029	3,912	0,094
23/05/2003	0	0,029	2,956	0,091
24/05/2003	0	0,029	3,385	0,088
25/05/2003	0	0,029	3,729	0,086
26/05/2003	0	0,029	3,651	0,083
27/05/2003	0	0,029	3,742	0,081
28/05/2003	0	0,029	3,662	0,079
29/05/2003	0	0,029	4,009	0,077
30/05/2003	0	0,029	4,441	0,075
31/05/2003	0	0,029	5,131	0,073
01/06/2003	0	0,029	3,596	0,071
02/06/2003	0	0,029	3,601	0,069
03/06/2003	0	0,029	4,291	0,068
04/06/2003	6	0,029	4,038	0,067
05/06/2003	0,5	0,029	4,472	0,069
06/06/2003	0	0,029	4,648	0,07
07/06/2003	0	0,023	4,911	0,066
08/06/2003	0	0,023	4,570	0,063
09/06/2003	0	0,023	4,832	0,061
10/06/2003	0	0,023	5,094	0,06
11/06/2003	0	0,023	5,477	0,058
12/06/2003	0	0,023	4,927	0,057
13/06/2003	0	0,023	4,929	0,056
14/06/2003	0	0,023	5,104	0,055
15/06/2003	0	0,023	5,106	0,054
16/06/2003	0	0,023	4,536	0,052
17/06/2003	0	0,023	4,503	0,051
18/06/2003	0	0,023	4,850	0,05
19/06/2003	0	0,023	5,284	0,049

20/06/2003	0	0,023	4,851	0,048
21/06/2003	0	0,023	5,059	0,048
22/06/2003	0	0,023	4,850	0,047
23/06/2003	0	0,023	5,110	0,046
24/06/2003	0	0,023	4,797	0,045
25/06/2003	0	0,018	5,055	0,044
26/06/2003	0	0,018	4,967	0,043
27/06/2003	0	0,018	4,931	0,043
28/06/2003	0	0,018	5,361	0,042
29/06/2003	0	0,018	5,358	0,041
30/06/2003	0	0,018	5,355	0,041
01/07/2003	0	0,018	4,834	0,04
02/07/2003	0	0,018	4,572	0,039
03/07/2003	0	0,018	4,310	0,039
04/07/2003	0	0,018	4,306	0,038
05/07/2003	0	0,018	4,647	0,037
06/07/2003	0	0,018	4,298	0,037
07/07/2003	0	0,018	4,500	0,036
08/07/2003	0	0,018	4,976	0,036
09/07/2003	0	0,018	5,433	0,035
10/07/2003	0	0,018	5,564	0,035
11/07/2003	0,7	0,018	5,642	0,034
12/07/2003	0	0,018	5,379	0,034
13/07/2003	0	0,018	5,286	0,033
14/07/2003	0,5	0,018	4,887	0,033
15/07/2003	0	0,018	5,440	0,032
16/07/2003	0	0,018	4,702	0,032
17/07/2003	0	0,018	5,508	0,031
18/07/2003	0	0,018	5,837	0,031
19/07/2003	0	0,018	5,742	0,031
20/07/2003	0	0,018	5,816	0,03
21/07/2003	0	0,018	5,384	0,03
22/07/2003	0	0,018	5,407	0,029
23/07/2003	0	0,018	5,781	0,029
24/07/2003	0	0,018	5,267	0,029
25/07/2003	0	0,018	5,256	0,028
26/07/2003	0	0,018	5,610	0,028
27/07/2003	0	0,018	4,983	0,028
28/07/2003	0	0,018	4,805	0,027
29/07/2003	0	0,018	5,041	0,027
30/07/2003	0	0,018	5,523	0,027
31/07/2003	0	0,018	5,344	0,026
01/08/2003	0	0,016	5,166	0,026
02/08/2003	0	0,016	5,151	0,026
03/08/2003	0	0,018	4,762	0,025
04/08/2003	0	0,018	4,309	0,025
05/08/2003	0	0,018	4,296	0,025
06/08/2003	0	0,018	4,283	0,025
07/08/2003	0	0,166	4,591	0,024
08/08/2003	0	1,391	4,416	0,024
09/08/2003	0	0,183	4,754	0,024
10/08/2003	0	0,029	4,865	0,024
11/08/2003	0	0,029	4,769	0,023

12/08/2003	0	0,023	4,831	0,023
13/08/2003	0	0,023	4,498	0,023
14/08/2003	0	0,023	4,481	0,023
15/08/2003	0	0,018	4,574	0,022
16/08/2003	0	0,018	4,525	0,022
17/08/2003	0	0,018	4,150	0,022
18/08/2003	0	0,018	4,489	0,022
19/08/2003	0	0,018	4,856	0,021
20/08/2003	0	0,018	4,912	0,021
21/08/2003	0	0,018	4,738	0,021
22/08/2003	0	0,018	4,641	0,021
23/08/2003	0,7	0,018	4,696	0,021
24/08/2003	0	0,018	4,071	0,02
25/08/2003	0	0,018	3,978	0,02
26/08/2003	0	0,018	4,183	0,02
27/08/2003	0	0,018	4,014	0,02
28/08/2003	0	0,018	4,024	0,02
29/08/2003	0	0,018	4,151	0,019
30/08/2003	0	0,018	4,349	0,019
31/08/2003	0	0,018	4,735	0,019
01/09/2003	0	0,018	3,985	0,019
02/09/2003	0	0,018	4,425	0,019
03/09/2003	0	0,018	4,473	0,019
04/09/2003	0	0,018	4,419	0,018
05/09/2003	0	0,018	3,856	0,018
06/09/2003	0	0,018	3,947	0,018
07/09/2003	0	0,018	4,274	0,018
08/09/2003	0	0,018	4,249	0,018
09/09/2003	0	0,018	3,946	0,018
10/09/2003	0	0,018	3,991	0,018
11/09/2003	0	0,018	4,240	0,017
12/09/2003	0	0,018	4,078	0,017
13/09/2003	0	0,018	3,917	0,017
14/09/2003	0	0,018	3,757	0,017
15/09/2003	0	0,018	3,466	0,017
16/09/2003	0	0,018	3,311	0,017
17/09/2003	0	0,018	3,486	0,017
18/09/2003	0	0,018	4,115	0,016
19/09/2003	0	0,018	4,022	0,016
20/09/2003	0	0,018	4,059	0,016
21/09/2003	0	0,018	3,838	0,016
22/09/2003	0	0,018	3,455	0,016
23/09/2003	0	0,018	3,342	0,016
24/09/2003	5,7	0,018	2,754	0,016
25/09/2003	0	0,018	3,728	0,016
26/09/2003	0	0,018	3,269	0,015
27/09/2003	0	0,018	3,244	0,015
28/09/2003	0	0,018	3,548	0,015
29/09/2003	0	0,023	3,255	0,015
30/09/2003	0	0,023	3,589	0,015
01/10/2003	0	0,018	3,679	0,015
02/10/2003	0	0,018	3,297	0,015
03/10/2003	0	0,018	2,827	0,015

04/10/2003	0	0,018	2,897	0,015
05/10/2003	2,3	0,023	2,816	0,014
06/10/2003	2,4	0,029	2,360	0,014
07/10/2003	0	0,029	2,488	0,014
08/10/2003	0	0,029	2,747	0,014
09/10/2003	0	0,029	2,780	0,014
10/10/2003	0	0,029	2,922	0,014
11/10/2003	0	0,029	2,646	0,014
12/10/2003	0	0,029	2,927	0,014
13/10/2003	9,8	0,029	2,548	0,014
14/10/2003	5,6	0,036	2,238	0,014
15/10/2003	0	0,036	2,219	0,014
16/10/2003	5,7	0,036	2,064	0,014
17/10/2003	0	0,036	1,817	0,014
18/10/2003	0	0,036	1,853	0,014
19/10/2003	0	0,036	2,194	0,013
20/10/2003	0	0,036	2,226	0,013
21/10/2003	1,6	0,036	2,206	0,013
22/10/2003	0	0,036	1,988	0,013
23/10/2003	11	0,036	1,596	0,013
24/10/2003	4,9	0,043	1,661	0,014
25/10/2003	0	0,043	1,743	0,015
26/10/2003	0	0,043	1,967	0,015
27/10/2003	0	0,043	1,731	0,014
28/10/2003	0	0,043	1,886	0,013
29/10/2003	0	0,043	1,655	0,013
30/10/2003	0	0,043	2,039	0,013
31/10/2003	3,4	0,043	1,608	0,013
01/11/2003	2,2	0,043	1,002	0,013
02/11/2003	0	0,036	1,445	0,013
03/11/2003	0	0,043	1,746	0,013
04/11/2003	0	0,043	1,687	0,013
05/11/2003	0	0,043	1,364	0,012
06/11/2003	0	0,043	1,484	0,012
07/11/2003	0	0,043	1,662	0,012
08/11/2003	0	0,043	1,717	0,012
09/11/2003	0	0,043	1,618	0,012
10/11/2003	27,2	0,043	1,689	0,014
11/11/2003	0	0,305	1,106	0,022
12/11/2003	0	0,067	1,122	0,029
13/11/2003	0	0,058	1,278	0,022
14/11/2003	0	0,058	1,268	0,015
15/11/2003	2,6	0,051	1,462	0,014
16/11/2003	0	0,051	0,975	0,014
17/11/2003	26,3	0,092	0,880	0,02
18/11/2003	0	0,131	1,112	0,038
19/11/2003	0	0,086	1,104	0,055
20/11/2003	0,5	0,076	0,901	0,037
21/11/2003	0	0,076	1,089	0,022
22/11/2003	2,1	0,067	1,236	0,019
23/11/2003	0	0,067	1,228	0,02
24/11/2003	0	0,067	0,916	0,021
25/11/2003	0	0,067	0,720	0,02

26/11/2003	0	0,058	0,829	0,019
27/11/2003	0	0,058	0,937	0,018
28/11/2003	0	0,058	0,820	0,018
29/11/2003	0	0,058	1,037	0,018
30/11/2003	0	0,058	0,995	0,018
01/12/2003	6,5	0,043	1,064	0,019
02/12/2003	8	0,051	0,511	0,027
03/12/2003	0	0,051	0,465	0,041
04/12/2003	0	0,051	0,543	0,044
05/12/2003	0	0,051	0,792	0,032
06/12/2003	0	0,051	0,933	0,024
07/12/2003	0	0,051	0,965	0,022
08/12/2003	13	0,051	0,784	0,027
09/12/2003	25,1	0,051	0,675	0,058
10/12/2003	23,6	0,509	0,354	0,15
11/12/2003	0	1,675	0,494	0,278
12/12/2003	0	0,499	0,634	0,306
13/12/2003	0	0,394	0,794	0,202
14/12/2003	0	0,247	0,912	0,14
15/12/2003	0	0,194	0,945	0,125
16/12/2003	0	0,147	0,769	0,121
17/12/2003	0	0,127	0,908	0,117
18/12/2003	1	0,107	0,837	0,114
19/12/2003	0	0,097	0,802	0,111
20/12/2003	0	0,097	1,011	0,109
21/12/2003	0	0,086	1,045	0,105
22/12/2003	0	0,076	0,906	0,102
23/12/2003	0	0,076	0,453	0,099
24/12/2003	0	0,076	0,488	0,097
25/12/2003	0	0,076	0,559	0,094
26/12/2003	0	0,076	0,699	0,092
27/12/2003	0,5	0,076	0,945	0,09
28/12/2003	5,9	0,076	0,736	0,093
29/12/2003	0	0,086	0,527	0,114
30/12/2003	0	0,076	0,507	0,131
31/12/2003	0	0,076	0,600	0,114

المخلص

إن الحوض الهيدروغرافي لوادي الأخضر (170 كلم²)، كان موضوع اهتمام لدراسة العلاقة الموجودة بين التساقط و التدفق باستعمال نموذج الهندسة الريفية.

في البداية، سعينا لتحديد خصائص عدة عوامل مادية، و الظروف الجيولوجية و المناخية التي تتحكم في التدفق. ثم استخدمت الدراسة الهيدرولوجية علي أساس معالجة البيانات الهيدرومترية لمدة 40 عاما. المرحلة الثالثة من هذا العمل هو تطوير النماذج التي يمكن أن تشكل العلاقة لسقوط الأمطار والجريان السطحي. تحقيقا لهذه الغاية، حاولنا استخدام طريقتين مختلفتين نوعا ما : تجربة الصندوق الأسود من نوع تدفق = و (المطر) مستعملة على معطيات التساقط و التدفق. الطريقة الأخرى يمثلها النموذج المفاهيمي الشامل للهندسة الريفية.

النتائج المحصل عليها عليها من دراسة تحول المطر إلى التدفق باستعمال نموذج GR1A، GR2M و GR4J تظهر أن هذه النماذج ذات الخزائين أثبتت النجاعة من نموذج "العلبة السوداء".

بالفعل، إن نموذج GR يأخذ بعين الاعتبار التسلسل الزمني للظواهر من جهة و ضغوط العوامل المناخية (التبخّر) و كذا العوامل "الفيزيولوجية" للحوض من جهة أخرى (رطوبة التربة و التبادلات المناخية).

الكلمات المفتاحية : النموذج مطر- تدفق، وادي الأخضر (الشولي)، GR1A، GR2M و GR4J.

RESUME

Le bassin versant de l'Oued Lakhdar (170 Km²) – Tafna- a fait l'objet d'une modélisation pluie-débit, par l'utilisation des modèles GR (Génie Rural) à trois pas de temps (Annuel, Mensuel et journalier).

Dans un premier temps, nous avons cherché à caractériser quelques facteurs en particulier physiques, géologiques et climatiques régissant l'écoulement. Ensuite une étude hydrologique basée sur le traitement des données hydrométriques relatives à une période de 40 ans a été utilisée. La troisième phase de ce travail consiste en l'élaboration des modèles pouvant rendre compte de la relation pluie-débit. A cet effet, nous avons essayé deux approches assez différentes : une empirique de type boîte noire sous la forme $débit = f(pluie)$ où f est déterminée par une régression effectuée sur les chroniques pluies-débites. L'autre conceptuelle globale représentée par le modèle du Génie Rural.

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 corrélatoire. 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 : Modélisation pluie-débit, Oued Lakhdar (Chouly), GR1A, GR2M, GR4J.

ABSTRACT

The Oued Lakhdar – Tafna – watershed (170 km²) was the purpose of a rainfall-discharge modeling, by the use of the GR (Genie Rural) models with three time intervals (annual, monthly and daily).

At first, we tried to characterize some factors; in particular physical, geological and climatic; governing the flow. Then a hydrological study based on the processing of 40-year hydrometric data period was used. The third phase of this work consists of the elaboration of the models that can take into account the rainfall-runoff relationship. For that purpose, we tried two quite different approaches: one empirical – black box type – in the form of flow = f (rainfall) where f is determined by a regression done on rainfall-discharge history. The other represented by the Genie Rural comprehensive conceptual model.

The results obtained by simulating the transformation of rainfall into runoff by the use of the Genie Rural models GR1A, GR2M GR4J and more satisfying than modeling by correlative approach. Indeed, on the one hand, the GR model takes into account the chronological succession of phenomena and, on the other hand, the influence of the climatic (evapotranspiration) as well as that of the watershed physical and hydrogeological (soil moisture and external exchanges) parameters.

Key-words : rainfall-discharge modeling, Oued Lakhdar (Chouly), GR1A, GR2M, GR4J.